

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE NICE SOPHIA-ANTIPOLIS
ÉCOLE DOCTORALE : LETTRES, ARTS ET SCIENCES HUMAINES (LASH)
DISCIPLINE : HISTOIRE ET ARCHÉOLOGIE

**DYNAMIQUE DES PAYSAGES AGRAIRES
ET GESTION DE L'EAU
DANS LE BASSIN SEMI-DÉSERTIQUE DE PHOENIX, ARIZONA
DE LA PRÉHISTOIRE À L'ÉPOQUE MODERNE**

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT PAR

LOUISE PURDUE
Le 21 NOVEMBRE 2011



Composition du jury : M. Jean-François BERGER – **Tuteur de thèse**
(Chargé de Recherche, CNRS, IRG/EVS-Lyon)
M. Morgan De DAPPER – **Rapporteur**
(Professeur, Université de Gand)
M. Laurent LESPEZ – **Examineur**
(Maître de conférence, Université de Caen Basse Normandie)

M. Frank BRAEMER – **Directeur de thèse**
(Directeur de Recherche, CNRS, CEPAM-Nice)
M. Sander van der LEEUW – **Rapporteur**
(Professeur, Arizona State University)
M. Claude MARTIN – **Examineur**
(Chargé de Recherche, CNRS, ESPACE-Nice)

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE NICE SOPHIA-ANTIPOLIS
ÉCOLE DOCTORALE : LETTRES, ARTS ET SCIENCES HUMAINES (LASH)
DISCIPLINE : HISTOIRE ET ARCHÉOLOGIE

**DYNAMIQUE DES PAYSAGES AGRAIRES
ET GESTION DE L'EAU
DANS LE BASSIN SEMI-DÉSERTIQUE DE PHOENIX, ARIZONA
DE LA PRÉHISTOIRE À L'ÉPOQUE MODERNE**

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT PAR

LOUISE PURDUE
Le 21 NOVEMBRE 2011

VOLUME I – TEXTE DE SYNTHÈSE

Old man Siuuhu turned himself into a small child and sat someplace by the seaside. He made a hole there, and he said he was going to bring all the water from the sea and put it in the hole. He also told that the rains would not come all over the earth very often, only once in a while. And the crops that people raised would be irrigated evermore by rainwater.

The people saw that the rain wasn't coming down often as it used to, so they gathered to plan how they would make canals in order to irrigate their crops. They finally decided they would make a canal right below "Suik": They dug with pointed sticks and used their hands to throw out the dirt.

Being of one mind, they thought they would complete this work, but when they completed it and tried to make water run in it, the water wouldn't run. Seeing this, they got one of the medicine men and asked him to draw water in the canal. He went down and walked there, singing:

*There lie the ditches
And among them
I am walking.
And among them I am breathing,
Leading the water.*

The water acted like it was going but didn't go. This medicine man couldn't do it. So they got another medicine man, and he went down and stood in the canal and sang:

*There lie the ditches
And I stood in the midst,
I'm making the winds blow (dust devils)
I'm making the water go.*

The water acted like it was going, but it stopped and turned back to where it started from. This man couldn't do it. So they got another medicine man and told him to try. He sang:

*By the side of a river
There lies a canal.
In that canal
The water is making signs of pretty decoration.*

This man made the water go, but not enough. They got another medicine man and told him to put some more water in the canal. He went down and stood in the canal and sang:

*There lie the canals
And in the midst of those
I stand
Making water-hair snakes.*

The water flowed some more, and they had plenty of water in the canal. From there on, the people learned how to build canals in order to irrigate their farms.

The origin of irrigation, Tawquahtah-Mawks and her canal (Thin Leather)
The short swift time of gods on earth. Hohokam Chronicles.
(Bahr et al., 1994)

Remerciements

Entreprendre une thèse est assurément une tâche ardue qui suppose de l'énergie, de la volonté et une passion sans faille. L'aide et le soutien, qui ont favorisé la progression de ma recherche et ma motivation personnelle, m'ont permis de mener à terme ces 6 années de recherche au Centre d'Etude Préhistoire Antiquité et Moyen Age (CEPAM-UMR 6130) à l'Université de Nice Sophia Antipolis. Je souhaite ici exprimer ma gratitude à ceux qui y ont contribué.

J'adresse à mon directeur de thèse **Frank Braemer** mes remerciements les plus sincères. Il a su m'apporter une aide et une écoute constante. Je le remercie d'avoir alimenté ma réflexion, je lui sais gré de ses conseils, de sa relecture et de ses encouragements.

Je tiens tout d'abord à remercier **Jean-François Berger**, tuteur de ce travail, pour son soutien financier et moral tout au long de ces années. Il m'a formée à la géoarchéologie de terrain en France comme au Moyen Orient et m'a accompagnée lors de ma première mission en Arizona. Je le remercie vivement pour ces opportunités. Il m'a transmis ses connaissances et ses idées. Je lui suis reconnaissante pour son dynamisme et sa motivation, ainsi que pour la liberté et l'autonomie qu'il m'a laissées. Sa relecture et ses commentaires sur mon travail m'ont aussi grandement aidée.

Je remercie les chercheurs qui ont accepté d'évaluer ce travail et de faire partie de mon jury de thèse : **Sander van der Leeuw** du Département d'Anthropologie d'Arizona State University; **Morgan de Dapper** de l'Université de Gand, **Laurent Lespez** de l'Université de Caen Basse Normandie; **Claude Martin** de l'UMR 6012 « Espace », Université de Nice Sophia-Antipolis.

L'objet de recherche traité dans cette thèse m'a conduite à travailler au sein de plusieurs laboratoires et équipes de recherches.

Toute d'abord, le Centre d'Etude Préhistoire Antiquité Moyen-Age-UMR 6130 m'a apporté, de Valbonne à Nice, un confort optimal pour ma recherche: espace, matériel et soutien financier (missions et colloques). J'adresse un chaleureux merci à **Franck Braemer** et **Didier Binder**, ses directeurs successifs. Au +2 du CEPAM, je tiens notamment à remercier **Claire Delhon**, pour ses conseils toujours avisés, son aide chaleureuse, sa relecture, sa bonne humeur et son humour, et **Isabelle Théry Parisot**, pour sa présence enjouée et pour m'avoir donné un jour, il y a de cela bien longtemps, une recommandation pour le moins pertinente et rassurante : « te préoccupe pas des autres, fais ton boulot et tout ira bien ». Au même étage, j'ai une pensée toute particulière pour **Michel Dubar** qui m'a soutenue humainement et scientifiquement au cours de ces 6 dernières années. Merci Michel pour ton temps et ton énergie : je sais maintenant faire fonctionner une mini-scie à diamant, utiliser du baume du Canada, une rectifieuse à lame mince, reconnaître les assemblages minéralogiques, et bien d'autres choses... Au 0, je remercie **Jeanine François** qui m'a aidée et a su si souvent déjouer pour moi les pièges de l'administration, des missions à l'étranger et des budgets. Toujours au 0, merci à **Gourguen Davtian**, pour son aide, ses formations en analyse spatiale et son accueil dans la salle SIG pendant toutes ces années.

Une grande partie, voire même presque l'ensemble de mes lames minces ont été fabriquées au GEOPHEN, Université de Caen Basse Normandie. Je remercie grandement tous les membres de cette équipe, et notamment **Daniel Delahaye**, directeur de laboratoire, pour son accueil,

Laurent Lespez pour son temps, son aide, et sa patience (!) et **Robert Davidson**, pour m'avoir « sauvé la vie » plusieurs fois!

Dans le cadre de mon travail de recherche, j'ai été rattachée à Arizona State University pendant 1 an, de 2006 à 2007. Cette année passée en Arizona a été plus qu'enrichissante : j'y ai rencontré des collègues et des amis. Un grand merci tout d'abord à **Sander van der Leeuw**, directeur de la School of Evolution and Social Change (Arizona State University), qui m'a accueillie à bras ouverts. Il m'a apporté un confort matériel et financier, sans lequel cette thèse n'aurait pu voir le jour. Il a également facilité mon intégration dans le milieu universitaire et les communautés indiennes. Je souhaite également le remercier chaleureusement pour sa disponibilité et son aide, de la France aux Etats-Unis, et ce malgré un emploi du temps souvent surchargé...Merci beaucoup Sander !

Dans le cadre universitaire, je remercie vivement **Gary Huckleberry** (University of Tucson) pour son aide sur le terrain, de la vallée de la Santa Cruz à la vallée de la Salt; pour nos discussions, pour ses relectures, ses critiques, et son soutien. Pour le temps qu'il m'a accordé et ses réponses toujours rapides, je lui dis merci du fond du cœur.

Je n'oublie pas **David Abbott** (Arizona State University) qui m'a introduite dans le milieu de l'archéologie préventive. Ses cours, sa collaboration et ses questions m'ont été d'une grande aide dans la construction du volet archéologique de ce travail.

La bonne réalisation de ces travaux a reposé sur la collaboration avec plusieurs organismes non-institutionnels.

Cette recherche a été notamment effectuée en collaboration avec la *Gila River Indian Community*, Cultural Resource Management Program et le Pima-Maricopa Irrigation Project. Les projets ont été financés par le Ministère de l'Intérieur, l'US Bureau of Reclamation, grâce au Tribal Self-Governance Act of 1994 (PL 103-413) afin de construire et développer un système d'arrivée d'eau à partir du Central Arizona Project. Je remercie donc tout d'abord la communauté pour m'avoir autorisée à accéder à ses terres. Mes premiers remerciements vont à **Llyn Fulmer**, manager de la Gila River Sand and Gravel, et **Tony Enos**, responsable de sécurité, qui ont m'ont autorisée à étudier et prélever des échantillons dans le lit majeur de la Gila. Je remercie également **Andrew Darling**, coordinateur de la GRIC-CRMP, pour son accueil au sein de l'équipe d'archéologues et qui a facilité mon intégration dans la communauté. Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à **Kyle Woodson**, qui m'a contactée lors des projets de fouilles, m'a toujours aidée et soutenue. Je salue également **David Wright**! Et c'est de tout cœur et amitié que je remercie **Wesley Miles**. Nous avons passé presque un an sur le terrain par une chaleur accablante. Wes racontait des légendes Pima-Apache pendant que l'on essayait difficilement de délimiter des strates dans des canaux. Je le remercie pour son soutien intégral, son temps, ses 300 e-mails en réponse à mes questions sur les canaux depuis maintenant 5 ans, et surtout pour sa vision des choses et ses passions. Merci Wes !

Je tiens également à exprimer mes remerciements à :

- **Todd Bostwick** (archéologue de la ville de Phoenix) et son assistant **Robert Serocki** pour leur accord à ma participation aux fouilles de sauvetage dans la ville de Phoenix et pour l'autorisation de consulter les rapports de fouilles inédits.
- **Cory Breternitz** (président de Soil System Inc), **Leonard Banks** (Senior Project Director) et toute l'équipe de fouilleurs de SSI.
- **Jerry Howard** (conservateur de l'Arizona Museum of Natural History) pour m'avoir accueillie dès 2005, contactée régulièrement pour m'informer des projets en cours et avoir répondu à mes questions.

- **Kathy Henderson** et **Connie Darby** (Desert Archaeology) pour m'avoir donné accès à l'un des plus beaux sites de la basse vallée de la Salt en 2009 (Pueblo Grande).
- **Bruce Phillips** (Ecoplan Inc.) pour avoir cru en moi, m'avoir soutenue et informée lors des projets avec canaux.
- **Glen Rice** et **Erik Steinback** (Rio Salado Archaeology LLC) ainsi que **Margerie Green** et **Joanne Tactikos** (ACS).

Je tiens à exprimer mes chaleureux remerciements à :

- **Tom Wergen** et **David Boggs** du Flood Control District of Maricopa County pour m'avoir fourni une documentation précieuse et indiqué les gravières potentiellement accessibles.
- **Norm Buckner** et **Tom Boden** (Vulcan) pour m'avoir autorisé l'accès à leur gravière, et permis de rêver à mon fameux « champ de maïs » jamais identifié !
- **Dan McQuade**, **Bob MacKey**, **Bruce Dyer** (Salt River Material Group) pour m'avoir accueillie plusieurs fois de suite dans la gravière. J'ai vu de magnifiques canaux historiques, des sédiments, toujours des sédiments, des coyotes, et du Kentucky Fried Chicken!

Enfin, je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui m'ont donné accès à des données, ma fois difficilement accessibles !

- Je suis reconnaissante à **Gene Rogge** (URS corporation), **Shannon Twilling** (Arizona State Museum), **Shelly Dudley** (SRP Historical Analyst), **Jack August** (Barry Goldwater Center for the Southwest) pour leurs informations sur les canaux et les crues historiques dans la basse vallée de la Salt.
- Je remercie **Owen Baynham**, **Christopher Smith**, **Cheryl Partin** et **Stephen Wiele** de l'USGS WRD de Tucson et **Jonathan Fuller** (Hydrology and Geomorphology, Inc.) pour leurs données sur la crue de 1993.
- Je suis reconnaissante à **Stewe Swanson** (Arizona State University), **Rick Karl** (Az Site Database Manager) et **Corinna Gries** (CAP- LTER Information Manager) pour l'acquisition des données spatiales environnementales et archéologiques.
- Merci à **Glenn Berger** (University of Nevada) pour ses explications et sa formation sur les dates OSL (quelle journée !), **Jeffrey Homburg** (Statistical Research Inc.) et **Manuel Palacios-Fest** (Terra Nostra Inc.), pour leur documentation sur les sols et la paléoécologie dans le bassin de Phoenix.
- Merci à **Christine Oberlin** pour son aide et la réalisation de toutes mes dates radiocarbone au Centre de Datation par le Radiocarbone de Lyon (ARTEMIS, appels d'offre annuels ARTEMIS du département INSHS du CNRS).

Je n'oublie pas ceux rencontrés au cours de ces 6 dernières années qui m'ont fait confiance, et me font aimer mon travail. Un grand merci à **Benoît Devillers** qui a inspiré une partie de cette recherche ! Merci à **Michel Mouton** (Paris I), **Julien Charbonnier** (Paris I), et **Anne Benoît** (Archéorient) du projet Jawf-Hadramawt: que de bons moments et de questionnements, merci ! Merci également à **Michel Pasqualini** (Service du Patrimoine de la ville de Fréjus) et toute l'équipe de fouille de Fréjus qui m'a, à un certain moment, il faut le dire, changé les idées !! Mes pensées chaleureuses vont vers mes amis Caennais, rencontrés entre deux imprégnations de résines, et qui m'ont apporté beaucoup, tant au niveau professionnel qu'amical, merci Johnny Douvinet et Yann le Drezen !

Je remercie tout particulièrement mes amis et compagnons « de galère » du CEPAM, bureau SIG, niveau 0: Nicolas Bernigaud et Grégory Gaucher, avec qui j'ai tout partagé depuis 2004, des moments de déprimés aux fous rires...Merci !! Mais je tiens également à remercier mes collègues et amis doctorants du laboratoire du -3 au +2, pour leur soutien, les pauses café, les soirées sympas, les semaines de terrain : **Sébastien**, merci pour ton amitié et ton soutien constant (moi aussi je te donnerai de bons conseils de fin de thèse !), **Aurélié**, merci pour ton accueil toujours chaleureux et amical, **Auréade, Alain, Emilie, Elisa, Lorène, Cédric, Florian, Jean-Victor, Carole, Antonin, Julia**, Je n'oublie pas Mai et Michel Girard au +2, Chantal Perrot au 0 : merci pour ton sourire matinal, tes cafés, tes plantes, et pour tout ce que tu m'as toujours si gentiment prêté. Et je n'oublie par **Antoine Pasqualini** ! Merci pour ta bonne humeur et ton aide !

Enfin, pour cette merveilleuse année en Arizona, riche en culture américaine, merci à **Katie** (et merci toujours !), **Jake, Jaime, Anna, Chris P., Chris R., Sidney, Julie, Charisse, Ashley!** Merci également à **Annick Coudart** pour son accueil chaleureux et ses repas, quel bonheur entre deux burgers!

Je n'oublie surtout pas ceux qui ont toujours été à mes côtés, ont essayé de comprendre, n'ont toujours pas compris, mais que je remercie de tout cœur: **Louise, Charlotte, Steph, Jeanne, Fabien...** Enfin, je tiens à exprimer mes plus profonds remerciements à ma **famille** (parents, sœurs, beaux-frères et nièces) pour son constant soutien matériel, logistique et moral...Leur présence à mes côtés a créé des conditions propices à un travail de rédaction final.

Enfin, je témoigne toute ma reconnaissance à **Tim**, qui a sacrifié son temps, son énergie, et a toujours été un soutien infaillible, Merci.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	7
TABLE DES MATIERES	11
INTRODUCTION GENERALE	19

PARTIE I

LE BASSIN SEMI-ARIDE DE PHOENIX : CADRE SPATIO-TEMPOREL ET CONTEXTES SOCIO-ENVIRONNEMENTAUX 31

CHAPITRE 1

PRESENTATION GENERALE DU CADRE ENVIRONNEMENTAL ACTUEL : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, MORPHOLOGIQUE ET CLIMATIQUE	35
1. Introduction	36
2. Cadre physiographique et géologique	36
2.1. Physiographie et topographie de la « Basin and Range Province »	36
2.2. Géologie du Bassin de Phoenix	36
3. Hydrologie et formations superficielles	40
3.1. Premières considérations sur les dynamiques fluviales en contexte aride et dans le Bassin de Phoenix	40
3.2. Le Phoenix urbain : la Salt River	40
3.3. La Gila River Indian Reservation: la Gila River	44
4. Climat	46
4.1. Régime des pluies	46
4.2. Température, évaporation et régime des vents	51
5. Interrelation entre climat, précipitation, décharge et morphologie fluviale	53
5.1. Climat et périodicité des crues : sensibilité des bassins versants au régime bimodal	53
5.2. Crues et sécheresses au cours du 20 ^{ème} siècle : implications climatiques	56
5.3. Adaptation de la dynamique et de la morphologie fluviale aux fortes décharges	57
5.4. Impact de la végétation	59
6. Une région riche et diversifiée	59
6.1. Couverture végétale naturelle	59
6.2. Couverture pédologique	62
7. Conclusion	65

CHAPITRE 2

CONTEXTE SOCIO-ENVIRONNEMENTAL DE LA PERIODE HISTORIQUE A PREHISTORIQUE : ETAT DE LA QUESTION 67

1. Introduction 68

2. Evolution au cours de la période Historique : de la colonisation à la formation de l'Etat d'Arizona en 1912 68

2.1. De l'occupation miliaire à la colonisation massive le long de la Salt River (2nde moitié du 19^{ème} siècle) 68

2.2. L'évolution historique du bassin de la Gila : les missionnaires et les Akimel O'Odham 70

3. Occupation préhistorique du territoire. Données archéologiques et paléoenvironnementales du 1^{er} au 16^{ème} s. apr. J.-C. 71

3.1. Données archéologiques et évolution culturelle des Hohokam 71

3.2. Evolution de l'environnement au cours des deux derniers millénaires 87

4. Conclusion 92

CHAPITRE 3 93

S'APPROPRIER LE DESERT : ORGANISATION ET AMENAGEMENT DU TERRITOIRE FLUVIAL AU COURS DES DEUX DERNIERS MILLENAIRES 93

1. Introduction 94

2. La gestion de l'eau et les pratiques agraires 94

2.1. Les techniques de production agricole et cultures associées 94

2.2. Description des structures hydrauliques rencontrées en plaine alluviale : les systèmes d'irrigation et de stockage d'eau 102

2.3. L'agriculture sèche : principe et description des structures rencontrées sur les terrasses et cônes alluviaux 112

3. Occupation et aménagement de l'espace fluvial de la période Archaïque à Protohistorique 115

3.1. Dans la basse vallée de la Salt 115

3.2. Dans la moyenne vallée de la Gila 129

4. Conclusion 134

PARTIE II

IDENTIFICATION ET CHRONOLOGIE DES DEPOTS NATURELS ET ANTHROPIQUES

135

CHAPITRE 1

DEMARCHE ET METHODE : RECONNAISSANCE ET ACQUISITION DES DONNEES PEDO- SEDIMENTAIRES

139

1. Apport d'une étude géoarchéologique fluviale hors site : stratégie adoptée et limites inhérentes au secteur d'étude	140
1.1. Problématiques et approche	140
1.2. Localisation des sites d'études dans le bassin de Phoenix	140
2. Caractérisation des éléments structurants les dépôts naturels	142
2.1. Les milieux fluviaux	143
2.2. Dépôts de versants	149
2.3. Dépôts éoliens	153
2.4. Synthèse des faciès observés	153
3. Reconnaissance des structures hydrauliques : estimation des paramètres naturels et anthropiques	155
3.1. Principe de l'approche	155
3.2. Repérage des réseaux fossiles	155
3.3. Discrimination entre canaux et chenaux naturels	156
3.4. Processus taphonomiques	159
4. Méthodes de datation	161
4.1. Période concernée, stratégie et limites inhérentes à l'objet d'étude	161
4.2. Les datations absolues : méthode adoptée, limites et stratégie d'échantillonnage	162
4.3. Les datations relatives : approche typostratigraphique et chronostratigraphique	167
4.4. Mise en place de diagrammes âge-profondeur	168
5. Conclusion : premiers questionnements et stratégie d'échantillonnage	169

CHAPITRE 2

ANALYSE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE ET PEDO-SEDIMENTAIRE DES STRUCTURES HYDRAULIQUES ET DES HERITAGES HOLOCENES DES BASSINS DE LA SALT ET DE LA GILA

171

1. Le Bassin de la Salt River	172
1.1. Le Canal System 1 (secteur amont, rive sud)	172
1.2. Le Scottsdale System (secteur amont, rive nord)	184
1.3. Le Canal System 2 (zone centrale, rive nord)	191
1.4. Le Canal System 7 (zone avale, rive sud)	205
1.5. Le Canal System 12 (zone avale, rive nord)	214
1.6. Conclusion et premières interprétations diachroniques sur les dynamiques morphogéniques et le fonctionnement des réseaux hydrauliques	220

2. Le Bassin de la Gila River	228
2.1. Casa Blanca System (zone centrale, rive sud)	228
2.2. Santan Canal System (zone centrale, rive nord)	238
2.3. Systèmes Poston/Casa Grande (zone amont, rive nord et sud)	247
2.4. Conclusion et premières interprétations chronostratigraphiques	252

PARTIE III

DESCRIPTION FONCTIONNELLE ET TYPOLOGIE DES PALEOMILIEUX ET DES PRATIQUES AGRAIRES	257
--	------------

CHAPITRE 1

METHODES DE LABORATOIRE	261
--------------------------------	------------

1. Sédimentologie magnétique	262
1.1. Principe	262
1.2. Etat des connaissances et limites	263
1.3. Objectifs de l'étude	265
1.4. Echantillonnage et mesures	265
1.5. Application à l'identification de sources sédimentaires et des milieux de sédimentation dans les bassins de la Salt, Verde et Gila	266
2. Analyses paléoenvironnementales	271
2.1. Importance de l'interdisciplinarité	271
2.2. Limites liées aux problématiques de recherches et à la conservation des artefacts	272
2.3. Evolution progressive vers une systématisation de la recherche paléoenvironnementale	273
3. Micromorphologie des sols	274
3.1. Principe, intérêts et limites pour la recherche paléopédologique et la restitution des paysages agraires en contexte semi-aride	274
3.2. Etapes analytiques	277
4. Les besoins en référentiels et les données exploitables	284

CHAPITRE 2	287
-------------------	------------

CARACTERISATION ET CLASSIFICATION DES DYNAMIQUES HYDROSEDIMENTAIRES	287
--	------------

1. Introduction : objectifs, démarche et corpus analysable	288
1.1. Objectifs et critères diagnostiques	288
1.2. Démarche	288
1.3. Le corpus de données	289
2. Mesure de la dynamique hydrique, reconnaissance des milieux de sédimentation et des sources sédimentaires	291
2.1. Signature micromorphologique des milieux de sédimentation (Fms)	291
2.2. Signature micromorphologique de la dynamique hydrique (facies granulométriques Fg)	300
2.3. Signature micromorphologique de l'origine des sédiments (facies source sédimentaire Fss)	306
3. Typologie des dynamiques hydrosédimentaires	318
3.1. Dans le bassin de la Salt	318

3.2.	Dans le bassin de la Gila	322
4.	Interprétation des facies hydrosédimentaires: confrontation des archives sédimentaires et historiques	327
4.1.	Les hydrosystèmes : impacts géographique et humain des crues majeures historiques	327
4.2.	L'hydro-agro-système : interprétation climatique, géomorphologique et anthropique des remplissages de canaux	339
5.	Conclusion	349
CHAPITRE 3		
CARACTERISATION ET CLASSIFICATION DES PROCESSUS PEDOLOGIQUES, ECOLOGIQUES ET AGRAIRES		
		353
1.	Introduction	354
2.	Typologie des traits pédologiques et écologiques observés dans les remplissages de chenaux et les formations alluviales	355
2.1.	Activité biologique animale et microstructure associée	355
2.2.	Matière organique et charbons	356
2.3.	Transfert de particules solides : description et dynamique	358
3.	Signature micromorphologique de la mise en surface et du développement d'un couvert végétal dans les formations alluviales non cultivées et les remplissages de canaux	364
3.1.	Référentiels actuels des traits micro-pédologiques et écologiques de surface sur sols non cultivés	364
3.2.	Signature de l'absence de mise en surface	366
3.3.	Signature de la présence d'un couvert végétal local à régional	366
4.	Signature micromorphologique de la culture et de l'irrigation des sols	368
4.1.	Critères traditionnels de reconnaissance des sols agricoles et de la pratique de l'irrigation	368
4.2.	Référentiel micromorphologique de sols cultivés historiques et modernes	370
5.	Conclusion	374
5.1.	Synthèse des résultats obtenus dans les formations alluviales de référence (sols cultivés/non cultivés)	374
5.2.	Dans les remplissages de canaux	375
CHAPITRE 4		
CARACTERISATION ET SIGNATURE PEDOCLIMATIQUE DES SEDIMENTS		
		377
1.	Introduction	378
2.	Typologie et dynamique des traits cristallins et crypto-cristallins observés	378
3.	La microstructure comme indicateur pédoclimatique	389
4.	Les charbons : marqueurs climatiques ou anthropiques ?	390
4.1.	Transport et érosion	390
4.2.	Corrélation avec les données pédo-climatiques	394

5. Limites dans l'interprétation du pédoclimat	395
6. Conclusion et proposition de classification	396

PARTIE IV

DYNAMIQUES HYDROSEDIMENTAIRES ET PALEOENVIRONNEMENTALES DES RESEAUX HYDRAULIQUES ET DES FORMATIONS ALLUVIALES	399
--	------------

CHAPITRE 1	403
-------------------	------------

EVOLUTION DES PAYSAGES DE LA BASSE VALLEE DE LA SALT	403
---	------------

1. Résultats micromorphologiques et paléoenvironnementaux	404
1.1. Le Canal System 1	404
1.2. Le Scottsdale System	415
1.3. Le Canal System 2	420
1.4. Le Canal System 7	424
1.5. Le Canal System 12	433
2. Phasage des dynamiques pédo-sédimentaires et paléoenvironnementales	439
2.1. Phase 1 : - 610 apr. J.-C. (Période Formative)	439
2.2. Phases 2 et 3 : 610-850 apr. J.-C. (Période Pionnière/Coloniale)	442
2.3. Phases 4 et 5: 850-1150 apr. J.-C. (Période Coloniale/Sédentaire)	443
2.4. Phases 6, 7, 8: 1150-1450 apr. J.-C. (Période Classique)	444
2.5. Phase 9 : 1450-1600/1650 apr. J.-C. (Période Protohistorique)	445
2.6. Phases 10 et 11 : 1600/1650 à 1930 apr. J.-C. (Périodes Protohistorique et Historique)	446

CHAPITRE 2

EVOLUTION DES PAYSAGES DE LA BASSE VALLEE DE LA GILA	449
---	------------

1. Résultats micromorphologiques et paléoenvironnementaux	450
1.1. Un système préhistorique fragile et peu maîtrisé : Le Casa Blanca System	450
1.2. Un système préhistorique central résilient: le Santan System	457
1.3. Les systèmes Casa Grande/Poston	467
2. Une histoire des dynamiques paysagères	472
2.1. Phases 1 à 4 : 250 apr. J.-C. à ? (Période Formative à ?)	472
2.2. Phases 5 et 6 : de 950-1050 apr. J.-C. (Période Sédentaire)	477
2.3. Phases 7 à 11 : de 1050 à 1450 apr. J.-C. (Période Classique)	478
2.4. Phases 12, 13, 14 : de 1450 à 1900 apr. J.-C. (Périodes Protohistorique et Historique)	480

PARTIE V	
SYNTHESE ET DISCUSSION	481
CHAPITRE 1	
HISTOIRE ET DYNAMIQUE DES PAYSAGES FLUVIAUX DE LA PREHISTOIRE AU 19^{EME} SIECLE DANS LE BASSIN DE PHOENIX	485
1. Représentativité et comparaison des résultats de l'échelle locale à régionale	486
1.1. Périodes Formative, Pionnière et Coloniale: une information fragmentée	486
1.2. Période Sédentaire à Historique: des observations régionales	490
2. Rythmicité des dynamiques hydrosédimentaires sur la longue durée et modalités de la morphogénèse	497
2.1. Identification des relations entre dynamiques hydrosédimentaires, climatiques et humaines au cours des deux derniers millénaires	497
2.2. Modélisation de l'évolution des paysages fluviaux	504
CHAPITRE 2	
LA CONSTRUCTION ET L'EVOLUTION DES SYSTEMES AGRAIRES : ENTRE VULNERABILITE, ADAPTATIONS, CONFLITS ET CRISES	507
1. Exploitation et transformation des paysages par l'homme	508
1.1. Détermination des pratiques culturelles	508
1.2. Choix des parcelles et pratiques associées	508
1.3. Feux anthropiques ou climatiques ?	509
2. Discussion autour d'une modélisation des agrosystèmes en réponse aux variabilités hydroclimatiques et humaines	511
2.1. MODELE 1 : Stabilité du territoire	511
2.2. MODELE 2 : Crues majeures hivernales et évolutions morphologiques	516
2.3. MODELE 3 : Ecoulements réduits, dynamiques locales de ravinement (post-incision)	521
2.4. MODELE 4 : Conditions chaudes et sèches, crues éclair	524
2.5. Conclusion	527
CONCLUSION GENERALE	529
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	535
LISTE DES FIGURES	611
LISTE DES TABLEAUX	616

Introduction générale

La maîtrise de l'eau est au cœur des débats dans la plupart des civilisations agricoles. Dans un cadre actuel de réchauffement climatique, elle constitue aujourd'hui une priorité à l'échelle internationale. Au cours des dernières décennies, les sociétés modernes ont consacré des moyens financiers et humains gigantesques à la dérivation, la canalisation et la concentration de l'eau par la construction de barrages et de canaux d'irrigation : il s'agit à la fois de subvenir aux besoins alimentaires, mais également d'afficher des symboles politiques. Malgré l'expertise des administrateurs et des ingénieurs, ces travaux ont été fréquemment réalisés au détriment de la préservation de l'environnement.

Au cours de l'histoire, la gestion de l'hydraulique a été une composante importante du fonctionnement des communautés agricoles : elle a eu un rôle important dans les processus de complexification socio-politico-économique. Le fonctionnement de ces sociétés complexes antiques, que l'on peut considérer comme des écosystèmes sociaux invasifs (Scarborough, 2003), et la façon dont elles se sont organisées et ont exploité leur environnement présente un certain parallélisme avec les sociétés agricoles actuelles. Identifier les variables économiques, politiques et environnementales en jeu dans le passé peut permettre d'appréhender plus clairement les causes des stimuli qui affectent nos sociétés modernes.

Le milieu naturel dans lequel les sociétés se développent conditionne fortement la gestion du territoire agricole et certaines des civilisations les plus technologiquement avancées se sont mises en place dans des milieux extrêmes et désertiques. Dans le nouveau monde, c'est le cas du Pérou, du Mexique et du Sud-Ouest Américain (ex : Donkin, 1979 ; Price B., 1971). Dans l'ancien monde, le développement des pratiques hydrauliques est associé à la mise en place d'un système étatique, notamment en Egypte (Butzer, 1976 ; Chaudhuri, 1990 ; Eyre, 1994 ; Menu, 1994 ; Manning, 2002), Pakistan et Inde (Allchin et Allchin, 1982 ; Francfort et Lecomte, 2002), Iraq (Gentelle, 1980 ; Adams R., 1981 ; Charpin, 2002) et centre Chine (Hsu, 1980 ; Will, 1989). Toutes les structures hydrauliques et agricoles ont été élaborées (barrages, réservoirs, puits, aqueducs, canaux d'irrigation, terrasses, pour les principaux) pour s'adapter aux contraintes géographiques, géomorphologiques, hydrogéologiques et climatiques locales.

Dans ce travail, nous chercherons à éclairer les dynamiques qui ont influé sur l'évolution culturelle d'une tribu paléo-indienne d'agriculteurs en Arizona, les Hohokam, puis de celle de leur descendants, les Akimel O'Odham. Cette tribu, de langue uto-aztèque, est implantée le long des rivières de la Salt et de la Gila dans le bassin semi-désertique de Phoenix depuis plus de deux millénaires. Son évolution culturelle repose sur une interaction constante de ses membres avec un environnement contraignant, et notamment avec l'une des ressources les plus rares en contexte désertique, l'eau. L'étude des dynamiques socio-environnementales produites par cette interaction sur la longue durée permet d'élaborer une illustration des réponses systémiques aux problèmes écologiques et sociaux.

Le bassin de Phoenix, Arizona

Cadre géographique et géopolitique

L'Arizona est un état du sud-ouest des Etats Unis qui possède une frontière commune avec le Mexique. Il est bordé par la Californie à l'ouest, le Nevada au nord-ouest, l'Utah au nord et le Nouveau Mexique à l'est. Cet état est connu pour son essor économique, mais surtout pour ses paysages et son climat semi-aride. Situé géographiquement dans le désert du Sonora, pour sa partie centrale et sud, et sur le plateau du Colorado pour sa partie nord, il est composé d'une mosaïque de paysages extrêmement riches.

Le bassin de Phoenix, situé dans la partie centrale de l'Arizona couvre une superficie de 1250 km² ; il est occupé géographiquement par deux réserves indiennes et par la zone urbaine de Phoenix. Deux cours d'eau aujourd'hui asséchés traversent cette zone : la Salt et la Gila River (Fig. 1).

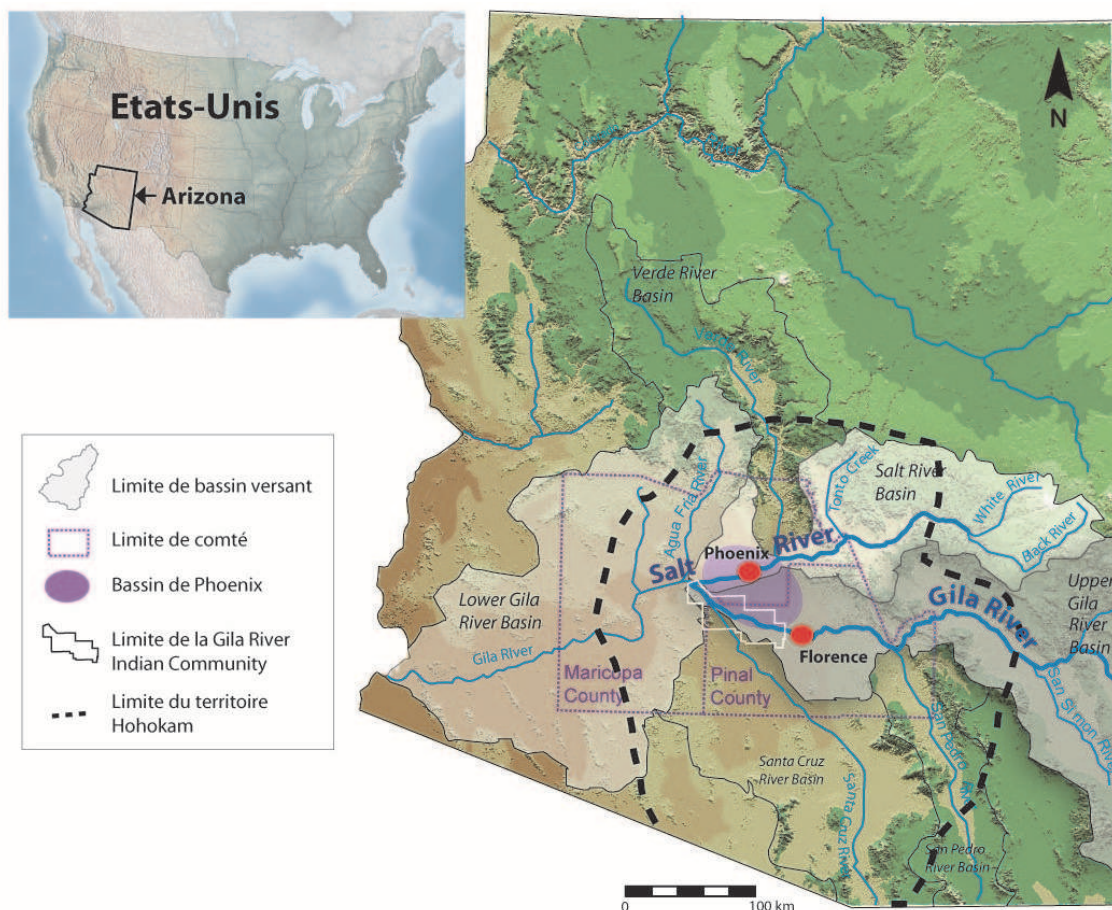


Fig. 1 : Carte de la zone d'étude (bassins de la Salt et de la Gila) et délimitation du territoire culturel des Hohokam

La construction « moderne » de **Phoenix** le long de la Salt River remonte au début du 20^{ème} siècle suite à la colonisation massive du territoire par les **Pionniers**, mais la mise au jour de ruines et d'anciens canaux d'irrigation indique une occupation nettement plus ancienne. Les ruines sont attribuées à une tribu paléo-indienne, les Hohokam, installée dans la basse vallée de la Salt River dès le début du premier millénaire apr. J.-C.

A la frontière sud de Phoenix, le long de la Gila River, se situe la **Gila River Indian Community** qui regroupe une tribu indienne, les **Akimel O'Odham**. La réserve, établie en 1859, se maintient aujourd'hui économiquement grâce à l'exploitation de la Gila, de l'agriculture ainsi que de deux casinos. Les Akimel O'Odham se considèrent comme les descendants des Hohokam, qui ont également construit dans ce bassin des canaux et laissé de nombreuses traces d'occupation, nettement mieux préservés que le long de la Salt River. La réserve est peu urbanisée, mais son accès est très restreint.

Les terres indiennes appartenant à la **Salt River Pima-Maricopa Indian Community**, situées en amont de Phoenix et jusqu'à la confluence avec la Verde River, sont peu urbanisées et l'accès est interdit.

Cadre archéologique et historique

La culture Hohokam se caractérise par la construction de systèmes d'irrigation majeurs (certains atteignent plusieurs dizaines de km) dont la construction et la gestion ont probablement contribué à leur complexification sociopolitique. Les premiers canaux dans le bassin de Phoenix datent de 100 apr. J.-C. (Henderson, 1989). Elaborant des techniques et des traditions déjà établies par des premiers groupes d'agriculteurs, la culture Hohokam se met en place autour de 300 apr. J.-C. sur un territoire qui couvre 73 000 km² (Hauray, 1976; Doyel, 1979; Gumerman, 1991) (Fig. 1). Leur centre culturel se situe dans le Bassin de Phoenix, le long des rivières permanentes de la Salt et de la Gila. Pendant presque 1 millénaire, les Hohokam ont connu des fluctuations climatiques (sécheresse), hydrologiques (évolution morphologique du cours d'eau, incision) et sociales (migrations, surpopulation, conflit liés à l'eau) contraignantes et complexes. L'occupation et l'exploitation des ressources limitées de ce territoire par les agriculteurs Hohokam ont eu un impact indéniable sur l'environnement.

La chronologie de la civilisation Hohokam peut être décomposée en trois grandes phases chrono-culturelles (Doyel, 1991 ; Dean, 1988, 1991 ; Wilcox and Sternberg 1983; Wilcox 1979, 1980, 1988, 1991), séparées par deux épisodes de ruptures. Les **périodes Pionnière et Pré-Classique**, de 300 à 1150 apr. J.-C., sont caractérisées par l'expansion spatiale des communautés d'agriculteurs Hohokam le long de la Salt et la Gila Rivers, une forte poussée démographique et l'instauration d'une société complexe. Un événement d'ordre culturel ou climatique autour de **1150 apr. J.-C.** conduit à des transformations culturelles, architecturales et agricoles au cours de la **période Classique** (1150-1450 apr. J.-C.) qui s'expriment par une organisation sociale plus fragmentée, bien que plus complexe, des limites géographiques réduites et une diminution des échanges culturels et commerciaux instaurés depuis la période préclassique. Malgré cette réorganisation et la stabilisation temporaire qu'elle a engendrée, le système décline autour de **1450 apr. J.-C.**

Après la période classique, pendant presque un siècle le Sud-Ouest américain entre dans une période dite **Protohistorique** pour laquelle les données archéologiques sont quasi-inexistantes (Fig. 2). Le bassin de Phoenix semble presque entièrement dépeuplé.

La période **Historique**, qui débute autour de 1694 apr. J.-C., est caractérisée par les premiers contacts entre les Akimel O’Odham, qui occupent des portions du bassin de la Gila, et des missionnaires jésuites, puis par la colonisation, au départ irrégulière puis intense, des militaires et des agriculteurs blancs au cours du 19^{ème} s apr. J.-C.. Ces phases de migrations et de colonisation massive marquent un épisode de rupture sociale pour les Akimel O’Odham entre 1850 et 1870 apr. J.-C., similaire à celui qu’ont connu leurs prédécesseurs. Le cadre dans lequel ils vivaient est toutefois mieux connu, et peut servir de référentiel climatique et anthropique.

La période postérieure à 1912 est qualifiée de **moderne**. Elle correspond à la création de l’état d’Arizona et à la période d’anthropisation massive du bassin de Phoenix. L’occupation du territoire s’intensifie avec une urbanisation incontrôlée et une exploitation agricole massive. Le paysage change de façon continue.

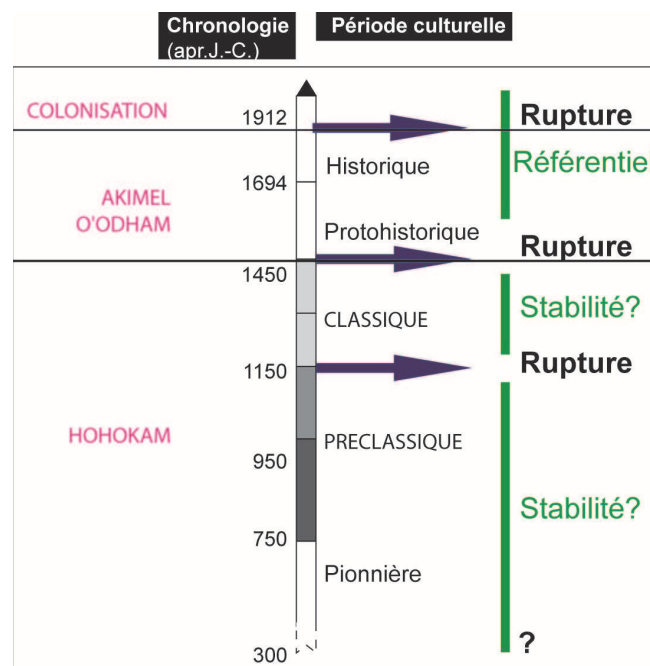


Fig. 2 : Chronologie culturelle en Arizona au cours des deux derniers millénaires : phases de stabilité et de ruptures

Le contexte scientifique et théorique

Approche traditionnelle de l'étude de la gestion de l'eau en contexte désertique

Les approches traditionnelles de l'étude des sociétés hydrauliques ont longtemps été intégrées au champ disciplinaire de l'anthropologie théorique. En effet, le travail et les connaissances nécessaires à la construction de systèmes hydrauliques et leur entretien a depuis toujours requis une organisation et une coopération au sein de larges groupes. L'interaction entre l'organisation socio-politique des sociétés et la construction de grandes structures hydrauliques avec la mise en place de sociétés étatiques a fait l'objet de nombreux débats entre les années 50 et 70 (Wittfogel, 1957 ; Steward et al., 1955 ; Leach, 1959 ; Millon, 1962 ; Mitchell, 1973 ; Netting, 1974 ; Service, 1975).

A la suite de ce débat, la recherche s'est penchée sur les conséquences des pratiques agraires sur l'organisation sociale des communautés grâce à des approches ethnographiques notamment (Hunt et Hunt 1973, 1976; Hunt, 1988; Lees, 1973; Downing et McGuire, 1974; Howard, 2006). Ainsi, l'expansion des systèmes hydrauliques suit les innovations technologiques, l'introduction de nouvelles espèces cultivables et l'augmentation démographique (Sanders et Price, 1968 ; Morin, 1987). Le déclin des sociétés complexes, en revanche, est la conséquence de catastrophes environnementales de type tectonique (ex : systèmes d'irrigation Moche au Pérou – Raikes, 1964, 1965, 1984), géomorphologique (incision, remontée des nappes phréatiques suite à un mauvais drainage, ex : Hohokam en Arizona (Waters, 2000)) voire humaine et climatique (absence d'entretien des structures et aridification, ex : système Maya dans la péninsule du Yucatan (Dunning et al., 2002 ; Harrison, 1977 ; Jacob, 1995)).

En parallèle, les approches archéologiques traditionnelles se concentrent généralement sur la cartographie et planimétrie des systèmes d'irrigation et structures hydrauliques. Bien qu'elles intègrent de plus en plus d'outils d'analyse géographique, elles restent relativement statiques. En effet, rares sont les approches qui intègrent le concept de réseaux d'irrigation en tant que système physique et entité socio-politique (Uphoff, 1986) qui transforme l'environnement naturel en paysage culturel.

Approche dynamique du paysage: de la panarchie au concept d'anthroposystème

La perception du paysage et de l'interaction homme-milieu a toujours été fragmentée. En **Amérique du Nord**, c'est le concept de **panarchie** et de **cycle adaptatif** (ex : Adams, 1978 ; Schumpeter, 1987 ; Tainter, 1988 ; Redman, 1999 ; Holling, 2001 ; Gunderson and Holling, 2002 dans Redman et Kinzig, 2003) qui définit et modélise les interactions entre les sociétés et le milieu, ainsi que leur degré de résilience (Fig. 3). Ce concept considère l'anthroposystème comme un écosystème, marqué par une évolution temporelle de ses structures et de ses fonctions, du fait de dynamiques et influences externes (Walker et al., 2006). Cet écosystème est régi de manière cyclique par une phase de croissance (r), une phase de conservation (K), une période de déclin économique (Ω) et enfin une phase de réorganisation (α), menant ensuite à une autre phase de croissance r au sein d'un cycle nouveau, similaire ou différent du précédent. Ces cycles intègrent à la fois des processus sociaux et naturels reliés par des échelles spatio-temporelles. Il existe de multiples connections entre les phases d'un niveau et celles d'un autre niveau (Fig. 3).

Lorsque le système entre dans la phase de déclin Ω , il peut se propager dans un niveau supérieur plus lent par le biais d'une crise ou révolte, et inversement les cycles plus lents ont un impact direct sur la réorganisation des cycles plus rapides, c'est la mémoire (Gunderson et Holling, 2002). Ainsi, chez les Hohokam, la période Préclassique se situe dans la phase r puis K , l'épisode de rupture autour de 1150 apr. J.-C. représente la phase Ω , puis la période Classique, la phase α (Redman et Kinzig, 2003).

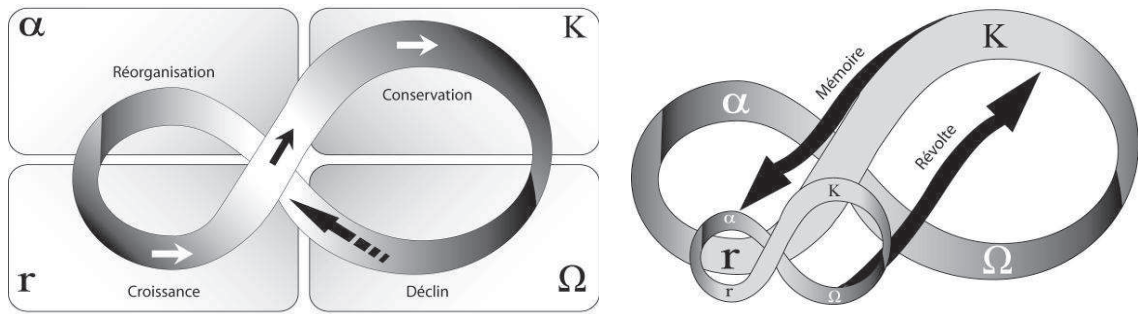


Fig. 3 : Principe des cycles adaptatifs et de la panarchie (Redman et Kinzig, 2003)

Cette approche nord-américaine tend à modéliser les dynamiques socio-environnementales, puis à appliquer les modèles ainsi créés à des communautés humaines bien spécifiques dont l'évolution culturelle pourrait valider le modèle. Cette approche simplifie et réduit la complexité humaine. Les modèles, non pas construits à partir de l'accumulation et de l'analyse de données, semblent reposer sur des bases fictives. Certains chercheurs archéologues et mathématiciens ont toutefois tenté de juxtaposer à cette théorie complexe des descriptions écologiques et des données archéologiques. L'intégration n'est pas toutefois pas spontanée (Jones, 2005) et les spécialistes de chaque discipline ne sont pas concertés.

A l'opposé, l'approche européenne vise à construire des modèles grâce à des analyses interdisciplinaires à haute résolution spatiale et temporelle. Considéré comme ayant un impact fortement négatif sur la stabilité des communautés humaines du fait de ses fluctuations, puis comme un élément perturbé et dégradé par l'impact des activités humaines (van der Leeuw et Redman, 2002), l'environnement est aujourd'hui perçu en **Europe** comme une construction sociale au sein de laquelle les sociétés interagissent. Une terminologie c'est progressivement mise en place. Le terme de **géosystème** (Sochava, 1963 ; Bertrand et Beroutchachvili, 1978) qui regroupe les disciplines de la géographie physique et humaine évolue en **anthroposystème**, système naturel ou artificialisé que les sociétés humaines exploitent et/ou aménagent (Bertrand, 1968 ; Lévêque et al., 2003). Les adaptations respectives et permanentes des systèmes environnementaux et des sociétés se perçoivent alors dans la longue durée (Burnouf et al., 2003), ce qui définit leur résilience (Holling, 1973, 1976; McGlade, 1995). Au sein d'un système résilient, le changement, qui s'exprime par le développement et l'innovation, permet à la fois le renouvellement et la réorganisation pour pallier les fluctuations environnementales (Gunderson et Holling, 2002 ; Berkes et Folke, 2002). En revanche, au sein d'un système fragilisé et vulnérable, les changements auparavant contrôlés peuvent avoir des conséquences catastrophiques (Kasperson et Kasperson, 2001) en transformant le système de façon irréversible. Ce sont ces seuils de rupture (Burnouf et al., 2003), mais également les phases de stabilité et de reconstruction qu'il s'agit de restituer.

Problématiques et objectifs de recherche

Les trois épisodes de rupture enregistrés dans l'histoire du peuplement de notre secteur d'étude (Fig. 2) correspondent-ils à une dégradation sur le long terme des conditions environnementales et/ou sociales ou s'agit-il d'évènements localisés temporellement et spatialement? Les phases de stabilité supposée ne correspondent-elles pas en réalité, et au moins pour certaines, à une fragilisation progressive des sociétés suite à une adaptation hyperspécialisée dans un environnement contraignant, qui rigidifie le système, alors moins susceptible de se réorganiser sous l'impulsion de ses seules forces internes?

Le débat n'a pas été tranché dans le Sud-Ouest américain. Des hypothèses sociales et environnementales ont été proposées pour expliquer les changements observés : les conflits (LeBlanc, 1999), les maladies (Di Peso, 1956 ; Dobyns, 1983; Fink et Merbs, 1991; Roberts et Ahlstrom, 1997), les invasions (Haury, 1945), la surpopulation (Ensor et al., 2003), les métamorphoses fluviales (élargissement, incision) (Waters and Ravesloot, 2001; Graybill et al., 2006) ou l'alternance crues-sécheresses (Nials et al., 1986; Gregory, 1991; Huckleberry, 1999b; Waters and Ravesloot, 2001).

Pour examiner plus à fond ces hypothèses et mesurer avec pertinence les interactions socio-environnementales et leur évolution sur la longue durée, la reconstruction préalable du paysage agricole dans sa totalité s'est imposée. En effet, l'étude des systèmes agricoles, et des structures hydrauliques qui y sont intégrées, est à l'interface des sciences de l'environnement et des sciences humaines. Ces systèmes artificialisés enregistrent une information écologique et archéologique particulière liée à l'exploitation d'un terroir au cours d'une période donnée (Bertrand, 1975). Leur construction, leur entretien et leur abandon sont le résultat de contextes socio-économiques et technologiques spécifiques, c'est-à-dire de contingences historiques. Or, ces structures sont également soumises à des évènements hydrologiques naturels à court-terme comme les orages, les crues, les phases de ruissellement intense, ou des évènements à long terme comme les métamorphoses fluviales ou les phases d'incision (Berger, 2000).

Les changements environnementaux et les dynamiques hydro-sédimentaires, résultats des activités humaines à l'échelle du bassin versant, sont perceptibles en position primaire dans les formations alluviales, et en position secondaire en tant que remplissages sédimentaires des structures hydrauliques (Fig. 4). Dans cette perspective, les systèmes d'irrigation représentent un objet de recherche riche et insuffisamment exploré.

C'est la description raisonnée de l'interaction entre tous ces facteurs environnementaux et humains qui va nous permettre de comprendre le paysage agricole. Plus que leur organisation et leur structuration dans l'espace, c'est leur évolution dynamique, synchronique et diachronique, qui nous intéresse. En les intégrant dans un cadre chronologique fin (Berger, 2000), on peut reconstruire les dynamiques du paysage d'une échelle locale à régionale.

Pour atteindre cet objectif, cette nouvelle archéologie agraire doit s'adapter méthodologiquement sur le terrain comme en laboratoire (Boissinot, 1997).

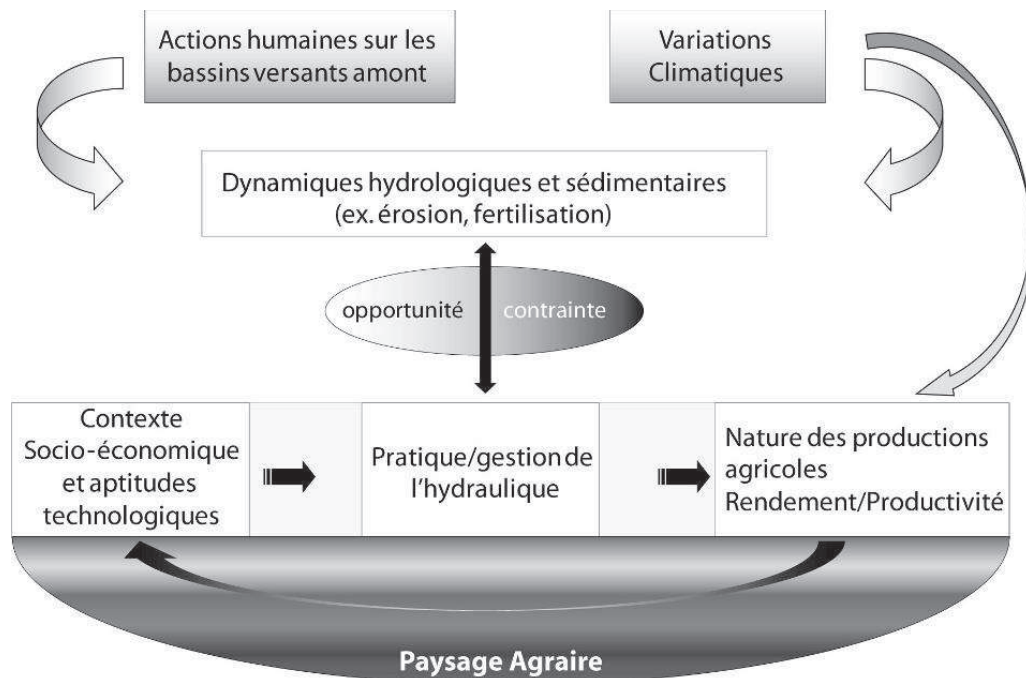


Fig. 4 : Gestion de l'hydraulique à l'interaction entre les sociétés et l'environnement (d'après Bernigaud et al., à paraître)

Comprendre l'alternance entre stabilité et rupture et plus largement reconstruire l'anthroposystème Hohokam, nécessite l'élucidation de plusieurs questions :

L'objectif principal est de restituer le **fonctionnement de l'hydrosystème** le long de la basse vallée de la Salt et de la moyenne vallée de la Gila. Il s'agira tout d'abord d'élaborer un cadre géomorphologique, paléohydrologique et climatique puis de reconstruire diachroniquement les dynamiques hydrosédimentaires, morphogéniques et pédologiques sur la longue durée. Cela devrait nous permettre de reconstruire les phases de stabilité paysagère à l'opposé des phases de crises hydrologiques et d'en comprendre l'origine.

En parallèle, il s'agira de comprendre le **fonctionnement de l'agrosystème** grâce à l'étude des systèmes d'irrigation et champs agricoles associés en analysant les phases de construction, d'entretien et d'abandon des systèmes dont on suppose qu'elles sont des réponses adaptées aux contraintes hydrosédimentaires et démographiques. La diversité des pratiques agraires et la nature des productions agricoles et des écosystèmes doivent également être restituées.

Le dernier objectif vise à reconstruire les **interactions complexes entre l'hydro- et l'agro- système** à différentes échelles spatiales et temporelles. Celles-ci s'expriment notamment par les dynamiques d'occupation du territoire et d'évolutions de son exploitation.

Une approche géoarchéologique et micromorphologique systématique

Pour répondre aux objectifs présentés ci-dessus et afin de comprendre plus précisément l'évolution d'un bassin versant ainsi que la cadre dans lequel vivaient les communautés agricoles une démarche géoarchéologique a été adoptée. Il apparaît nécessaire de poursuivre de front les méthodes de la géomorphologie fluviale, de la sédimentologie et de la pédologie. Aux échelles locales et micro-locales, les méthodes géophysiques et micromorphologiques ont été choisies afin de mieux appréhender le rôle des processus sédimentaires, pédologiques, écologiques, pédo-climatiques et humains dans l'évolution des paysages physiques (Courty, 1990), et de mettre en place une typologie et des indicateurs paléoenvironnementaux à paléoclimatiques (Fedoroff et Courty, 1989). En effet, le cadre chronologique sur lequel le travail se focalise est très court car il ne couvre que les deux derniers millénaires. Les changements à la fois environnementaux et sociaux qui ont eu lieu au cours de cette période sont relativement difficiles à percevoir et ne peuvent être estimés qu'à l'aide d'une démarche systématique à haute résolution spatiale et temporelle.

Comprendre les dynamiques actuelles qui régissent l'évolution des paysages

La première étape de l'étude requiert la création de référentiels multiples sur la gestion de l'eau en contexte désertique. Les données enregistrées dans les textes modernes et historiques (qualitatives -culture, pratiques agraires- et quantitatives - T°, pluviométrie, débits, etc..) peuvent être confrontées aux données enregistrées par le terrain (sédimentaires, pédologiques, écologiques), ce qui facilite la reconstruction globale des environnements passés. Au niveau humain, elles permettent également de comprendre les réactions des groupes aux aléas et aux risques fluviaux en milieu désertique que sont le risque phréatique (hydromorphie, salinisation des sols), le risque d'érosion (lié aux pluies intenses érosives de mousson) et le risque inondation (peu prédictible) (Arnaud-Fassetta, 2008).

Reconstruire l'évolution de l'hydrosystème

Les enregistrements sédimentaires hors sites, bien calés chronologiquement, apportent une information primaire sur la dynamique fluviale qui peut être complétée par l'information secondaire fournie par les remplissages pédo-sédimentaires des canaux d'irrigation. Le biais introduit par cette seconde approche implique un cadre chronologique précis et un recadrage dans le fonctionnement global du bassin versant (Berger et Jung, 1999).

Les approches géomorphologiques et géoarchéologiques sont rares dans le bassin de Phoenix, du fait d'un manque de tradition de recherche d'une part, de la forte urbanisation et de l'accès limité aux terres indiennes. D'autre part, seules les fouilles préventives, limitées spatialement et temporellement, et les carrières de graviers, qui donnent une information géomorphologique et géoarchéologique facilement exploitable, ont permis une reconstruction de la paléodynamique fluviale.

Reconstruire le fonctionnement de l'agrosystème

L'archéologie agraire et la compréhension des pratiques culturelles reposent sur les méthodes de la géographie rurale, la géomorphologie, la paléoécologie, l'agronomie, la physico-chimie et la micromorphologie des sols mais également de la taphonomie (Berger et Jung, 1996).

En Arizona, la recherche sur le fonctionnement de l'agrosystème n'intègre pas ces approches simultanément. Les systèmes d'irrigation Hohokam, définis par la présence d'un canal primaire associé à des canaux secondaires et tertiaires, doivent être perçus et analysés à différentes échelles spatiales (unité géomorphologique, par canal, par système) et temporelles (phase de stabilité, phase de rupture). L'information paléoenvironnementale et agraire résultante sera micro-locale à locale (pour un canal secondaire ou tertiaire qui irrigue de quelques hectares à une dizaine d'hectares), voire microrégionale (canal primaires).

L'efficacité de l'irrigation peut fortement varier au sein d'un système, du fait des contraintes et fluctuations géomorphologiques locales, de sa position amont-aval, des oscillations du climat (disponibilité en eau) et de la topographie du bassin versant. Analyser ces systèmes contribue à comprendre les évolutions environnementales et les adaptations associées, grâce à une approche géoarchéologique d'une part et une approche plus technique sur la construction et la maintenance des systèmes d'autre part. Afin de comprendre tout le tissu des interactions socio-environnementales une carte archéologique, dont la densité sera liée aux processus taphonomiques et à la conservation des sites, doit être disponible et accessible.

Contenu du mémoire

Afin de répondre aux objectifs présentés, la thèse se décompose en cinq parties.

La première partie présente le cadre spatio-temporel de l'étude, de la période moderne à l'occupation préhistorique du territoire par les Hohokam. Elle met en relief l'état des connaissances relatif à l'évolution des interactions sociétés-environnement, et aborde la thématique de la gestion de l'eau des Hohokam et des Akimel O'Odham ainsi que l'organisation et l'aménagement du territoire fluvial sur la longue durée dans le bassin de Phoenix.

La seconde partie est consacrée à l'analyse des archives sédimentaires le long de la Salt et de la Gila Rivers et à la reconstruction des dynamiques chronostratigraphiques et morphogéniques au cours des deux derniers millénaires grâce à l'étude des structures hydrauliques et des formations alluviales.

La troisième partie présente tout d'abord les méthodes de laboratoire appliquées et propose une mise en place des référentiels (historiques et modernes) magnétiques et micromorphologiques sur la dynamique sédimentaire, écologique, pédologique et pédoclimatique observée en contexte naturel et anthropique. De cette approche découle une typologie et classification des anciens facies pédo-sédimentaires alors imputables à des conditions environnementales et/ou sociétales à l'échelle du bassin versant.

Dans *la quatrième partie*, cette typologie est appliquée aux archives sédimentaires primaires et secondaires étudiées et est complétée par l'analyse paléoenvironnementale et anthropique des remplissages de fossés et paléosols associés.

Enfin, *la cinquième partie* propose une synthèse des résultats obtenus. Les transformations du paysage par l'homme et le fonctionnement des agrosystèmes Hohokam sont intégrés à des dynamiques environnementales et humaines plus larges, dont découlent les adaptations et changements socio-culturels.

Organisation du travail

Ce travail de recherche a été réalisé à l'Université de Nice Sophia Antipolis au sein de l'UMR 6130 (CEPAM, UNICE CNRS, Directeur : Didier Binder), dans l'équipe *Archéologie et Histoire des Paysages et des Peuplements*, dirigée par Jean-François Berger. Une collaboration et un rattachement pendant une année complète ont été établis avec Arizona State University, School of Human Evolution and Social Change (Directeur : Sander van der Leeuw).

En l'absence de programme collectif de recherche cohérent sur le terrain américain, ce travail a été réalisé individuellement grâce une collaboration avec de nombreuses entreprises privées en archéologie : Soil System Inc, GRIC-CRMP, Ecoplan, Desert Archaeology, Rio Salado, ACS pour citer les principales.

Partie I

Le bassin semi-aride de Phoenix :
cadre spatio-temporel et
contextes socio-environnementaux



CONTENU DE LA PARTIE I

Cette première partie présente une analyse régressive synthétique des données environnementales (climatiques, géomorphologiques, pédologiques, végétales) et humaines (gestion du territoire et de l'hydraulique) actuelles, historiques et préhistoriques. En effet, trois phases majeures d'anthropisation, qui vont structurer cette recherche, doivent être prises en considération (Fuller, 2008) :

1- La période post 1912 pour laquelle les données descriptives quantitatives – climatiques, fluviales, pédologiques- sont disponibles.

2- La période de colonisation entre 1870 et 1912, au cours de laquelle l'exploitation du territoire reste contrainte par des conditions climatiques et hydrosédimentaires fluctuantes. Des données environnementales qualitatives (gestion du territoire et de l'hydraulique) et quantitatives éparses (décharge et morphologie fluviale, température, précipitation) sont disponibles pour cette période et ont permis de construire certains de nos référentiels.

3- L'occupation et l'utilisation du territoire par les Hohokam antérieurement à toute installation pionnière correspond à la principale problématique de notre recherche. Aucune donnée écrite n'est disponible pour cette période et la reconstruction des environnements passés repose sur une approche archéologique et paléoenvironnementale.

CHAPITRE 1

Présentation générale du cadre environnemental actuel : contexte géographique, morphologique et climatique

Ce premier chapitre présente le cadre environnemental actuel (post 1912) dans le bassin de Phoenix. Dans un premier temps, la basse vallée de la Salt et la moyenne vallée de la Gila sont replacées dans un contexte géologique, climatique et géomorphologique puis les caractéristiques de leur régime fluvial actuel sont évoquées. Dans un second temps, les formations végétales et pédologiques sont présentées en fonction des unités physiographiques identifiées.

CHAPITRE 2 :

Contexte socio-environnemental de la période Historique à Préhistorique : état de la question

Nous déclinons ce second chapitre en deux volets. Le premier volet intègre un état des connaissances relatif aux dynamiques socio-environnementales au cours de la période Historique. Nous croisons synthétiquement, et grâce aux sources écrites, les dynamiques humaines et environnementales depuis le 17^{ème} siècle.

Dans le second volet, l'état de la recherche archéologique et géoarchéologique (périodes Préhistorique et Protohistorique) dans le secteur de Phoenix est exposé et complété par des premières définitions, qui permettent de présenter les grandes lignes de l'évolution culturelle des Hohokam et de leur cadre environnemental.

CHAPITRE 3

S'approprier le désert : organisation et aménagement du territoire fluvial au cours des deux derniers millénaires

Sur la base d'une étude paléo-paysagère et géoarchéologique ainsi que des données bibliographiques préexistantes, ce chapitre présente une description des pratiques agraires, des techniques de gestion de l'eau et des espèces cultivées par les Hohokam et les Akimel O'Odham. La variabilité des techniques et de l'ingénierie est replacée dans un contexte socio-économique, culturel et environnemental. Des modèles diachroniques de fonctionnement et d'organisation du territoire, fondés sur des données théoriques et archéologiques, sont proposés.

CHAPITRE 1

Présentation générale du cadre environnemental actuel : contexte géographique, morphologique et climatique

1. Introduction	36
2. Cadre physiographique et géologique	36
2.1. Physiographie et topographie de la « Basin and Range Province »	36
2.2. Géologie du Bassin de Phoenix	36
3. Hydrologie et formations superficielles	40
3.1. Premières considérations sur les dynamiques fluviales en contexte aride et dans le Bassin de Phoenix	40
3.2. Le Phoenix urbain : la Salt River	40
3.3. La Gila River Indian Reservation: la Gila River	44
4. Climat	46
4.1. Régime des pluies	46
4.2. Température, évaporation et régime des vents	51
5. Interrelation entre climat, précipitation, décharge et morphologie fluviale	53
5.1. Climat et périodicité des crues : sensibilité des bassins versants au régime bimodal	53
5.2. Crues et sécheresses au cours du 20 ^{ème} siècle : implications climatiques	56
5.3. Adaptation de la dynamique et de la morphologie fluviale aux fortes décharges	57
5.4. Impact de la végétation	59
6. Une région riche et diversifiée	59
6.1. Couverture végétale naturelle	59
6.2. Couverture pédologique	62
7. Conclusion	65

1. Introduction

Le bassin de Phoenix, situé dans le désert du Sonora, au centre de l'Arizona, couvre une superficie de 1250 km². Deux principaux cours d'eau, la Salt River et la Gila River traversent cette zone. Le bassin versant de la Gila River mesure 57 959 km², celui de la Salt 33 670 km² (Péwé, 1978), mais le secteur d'étude ne concerne que certaines sections de ces bassins versants (20450 km² pour le bassin de la Gila, 28933 km² pour le bassin de la Salt). Il concentre la **zone urbaine de Phoenix** dans le comté administratif de Maricopa ainsi que la **Gila River Indian Community** dans le comté du Pinal (Fig. 5). La première section sur laquelle ce travail va porter est la moyenne vallée de la Gila River qui s'étend de Florence jusqu'à sa confluence avec la Salt River, au sud ouest de l'actuelle ville de Phoenix et s'écoule dans cette zone avec une orientation sud-est/nord-ouest sur une distance de 120 km. Ces terres appartiennent à la Gila River Indian Community. La seconde zone d'intérêt est la basse vallée de la Salt River, qui s'écoule sur 37 km avec une orientation est-ouest de sa confluence avec la Verde River jusqu'à sa confluence avec la Gila River, à l'ouest de Phoenix (Fig. 5).

2. Cadre physiographique et géologique

2.1. Physiographie et topographie de la « Basin and Range Province »

Le bassin de Phoenix se situe dans une formation physiographique d'origine tectonique communément appelée la *Basin and Range Province* (Gilbert, 1875 ; Davis, 1903) (Fig. 6). Cette zone est formée de montagnes orientées nord-ouest/sud-est, qui s'élèvent de 90 à 3265 m au dessus du niveau de la mer (Morrison, 1985). Les vallées encadrées par ces montagnes s'étendent de quelques kilomètres à plus de 100 kilomètres et atteignent parfois 25 km de large (Fenneman, 1931). Fréquemment, des cours d'eau temporaires parcourent les plaines alluviales de ces vallées à très faible pentes (0-5°) (Fenneman, 1931). Les zones de plus fortes pentes sont riches en graviers issus de l'érosion des montagnes et donnent ainsi naissance à des cônes alluviaux détritiques (Hendriks, 1974) et bajadas (ensemble de cônes) qui bordent la plaine alluviale (Fig. 7).

2.2. Géologie du Bassin de Phoenix

Les formations géologiques les plus anciennes observées dans le bassin correspondent à un complexe métamorphique de l'époque PréCambrienne-Protérozoïque (1,6-1,8 Ga) (Reynolds, 1988) (Fig. 6). Certaines traces de cette activité métamorphique, notamment des roches métavolcaniques comme la métarhyolite ou la néphrite sont toujours présentes dans les Phoenix Mountains (Reynolds et De Witt, 1991 ; Johnson, 2000) et à proximité des Papago Buttes (vallée de la Salt) (Péwé et al., 1987) (Fig. 6). Des roches métasédimentaires comme l'ardoise, la phyllite, les schistes et la quartzite sont également observées dans les Phoenix Mountains (Jones, 1996 ; Johnson, 2000).

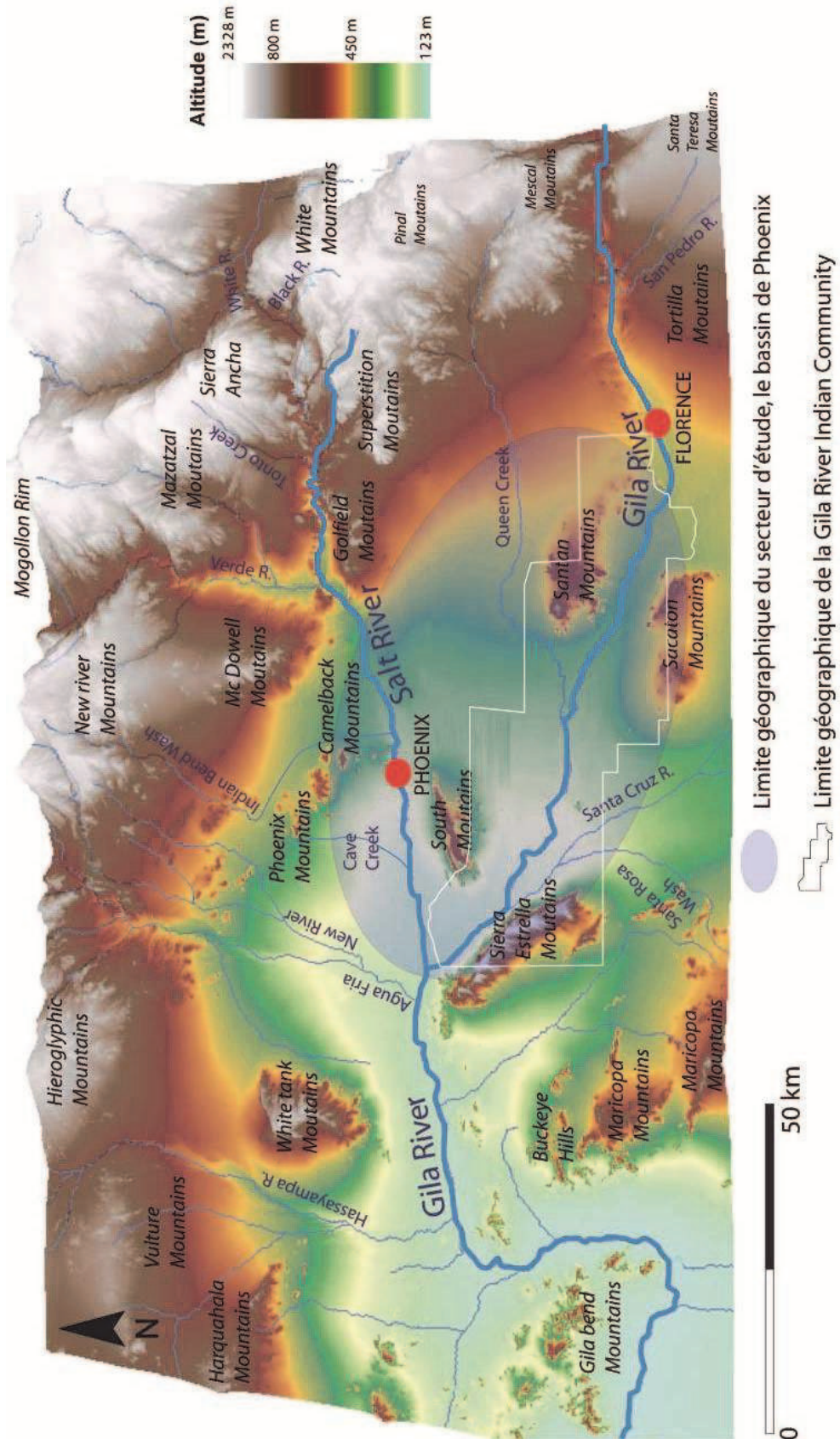


Fig. 5: Système hydrographique et relief dans le bassin de Phoenix

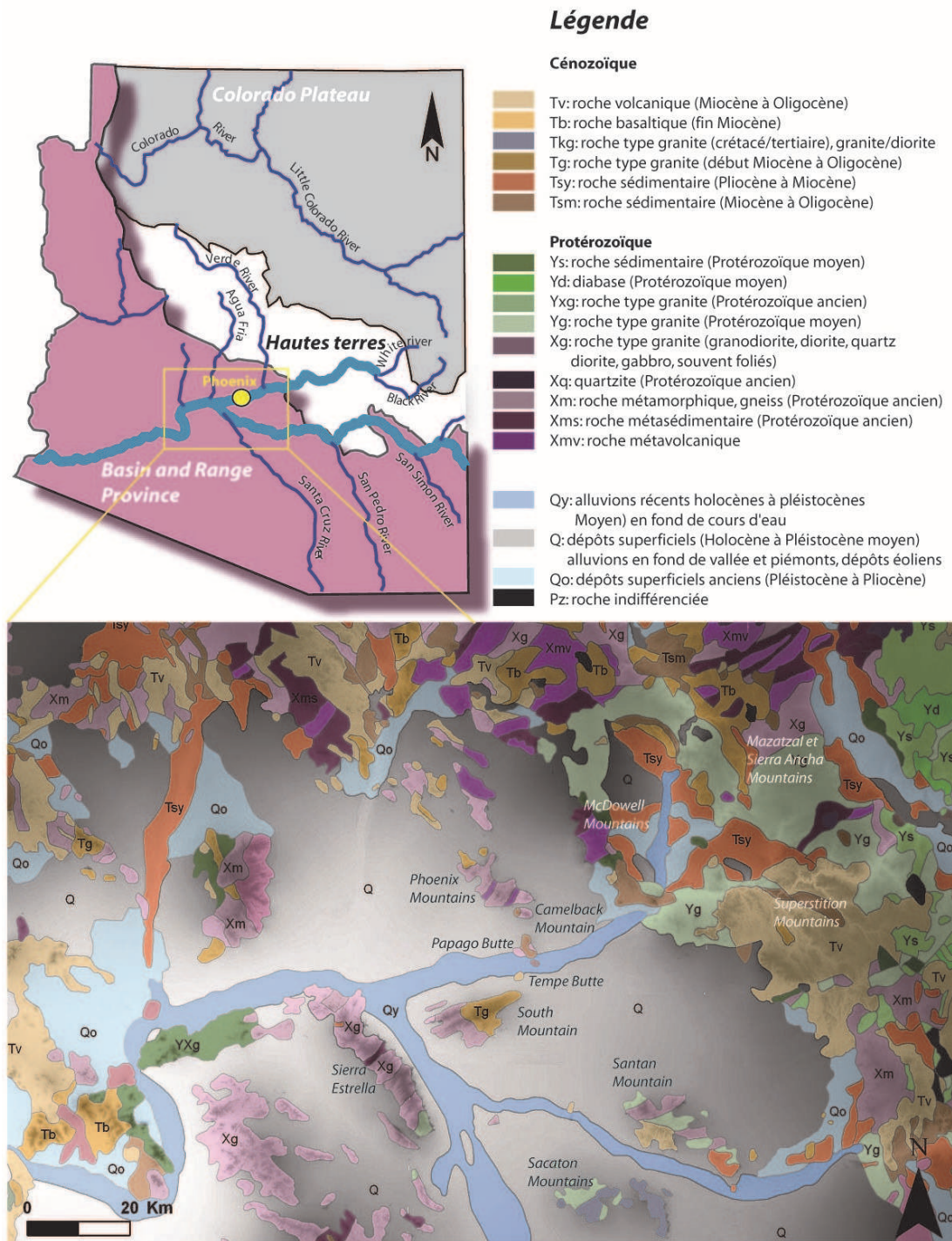


Fig. 6 : Physiographie et géologie du bassin de Phoenix (Reynolds, 1988)

Les roches métamorphiques, gneissiques et schisteuses sont visibles dans les montagnes de la Sierra Estrella, South et Santan Mountains (vallée de la moyenne Gila) et dans certaines parties des Sierra Ancha et Mazatzal Mountains (vallée de la Salt) également composées de granite précambrien et de quartzite (Reynolds et De Witt, 1991 ; Johnston, 2000) (Fig. 6). Des plutons granitiques de la même époque ont été répertoriés sur les Camelback Mountains, Papago Buttes (vallée de la Salt) et Sacaton Moutains (vallée de la moyenne Gila).

Au cours du Paléozoïque et Mésozoïque, des sédiments sont déposés sur le Plateau du Colorado, ainsi que dans la partie sud et ouest de l'Arizona. Des déformations tectoniques postérieures ont complètement érodé ces formations, ce qui explique la superposition directe des dépôts tertiaires sur le socle Protérozoïque.

Le relief actuel a été en grande partie modelé au cours de l'époque tertiaire (Cénozoïque) (Shafiqullah et al., 1980) à la suite de phénomènes de compression entre la Plaque Pacifique ouest et la Plaque nord Américaine au niveau de la faille San Andreas au début du Miocène (20-15 millions d'années) (Atwater, 1970). Au cours de ces événements, la croûte continentale en Arizona s'est alors fortement étendue puis amincie, avec pour résultat la formation de failles normales, de grabens et horsts (Gilbert, 1875; Davis, 1903) et par conséquent une phase d'orogénèse majeure (Damon et Bikerman, 1964).

Ces formations et les plutons associés, poussés à la surface, donnèrent naissance au *metamorphic core complex* (Reynolds et Bartlett, 2002). A cette phase tectonique succède un volcanisme calco-alcalin intense associé à un fort plutonisme dont les traces couvrent une grande partie du sud de l'Arizona (Superstition et Goldfield Mountains, partie de McDowell Mountains, Tempe Butte dans la basse vallée de la Salt). A la fin du Miocène (15-4 Ma), l'érosion des horsts remplit les grabens avec du matériel érodé, notamment des grès et des conglomérats ainsi que des sédiments fins et du sel dans les parties les plus centrales (Reynolds, 2002) donnant naissance à la physiographie actuelle de la *Basin and Range Province*. Ces dépôts sont profonds, souvent supérieurs à 365 m et atteignent parfois 6000 m (Oppenheimer et Sumner, 1980 ; Graph, 1988a) (Fig. 7). Une phase climatique stable (9-4 millions d'années) équilibre l'alternance entre aggradation et incision et conduit à l'érosion des remplissages de vallées (de 5 à 15 m). Aujourd'hui, le bassin est couvert par des graviers, galets, et roches au sein d'une matrice sableuse (Reynold et Bartlett, 2002).

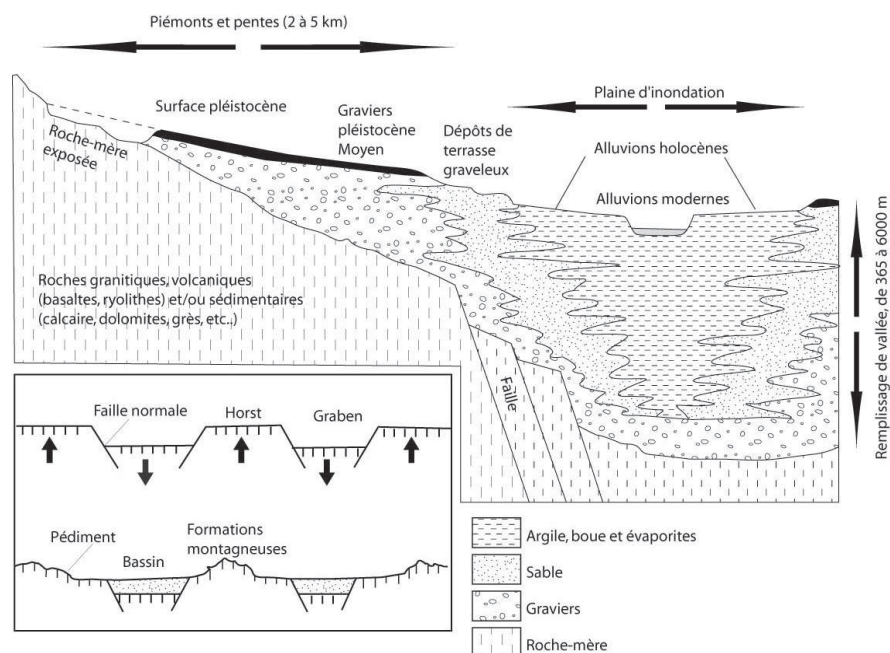


Fig. 7: Section transversale typique d'une vallée appartenant à l'unité physiographique du *Basin and Range* (adapté de Scarborough et Peirce, 1978 et Rahn, 1966)

3. Hydrologie et formations superficielles

3.1. Premières considérations sur les dynamiques fluviales en contexte aride et dans le Bassin de Phoenix

Les cours d'eau en contexte aride sont rarement stables (Stevens, 1975; Graf, 1983, 1988b; Tooth, 1997). En effet, lorsque la décharge est faible, l'eau est concentrée dans une morphologie méandrique, incluse dans un système tressé. Le cours d'eau est sinueux et étroit, transportant du matériel fin, et les crues débordantes n'ont lieu qu'une à deux fois par an (Waters, 1992). Les chercheurs anglophones (Gregory et Park, 1974 ; Richards, 1982) nomment cette configuration particulière un “**channel into channel**” ou un système composé. Lors d'une augmentation de la décharge, les berges de ce cours d'eau à méandres sont érodées et le système évolue vers une morphologie en tresse. La forte mobilité de ces berges et des sédiments associés fragilisent de façon permanente le système. Par conséquent, la relation entre précipitation, décharge, et morphologie fluviale est difficile à appréhender et particulière à chaque bassin versant.

Les comportements de la Salt et de la Gila River sont très différents. La Salt River est caractérisée par des évolutions morphologiques régulières avec une certaine constance dans la largeur du cours d'eau (Graf, 1983). La Gila River, quant à elle, est sujette à des crues et des variations latérales très importantes ainsi que des évolutions d'un système à méandre à un système en tresses très contrastées. Du fait de la forte anthropisation du territoire depuis le siècle dernier et la construction des barrages, la Salt et la Gila River sont aujourd'hui asséchées. En revanche, notre étude prend en considération le fait qu'antérieurement à l'aménagement des rivières et leur dérivation à des fins agricoles, ces dernières coulaient de façon permanente.

3.2. Le Phoenix urbain : la Salt River

3.2.1. Hydrologie de la Salt River

La Salt River prend sa source dans les White Mountains (Black et White River) à l'est de l'Arizona (Fort Apache Indian Reservation) à 3500 m d'altitude (Fig. 5). Elle s'écoule sur 320 km, d'est en ouest, à une altitude moyenne de 275 m, et une pente de 1.2 à 3 m/km. La partie amont du bassin versant est encadrée par le Mogollon Rim au nord, les Mazatzal Mountains à l'ouest, les Superstition Mountains et les White Mountains à l'est (Fig. 5).

La Salt River est alimentée par un affluent principal permanent, la **Verde River**, qui s'écoule avec une orientation nord ouest-sud est sur 225 km, et qui contribue le plus à la décharge de la Salt River avec presque 60% de l'apport d'eau total au cours du mois de janvier (Fuller, 2008) (Fig. 8). La décharge annuelle moyenne mesurée légèrement en aval de la confluence Verde/Salt River (Granite Reef Dam) (latitude de 33°30'51'' et longitude de 111°41'25'' (NAD27)) s'élève à 48 m³.s⁻¹ (USGS water resource, 1992).

La décharge maximale s'élève à $160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en mars (fin de la période hivernale, début du printemps), $0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en juillet, et $29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en août (précipitation estivales de mousson).

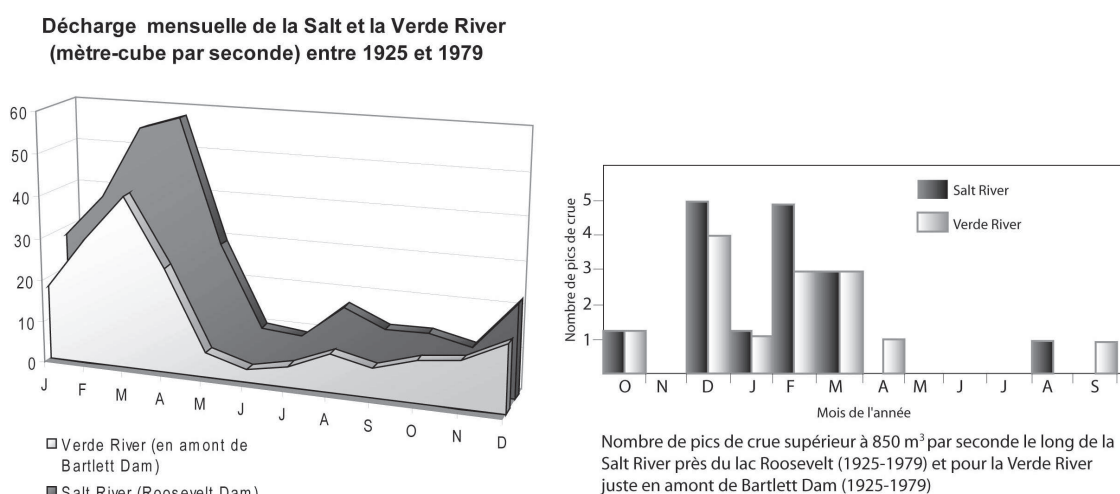


Fig. 8: Décharge des rivières de la Salt et de la Verde avec les pics de crue associés

La Salt River est également alimentée par des affluents secondaires comme le Tonto Creek, l'Agua Fria et la New River (Fig. 5) et deux affluents intermittents, Indian Bend Wash et Cave Creek, aujourd'hui très anthropisés, qui rejoignent la Salt River dans sa moyenne vallée.

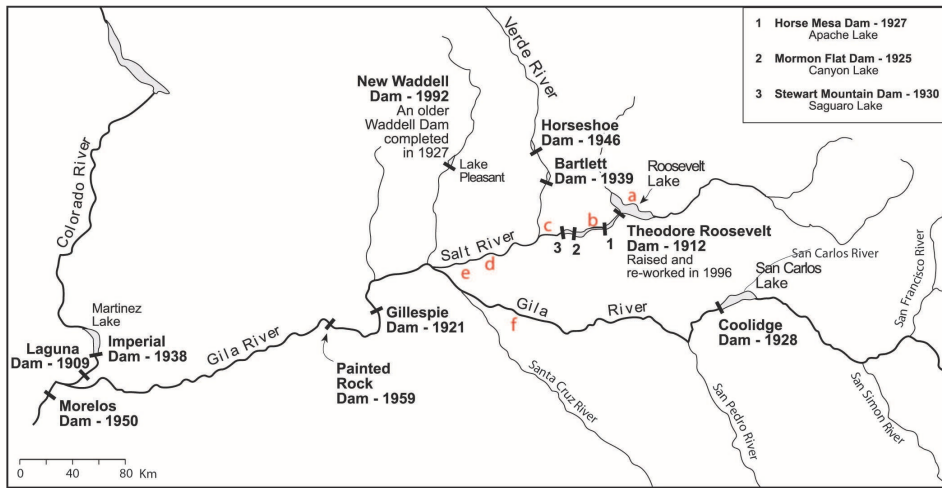
Ces cours d'eau sont asséchés depuis la construction des 6 barrages le long de la Salt et de la Verde (Fig. 9), du moins dans la partie artificialisée de Phoenix, avec des phases de remise en eau temporaire après les pluies (Fig. 9e). Les parties en eau permanentes se situent en amont de la Verde River et en aval à la confluence avec la Gila River (Fig. 9a, b et c).

3.2.2. Niveau des nappes phréatiques et qualité de l'eau

Les remplissages de vallées sont des réservoirs d'eau naturels. En 1913, le niveau de la nappe se situe à moins de 3 m sous la surface, sur plus de 12 % de la basse vallée de la Salt. Jusqu'en 1920, de nombreuses zones sont hydromorphes suite à la dérivation d'eau pour irriguer des champs et des fuites d'eau par les canaux (McDonald et al., 1947). L'augmentation rapide de la population réduit rapidement le niveau des nappes et en 1945, seul 2 % de la basse vallée possède une nappe phréatique située à moins de 3 m de la surface.

Ces eaux sont riches en calcium et carbonates. Dans certaines zones localisées de la partie centrale et occidentale de la vallée, elles sont fortement minéralisées et contiennent du sodium et des chlorites. Les eaux de surface sont considérées bonnes à excellentes pour l'irrigation (McDonald et al., 1947), bien que de plus en plus salées à ce jour (Anning et al., 2005) notamment avec la dérivation des eaux de la Colorado.

Salt River



adapté de B. Trapido-Lurie, Arizona Geographic Alliance, Department of Geography, Arizona State University

Gila River



d- Lac artificiel de Tempe e- Après les pluies, en aval du lac Tempe, 01/09 f- La Gila River complètement asséchée

Fig. 9: Localisation des barrages le long de la Salt et Gila Rivers et paysages associés

3.2.3. Géomorphologie de la Salt River

Les études géomorphologiques effectuées le long de la Salt River sont rares du fait de l’urbanisation et de l’érosion des formations superficielles. Le travail de Péwé est le plus substantiel le long de la Salt River (1978, 1987) et de l’Agua Fria (1976). Il a été complété récemment par les études d’Onken et al. (2004) sur la rive nord de la Salt, au niveau de sa confluence avec la Gila. Quatre terrasses ont été différenciées par leur position topographique et leur teneur en carbonate/caliche, entre Tempe Butte et Granite Reef Dam (Fig. 10). Toutes ces terrasses diminuent en taille et sont enterrées à l’ouest de Tempe. Dans Phoenix, elles ne sont plus reconnaissables à cause de la mise en place de pédiments et de mouvements tectoniques liés à un soulèvement régional Cénozoïque (Péwé, 1978).

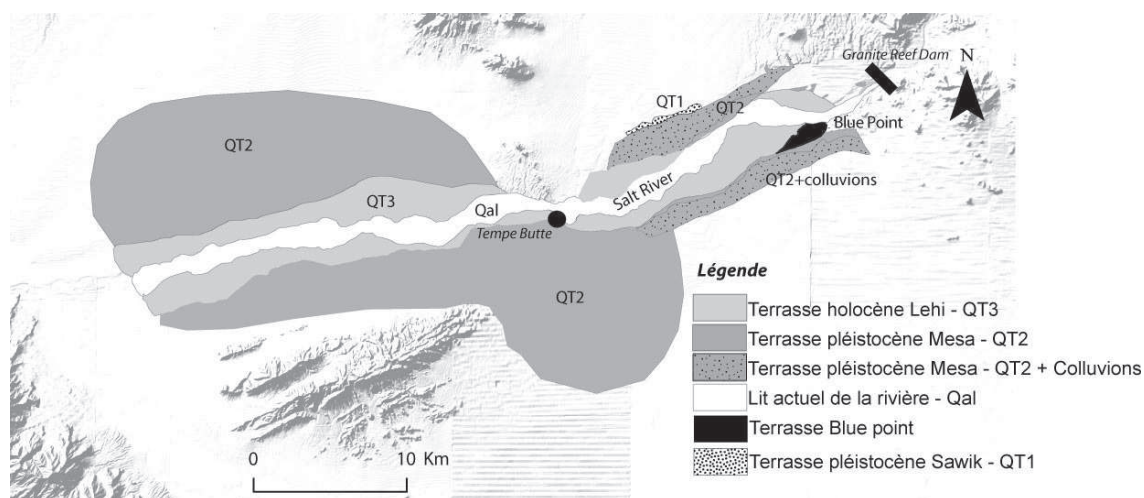


Fig. 10: Carte géomorphologique de la Salt River (adapté de Pewé, 1978)

De la plus récente à la plus ancienne, sont distinguées les terrasses Lehi, Blue Point, Mesa et Sawik. Ces deux dernières se sont mises en place au cours du Pléistocène (Pewé, 1978) et sont morphologiquement très similaires par leur teneur en caliche (environ 10 cm de carbonates autour des graviers). Elles sont le plus souvent recouvertes de cônes alluviaux détritiques composés de galets et rochers. De nombreux sites archéologiques ont été mis au jour sur ces terrasses.

La **terrasse Sawik** s'élève entre 15 et 72 m au dessus du lit actuel de la rivière et la **terrasse Mesa** de 9 à 29 m (Onken et al., 2004).

A l'opposé, les terrasses les plus jeunes, la Blue Point et la Lehi terrasse sont pauvres en caliche. La **terrasse Blue Point** se situe entre les terrasses Lehi et Mesa, de 24 à 3 m au dessus du lit moderne de la rivière, mais son érosion de même que de nombreux dépôts de crues rendent difficile sa visibilité sur le terrain. Les dépôts sont le plus souvent constitués de graviers grossiers entourés par 0.5 cm de caliche indiquant une mise en place probablement au cours du Pléistocène, peut être à l'Holocène. La **terrasse Lehi** s'est mise en place au cours de l'Holocène et se situe entre 1.5 et 6 m au dessus du lit actif de la rivière. Elle est composée de dépôts de débordement (qui se sont déposés jusqu'à la construction du Roosevelt Dam en 1911) peu structurés avec occasionnellement un film de carbonates sur des graviers.

Le travail de Kokalis (1971) a montré que ces terrasses sont riches en matériel érodé provenant de 3 formations géologiques majeures. Sur un total de 6600 galets comptés et étudiés :

- 15.3% sont de type granitique et issus de l'érosion du complexe précambrien
- 36.3% sont de type volcanique et sont composés de basaltes riches en olivine, plagioclases et augite issus des Mont Mac Dowell, Superstition et Goldfield Mountains qui contiennent également des rhyolites et dacites.
- 48.5 % sont de type sédimentaire dont 22.2 % sont des roches orthoquartzitiques et 13.6% de type arkose (Mazatzal Mountains).

L'observation d'alluvions proches de la confluence Verde/Salt River a mis en évidence la prépondérance, dans 52 % des dépôts étudiés, de basalte à olivine, indiquant un important apport de matériel volcanique/basaltique depuis le bassin de la Verde.

3.3. La Gila River Indian Reservation: la Gila River

3.3.1. *Hydrologie de la Gila River*

La Gila River prend sa source à l'ouest du Nouveau Mexique dans la Black Range, à 2000 m d'altitude et s'écoule sur plus de 1044 km jusqu'à sa confluence avec la Colorado River, à l'ouest de l'Arizona. C'est aujourd'hui un système composé en tresses présentant des zones stables très proches de zones instables (Graf, 1988b). La Gila River s'écoule avec une orientation sud est–nord ouest jusqu'à sa confluence avec la Salt. Elle s'assèche en aval de Coolidge Dam (Fig. 9). A l'ouest de Phoenix, elle s'écoule vers le sud-ouest jusqu'à sa confluence avec la Colorado River.

La Gila River possède trois principaux affluents à l'est de l'Arizona qui contribuent pour 25 % de sa décharge annuelle (Huckleberry, 1995) (Fig. 9): les San Francisco, San Simon et San Carlos Rivers, et deux autres affluents plus en aval : les San Pedro et Santa Cruz Rivers. Du fait de la taille du bassin versant, la contribution en eau de chaque affluent varie fortement. La partie est du bassin versant contribue à la décharge de la Gila River par des pluies hivernales et de la neige. A l'opposé, les tributaires situés dans la partie sud de l'état (San Pedro et Santa Cruz) ont un apport de type estival lié à des pluies de mousson.

De façon similaire à la Salt River, la décharge a été mesurée en aval de Coolidge Dam en 1992 (latitude 33°10'10" et longitude 110°31'50", 703 m NGA) (Fig. 9). La décharge annuelle, nettement plus faible que celle de la Salt River, s'élève à 21 m³.s⁻¹, avec un maximum en mars de 46 m³.s⁻¹, un minimum en janvier de 0.48 m³.s⁻¹ et une décharge de 33 m³.s⁻¹ en août (USGS surface water, 1992).

La Gila River, contrairement à la Salt, charrie beaucoup de sédiments de texture fine: « No other stream is known in America which carries such a large volume of debris » (Lippincott, 1900). Forbes, en 1911 a noté que la charge solide de la Gila est estimé à 9.41% du poids, i.e. 0.09 kg à 103 kg de sédiment/m³ d'eau, alors que le long de la Salt River, la charge en sédiment s'élève à 0.95% du poids (0.004-10 kg / m³ d'eau), en lien avec le substrat géologique plus tendre.

3.3.2. *Les nappes phréatiques et la qualité de l'eau*

De sa source au barrage Coolidge, la qualité de l'eau diminue considérablement du fait des retours d'eau d'irrigation et des nombreux dépôts évaporitiques en fond de vallée. Le long de la moyenne vallée de la Gila, peu avant la confluence avec la Salt River, l'eau est riche en métaux lourds, ammonium, bactéries, éléments solides dissous avec une combinaison de calcium et bicarbonate (Arizona Department of Environmental Quality, 1990). Combinée à des débits hydriques faibles, l'eau dans cette zone est considérée de insatisfaisante à mauvaise pour l'irrigation (McDonald et al., 1947).

En aval de sa confluence avec la Salt, la Gila River est fortement polluée (pesticides, nutriments, métal, etc..). Les barrages Gillespie et Painted Rocks (Fig. 9) présentent des concentrations en contaminants élevées (Arizona Department of Environmental Quality, 1990) ayant de fortes conséquences sur la vie aquatique, sauvage mais également sur la santé publique.

Le niveau des nappes phréatiques dans la moyenne vallée de la Gila a fortement baissé dès 1902 du fait du pompage de l'eau pour l'agriculture. En 1903, le niveau des nappes est à moins de 15 m de la surface sur la majeure partie du territoire indien. Leur niveau s'est stabilisé depuis les 25 dernières années et est même remonté de 10 m depuis 1989 dans certaines zones. Cette tendance est favorisée par la diminution du pompage des nappes grâce à la réduction de la superficie cultivée et par la recharge en eau permise par les crues occasionnelles. La profondeur de la nappe s'étend de 30 à 180 m aujourd'hui avec une réserve en eau de $2.7 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$, bien que certaines nappes perchées comme à proximité de Florence (Casa Grande) permettent l'acquisition d'eau à partir de 3 m, et ce jusqu'à 30 m de profondeur.

3.3.3. *Géomorphologie de la Gila River*

Huckleberry (1993, 1995) identifie 4 terrasses pléistocènes sur la moitié amont de la réserve indienne: Target (0), Florence (M1), Bogart (M2) and Stiles (M3) qui convergent près de Coolidge Dam en une terrasse unique appelée M (Tab. 1). Il enregistre également 3 surfaces Holocènes : le lit actif de la rivière, appelé Y2, la terrasse Adamsville Terrace Y1 et une basse terrasse entre Y1 et Y2 appelée Y2/Y1. Waters cartographie en 1996 la totalité du territoire indien et décrit 4 terrasses dans cette zone, de T0 à T4 (Fig. 11, Tab. 1). Ses travaux sont complétés par ceux d'Onken et al. (2004). Une **terrasse pléistocène (T3)**, 8m au dessus du lit actif, composée de dépôts argileux et carbonatés, est couverte de 0,5 à 2 m de sable éolien. Cette terrasse correspond à la terrasse M répertoriée par Huckleberry (Tab. 1). La **terrasse holocène T2** est bien séparée de T3 et T1 et correspond à la surface Y1 décrite par Huckleberry. Les dépôts à la base sont sablo-graveleux et couverts par des alluvions fins sur 3 à 4 m. La **terrasse T1** est bien plus jeune (de 1000 BP aux périodes historiques) et les dépôts sont sableux et limoneux. Séparée de T2 de juste 1m (Onken et al., 2004), cette terrasse correspond à la surface Y2/Y1 décrite par Huckleberry.

T0 correspond au lit actif de la rivière et par conséquent peut être corrélé avec Y2. De nombreux cônes alluviaux pléistocènes et holocènes bordent la plaine alluviale. Ils sont couverts par des graviers et présentent un développement pédologique mineur.

Péwé, au cours de son travail le long de la Salt et la Gila Rivers suggéra que les terrasses de la Salt étaient similaires à celles de la Gila River (Péwé 1978), de l'Agua Fria River (Péwé 1976), de la Verde River (Pope and Péwé 1973) et de Queen Creek (Péwé 1978) (Fig. 5).

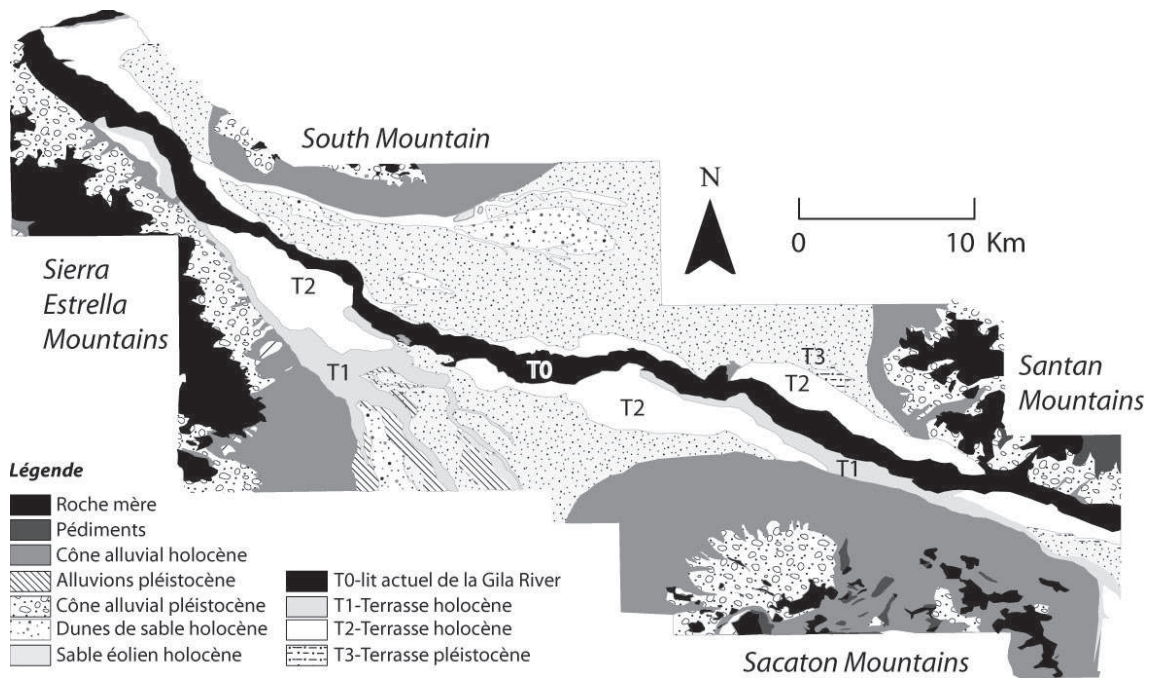


Fig. 11: Géomorphologie de la Gila River Indian Reservation (Waters, 1996)

Huckleberry, 1993, 1995		Waters, 1996		Onken et al., 2004		Age	Type de dépôts
Nom des formations	Hauteur estimée	Nom	Hauteur estimée (/lit actif)	Nom	Hauteur estimée (/lit actif)		
Target (0)	> 8 m	T3	7.5-8 m	T3	10-20 m	Pléistocène	Argile carbonatée+dépôts éoliens
Florence (M1)	> 4 m						
Bogart (M2)	< 3 m						
Stiles (M3)	< 3 m						
Y1 (Adamsville)	< 3 m	T2	5-5.5 m	T2	3-4 m	Holocène	Sables graveleux (4 cm)/alluvions fins laminés à bioturbés, zones humides
Y2/Y1	< 2 m	T1	4m	T1	2 m	1100- 1750 apr. J.-C.	Sables et limons sur T1, limons argileux sur T2
Y2	X	T0	X	T0	X	Actuel	Graviers/Sables

Tab. 1 : Tableau d'équivalence entre les formations identifiées par Waters (1996) et Huckleberry (1993, 1995) dans la moyenne vallée de la Gila et par Onken (2004) à la confluence Salt/Gila

4. Climat

Le climat de l'Arizona est caractérisé par des températures élevées, de fortes précipitations saisonnières, une forte variabilité interannuelle et une forte stabilité à l'échelle décennale (Arizona Dept. Of Water Resources, 2006).

4.1. Régime des pluies

4.1.1. Un régime bimodal

Le bassin de Phoenix est soumis à un régime climatique bimodal. Les précipitations ont lieu de novembre à mars, mais également sous la forme de pluies de mousson de juillet à mi-septembre (Fig. 12a) qui touchent l'Arizona, le Nouveau Mexique et la

Californie. Les précipitations annuelles moyennes fluctuent entre 200 et 300 mm dans la ville de Phoenix (moyenne de 1948 à 2007, Station WSFO AP Western Regional Climate Center, 2008) (Fig. 12b). Pendant la période hivernale (de décembre à mars), les précipitations moyennes mensuelles atteignent 21 mm, comme la période estivale. Aujourd'hui, 75 % des précipitations tombent sous la forme de neige dans la zone des plateaux au nord de l'état, contre 52 % dans les années 60 (Sellers, 1965). Ces précipitations font suite à trois types d'évènements : les orages tropicaux estivaux/automnaux, les orages convectifs estivaux et les orages frontaux hivernaux.

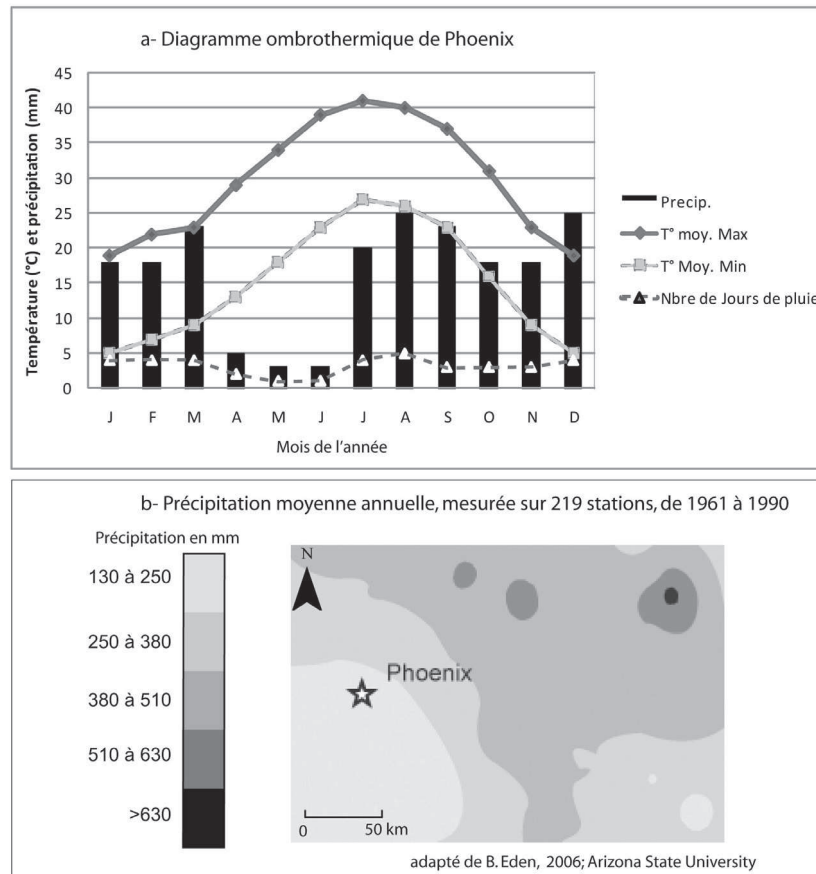


Fig. 12: Diagramme ombrothermique de Phoenix et répartition spatiale des précipitations

4.1.1.1. Orages tropicaux estivaux / automnaux

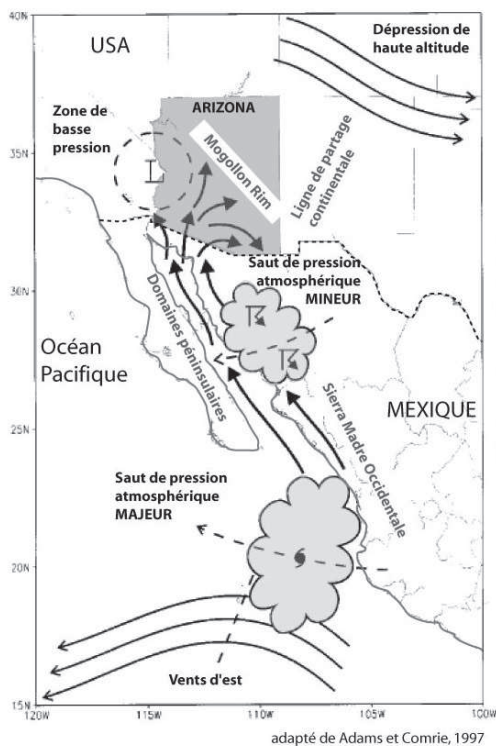
Les orages tropicaux correspondent souvent à des phases terminales d'ouragans formés sur la côte ouest du Mexique et très actifs d'août à septembre (Sellers, 1965). L'état d'Arizona peut s'attendre aux effets directs d'un orage tropical tous les 4 à 5 ans et à ses effets indirects tous les 2 ans (Pytlak, 2002) (fortes crues en 1962, 1967, 1970, 1972, 1976, 1983, 1997) (Flood control district of Maricopa County, 2010). La fréquence de ces orages tropicaux semble réduite au cours des années El Niño car les vents verticaux inhibent la formation des ouragans. Toutefois, lorsque ces orages se forment sur la côte mexicaine, ils se dirigent fréquemment vers le sud-ouest et déversent alors un grand volume d'eau.

4.1.1.1. Orages convectifs estivaux

Pendant de nombreuses années, les chercheurs ont pensé que les pluies associées aux précipitations estivales trouvaient leur origine dans le Golfe du Mexique (Reitan, 1957 ; Jurwitz, 1953 ; Green, 1963 ; Green et Sellers, 1964 ; Hastings et Turner, 1965) mais il est aujourd'hui accepté que les pluies de mousson résultent de l'interaction de masses d'air en provenance de l'Océan Pacifique et du Golf de Californie.

En effet, des masses d'air humide tropicales du Golf de Californie se dirigent grâce à un gradient de pression vers le désert du Sonora où l'air est moins dense et les températures surfaciques élevées. Le nord du Mexique et le Sud-Ouest américain reçoivent alors de l'humidité sous forme d'orages et de rares pluies.

En parallèle, sur la côte californienne et le Baja Californie, une masse d'air de basse altitude pénètre sur le continent au cours de l'été, sous l'effet de gradients thermiques. La Sierra Madre Occidentale limite la circulation est et ouest de cette masse d'air qui stagne en Arizona. Son interaction avec l'air tropical de basse altitude qui provient de la côte californienne donne naissance aux pluies de mousson et aux orages convectifs (Adams et Comrie, 1997) en août et septembre (Fig. 13) (crues en 1951, 1954, 1974, 1979, 1994, 1999, 2000, 2003, 2005, 2006, 2008) (Flood control district of Maricopa County, 2010).



Fonctionnement de la Mousson nord américaine

Les fronts sont associés à des Easterlies qui traversent la partie sud du Golf de Californie. Une masse d'air tropical humide est poussée vers le nord via ce Golf grâce à un gradient de pression atmosphérique. Ce dernier est mis en place grâce au contact entre le Pacifique tropical et les températures très élevées dans le nord du Mexique et l'Arizona. L'un des principaux phénomènes résultant est la formation d'une masse nuageuse au dessus du Golfe de Californie et du détournement des vents au dessus de l'Arizona. L'arrivée simultanée d'air tropical marin de basse pression au dessus du désert du Sonora favorise l'activité convective, et par conséquent les précipitations courtes et intenses.

Fig. 13 : Dynamique de fonctionnement de la mousson nord-américaine

4.1.1.1. Orages frontaux hivernaux

Les précipitations hivernales résultent d'orages frontaux de grande envergure. Des masses d'air froid de haute pression, poussées par les Westerlies (Sellers, 1965) sur la côte ouest des états de l'Oregon et de Washington, sont légèrement entraînées dans le sud vers les grandes plaines, puis se dirigent vers le nord-est, en direction de l'océan

Atlantique. L'effet de ces circulations d'air en Arizona est très faible et seuls quelques nuages et des vents plus intenses sont observés.

En revanche, si les pluies sont déjà importantes dans l'Oregon et l'état de Washington, une zone de basse pression se forme sur la Californie. La masse d'air à haute pression se déplace alors légèrement plus vers le sud et entre sur le continent au nord de la Californie (au lieu de l'Oregon), toujours sous l'effet des Westerlies. Cette dernière est responsable d'orages récurrents de faible amplitude (hebdomadaire) qui traversent l'Arizona.

Finalement, quand cette masse d'air de haute pression est très développée, les zones d'air de basse pression stagnent plus longtemps sur la côte Californienne avant d'entrer sur le continent et les conditions orageuses s'intensifient. Une fois en Arizona, ces masses d'air riches en eau peuvent produire de très fortes pluies.

Relativement rares, avec une fréquence d'une année sur six au cours du dernier siècle, ces pluies sont responsables d'années à très fortes crues (1889, 1890, 1891, 1905, 1919, 1926, 1931, 1941, 1965, 1977-1980, 1993, 2000, 2005, 2010) (Flood control district of Maricopa County, 2010).

4.1.2. *Variabilité spatiale et temporelle des précipitations*

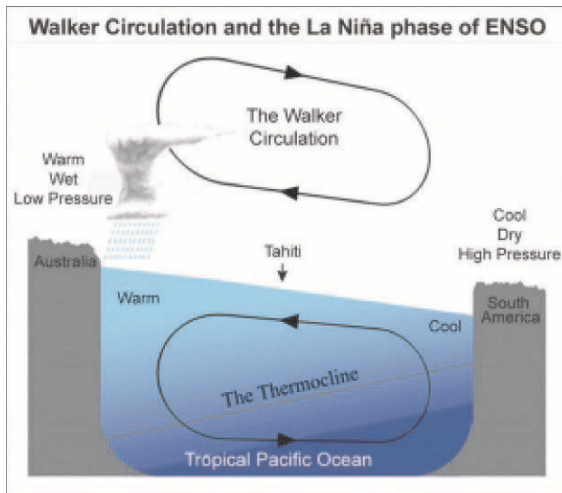
4.1.2.1. **Fonctionnement macrorégional : la circulation de Walker, El Niño et La Niña**

La circulation atmosphérique dans le Pacifique porte le nom de Circulation de Walker. Elle correspond à des variations périodiques de pression et de température entre l'Océan Pacifique et l'Océan Indien (Fig. 14 a). Le phénomène ENSO (El Niño/Southern Oscillation¹), qui regroupe les événements El Niño, La Niña et l'Oscillation Australe (= Circulation de Walker), résulte d'un déplacement de cette circulation atmosphérique entre les mois d'avril et de juin (centré sur décembre-janvier), avec une rythmicité de 3 à 7 ans. Ce phénomène influence fortement le climat sur le continent nord-américain.

En temps normal (Fig. 14 a), les Easterlies chassent les eaux chaudes de la côte de l'Amérique du Sud vers l'ouest (forte pluviométrie en Australie) et favorisent la remontée d'eaux froides (*upwelling*) sur les côtes de l'Equateur, du Chili et du Pérou (années La Niña). En revanche, des Easterlies plus faibles favorisent la circulation des eaux chaudes vers l'ouest et conduisent à de fortes précipitations sur l'Amérique du Sud (années El Niño). Une année El Niño s'exprime par une augmentation des températures moyennes mensuelles de plus de 0.4 °C pendant plus de 5 mois, dans une région définie, au milieu de l'Océan Pacifique (région Niño 3.4).

¹ Le Southern Oscillation Index, ou SOI, estime la différence de pression entre le centre et l'ouest de l'Océan Pacifique (de Tahiti à Darwin, Australie) et exprime ainsi l'impact des événements ENSO sur la circulation atmosphérique. Une SOI négative caractérise les événements El Niño et indique une pression atmosphérique plus faible à Tahiti qu'en Australie.

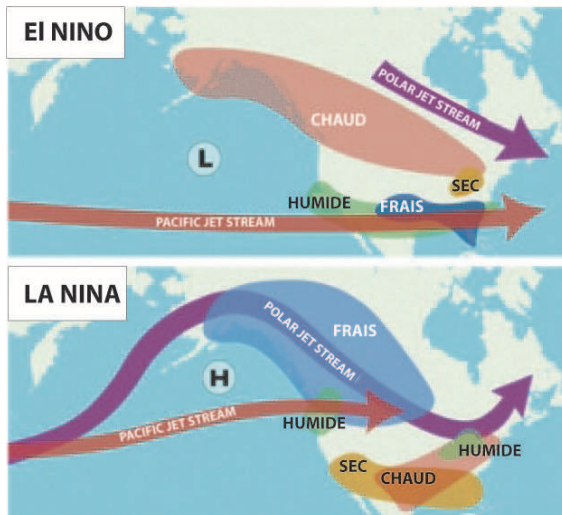
A l'opposé, La Niña apparait lorsque la température de l'eau diminue dans ce même secteur, de plus de 0.4°C (National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Predictions Center, 2011).



a) WALKER CIRCULATION

La rotation de la terre et les Easterlies poussent les eaux chaudes en provenance de l'Amérique du Sud vers l'Australie. Ces eaux chaudes réchauffent l'air, qui s'élève et crée alors une zone de basse pression. L'air se refroidit en montant et circule à nouveau vers l'Amérique du Sud en formant une zone de haute pression. Cette dynamique correspond à la Walker Circulation.

b) EFFET DE L'ENSO EN AMERIQUE DU NORD



adapté de Guido, 2010 (Smithsonian Institution)

EL NINO

Pendant les années El Niño, les eaux chaudes circulent vers l'Amérique du sud. Les masses orageuses qui les accompagnent modifient l'axe de circulation du Pacific Jet Stream, qui présente alors une orientation presque horizontale et circule au nord du Mexique où le contraste de température est le plus prononcé. La zone de basse pression qui se forme alors en Alaska contribue à générer des orages juste à l'ouest de la Californie, où les eaux sont plus chaudes. L'hiver est plus humide (pluie/neige) dans le Sud Ouest (Sheppard et al., 2002).

LA NINA

A l'opposé, au cours des années La Niña, les températures de l'eau sont plus faibles dans la zone centrale et est de l'Océan Pacifique. Cette réduction des T° empêche la circulation du Pacific jet Stream au nord du Mexique, mais favorise son entrée en Alaska dans une zone à haute pression. Le sud-ouest n'est alors pas touché par les orages.

Fig. 14 : Circulation atmosphérique de Walker et dynamique du phénomène ENSO

L'impact de l'ENSO dans le Sud-Ouest américain résulte d'une perturbation dans l'axe de circulation des Westerlies du Pacific Jet Stream (Fig. 14b). Pendant les années El Niño, des conditions humides dominant sur le continent Nord-Américain du fait d'un jet stream plus puissant et plus au sud de son axe traditionnel. Cet effet combiné d'El Niño et de la Southern Oscillation conduit à des orages hivernaux convergents dans le sud-ouest (Kiladis et Diaz, 1989 ; Douglas et Englehart, 1981; Guido, 2010).

Pendant les années La Niña, le Pacific Jet Stream circule plus au nord, apporte de la pluie sur le Midwest et des conditions plus chaudes et sèches sur le sud-ouest (Kiladis et Diaz, 1989). Ces dernières s'expriment par des précipitations estivales en dessous de la moyenne en Arizona et au Nouveau Mexique (Higgins et al., 1999).

Certains chercheurs pensent que les effet de El Niño sont bien plus significatifs que ceux de La Niña (Harrington et al., 1992).

D'autres études (Webb et Betancourt, 1992) prouvent le contraire. Par conséquent, il est difficile à ce jour de relier les précipitations estivales de mousson avec l'un ou l'autre de ces événements (Andrade et Sellers, 1988; Adams et Comrie, 1997).

4.1.2.2. Variation inter et intra-annuelle des précipitations estivales

La plus grande partie des pluies estivales provient d'orages convectifs. Les pluies sont abruptes et brèves, souvent plus intenses en fin d'après-midi et fréquemment associées à des vents et des tempêtes de sable (Sellers, 1965).

La mousson du Sud-Ouest américain est réputée pour avoir une forte variabilité intra-saisonnière sous la forme de périodes d'intense activité orageuse, versus des périodes plus sèches (Hales, 1972 ; Brenner, 1974). Cependant, il n'existe aucun modèle d'uniformité spatiale des précipitations.

4.1.2.3. Variation inter et intra-annuelle des précipitations hivernales

Les orages hivernaux sont dit convergents. Ils sont de faible intensité mais généralement long et spatialement étendus. Les précipitations sont très variables d'années en années mais relativement stables spatialement. Les hivers généralement frais ont une récurrence de 2 à 10 ans, avec un intervalle moyen de 3 à 4 ans entre les événements El Niño (Barry et Chorley, 1998).

Depuis 1970, il y a une recrudescence des événements El Niño relativement à La Niña, avec un ratio de 2/1, en association avec la dominance des pluies hivernales (Trenberth, 1997).

4.1.2.4. Variations séculaires

Au cours du 20^{ème} siècle, l'Arizona a connu une période humide de 1905 à 1930 puis des années plus sèches de 1942 à 1964 (Fig. 15). La sécheresse au cours des années 1950 fut la plus extrême enregistrée dans le Sud-Ouest et les grandes plaines, avec un très fort impact écologique (Swetnam and Betancourt, 1998). Entre 1965-1980, un retour à de conditions hivernales humides liées à une plus grande fréquence des événements El Niño est observé, en parallèle à des étés instables. Depuis cette période, la température moyenne sur 5 ans et la température annuelle ne cessent d'augmenter.

4.2. Température, évaporation et régime des vents

Les températures sont très variables en Arizona. Les températures annuelles moyennes atteignent 22-23 °C (enregistrements entre 1948–2007, Station WSFO AP –Western Regional Climate Center, 2008). Les températures moyennes mensuelles de décembre à mars avoisinent 14 °C. En été, à l'opposé, elles atteignent 32°C (Fig. 12), la période la plus chaude se situant en général entre la dernière semaine de juin et les deux premières semaines de juillet.

Diachroniquement, ces températures (Fig. 15) ont augmenté entre 1870 et 1960 (1 à 2 °C), puis ont chuté entre 1960 et 1970, pour augmenter de façon quasi continue depuis les années 1970 (Jones et al., 1982).

L'évaporation s'élève à 2398 mm par an (moyenne de 1896 à 2005) à Mesa à l'est de Phoenix (376 m d'altitude) et à 2013 mm à Tempe Butte (356 m d'altitude) le long de la Salt (Fig. 16). A Sacaton, dans la Gila River Indian Community, à 391 m d'altitude, elle atteint 2728 mm (Sellers, 1965). Ce déficit hydrique est plus marqué entre janvier et juillet (Fig. 16), peut-être en réponse à des températures hivernales plus chaudes.

Les vents proviennent généralement du sud, sud-est. Dans le bassin de Phoenix, les vents descendent la Salt River la nuit, et remontent la rivière la journée, où ils sont deux à trois fois plus intenses. Les vents matinaux du sud-est sont particulièrement fréquents, avec une moyenne de 5 km par heure (Davis, 1897) et ne dépassent que rarement 13 km par heure (Sellers, 1964). A l'échelle annuelle, les vents les plus sévères se situent à la fin de l'hiver et au début du printemps.

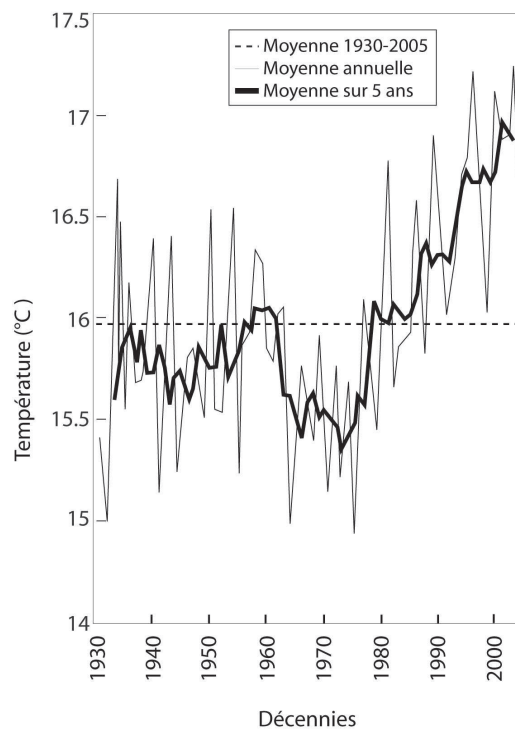


Fig. 15: Evolution historique des T° (Celsius) dans le sud-est de l'Arizona

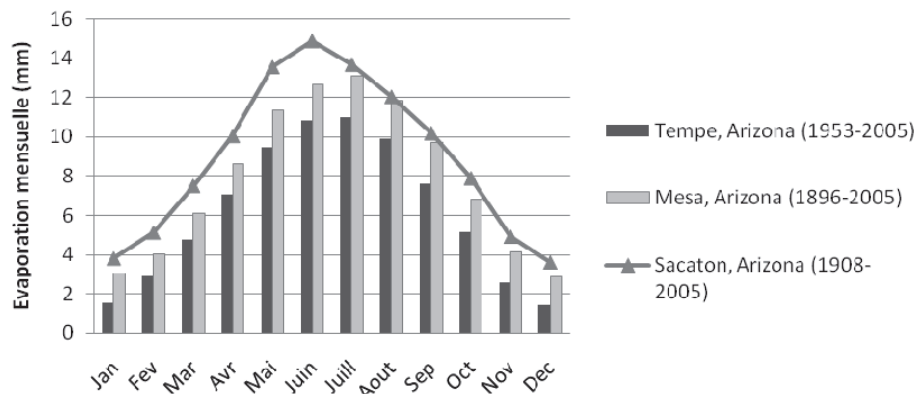


Fig. 16 : Evaporation moyenne mensuelle le long de la Salt River (Tempe et Mesa) et le long de la Gila River (Sacaton). (Données collectées sur le site internet du Western Regional Climate Center / Desert Research Institute).

5. Interrelation entre climat, précipitation, décharge et morphologie fluviale

5.1. Climat et périodicité des crues : sensibilité des bassins versants au régime bimodal

L'augmentation des débits est directement liée à la quantité d'eau mobilisable (ie reçue par le bassin versant), au ruissellement (dépend de la nature et du mode d'exploitation des sols et de la répartition spatio-temporelle de la pluviométrie), au temps de concentration (durée qu'une goutte d'eau met pour parcourir la distance entre l'exutoire du bassin versant et son point le plus éloigné), et à la propagation de l'onde de crue (fonction de la structure du lit et de la vallée, autrement dit de la pente, forme du bassin versant, topographie du lit).

Chaque bassin versant, de par son élévation, ses températures et les précipitations qu'il reçoit, présente des disparités et est plus ou moins sensible à certains types de crues. Il en existe 2 en Arizona (Fig. 17).

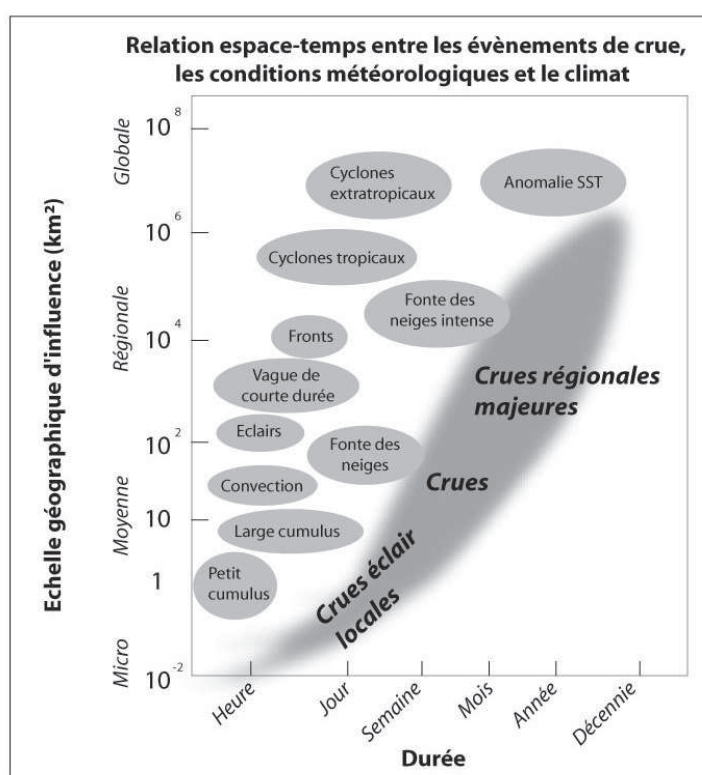


Fig. 17: Lien entre les conditions climatiques et la dynamique fluviale (Hirschboeck, 1988)

- **les crues locales.** Lorsque les précipitations sont intenses, les eaux se concentrent, ruissellent et donnent naissance à des crues torrentielles dites crues éclair à forte capacité érosive. Ces crues sont le plus souvent estivales et observées dans les bassins versant de taille $< 250 \text{ km}^2$. Leur effet cumulé peut avoir un impact important à l'échelle du bassin versant.

Généralement, ces crues éclairs remobilisent du matériel grossier et des éléments flottants sur les piémonts, mais la sédimentation rapide limite le tri des sédiments (McKee et al., 1965; Smith et al., 1993 dans Devillers, 2005). Le bassin de la Gila est sensible à ces dynamiques mais l'interprétation des dépôts observés dans la basse vallée de la Salt est plus ambiguë. Le terme de crue éclair est généralement limité aux cours d'eau éphémères, ce qui n'est pas le cas de la Verde ni de la Salt. Or certains des faciès observés présentent typiquement la signature sédimentaire de crues éclair. Il serait donc plus pertinent de parler de vitesse de sédimentation ou de rapidité d'un événement. L'extrapolation climatique est alors délicate et ne peut être directement reliée à des précipitations estivales.

- **les crues régionales ou inondations de plaine**, lorsque le lit de la rivière sort de son lit mineur, résultent de pluies de faible intensité mais de longue durée. Ces crues, principalement hivernales, sont observées dans des bassins versants de taille supérieure à 250 km². Dans la basse vallée de la Salt, ce sont principalement les signatures sédimentaires de ces crues régionales qui sont observées.

5.1.1. *Un bassin réactif aux pluies hivernales : le bassin de la Salt*

Afin de déterminer l'impact de ces précipitations sur le régime des crues, il s'agit tout d'abord d'estimer le ratio précipitation/décharge. Des études, notamment celles conduites par Smith en 1981, ont testé le ratio entre les décharges annuelles et les précipitations pour la Salt River et son affluent principal, la Verde River, de 1914 à 1979. Quantitativement, le ratio annuel entre décharge et précipitation atteint 0.79, le ratio estival 0.67 et le ratio hivernal 0.81 (Cooperrider et Sykes, 1938), avec un coefficient de variation de 150 %. 47 % des précipitations tombent au cours de l'hiver et cela représente environ 73 % de la décharge totale de la Salt River (Fig. 18).

Ces fortes précipitations hivernales conduisent fréquemment à des décharges printanières élevées qui atteignent $2,8 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{an}$ (Feth et Hem, 1963).

Les bassins de la Salt et de la Verde sont donc sensibles principalement aux précipitations hivernales ce que souligne la Fig. 19. En effet, les pics majeurs de crues enregistrées dans le bassin de la Verde sont liés à l'occurrence d'orages frontaux, exceptés au cours de la période de sécheresse des années 50.

Les fortes crues qui ont lieu au cours de la période hivernale sont déclenchées par cinq facteurs conjugués ou indépendants : des orages frontaux larges et de longue durée, la fonte des neiges après de fortes températures, de fortes pluies sur des dépôts neigeux, la résurgence des eaux souterraines (Burkham, 1970) et l'intense ruissellement qui suit une phase de saturation en eau des sols (Erickson et al., 1983). Ces orages hivernaux circuleraient en direction du nord-est et résulteraient en un pic de décharge le long de la Verde River et une décharge plus faible le long de la Salt River. En effet, les orages circulent généralement d'ouest en est, ce qui correspond à l'orientation générale du bassin versant de la Verde River, mais est en opposition avec le sens d'écoulement de la Salt, ce qui pourrait expliquer ses faibles décharges.

La crue maximale envisagée serait de $1755 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Stewart Mountain Dam le long de la Salt River, et $2746 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Bartlett Dam, le long de la Verde River. A l'opposé, les orages convectifs estivaux, la forte demande en eau au cours de cette période, l'intense évaporation et la recharge des sols en eau limitent les larges crues estivales.

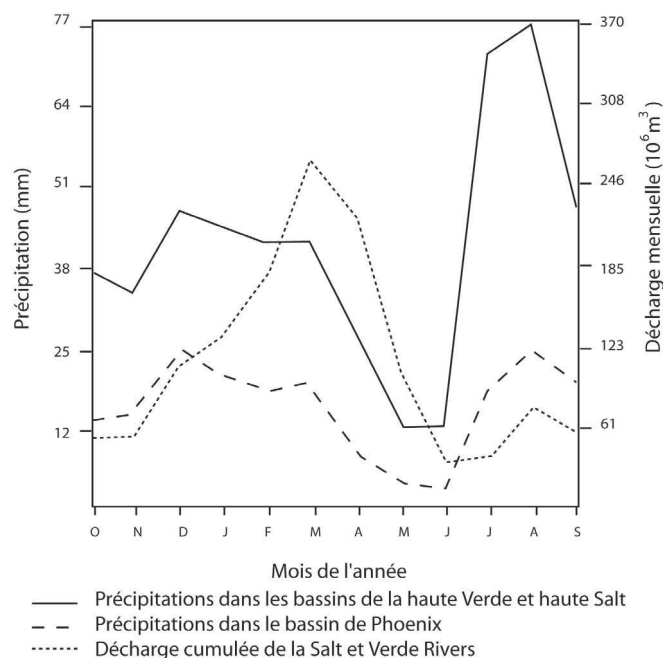


Fig. 18: Lien entre précipitation et décharges annuelles moyennes dans le bassin de la Salt (Smith, 1981)

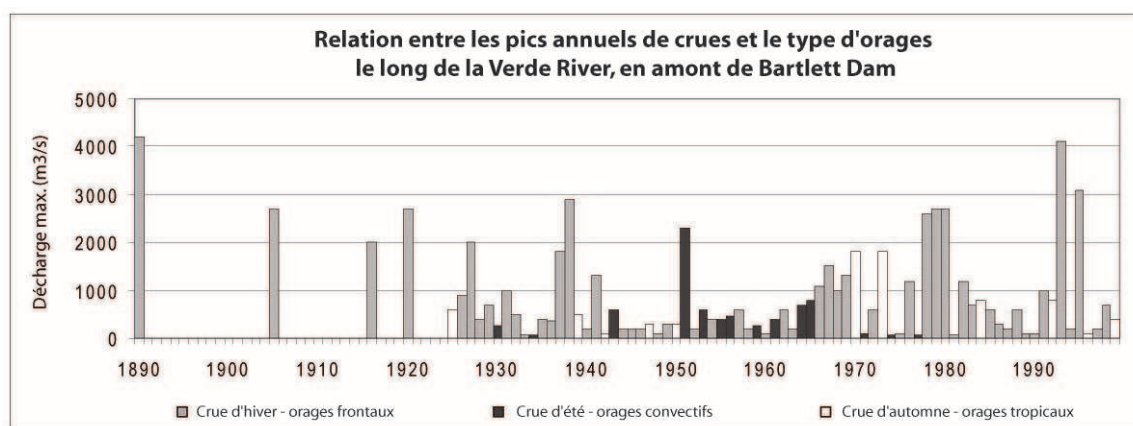


Fig. 19: Lien entre décharge, type de crue et saisonnalité dans le bassin de la Verde (Redmond et al., 2002)

5.1.2. Un bassin sensible aux pluies hivernales et estivales : le bassin de la Gila

Le bassin de la Gila River est plus réactif à l'effet de la mousson que le bassin de la Salt. Ses nombreux affluents (Santa Cruz, San Pedro, etc..) sont sensibles à une forte pluviométrie estivale du fait de leur morphologie, leur faible élévation et leur localisation géographique. La décharge estivale moyenne atteint 32% de la décharge annuelle dans la haute vallée de la Gila (données de 1914 à 1964, Burkham, 1970).

Les précipitations hivernales, bien qu'elles soient faibles, s'expriment par de fortes décharges, suite à la saturation des sols en eau et la diminution de l'évapotranspiration. La concentration en sédiment charriés est pourtant 20% plus faible que celle identifiée en été, ce qui indique une érosion plus marquée au cours des périodes estivales (Burkham, 1972) suite à l'effet de précipitations violentes et localisées (orages de mousson). Ces deux facteurs combinés rendent les crues le long de la Gila moins prédictibles et plus risquées (Graybill, 1989).

5.2. Crues et sécheresses au cours du 20^{ème} siècle : implications climatiques

Les sécheresses sont fréquentes en Arizona et peuvent durer jusqu'à 5 ans, voire plus. Des régressions linéaires multiples ont montré des tendances inhabituelles pour le 20^{ème} siècle. L'analyse de 15 stations météorologiques dans le bassin de la Salt et de la Gila a mis en évidence des conditions humides, associées à une augmentation du nombre de crues, entre 1905 et 1920 (probablement la période la plus humide depuis 1650 : Stockton et Fritts, 1971). 4 années de sécheresse sont enregistrées entre 1932-1936 (intervalle de récurrence de 10-20 ans), 1942-1964 (intervalle de récurrence de 100 ans) (USGS, 2004), 1973-1977 (sécheresse à récurrence de 16-35 ans), et 1999-2004 (USGS, 2004) (Fig. 20). Ces épisodes à faibles débits liquides sont liés à la diminution des précipitations hivernales (Mc Donald 1956, 1960 ; Sellers, 1960 ; Diaz et Quayle, 1980), des températures chaudes et des étés plus frais.

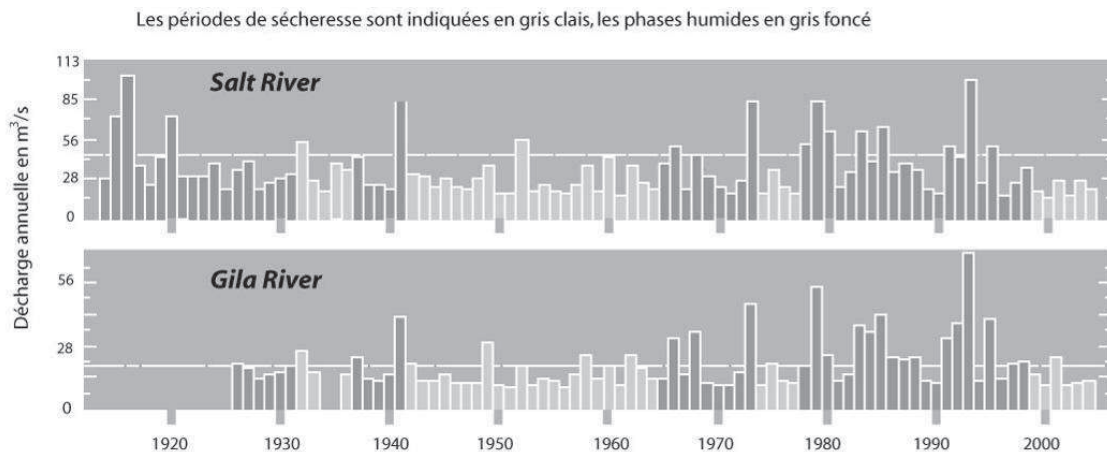


Fig. 20: Décharge mesurée de la Salt et Gila Rivers, de 1913 à 2004 (Phillips et Thomas, 2005)

Les crues sont le résultat de processus climatiques complexes, dont la fréquence et l'intensité sont très variables. Les orages frontaux ont un effet indéniable sur l'intensité des crues dans le bassin de Phoenix, mais ce sont les orages tropicaux qui ont un impact désastreux en termes de dommages et pertes humaines. En effet, sur les 10 événements climatiques les plus importants du 20^{ème} siècle, 3 sont associés à des orages tropicaux (1970, 1972, 1983).

5.3. Adaptation de la dynamique et de la morphologie fluviale aux fortes décharges

Les relations générales entre la décharge, les flux solides et la morphologie fluviale sont bien établies (Langbein, 1949 ; Leopold et Maddock, 1953 ; Ritter, 1978 ; Chorley et al., 1984). Au moins trois facteurs climatiques peuvent influencer le fonctionnement de l'hydrosystème (Dean, 1988) : l'amplitude des précipitations sur le long terme (50 ans) et leur variabilité spatiale et temporelle. Certains facteurs locaux intrinsèques au bassin versant peuvent également jouer et ont un impact sur le niveau des nappes phréatiques et les processus de déposition, notamment sur l'aggradation de la plaine alluviale (Schumm, 1977). Lorsque les précipitations ont une faible variabilité spatiale et temporelle, le niveau des nappes s'élève et l'aggradation est maintenue. Les limites du système peuvent être atteintes, ce qui conduit à une stabilisation du niveau de ces nappes mais la poursuite de l'aggradation. A la suite de longues périodes humides, de fortes sécheresses couplées à une forte variabilité spatiale des précipitations peuvent diminuer le niveau des nappes et résulter en des phases d'incision.

D'autres variables comme la largeur du chenal, sa profondeur, la sinuosité du lit de la rivière, la taille du grain, le profil longitudinal et la vitesse de circulation de l'eau ont également un impact mais sont autorégulés (Bloom, 1978) ou régulés par la décharge et les flux solides. L'impact direct des débits élevés sur la morphologie fluviale est lié à la crue maximale probable, à des événements de forte intensité rapprochés dans le temps (système en tresse avec des barres), et à des périodes de très faible intensité suivies par de forts événements hydrosédimentaires (système en tresse avec des îles). Les adaptations morphologiques seront du type élargissements, variations latérales rapides (Graf, 1983), incision, érosion et aggradation.

Les fortes crues n'ont pas toujours la même réponse morphologique dans notre secteur. Prenons l'exemple de la Gila River. Au cours du dernier siècle, la sinuosité de ce cours d'eau est restée stable (1.18). Après les fortes crues entre 1905 et 1915, la largeur de la Gila River (General Land Office Survey Notes) augmente de presque 200 m (Fig. 21). Elle reste relativement large et atteint même une largeur de 300 m après la crue de 1928 (Huckleberry, 1993). A partir de 1940, la rivière redevient méandrique et les plaines alluviales sont reconquises par les espèces de ripisylves. La période de recouvrement n'a pas dépassé 50 ans, ce qui est relativement rapide (Burkham, 1972). De façon générale, il faut environ 30 ans pour que la Gila River récupère sa configuration initiale (Huckleberry, 1995).

La Gila River ne subit pas de nouveau les effets de fortes crues avant 1983 (Huckleberry, 1994). En 1983, après des pluies estivales intenses, des orages tropicaux en provenance de l'est du Pacifique s'abattent sur l'Arizona, résultant en un fort ruissellement et d'intenses crues pendant 2 jours. Le pic de crue atteint 2830 m³/s mais ne modifie que très faiblement la morphologie de la rivière (Huckleberry, 1994).

En 1993, en revanche, au début de l'hiver, des orages froids récurrents du Pacifique nord déposent de la neige dans la partie amont du bassin versant.

Ils sont suivis par de nombreux orages associés à des températures plus chaudes qui provoquent la fonte de la neige, augmentent le ruissellement et provoquent 17 jours consécutifs de crues. La décharge atteint $2080 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et modifie le style fluvial en un système en tresse.

Le long de la Salt River et de ses tributaires, les effets de la crue de 1993 ont également été observés. Les fortes pluies hivernales suivies par des précipitations à hautes et basses altitudes ont conduit à une érosion majeure de long de la Verde River (House et Hirschboeck, 1997).

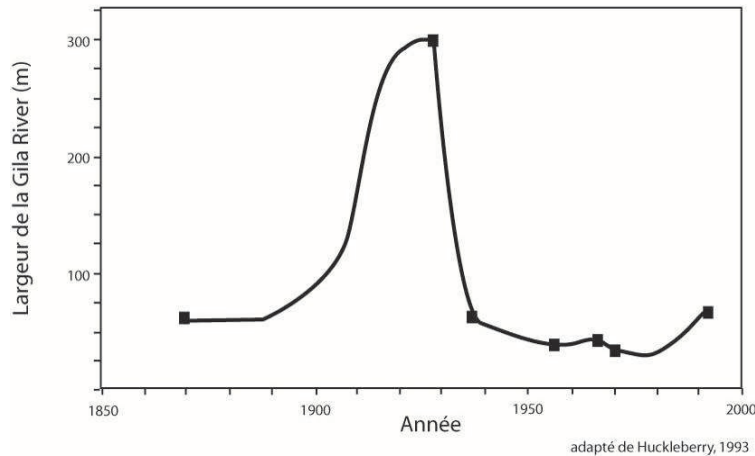


Fig. 21: Largeur moyenne du lit mineur de la Gila River (du Southern Pacific Railroad à Pima Butte)

D'autres travaux, comme ceux de Burkham en 1970, ont montré que les modifications de la morphologie fluviale sont liées à de larges et longues crues et de faibles flux solides, comme celles générées par la fonte des neiges. Ces études, qui complètent de nombreuses travaux conduits le long de la Santa Cruz (affluent de la Gila River) ont permis de créer un premier modèle sur les relations entre le régime des précipitations et leur impact sur la stabilité géomorphologique. Ce modèle met en évidence le lien entre l'intensification des précipitations automnales/hivernales (Andrade et Sellers, 1998) résultant en de fortes décharges et crues (Cayan et Webb, 1992 ; Ely et al., 1993), un régime hydrique variable (évolution morphologique vers un système en tresse) (Andrade et Sellers, 1998 ; Michaelsen, 1989 ; Swetnam et Betancourt, 1990 ; Webb et Betancourt, 1992) et les événements El Niño. A l'opposé, les pluies estivales ne peuvent conduire à ces fortes décharges suivies par des modifications morphologiques. Leur effet se limite à un ruissellement local, une forte érosion associée à une diminution de la capacité d'infiltration et des crues éclairs dans des bassins versants de petite taille. Les cours d'eau y sont incisés et transportent du matériel grossier. Ces zones fragilisées sont ensuite plus sensibles aux longues pluies hivernales (Gerson et Yair, 1975 ; Bull, 1991 ; Etheredge et al., 2004).

Certains précisent que c'est la succession entre un système à précipitation estivale dominante et un système à précipitation hivernale, plus équilibré et lié à des années El Niño, qui pourrait expliquer les évolutions géomorphologiques (Mabry, 2001) comme les incisions (Waters et Haynes, 2001).

Pour vérifier ce modèle et le mettre en application, de nombreuses études doivent être conduites en se basant sur les données historiques, des données précises sur la paléodynamique fluviale et une bonne chronologie. Il sera donc confronté à nos résultats et rediscuté plus tardivement dans ce travail.

5.4. Impact de la végétation

Sur des zones érodées, les précipitations estivales sont souvent dissipées. Des pluies comprises entre 0 et 2.5 cm pénètrent à moins de 10 cm de profondeur et favorisent le ruissellement et les crues (Chorley et al., 1984). En revanche, un couvert végétal permettra une absorption de 15 à 20 cm d'eau dans le sol pour une même pente (Cooperrider et al., 1938). Cette végétation protectrice pousse principalement grâce aux pluies estivales. Les espèces de ripisylve protègent les berges de rivière mais de façon partielle pendant de fortes crues. Certains arbres arrachés peuvent en effet contribuer à augmenter la turbulence et l'érosion.

6. Une région riche et diversifiée

6.1. Couverture végétale naturelle

6.1.1. Répartition géographique et associations végétales

Le paysage végétal dans le bassin de Phoenix est inclus dans la communauté biotique de la forêt sèche basse du bas Sonora (Turner et Brown, 1982) à des élévations inférieures à 750 m (Holland, 1986). Le groupe dominant est celui des buissons à feuilles caduques ou permanentes, généralement de taille comprise entre 0.5 et 2 m et qui donnent une forte impression de paysage ouvert (Burk, 1977). En revanche, les bassins amont de la Salt et de la Verde River appartiennent aux hautes terres d'Arizona qui sont les zones les plus élevées et les plus froides du désert du Sonora (Fig. 22).

6.1.1.1. Dans les bassins amont de la Salt et de la Verde

Les zones de montagnes, entre 1100 et 1700 m, sont couvertes de chaparral, sorte de maquis formé par des buissons et broussailles (Fig. 22). On y trouve du jojoba (*Simmondsia chinensis*), du chêne sclérophile (*Quercus turbinelle*), du prunellier (*Canotia halocantha*), de la bruyère (*Arctostaphylos pungens*), du yucca (*Yucca sp.*) et de l'agave (*Agave sp.*). Plus en altitude, le pin à pignons (*Pinus monophylla*) et le genévrier (*Juniperus sp.*) sont fréquemment rencontrés pour finalement laisser place au pin ponderosa (*Pinus ponderosa*) à des élévations encore plus importantes (Fig. 22 et Fig. 23). Les espèces de ripisylves regroupent le paloverde (*Cercidium floridum*), le chêne (*Quercus spp*), le peuplier oriental (*Populus Fremontii*), le saule (*Salix Gooddingi*), le frêne (*Fraxinus velutina*), et le sycomore (*Platanus wrightii*) généralement en association avec le mesquite (*Prosopis Spp*) (Lowe et Brown, 1973 ; Campbell, 1970) (Fig. 22 et Fig. 23).

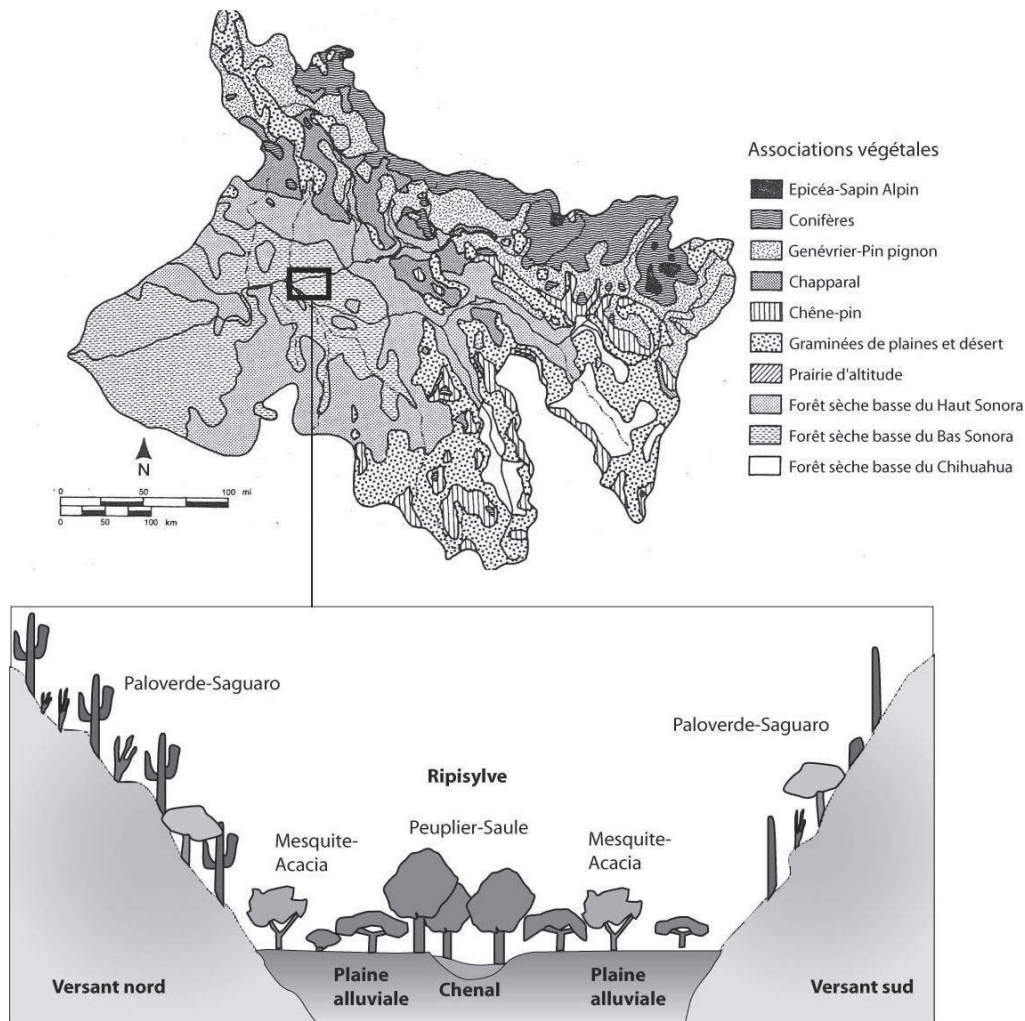


Fig. 22: Couverture végétale et organisation spatiale des principaux groupes végétaux (Graf, 1988 a). La zone agrandie correspond aux principales associations végétales identifiées dans le secteur d'étude.

6.1.1.1. Dans le bassin de la Gila et la basse vallée de la Salt

En aval, dans les basses plaines alluviales, les ligneux sont dispersés et on retrouve principalement le mesquite (*P. velutina*), le peuplier oriental (*Populus fremontii*) et le saule (*Salix goodingii*). Ces trois espèces ne sont visibles à ce jour qu'en amont de Granite Reef Dam, le long de la Salt River. Dans des contextes purement sableux, les plantes dominantes seront le « Burro Bush » (*Hymenoclea monogyra*), « le Desert Broom » (*Baccharis sarothroides*) et le saule du désert (*Chilopsis linearis*). Sous ces formations végétales, poussent des graminées et autres buissons, habitués à la fois aux sols salins, comme l'arroche (*Atriplex polycarpa*) et le suéda (*Sueda torreyana*), ou aux sols sableux comme le baccharis (*Baccharis glutinosa*), l'arroweed (*Tesseria sericea*) ou même de l'ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*).

Sur les cônes alluviaux et les bajadas (ensemble de cônes alluviaux), où les sols sont grossiers, la richesse végétale atteint son maximum (presque 630 espèces répertoriées). La forêt de saguaro (*Carnegie Gigentea*) - paloverde (*Cercidium microphyllum*) est la plus fréquemment rencontrée (Bradley et Deacon, 1967 ; Cheatham et Haller, 1975 ; Burk, 1977 ; Parker et Matyas, 1981 ; Turner et Brown, 1982) (Fig. 22 et Fig. 23).

Le créosote (*Larrea divaricata subsp.*) est également un des arbustes dominant, par sa taille plus que sa densité (Turner et Brown, 1982). On y trouve également de l'acacia (*Acacia Greggii*, *Acacia Constricta*) et de nombreux cactus comme l'ocotillo (*Fouquieria splendens*), le « Teddy Bear Cholla » (*Opuntia bigelovii*) (Fig. 23). De nombreuses graminées couvrent également les cônes alluviaux lorsque les dépôts de surface sont plus fins.

Sur les terrasses, les créosotiers (*Larrea tridentata*) et l'ambrosie (*Ambrosia dumosa*) dominant. Des cactus type Cholla et « cactus raquette » (*Opuntia sp.*), des graminées et autres pérennes sont associés à cette formation.

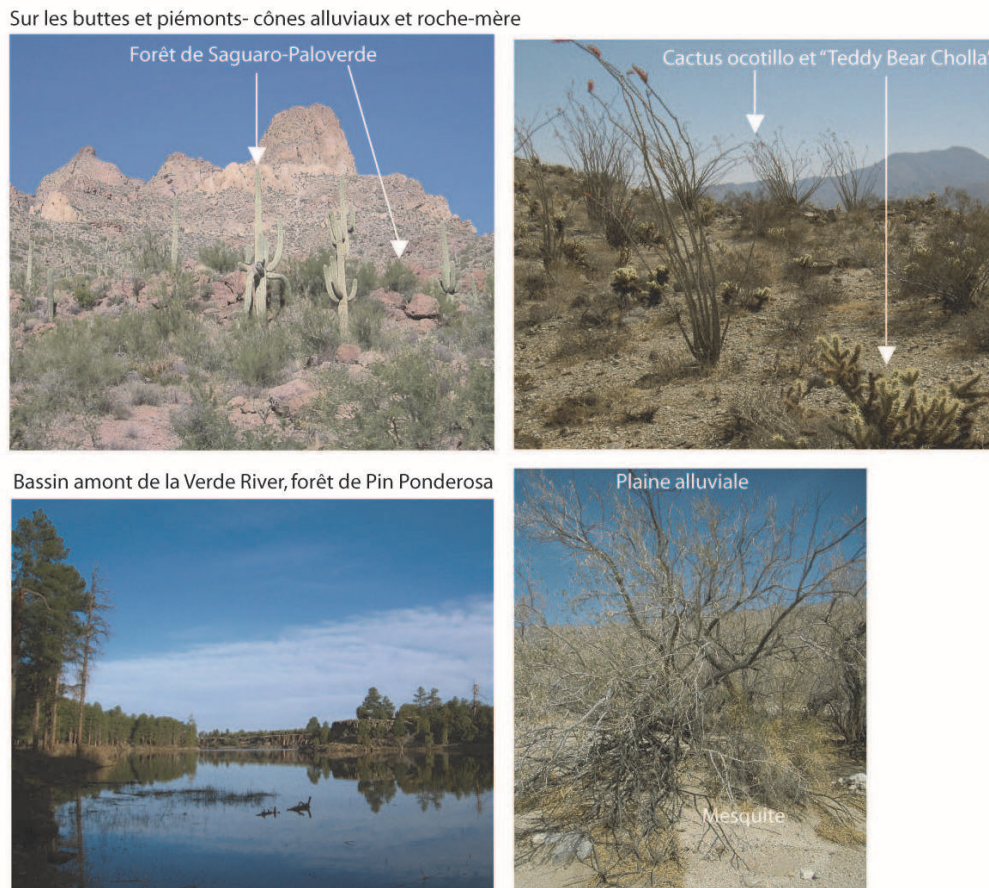


Fig. 23: Couvert végétal et unité géomorphologique

6.1.2. Impact de l'anthropisation sur l'évolution de la végétation au cours du 20^{ème} siècle

L'activité humaine a fortement altéré le paysage naturel depuis 1870 en intégrant des espèces exotiques et exogènes comme le tamaris (Hasse, 1972) et en détruisant les espèces de ripisylves (volontairement ou non). Par ailleurs, l'effet combiné du pâturage, de la compétition végétale, de l'impact des rongeurs, de l'évolution du climat et de la suppression d'espèces pyrophiles ont fortement modifié le paysage végétal. La comparaison de photographies datant du 19^{ème} siècle avec des clichés des années 1960 (Hastings and Turner, 1965) a montré des changements de répartition végétale.

C'est le cas du paloverde (Blue et Foothill) qui occupe aujourd'hui des altitudes plus élevées qu'au cours des périodes historiques. Des travaux plus récents (Briggs et al., 2006) ont quantifié cette évolution de la végétation en centre Arizona (Agua Fria National Monument), toujours en se basant sur des clichés datant de 1940 à 2001. L'augmentation du nombre de ligneux serait conséquente sur des pentes <6% et autour de 1000 m d'altitude. Ces travaux mettent également en évidence la recolonisation des prosopis (mesquite) en réponse à une diminution de l'entretien des paysages par les communautés agricoles indiennes qui contrôlaient son expansion, mais également par une diminution de son utilisation à buts nutritifs (Fredrickson et al, 2006).

6.2. Couverture pédologique

Les sols des régions semi-arides en Arizona ont fait l'objet d'études poussées systématisées. Ces travaux exhaustifs ont même permis d'affecter une classification pédologique aux formations géomorphologiques (ordres et sous-groupes de USDA / Soil Survey Staff, Fig. 24 et Fig. 25). Le Tab. 2 présente les équivalences entre ces termes américains, la classification pédologique internationale (World Reference Base for Soil Resources, 2006) et française (Référentiel Pédologique, 2008).

Position géomorphologique	Gila River				Salt River			
	WRB (2006)	Référentiel Pédologique en France (2008)	Taxonomie des sols (Soil Survey Staff, 1975)	USDA, 1991	WRB (2006)	Référentiel Pédologique en France (2008)	Taxonomie des sols (Soil Survey Staff, 1975)	USDA, 1972
	Ordre		Ordre / Sous-groupe	Série	Ordre		Ordre / Sous-groupe	Série
Plaine alluviale	Fluvisol	Fluvisol	Entisol/ Torrifluent	Gadsen-Brios	Fluvisol	Fluvisol	Entisol/ Torrifluent	Gilman-Estrella-Avondale
	Solonchak	Salisol	Aridisol / Typic Salorthid	Yahana-Indio	/	Salisol	/	/
Bajadas	Cambisol	Calcosol/ Calcarisol, Hz pétrocalcaire entre 0 et 1 m	Aridisol/ Paleorthid	Cavelt	Fluvisol	Fluvisol	Entisol/ Torrifluent	Antho-Valencia
	Calcisol	Calcosol/ Calcarisol, Hz calcaire entre 0 et 1 m	Aridisol/ Calciorthid	Gunsight-Carrizona-Cristobal	Calcisol	Calcosol/Calcarisol: Horizon calcaire entre 0 et 1 m	Aridisol/ Calciorthid	Laveen
	Fluvisol Cambisol	Fluvisol brunifié à calcisol (hz sup décarbonaté)	Aridisol/ Fluventic Camborthid	Denure-Pahaka	Luvisol	Luvisol	Aridisol/ Haplargid	Mohall-Contine
Ancien fond de vallée	Solonetz	Sodisol	Aridisol/ Natrargid	Casa-Grande-Kamoto	/	/	/	/
Terrasses	Solonchak	Salisol	Aridisol/ Natric Camborthid	Shontic-Casa-Grande-Redun	Calcisol	Calcosol/ Calcarisol: Horizon calcaire entre 0 et 1 m	Aridisol/ Calciorthid	Laveen
Roche-mère	Leptosol	Lithosol	Entisol/ Lithic Torriorthent	Quilotosa	/	/	/	/

Rq : Hz=horizon, la définition des calcisol/calcosol/calcarisol dans le référentiel pédologique français est très différente de celle du World Reference Base. Les corrélations proposées ici sont simplifiées.

Tab. 2 : Equivalence entre la taxonomie internationale des sols de la WRB (2006), la classification française (Référentiel pédologique de l'INRA, 2008) et américaine (United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1972, 1975 et 1991).

6.2.1. *Gila River Indian Reservation (Fig. 24)*

Les sols dans les *basses terres alluviales* (pente < 5%) et fonds de chenaux asséchés sont des fluviolsols (formation 1, série Gadsen-Brios). Ils sont profonds, stratifiés, généralement sableux. Sur les plaines plus élevées, avec des pentes qui peuvent atteindre 10%, il est fréquent d'observer des salisols (série Yahana-Indio), qui présentent un horizon salique suite à des phases anciennes d'évaporation et de remontée d'eau par capillarité (la teneur en sel peut atteindre 6%.) Ces sols sont limoneux, profonds et bien drainés. Ces deux formations ne sont pas exploitées à des fins agricoles à cause des risques de crues élevés, des duripans (horizon cimenté) et de la salinité des sols. Ils sont occasionnellement couverts par de la végétation de ripisylve éparse.

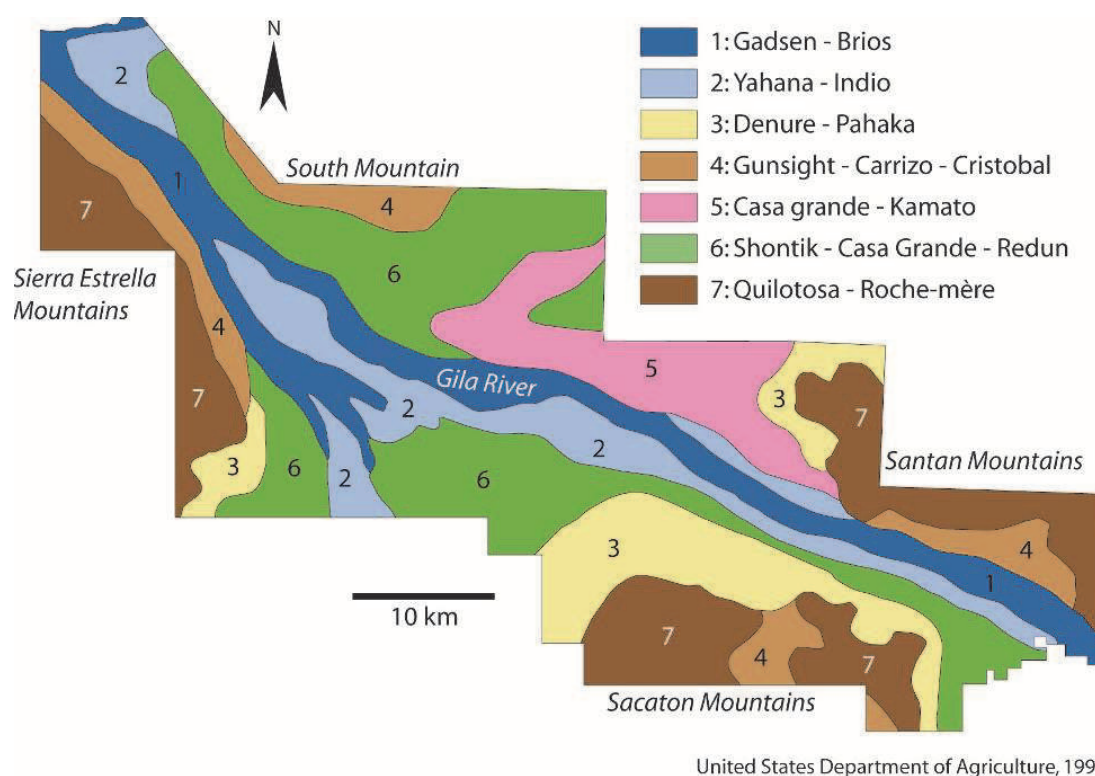


Fig. 24: Carte pédologique de la Gila River Indian Community

Sur les cônes holocènes, on observe principalement des fluviolsols décarbonatés, caractérisés par des stratifications et une faible teneur en matière organique.

Les formations pléistocènes sont caractérisées par une succession de sols carbonatés (Série Cavelt sur les hautes zones, série Gunsight-Carrizon-Cristobal- dépôts graveleux et série Denure-Pahaka : dépôts grossiers et bien drainés, dans les zones les plus basses). Les deux derniers groupes mentionnés sont cultivés ou en zone urbaine. Les sols du groupe Gunsight-Carrizon-Cristobal sont salins et sodiques et ont un horizon calcaire. Les sols du groupe Denure-Pahaka ont une très faible rétention en eau.

Les anciens fonds de vallée (formation 5) sont classés en sodisols. Les pentes sont faibles, les sols profonds, bien drainés et de texture fine. Ils sont argileux, riches en sels et gypse. Ces zones sont généralement cultivées et irriguées mais les sols sont parfois salins, sodiques et sujets à des épisodes de retrait-gonflement.

Sur les *terrasses* composées de sédiments holocènes moyennement grossiers et de dépôts fins pléistocènes de fond de vallée, les sols sont des salisols (formation 6). Ces sols sont irrigués pour la plupart et ont une teneur en sels et sodium élevée.

Le *substrat géologique* correspond à la formation 7. Ces sols y sont peu épais, graveleux et bien drainés. Ils sont classés dans le groupe des lithosols.

6.2.2. *Basse Salt River (Fig. 25)*

Les sols dans la *plaine alluviale* de la Salt (pente comprise entre 0 et 1%) sont des fluvisols (formation 5). Ils présentent une texture limoneuse à argilo-limoneuse. Ils sont profonds, riches en carbonates, bien drainés, cultivés et occasionnellement pâturés. Sur les *cônes alluviaux* à pente douce (0-3%), des sols classés en fluvisols sont observés (formation 2). Ils sont de texture grossière à sableuse et riches en carbonates. Bien drainés, ils sont pour la plupart cultivés et irrigués.

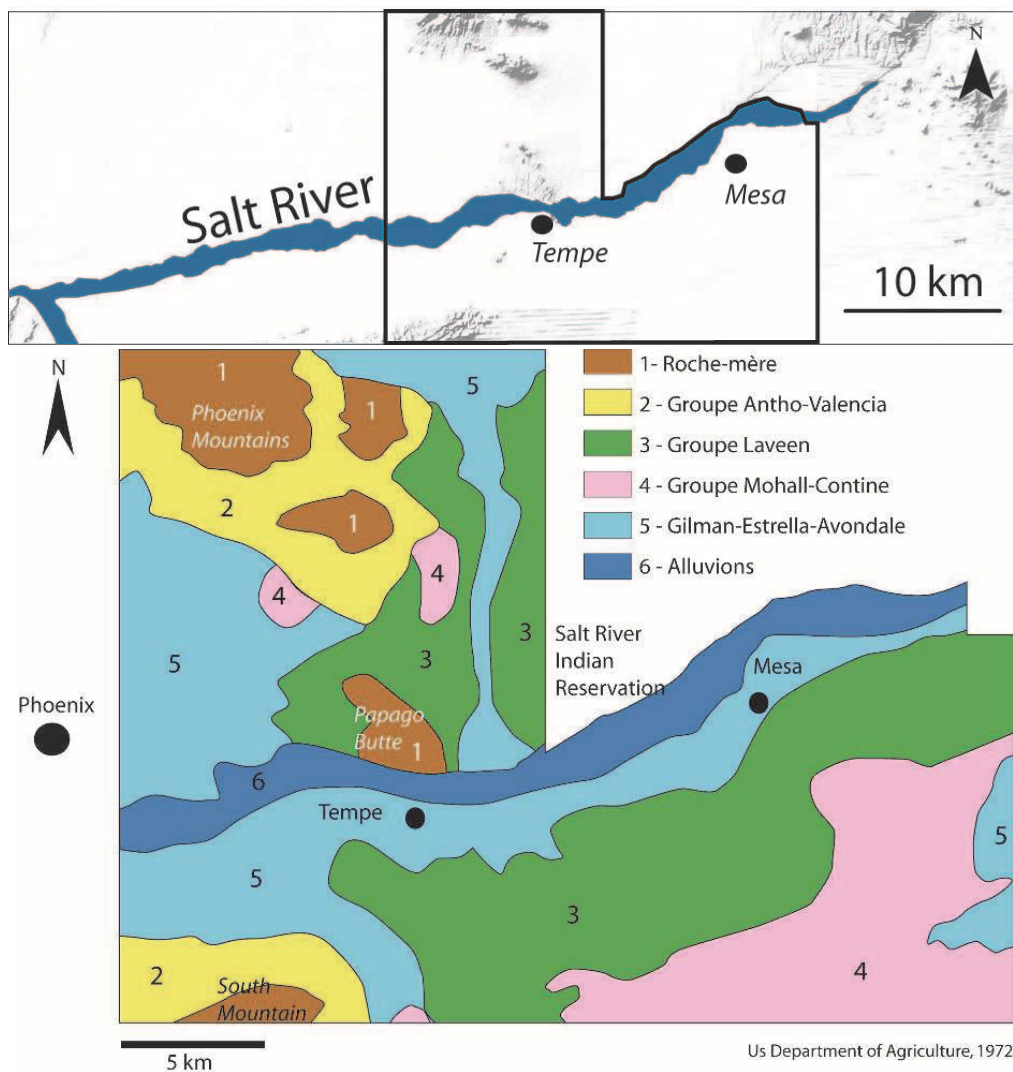


Fig. 25: Carte pédologique de la partie est du comté de Maricopa

Sur *les terrasses et cônes alluviaux pléistocènes* à faible pente (0-3%), des limons argilo-sableux carbonatés sont observés (formation 3, série Laveen). Ils sont profonds et bien drainés, parfois cultivés, mais souvent aménagés en terrain de sport et de golf.

Certains secteurs à pente plus faible (0-1%) sont couverts par des sols de type luvisols (formation 4, série Mohall-Continue). Similairement, ces sols sont bien drainés, profonds et cultivés. Les pluies permettent aussi un peu de pâturage pendant la période hivernale.

Les *fonds de vallées* sont composés de sables graveleux exploités par les carrières de graviers, omniprésentes dans le fond du chenal asséché (formation 6).

Enfin, sur des pentes élevées à substrat granitique, schisteux et andésitique (formation 1), les sols sont peu profonds, composés de graviers à limons graveleux.

7. Conclusion

Les données quantitatives – climatiques, géomorphologiques, hydrologiques - mettent en relief la forte évolution morphologique contemporaine du bassin de Phoenix, ainsi que la variabilité et l'instabilité hydrologique de la Salt et de la Gila, résultat d'un contexte économique associé à un aménagement du territoire peu optimal, mais également d'un climat bimodal marqué par la mousson nord-américaine et les évènements El Niño. La richesse de l'environnement étudié, tant au niveau de sa couverture végétale que pédologique, a favorisé son exploitation massive voire sa surexploitation au cours du dernier siècle.

CHAPITRE 2

Contexte socio-environnemental de la période Historique à Préhistorique : état de la question

1. Introduction	68
2. Evolution au cours de la période Historique : de la colonisation à la formation de l'Etat d'Arizona en 1912	68
2.1. De l'occupation militaire à la colonisation massive le long de la Salt River (2 nd e moitié du 19 ^{ème} siècle)	68
2.2. L'évolution historique du bassin de la Gila : les missionnaires et les Akimel O'Odham	70
3. Occupation préhistorique du territoire. Données archéologiques et paléoenvironnementales du 1^{er} au 16^{ème} s. apr. J.-C.	71
3.1. Données archéologiques et évolution culturelle des Hohokam	71
3.2. Evolution de l'environnement au cours des deux derniers millénaires	87
4. Conclusion	92

1. Introduction

L'occupation et la gestion du territoire préalable à l'arrivée massive des colons au 20^{ème} siècle est souvent considérée comme analogue aux conditions préhistoriques et sert de référentiel climatique et agricole. En effet, les agriculteurs ont fait face aux mêmes contraintes environnementales dans un environnement peu anthropisé (Ackerly, 1982, 1991 ; Howard, 1990). Ils ont cultivé sur les terrasses et les plaines alluviales, construit des canaux d'irrigation en terre et des barrages de dérivation, ont dû faire face à la forte variabilité hydrologique et à l'augmentation progressive de leur propre demande en eau, et par conséquent aux conflits et à la nécessité d'une organisation sociale adaptée. Mais la tâche leur était facilitée par les outils, chevaux et canaux préhistoriques préexistants qu'il ne fallait que nettoyer (Hackbarth, 1992). Malgré ces différences, l'évolution de l'hydrosystème et les adaptations associées, de même que l'impact de l'anthropisation du bassin versant, peuvent nous aider à comprendre l'agro/hydrosystème Hohokam. Dans la section ci-dessous seront présentés succinctement l'histoire de cette colonisation, l'évolution des ressources en eau, et la gestion du territoire. Les données précises relatives à cette période seront exploitées ultérieurement pour la construction des référentiels.

2. Evolution au cours de la période Historique : de la colonisation à la formation de l'Etat d'Arizona en 1912

2.1. De l'occupation militaire à la colonisation massive le long de la Salt River (2^{nde} moitié du 19^{ème} siècle)

2.1.1. Une occupation militaire puis agricole

Les premières occupations pionnières en Arizona remontent à la guerre civile. Deux objectifs : exploiter sa richesse en minerais et limiter l'expansion des confédérés vers l'ouest. La main mise du territoire par l'armée et la construction de forts, notamment le fort Mac Dowell en aval de la Verde River en 1865, facilita la protection du territoire contre les Apaches. Or ces troupes, de même que les mineurs, avaient besoin de vivres, pour eux-mêmes et leurs chevaux. Ceci fut à l'origine de l'installation d'agriculteurs le long de la Salt River et de la réhabilitation des canaux d'irrigation. Le premier à remettre le système en route fut Jack Swilling (Mawn, 1977) en 1867, grâce à la création de la Swilling Irrigating and Canal Compagny. A l'arrivée des premières récoltes en mars 1868, des canaux supplémentaires furent construits. En 1872, 9 canaux d'irrigation principaux étaient actifs et 3300 ha étaient déjà cultivés en orge, blé, alfalfa, maïs et légumes (SRP, 1979), chaque agriculteur irrigant presque 14 ha de terres. L'habitat était très dispersé le long des canaux, jusqu'à ce que ces communautés décident de créer un centre économique et commercial, Phoenix, en honneur aux ruines indiennes dans la vallée.

La ville fut implantée sur une zone topographique élevée afin de se protéger des crues et s'installer à une certaine distance des « forêts » de mesquite, en très grand nombre dans la plaine alluviale (Luckingham, 1989). Au sein de ce système peu organisé, le conflit d'eau était très présent : les vols d'eau, les dérivations illégales et violence étaient coutumes. Pendant les périodes de maintenance, chaque agriculteur était équipé d'armes à feu (SRP, nd).

2.1.2. Une rapide surpopulation

En 1877, 83 membres de l'Eglise de Jésus Christ s'installèrent à Mesa, en amont de Phoenix. Ces mormons curèrent de nombreux canaux préhistoriques et en construisirent rapidement de nouveaux (Mc Clintock, 1921) ainsi que 15 barrages. A la signature du Desert Land Act en 1877, qui permettait aux agriculteurs d'acquérir 260 ha de terre et de payer de faibles taxes gouvernementales, de nombreux colons s'implantèrent dans la vallée. Cette immigration massive inquiéta rapidement les agriculteurs déjà installés. En effet, en 1878, le besoin en eau dépassait déjà de 5.5 fois la décharge annuelle de la rivière (Zarbin, 1997). Dès 1880, la Verde et la Salt River n'apportaient de l'eau en quantité qu'une année sur trois. 40500 ha étaient alors cultivés et de nouvelles parcelles étaient créées quotidiennement en éclaircissant la végétation (SRP, 1979).

2.1.3. Des communautés agricoles en proie aux contraintes environnementales

En plus du manque d'eau, les agriculteurs de la Salt River s'aperçurent bien vite des aléas climatiques et hydrologiques. Plus que les années à faible décharge, ce sont les crues saisonnières détruisant les vannes d'entrées, les barrages et colmatant les canaux, qui représentaient une véritable contrainte. Des crues de 230 à 340 m³.s⁻¹, relativement fréquentes, étaient suffisantes pour détruire une grande partie de ces constructions. La crue centennale de 1891 (8500 m³.s⁻¹), la plus forte jamais enregistrée dans la basse vallée de la Salt, détruisit de nombreuses infrastructures et habitations.

Une période de sécheresse entre 1891 et 1905, la pire depuis 600 ans (Hackenberg, 1983), dont les effets ont été intensifiés par des besoins grandissants en eau, succède à cette crue majeure et fragilise d'autant plus le système agraire. L'exploitation de la vallée décline. En 1896, 51 600 ha étaient cultivés, en 1905, il n'en restait plus que 40 000 (Luckingham, 1989). Au cours de cette période, les fermes en amont survivaient bien mieux que les fermes en aval (Strong, 1945) car elles dérivait l'eau avant les autres pour irriguer leur champ. De nombreuses familles migrèrent alors vers des zones plus clémentes (SRP, nd). La sécheresse signait-elle le déclin de ces communautés ? La tension était telle que des meurtres sont attestés (Strong, 1945). Cette période de sécheresse évolue soudainement entre 1905 et 1911.

Les conditions humides et les fortes décharges de 1905 à 1906 conduisent à des crues intenses, détruisent un certain nombre de canaux et ponts, et repoussent la construction des barrages, dont le premier est inauguré seulement en 1911.

Ces conditions contrastées poussent les premiers colons à créer la Salt River Valley User's Association en 1903 et à demander un prêt financier au gouvernement pour moderniser la gestion de l'eau afin de construire des barrages et des canaux d'irrigation. Le National Irrigation Act, signé en 1902, leur permet de collecter des fonds gouvernementaux à usage public. En 1903, le gouvernement fédéral prit en main la gestion de l'eau, décidant rapidement de la construction de barrages, 6 entre 1911 et 1946, par l'intermédiaire d'un organisme semi-public, le Salt River Project qui intègre alors la Salt River Valley User's Association. Cette association entre le gouvernement et les entreprises privées orienta rapidement la politique écologique du nouvel Etat.

2.2. L'évolution historique du bassin de la Gila : les missionnaires et les Akimel O'Odham

2.2.1. Le temps des missionnaires

L'Arizona fut exploré pour la première fois au cours du 16^{ème} siècle. En se reposant sur les écrits des missionnaires espagnols, il semblerait que des groupes de langue uto-aztèque étaient établis le long de la Santa Cruz (Pima), de la Gila (Gileño), de la San Pedro (Sobaipuri) (Salmerón, 1621-1626 dans Milich, 1966 ; Bolton, 1948 ; Di Peso, 1953). Ces groupes se sont réorganisés en Akimel O'odham (Pima ou hommes des rivières), Tohono O'odham (Papago ou hommes des déserts) et Pee-Posh (Maricopa) au cours des périodes modernes (Shaul et Hill, 1998 ; Wilson, 1999) mais leurs différences sont purement géographique (Fontana, 1983) car ils appartiennent à une même nation Pima. Leur appellation repose sur le fait qu'un des groupes cultivait en bord de rivière et l'autre sur les cônes alluviaux. Lors des premières visites du père Kino en 1694, les Akimel O'Odham étaient installés le long de la Gila et de ses affluents. Leurs villages (ou *rancheria*) représentaient une unité de défense et de travail commun (Hackenberg, 1974). Ils étaient composés de 200 à 600 habitants (environ 50 foyers) (Ezell, 1961), de champs, canaux, ainsi qu'un cimetière qui servait de frontière géographique. Chaque habitation était composée de 2 à 4 familles, avec de 3 à 5 personnes par famille (Doelle, 1981 ; Wilson, 1999). Un ensemble de 4 villages définissait un district. Ces villages isolés étaient implantés dans des zones à forte densité de ligneux et buissons (Font, 1780 dans Bolton, 1930) propices aux attaques et raid ennemis apaches. Ces derniers s'intensifient au cours du 18^{ème} siècle. En réponse, les villages s'agrègent, se rapprochent les uns des autres et s'éloignent des berges de la Gila pour s'installer sur les terrasses élevées, plus stratégiques et propices à la défense, à environ 1.5 à 3 km du cours d'eau. Des murs sont construits autour des villages pour se protéger des ennemis.

2.2.2. Le temps de la colonisation massive

A partir de 1850, l'histoire des Akimel O'Odham est marquée par un déclin culturel lié à : 1) La forte activité militaire le long de la Salt River, qui confina les Apaches dans des réserves, perturbe l'organisation sociale et géographique des Pimas, fondée sur l'appréhension de raids ennemis.

2) Des conditions géomorphologiques extrêmes avec des crues récurrentes (1868), qui détruisent des villages et des systèmes d'irrigation, conduisent à une incision du cours d'eau principal et des tributaires (Bryan, 1920). Suite à la sécheresse entre 1891 et 1905, l'organisation de l'habitat évolue avec de fortes migrations vers la Salt River, la création de la Salt River Pima Maricopa Indian Community, et l'implantation des villages dans les plaines alluviales (Southworth, 1919). En parallèle, les techniques d'exploitation du territoire se diversifient. Plus de 40 500 ha de mesquite sont coupés et vendus afin d'alimenter les moulins en bois et permettre aux communautés indiennes de subvenir à leur besoins alimentaires. Les Akimel O'Odham cultivent les basses terres alcalines et adaptent leurs techniques agraires en dérivant les eaux de ruissellement sur les cônes détritiques et en cultivant leur partie distale (Fish et Fish, 1992 ; Nabhan, 1986). En 1902, des puits sont creusés afin d'y prélever l'eau d'irrigation mais ces derniers se salinisent progressivement. Dès lors, seules les résurgences d'eau au centre et au nord ouest de la réserve ainsi qu'une *cienega* (zone humide) dans la partie centrale peuvent être exploitées.

Cette adaptation à faible coût a permis de lutter contre les événements hydrologiques à haute fréquence. En revanche, les événements catastrophiques à faible fréquence (élargissement, incision) ont conduit à des épisodes de migration, de réorganisation sociale, de déprise agricole associée à la conquête de nouvelles terres et des conflits d'ordre foncier (Spier, 1933).

3) La construction de la ligne ferroviaire Southern Pacific en 1879 qui a pour terminus les Sacaton Mountains. Elle favorise l'immigration et l'anthropisation du territoire (Bryan, 1920). Les colons, en s'installant le long de la Gila River, occupèrent presque chaque parcelle proche d'un plan d'eau. Cette eau fut progressivement dérivée à des fins agricoles et au détriment des cultures agricoles Akimel O'Odham (Pimas) plus en aval (Howard, 1987).

3. Occupation préhistorique du territoire. Données archéologiques et paléoenvironnementales du 1^{er} au 16^{ème} s. apr. J.-C.

3.1. Données archéologiques et évolution culturelle des Hohokam

3.1.1. Recherche antérieure, données actuelles et préservation des sites

3.1.1.1. Une recherche qui commence dès l'arrivée des colons au 19^{ème} siècle

Les premières recherches destinées à comprendre l'occupation Hohokam débutent dès les années 1880. Frank Hamilton Cushing et Frederick Web Hodge, en 1887, donnent de précieuses informations sur des sites archéologiques primordiaux le long de la Salt River : Los Muertos, Los Hornos, Las Acequias et Los Guanacos (Fig. 26).

Ces recherches se poursuivent au cours du 20^{ème} siècle grâce notamment aux travaux de Mindeleff (1896, 1897), Fewkes (1892, 1907, 1912), Pinkley (1926), Gladwin (1928), Schmidt (1928) et Hastings (1934) à Casa Grande, un des sites archéologiques majeur situé en amont de la Gila River Indian Community et transformé aujourd'hui en musée. Grâce aux travaux de Schmidt (1928) sur ce site, les premières chronologies d'occupation sont mises en place. La fouille du village de Snaketown dans la Gila River Indian Reservation par Gladwin en 1933 (Fig. 26), financée par une fondation privée, permet également de compléter cette chronologie.

Les fouilles archéologiques dans le bassin de Phoenix se poursuivent dans les années 30 grâce à des financements par les grands programmes du New Deal (Schroeder, 1940 ; Halseth, 1936 ; Hayden, 1945 ; 1957).

Puis dès les années 60, les fouilles universitaires financées par le National Science Foundation et l'Arizona State University se mettent en place : la Ciudad de la Mesa Grande à l'est de Phoenix (Fig. 26) (Wilcox, 1987), le site de Fitch (Pailes, 1963), et Las Canopas (Plog, 1980 ; Gasser, 1978) dans le centre de Phoenix sont fouillés.

Dès les années 70 et 80, ces programmes sont suivis par des fouilles préventives notamment dans la basse vallée de la Salt, qui complètent voire multiplient les données existantes et disponibles. Les perspectives de recherches sont plus précises, se focalisant ainsi sur le système d'occupation pris dans son ensemble, en essayant de comprendre l'organisation du territoire, la répartition spatiale intrasite de l'habitat, la structuration des communautés au sein des villages, mais également la gestion du territoire dans les zones périphériques qui définissent la zone d'influence Hohokam (Wilcox et al., 1981 ; Howard, 1985 ; Sires, 1984 ; Henderson, 1987 a et b ; Ciolek-Torrello et Wilcox, 1988 ; Doyel et Elson, 1985 ; Ferg et al., 1984 ; Wood, 1985). A ce jour, environ une vingtaine d'entreprises privées en archéologie sont actives dans la basse vallée de la Salt.

Les connaissances accumulées permettent donc aujourd'hui de discuter d'un système pris dans son ensemble qui intègre l'évolution environnementale au cours des deux derniers millénaires en passant par l'organisation socio-politique des communautés, l'exploitation du territoire, la gestion de l'hydraulique, la répartition de l'habitat et des activités dans les zones périphériques et centrales.

Dans la moyenne vallée de la Gila, les conditions de recherche sont différentes. Le Gila River Indian Community Cultural Resource Management Program (GRIC-CRMP) créé en 1993 après la mise en place du projet d'irrigation Pima-Maricopa (P-MIP) vise à interpréter, comprendre, protéger et faciliter la transmission de la culture et tradition Akimel O'odham et Pee-Posh, par le biais d'une approche archéologique, historique et ethnographique. A ce jour, plus de 570 km² sur 1500 ont été prospectés, et plus de 1000 sites mis à jour, cartographiés et documentés (Darling et al., 2002 ; Eiselt et Woodson, 2002 ; Peterson et al., 2002 ; Randolph et al., 2002 ; Ravesloot et Waters, 2002 ; Rice et Ravesloot, 2002 ; Woodson et al., 1999 ; Woodson et Davis, 2001 ; Woodson et Rice, 2002). En revanche, les données archéologiques ne sont pas diffusées, et je n'ai pas eu accès aux cartes d'occupation.

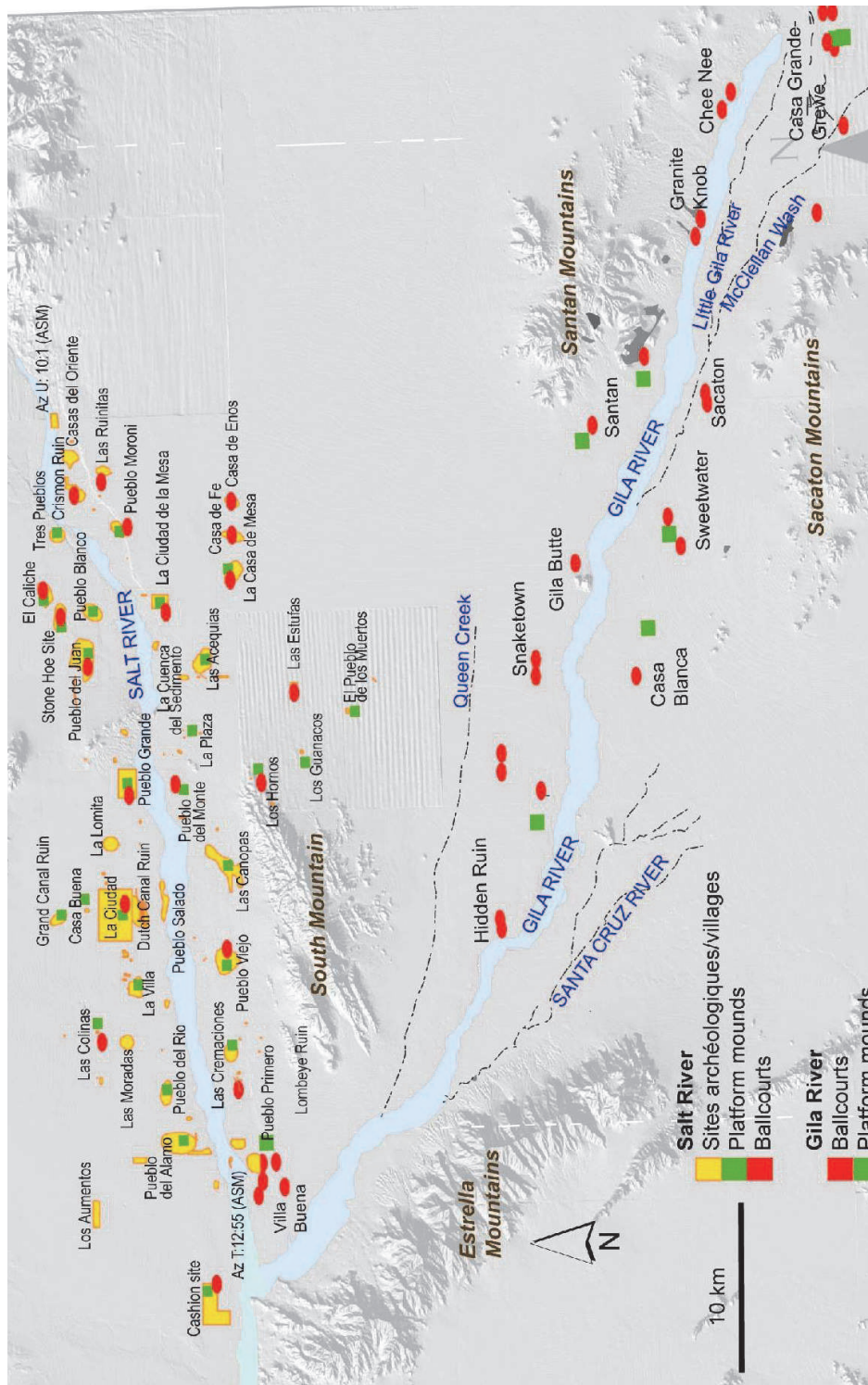


Fig. 26: Sites archéologiques répertoriés et cartographiés le long de la Salt et Gila Rivers. L'information n'est pas identique faute de données archéologiques accessibles. Le long de la Salt, les sites archéologiques sont intégrés à la base de données Azsite, accessible en ligne. Les sites répertoriés par Howard et Huckleberry, 1991 (publiés dans GEO-MAP, 1992) ont été ajoutés. La localisation des platform mounds a été obtenue dans Fish (1996) et Howard et Huckleberry (1991), celle des ball courts dans Marshall (2001) et Howard et Huckleberry (1991). La carte des ballcourts et platform mounds dans la moyenne vallée de la Gila a été obtenue dans Ravesloot, 2007. Ces structures publiques sont implantées dans les villages, mais l'accès à la carte de ces villages et de leur délimitation n'a pas été obtenu.

3.1.1.1. Un vif intérêt pour la cartographie des systèmes d'irrigation

Les canaux d'irrigation sont les structures préhistoriques les mieux préservées (Fig. 27). De nombreux archéologues s'y sont donc vite intéressés. Les premières études sur les systèmes d'irrigation visaient principalement à comprendre et cartographier leur répartition spatiale, ainsi que leur forme et capacité (Bandelier, 1890). Garlick et Patrick (1903) cartographièrent une grande partie des canaux sur la rive sud de la Salt au cours de la décennie suivante. Turney, l'ingénieur en chef de la ville de Phoenix, reprit leurs plans en 1922 et y intégra ses propres données qu'il publia en 1929 (Fig. 28 a). Il estima que plus de 390 km de canaux avaient été construits au cours de la période préhistorique. Peu de temps après, Judd (1931) étudia la structure des systèmes d'irrigation le long de la Gila River grâce à des photos et il observa qu'uniquement 10% des canaux cartographiés par Turney étaient toujours visibles en 1930.



Fig. 27 : Vue du nord-ouest des berges d'un canal préhistorique, Canal System 2 en 1930 (SRP, 1930)

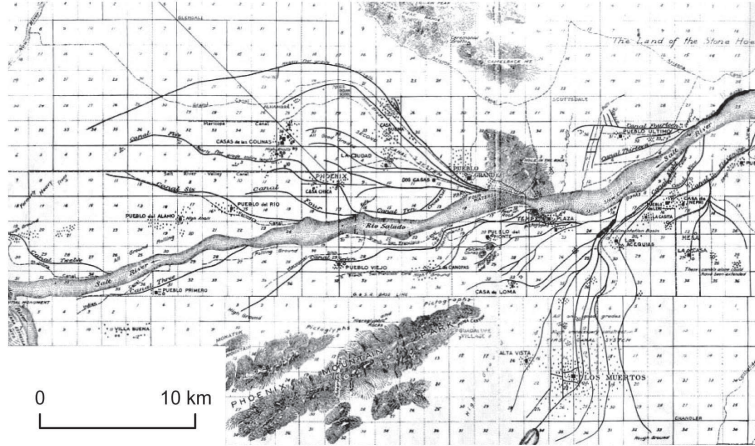
Ce travail cartographique se poursuit par la publication d'une version mise à jour des réseaux d'irrigation par Midvale en 1966 (Fig. 28 b) et d'une version finalisée mais non diachronique de Howard et Huckleberry (1991), qui montre un alignement total de 800 km de canaux (Fig. 28 c).

3.1.1.1.1. Préservation différentielle des sites archéologiques

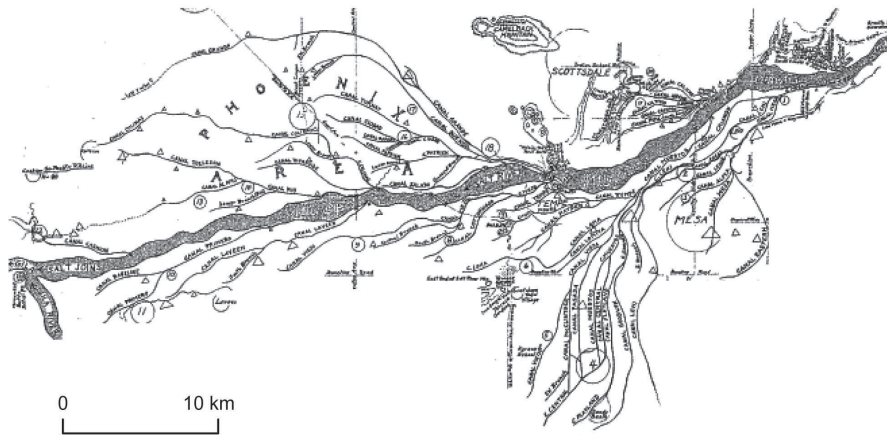
Le contexte actuel de préservation des sites varie nettement entre la Gila et la Salt River. Dans le Phoenix métropolitain, l'impact humain intense lié à l'urbanisation et l'agriculture dès le 19^{ème} siècle a fortement altéré les sites enfouis. Associés à cela, le nivelage des sols, la construction de routes et de nouveaux canaux d'irrigation détruisent progressivement les traces archéologiques. En conséquence, il ne reste actuellement que des traces éparses des systèmes d'exploitation agricoles utilisés par les Hohokam et probablement 99% des canaux préhistoriques ont aujourd'hui disparus (Huckleberry, 1999b). Seules quelques zones non urbanisées en plaine alluviale, enfouies sous des alluvions de crues, préservent les sites archéologiques.

Les mieux conservés étant toutefois ceux éloignés de la Salt River et donc de la zone centrale d'influence des Hohokam. Le long de la Gila, un territoire protégé de l'urbanisation massive, les données archéologiques sont nombreuses et généralement très bien conservées, excepté dans les zones agricoles nivelées et à proximité des routes.

a) Canaux d'irrigation de long de la Salt River cartographiés par Turney, 1929



b) Canaux d'irrigation de long de la Salt River cartographiés par Midvale, 1966



c) Canaux d'irrigation de long de la Salt River cartographiés par Howard et Huckleberry, 1991

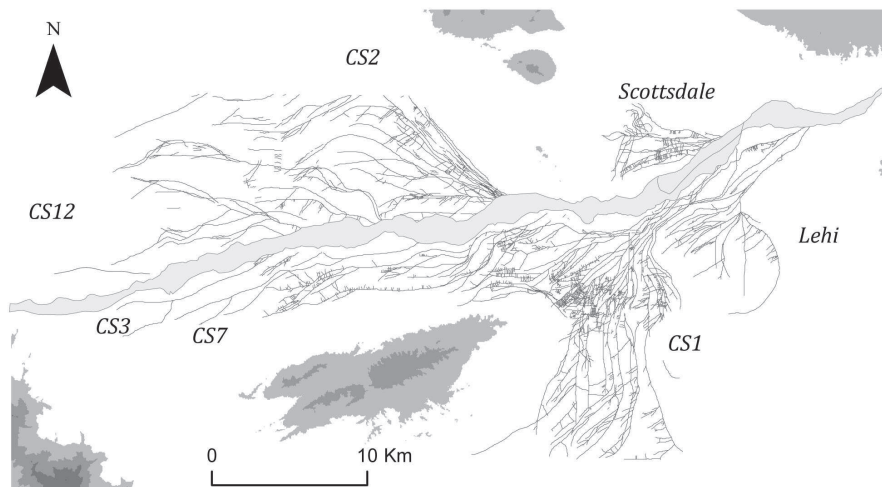


Fig. 28: Cartographie des systèmes d'irrigation le long de la Salt River

3.1.2. Répartition géographique, chronologie et évolution culturelle des Hohokam

3.1.2.1. Répartition géographique et culturelle

Les Hohokam dont le nom provient du Pima « ceux qui ont disparu », ont occupé un territoire d'environ 120 000 km² (Doyel, 2000) pendant plus d'un millénaire (Fish et Fish, 1992). Cet espace est décomposé en plusieurs unités de paysages culturels.

La première zone territoriale représente le cœur de la culture Hohokam, centré autour de la basse vallée de la Salt et la moyenne vallée de la Gila. La seconde zone regroupe tous les sites situés à moins d'une journée de trajet de ces cours d'eau, certains possédant de l'architecture publique, de l'irrigation et même des réservoirs d'eau. La troisième catégorie est caractérisée par des zones périphériques intermédiaires où l'irrigation est toujours envisageable par des techniques alternatives. La dernière zone d'occupation regroupe des sites situés dans la périphérie lointaine, comme la haute Salt River, la vallée de Safford, le sud est de l'Arizona, et la zone de Flagstaff au nord.

3.1.2.2. Construction de la chronologie Hohokam et évolution culturelle

La chronologie culturelle des Hohokam a été établie sur des données stratigraphiques et des études typochronologiques (Kidder, 1924 ; Schmidt, 1928 ; Gladwin, 1928 ; Gladwin et al., 1937 ; Haury, 1932 ; Gladwin et Gladwin, 1935). Les fouilles de Snaketown, dans la Gila River Indian Reservation, par Gladwin, en 1937, ont permis de mettre en place la première chronologie viable et les principales tendances et caractéristiques culturelles de la tradition Hohokam : la céramique rouge sur beige, l'irrigation monumentale, l'architecture publique dont les *ball courts*, les *platform mounds* et les « grandes maisons » de 300 à 1450 apr. J.-C.

A partir de ce moment là, de nombreux chercheurs ont tenté de préciser cette chronologie (Dean, 1991; Deaver, 1997; Eighmy et McGuire, 1989; Elson, 1996; Haury, 1976; Plog, 1980; Schiffer, 1986) à partir des mêmes proxies. L'archéologie du bassin de Phoenix et le désert du Sonora, ne peut, contrairement aux sites archéologiques sur le plateau du Colorado, se baser sur des données dendrochronologiques (Dean et al., 1996 ; Ahlstrom et Slaughter, 1966). Par conséquent, il a fallu rapidement dater les sites par les méthodes du carbone 14 et de l'archéomagnétisme (Henderson, 1987a ; LaBelle et Eighmy, 1995), sur lesquelles l'archéologie préventive s'est fortement penchée au cours des vingt dernières années. Grâce à ce travail intensif, plus de 2500 dates étaient disponibles en 1997 (Deaver, 1997).

Ces recherches ont permis de mettre en place plusieurs chronologies fondées sur la circulation et la fabrication de poteries, la distribution dans l'espace de l'architecture publique, de l'habitat, de l'occupation du territoire et de la circulation d'objets (Crown, 1991).

La terminologie régionale regroupe la période Formative (?-600 apr. J.-C.), Pionnière (600-750 apr. J.-C.), Préclassique (750-1150 apr. J.-C.), Classique (1150-1450 apr. J.-C.) et Protohistorique (1450-1592 apr. J.-C.) (Tab. 3). Il existe des subdivisions conventionnelles et locales dans cette chronologie (Dean, 1991 ; Sires, 1983)² (Tab. 3). Dans la mesure du possible, les données et résultats présentés dans ce travail seront exprimés en utilisant la terminologie locale de Dean (1991), mais le manque de précision voire l'absence de dates ¹⁴C, ne nous permettra parfois d'utiliser que la chronologie conventionnelle. L'évolution culturelle des Hohokam est présentée ici de façon synthétique et résumée dans le Tab. 3, mais sera détaillée dans le chapitre suivant où nous présenterons la répartition de l'habitat et des systèmes hydrauliques dans la longue durée. Les termes indiqués en *italique* sont explicités dans la section suivante 3.1.2.3.

Chronologie	Périodes régionales	Périodes conventionnelles	Bassin de Phoenix (Dean, 1991)	Caractéristiques culturelles
1900 apr. J.-C.	HISTORIQUE	HISTORIQUE	HISTORIQUE	Colonisation. Missionnaires jésuites et Akimel O'Odham dans la vallée de la Gila (1700-1870). Implantation militaire dans la basse vallée de la Verde (1865) puis colonisation massive dans la Salt et la Gila (post 1870)
1700 apr. J.-C.	PROTOHISTORIQUE	PROTOHISTORIQUE	Non définie	Absence de données
1450 apr. J.-C.	CLASSIQUE	Post-Classique	Polvoron	Sites épars (Pueblo Salado, Escalante) toujours occupés
		Classique	récent	Civano
1150 apr. J.-C.	PRE-CLASSIQUE		Sédentaire	Santan?
		Sacaton		Etablissement d'un réseau commercial local et régional Expansion et construction de canaux et nouveaux systèmes Systématisation des <i>ball courts</i>
		Coloniale	Santa Cruz	Explosion démographique, production de céramique <i>Gila Butte</i> et <i>Santa Cruz red-on-buff</i> , construction des <i>Ball courts</i> et de canaux, développement artistique (rituels mortuaires, bijoux) et commercial
750 apr. J.-C.	PIONNIERE	Pionnière	Snaketown	Premiers villages, début de la production céramique: <i>Vahki plain</i> , <i>Estrella red-on-gray</i> , <i>Sweetwater red-on-gray</i> , <i>Snaketown red-on-gray</i> Apparition de l'irrigation (450-500 apr. J.-C.), habitat le long des cours d'eau. Début des pratiques mortuaires (700 apr. J.-C.)
Sweetwater				
Estrella				
600 apr. J.-C.	FORMATIVE	FORMATIVE	Vahki	
			Red Mountain	
1 apr. J.-C.	Limite non définie			
400 av. J.-C.	ARCHAIQUE			Chasseurs cueilleurs, petites occupations

Tab. 3: Chronologie régionale et locale des Hohokam et caractéristiques culturelles (d'après Dean, 1991)

² La chronologie présentée dans le Tab. 3 a été construite par Dean excepté pour la phase Polvoron (Sires, 1983). Les limites chronologiques ont été établies sur une base de 25 à 50 ans car les datations radiocarbone et archéomagnétiques n'ont pas permis d'obtenir une résolution plus fine. Certaines des phases peuvent se superposer.

Les Hohokam appartenait à « un système régional » défini comme un groupe de communautés géographiquement distinctes mais interagissant et dépendantes les unes des autres, via l'échange de biens et de services (Judge, 1984 ; Wilcox et Sternberg, 1983). Leur histoire peut être découpée en 6 phases d'évolutions socio-culturelles distinctes.

Les **périodes Formative et Pionnière** (?-750 apr. J.-C.) sont caractérisées par la production de poterie brune et de figurines en argile ainsi que par la fabrication de pointes de flèches et la pratique de l'inhumation (Doyel, 1991). Dès 300 apr. J.-C., des céramiques rouges apparaissent (phase Vahki), puis décorées, à partir de 500 apr. J.-C. Les Hohokam occupent de façon semi-permanente puis permanente des fermes dispersées sur les basses terrasses et plaines alluviales. Ces dernières sont cultivées (maïs, courge, haricot) et irriguées par les eaux de crues (Cable et Doyel, 1985 ; 1987 ; Doyel, 1991 ; Henderson, 1989, 1995) et des *fieldhouses* y sont implantées. A la fin de la période Pionnière, *les villages* de Pueblo grande, Pueblo Viejo, Las Moradas, Las Canopas sont construits, indiquant la mise en place d'un tissu social complexe (Fig. 26). La découverte de coquillages et de turquoise indique l'existence de réseaux de commerce ou d'échange (Wilcox et Shenk, 1977) dès la période Vahki.

La période Coloniale (750-950 apr. J.-C.) est définie par la construction massive de *villages* (ex : Pueblo Viejo, La Ciudad, Dutch Canal Ruin, Los Hornos, Las Acequias) (Fig. 26) *hameaux, fermes, fieldhouses* et *canaux d'irrigation*, en plaine alluviale et sur les terrasses plus élevées. C'est également à partir de cette époque que la différenciation entre la taille et la fonction des sites se met en place (Gregory, 1991). L'habitat est organisé autour d'une place centrale autour de laquelle a été mis au jour un nouveau type d'architecture publique : les *ball courts*. Ces structures publiques sont incorporées au sein de villages majeurs, mais se situent en périphérie des villages de plus petite taille (Howard, 1985 ; Wilcox et al., 1981 ; Wilcox et Sternberg, 1983). En parallèle, un développement artistique se met en place et s'exprime par la production de figurines, effigies en céramique et sculptures.

La période Sédentaire (950-1150 apr. J.-C.) est caractérisée par un fort accroissement démographique, l'augmentation exponentielle du nombre de villages sur les terrasses (Howard, 1993), le creusement de nouveaux canaux plus au nord, au sud ou en amont des précédents (Howard, 1993), et la construction systématique de *ballcourts* (Crown, 1991 ; Doyel, 1991 ; Doyel et Elson, 1985 ; Haury, 1976 ; Howard, 1993 ; Wilcox et Sternberg, 1983). Les Hohokam développent également un large réseau d'échange et de commerce, et peut-être un début de différenciation sociale entre les individus (Doyel, 1991 ; Nelson, 1986). L'organisation interne de l'habitat reste relativement similaire à celle de la période Coloniale.

Les pratiques artistiques évoluent vers une spécialisation de la production céramique³, avec la réapparition des céramiques rouges Sacaton Red on Buff (Abbott, 2003 ; Crown, 1983). Bien que les crémations soient les plus fréquentes, la pratique de l'inhumation est mieux représentée.

La transition entre la période Sédentaire et Classique (Préclassique-Classique) est caractérisée par la chute du système régional (Doyel, 1991) établi au cours de la période Sédentaire, le déclin et l'abandon de nombreux sites situés en périphérie de la zone d'influence des Hohokam (Crown, 1991 ; Fish, 1989 ; Teague, 1984 ; Doyel, 1979), notamment les zones autour San Pedro, Safford, la Verde River, Cave Creek et New River (Doyel, 1984), Flagstaff et Gila bends (Doyel, 1981), ce qui représente 50% de la zone totale occupée à cette période. La population se concentre dans les grand villages (Pueblo Grande, Mesa Verde, Casa Grande par exemple) (Ciolek-Torrello et Wilcox, 1988 ; Craig, 2000 ; Crown, 1991 ; Doyel, 1991 ; Gasser et al., 1990 ; Haury, 1976 ; Wilcox et Sternberg, 1983) ou est absorbée par des groupes culturels différents (Doyel, 1980 ; Wilcox et Sternberg, 1983) : c'est la période d'agrégation (Adler, 1996 ; Spielman, 1998) (Fig. 29). Il n'est pas possible à ce jour d'affirmer si cette phase d'agrégation est liée à un déclin ou une poussée démographique.

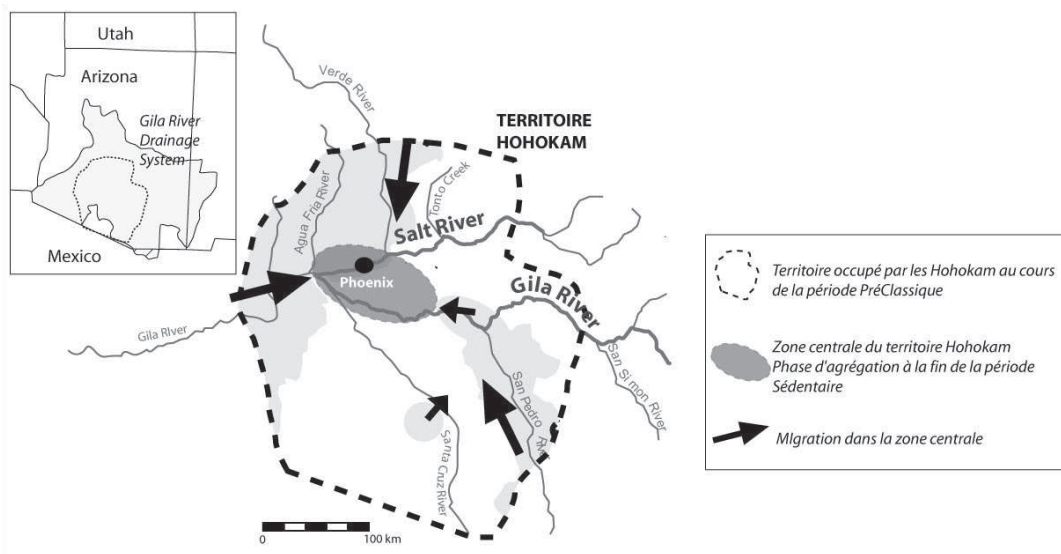


Fig. 29 : Illustration de la phase d'agrégation observée dans le territoire Hohokam à la fin de la période Sédentaire.

Associés à ces événements, les réseaux d'échange évoluent (Crown, 1991 ; Doyel, 1980 ; 1991), la production artistique diminue, un nouveau système de production de céramique apparaît (diminution des céramiques décorées, et retour à une production locale (Abbott, 2008)) et les crémations dans des urnes et les inhumations sont plus nombreuses.

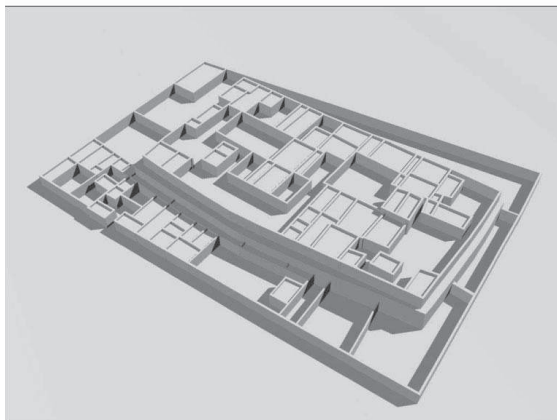
³ Quatre zones de production ont été identifiées dans le bassin de Phoenix au cours de la période Sédentaire : Las Colinas et le secteur de South Mountain le long de la Salt, Gila Butte et Snaketown le long de la Gila (Fig. 26).

Les hypothèses proposées pour expliquer cette évolution reposent sur des changements environnementaux (Doyel, 1979 ; Masse, 1981 ; Plog, 1980 ; Weaver, 1972, Waters et Ravesloot, 2001) comme des conditions chaudes et sèches (Weaver, 1972), un épisode d'élargissement et d'incision (Waters et Ravesloot, 2001) voire même des décharges réduites ou très variables (Doyel, 1979). Le facteur social (surpopulation) et environnemental aurait conduit à une surexploitation agricole (Grady, 1976 ; Wilcox, 1979 ; Wilcox et Sternberg, 1983), une diminution de la productivité et favorisé une situation de stress associée à une forte compétition pour l'eau. Ceci peut expliquer la réorganisation du système et l'apparition d'une société plus complexe, et justifie alors la construction de structures fortifiées (Wilcox, 1979 ; Wilcox et Sternberg, 1983).

L'évolution socio-politico-culturelle amorcée à la fin de la période Sédentaire se poursuit au cours de **la période Classique** (1150-1450 apr. J.-C.). La phase Soho (1150-1300 apr. J.-C.) est caractérisée par le déclin du système à *ballcourts* et la mise en place du système à *platform mounds* (Gregory, 1987) (Fig. 30), dont le nombre atteint 41 autour de 1300 apr. J.-C.



Représentation illustrée du platform mound de Pueblo Grande au cours de la période Classique, de M. Hampshire



Représentation de la phase terminale de l'occupation de Pueblo Grande avec des habitations au sommet du mound. La forme du village est rectangulaire avec de hauts murs en adobe, ce qui contraste avec les mounds arrondis des époques précédentes.

Fig. 30 : Le village de Pueblo Grande, rive nord de la Salt River

La phase Civano (1300-1375 apr. J.-C.) voit l'apparition des *grandes maisons* (Wilcox, 1991). Leur signification n'est pas connue, mais leur taille et les multiples étages qu'elles contiennent pourraient suggérer une organisation socio-politique différente (Gregory, 1991 ; Howard, 1987) avec un contrôle par des élites (Doyel, 1991 ; Wilcox, 1991 ; Wilcox et Shenk, 1977).

Le rôle précis de ces élites dans la gestion du travail, la construction et l'entretien de ces systèmes d'irrigation est à ce jour inconnu (Howard, 1996). Les données démographiques⁴ indiquent en parallèle une augmentation considérable de la population dans certains villages (Dean et al., 1994 ; Doelle, 1995), notamment à Pueblo grande (Abbott et Foster, 2003), Casa Buena, Grand Canal Ruins, La Lomita, La Ciudad et Las Colinas suite à la phase d'agrégation (Fig. 26). L'ensemble de ces données suggère l'existence d'un système à 4 composantes sociales: une classe supérieure occupant des villages avec palissade au sommet des *platform mounds* (Fig. 30), une classe moyenne dans des villages sans palissade, une classe inférieure occupant toujours les maisons en fosse organisées autour d'une cour centrale et enfin un dernier groupe occupant des hameaux éloignés des villages (Wilcox et Sternberg, 1983).

La fin de la période Classique est caractérisée par le déclin et l'abandon de la majeure partie des sites le long de la Salt et Gila River et la production de poterie de faible qualité. Un certain nombre d'hypothèses ont été proposées pour expliquer ce « déclin » observé à la fin de la période Classique.

1- En réponse à des irrégularités climatique, une succession de crues majeures (1358-1380 apr. J.-C.), détruisant les systèmes d'irrigation et colmatant les canaux (Dart, 1986), alterne avec des phases temporaires de sécheresse prononcée (Gregory, 1991 ; Huckleberry, 1999b ; Nials et al., 1986 ; Waters et Ravesloot, 2001) favorisant ainsi l'abandon des systèmes d'irrigation.

2- Plog (1980) suggère qu'une intensification agricole serait responsable du déclin des Hohokam. Teague (1982) et Huckleberry (1992) pensent que cette intensification est responsable d'une érosion accrue favorisant la dégradation des sols.

3- Ackerly (1982) soutient que chaque système fonctionnait de façon indépendante, les villages en amont recevant plus d'eau que ceux en aval, ce qui expliquerait le déclin progressif de ces systèmes d'irrigation, de l'ouest vers l'est (Salt) et du nord au sud (Gila).

4- L'instabilité progressive des communautés aurait pu faire suite à des phases de migration au cours du 12^{ème} et 13^{ème} siècle par les tribus Salado (Abbott et Foster, 2003 ; Henderson, 1995), Kayenta et Tusayan en provenance du plateau du Colorado (Clark, 2001). Ces vagues d'immigration auraient conduit à un épuisement des ressources locales puis à des phénomènes de malnutrition, malgré l'intensification des cultures, de la pêche, et des techniques d'irrigation (Di Peso, 1956 ; Dobyms, 1983 ; Fink et Merbs, 1991 ; Reff, 1990, 1992 ; Roberts et Ahlstrom, 1997). Ces hypothèses sont contredites par des modèles qui suggèrent une diminution de la population autour de 1400 apr. J.-C. (Hill et al., 2004).

⁴ La population est estimée de façon indirecte en comptabilisant le nombre et le type d'habitations (villages en opposition aux hameaux/maisons des champs) par période culturelle dans un secteur donné. Le nombre de maisons et leur superficie moyenne renseignent alors sur le nombre d'habitant par type de site. Il est estimé que la population au cours de la période Classique aurait atteint presque 20 000 personnes dans le bassin de Phoenix (Peeples, 2006).

5- Wilcox et Sternberg (1983) proposent un modèle politique. Au cours de la période Civano, les Hohokam tissent des liens inter-régionaux, créant ainsi le système Saladoan qui intègre les tribus de Casa Grande (Gila River), le bassin de la Tonto (bassin amont nord de la Salt), Globe-Miami (bassin amont sud de la Salt), Point of Pines et Safford Valley (bassin amont de la Gila). Ces alliances politiques fragiles, associées à des conditions environnementales fluctuantes, auraient pu très rapidement donner lieu à des conflits et conduire au déclin du système dans sa totalité.

6- Certains témoignages ethnographiques recueillis chez les Akimel O'Odham suggèrent que des conflits entre tribus auraient contribué au déclin culturel des Hohokam (Bahr et al., 1994 ; Teague, 1989, 1993 ; Wilcox et Sternberg, 1983).

7- Il est fortement probable qu'un certain nombre de ces facteurs aient contribué au déclin des Hohokam avec les effets cumulés d'une surexploitation de l'environnement suivie par des phénomènes de malnutrition (Kwiatkowski, 2003 ; Sheridan, 2003 ; Minnis, 1985 ; Di Peso, 1956 ; Dobyns, 1983 ; Fink, 1991 ; Ramenofsky, 1987 ; Reff, 1990, 1992 ; Roberts et Ahlstrom, 1997), de conflits internes liés à la compétition à l'eau (Rice, 1998), de variations hydrologiques (Gregory, 1991) et d'un affaiblissement de l'autorité lié à ces évolutions.

Sires définit en 1984 une nouvelle phase culturelle, dite **Polvorón** (1375- ? apr. J.-C.) (Chenault, 1996 ; Crown, 1991 ; Sires, 1983 ; Teague et Crown, 1984), suite à la fouille du site de El Polvorón le long de Queen Creek Drainage, dont l'occupation s'étend de la période Classique à Protohistorique (datations radiocarbone et archéomagnétiques). Il caractérise cet épisode culturel par des maisons en adobe (style jacal), des céramiques intrusives Hopi et Salado polychromes, des projectiles Sobaipuri et la disparition de la céramique red-on-buff.

La question selon laquelle cette période correspond à une nouvelle ère culturelle qui remplace celle des Hohokam (Chenault, 1993) ou une nouvelle organisation culturelle des Hohokam afin de s'adapter à la diminution de la population à la fin de la période Classique-Civano est toujours débattue. Cette phase culturelle Polvorón pourrait superposer la période **Protohistorique** traditionnellement définie entre 1450-1694 apr. J.-C. La période Protohistorique est peu comprise car son cadre chronologique est mal défini. L'absence de culture matérielle complexifie l'interprétation des données archéologiques lorsqu'elles sont présentes (Gilpin et Phillips, 1998).

3.1.2.3. Précision des termes relatifs à l'architecture domestique, publique, le territoire et son utilisation

Afin de comprendre l'évolution culturelle des Hohokam dans la longue durée, il s'agit avant toute chose d'explicitier certains termes utilisés, propres à l'occupation du territoire et à l'architecture publique associée.

- L'architecture domestique: de la maison en fosse aux structures complexes (Fig. 31a et e)

La structure de base de l'architecture domestique Préclassique est la maison en fosse. Construite dans un trou de 0.5 m de profondeur afin de se protéger des températures élevées, sa base est en bois (mesquite ou peuplier entrelacé avec des herbes et branches de cactus saguaro et cholla, Fig. 23), le tout étant recouvert de boue et d'adobe. Elles sont de formes ovales ou semi-rectangulaires, et consistent en une pièce unique avec une entrée sur le côté. Les traces d'un foyer et de structures de stockages sont souvent mises au jour. Ces maisons en fosse sont généralement orientées vers une petite cour commune et pourraient regrouper une famille élargie (Andrews et Bostwick, 2000). Au cours de la période Classique (1150-1450 apr. J.-C.), cette architecture domestique change nettement. Les maisons sont surélevées et construites en adobe avec occasionnellement une fondation en pierre. Le toit est en matériel végétal et également recouvert par de la terre crue. Comme au cours des périodes précédentes, l'ensemble de ces structures, construites les unes à côté des autres, délimite une série de petites places contiguës, elles-mêmes séparées par des murs séparateurs intérieurs.

Chacune de ces zones distinctes entourant une place publique est appelée « compound », et les villages en contiennent de 5 à 25. Ces compounds pouvaient contenir jusqu'à 17 pièces, lesquelles étaient probablement occupées par une famille étendue. Ces compounds étaient généralement groupés autour d'un « compound » principal, très large et bien construit (type « platform mounds » ou grande maison).

- L'architecture publique: des « ball courts » aux « platform mounds » et grandes maisons

- **Les « ball courts » (Fig. 31b)**

Il s'agit de la forme la plus répandue d'architecture publique, et plus de 200 *ball courts* sont répertoriés dans l'aire culturelle Hohokam, dont plus de 30 le long de la basse Salt (Andrews et Bostwick, 2000) (Fig. 26). Les premiers remontent à la période Préclassique-Coloniale (750-950 apr. J.-C.). Ils auraient pu être utilisés jusqu'à la fin de la période Classique (Gregory, 1991 ; Wilcox et Sternberg, 1983), mais leur utilisation décline fortement autour de 1200 apr. J.-C. Initialement creusés dans le sol et couverts de caliche (plâtre en carbonate), ils ont une forme ovale, atteignent une longueur de 24 à 35 m et une largeur de 15m.

Des buttes de 3m construites avec la terre déplacée en creusant la dépression encerclent cette structure. Deux petits renforcements sont construits à chaque extrémité. Dans la majeure partie des cas, ces *ball courts* se situent dans des villages qui possèdent également des *platform mounds* (Fig. 26) (voir ci-dessous).

Il y a une relation probable entre les *ball courts* rencontrés en Amérique Centrale, qui correspondent à l'emplacement des jeux de balle (jeu rituel pratiqué avec une balle en résine qui permet une communication directe avec les dieux). Par conséquent, ces structures étaient probablement ouvertes au public et possédaient une certaine importance sociale et rituelle. Leur utilisation dans le Sud-Ouest américain est à ce jour malheureusement peu comprise car aucune donnée ethnographique ne les mentionne.

Cependant, de petites figurines ainsi que les balles en résine ont été découvertes dans le sud de l'Arizona. Certains ont également proposé que les terrains de jeux de balle servaient de marché public au moment des jeux, comme le suggère indirectement le déclin simultané du système à *ballcourts* et de la production régionale de céramique (Abbott, 2009).



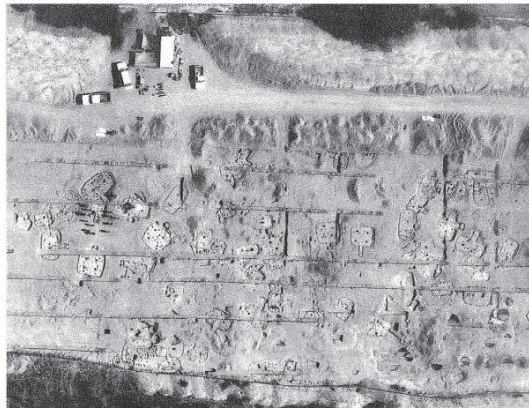
a- Maison en fosse, Cashion site, rive nord de la Salt River. Largeur de la maison: ~ 4 m) (photo: L. Purdue)



d- Casa Grande, "Grande Maison", Gila River Indian Community (photo: E. Peterson)



b- Ball court à Snaketown, Gila River Indian Community (photo: Arizona State Museum)



e- Vue aérienne des maisons en fosses et cours communes du village de Grewe (photo: Arizona Department of Transportation)



c- Platform mound de Pueblo Grande, rive nord de la Salt River (photo: M. Heringer)

Fig. 31: Architecture publique et domestique des Hohokam

- Les « platform mounds » (Fig. 31c)

Ils sont généralement implantés au sein même des villages mais leur nombre est limité comparé à celui des *ballcourts*, avec un rapport de $\frac{1}{4}$. Le long de la basse vallée de la Salt, 50 ont été mis au jour dans plus de 30 villages (Andrews et Bostwick, 2000) (présentés en partie dans la Fig. 26).

Initialement de petite envergure et construits par l'accumulation de déchets, la forme et la fonction des *platform mounds* varient fortement au cours des périodes tardives. Les premiers mesurent moins de 10 m de diamètre et moins d'1 m de hauteur (Gregory et Nials, 1985 ; Gregory et al., 1988 ; Haury, 1976 ; Wasley, 1960). A la fin de la période Coloniale et au cours de la période Sédentaire (850-1150 apr. J.-C.) les *platform mounds* sont circulaires.

Au cours de la période Classique (1200 apr. J.-C.) ils deviennent rectangulaire, sont orientés nord-sud et sont entourés systématiquement d'un mur d'enceinte (Gregory et Nials, 1985 ; Gregory, 1987). Ils sont régulièrement espacés, tous les 5 km (Gregory et Nials, 1985). De nombreuses pièces étaient construites sur leur sommet (Gregory, 1987 ; Gregory et al., 1988 ; Hayden, 1957 ; Wilcox, 1987), de même qu'à leur base.

Leur fonction reste débattue mais ils avaient probablement une importance rituelle ou politique, car des sépultures et des pièces à vocation astrologique ont été découvertes sur leur sommet (Andrews et Bostwick, 2000).⁵

L'unique consensus est que ces *platform mounds* représentaient les centres communautaires et administratifs des Hohokam (Elson, 1998 ; Lindauer et Blitz, 1997) ou bien un cadre institutionnel pour différentes divisions ethniques (Clark, 1995 ; Elson et Abbott, 2000 ; Simon et Jacob, 2000).

-Les grandes maisons (Fig. 31d)

Elles correspondent à un nouveau type d'architecture publique qui apparaît au cours de la période Classique, vers 1300 apr. J.-C. Il s'agit d'une large maison à plusieurs étages dont la base est légèrement surélevée, comme la base d'un *platform mound*, et dont le contour est entouré par une palissade. Chaque étage possédait de multiples pièces, dont les murs, protégés par une sorte de plâtre, affichent des pictogrammes (humain, animal, éclairs) qui laissent présager une utilisation cérémonielle ou rituelle (Andrews et Bostwick, 2000). Par ailleurs, de nombreuses ouvertures alignées sur l'emplacement des solstices et des équinoxes ont été observées dans les murs de ces maisons, ce qui pourrait impliquer une utilisation à des fins astronomiques et/ou élitistes. Certains chercheurs pensent que ces grandes maisons signent une organisation socio-politique différente (Gregory, 1991 ; Howard, 1987) avec un contrôle par des élites (Doyel, 1991 ; Wilcox, 1991 ; Wilcox et Shenk, 1977).

La première grande maison mentionnée est celle de Pueblo Grande (Cushing, 1890) (Fig. 26), mais elle disparaît au début du 20^{ème} siècle. Deux autres ont été décrites sur le site de La Ciudad et Las Colinas (Andrews et Bostwick, 2000). L'unique exemple préservé à ce jour est celle de Casa Grande, transformée en musée (Fig. 31d) qui mesure 18m de longueur, 12 m de large et 10.5 m de haut.

⁵ Seuls deux *platform mounds* sont aujourd'hui visible à Phoenix. Il s'agit du *platform mound* de Pueblo Grande sur la rive nord (Fig. 26 et Fig. 31c) construit au cours de la période Classique qui atteint 6 m de hauteur, 100 m de longueur et 70 m de largeur, et du *platform mound* de Mesa Grande sur la rive sud, d'une taille similaire.

- Division du territoire

- Le village (Fig. 31e)

Il est généralement composé d'une centaine d'habitants qui occupent l'espace de façon permanente. Il est souvent situé en bordure des cours d'eau principaux ou d'un canal d'irrigation majeur où l'eau est facilement accessible et utilisable à des fins agricoles. Il est généralement caractérisé par la présence d'architecture publique, type *ball court* et *platform mound*, d'une place centrale et d'un cimetière.

- Le hameau

Un hameau est également occupé à l'année par un groupe d'individus inférieur à 100 personnes. Il correspond à un ensemble de fermes implantées en bordure de cours d'eau ou le long des canaux. Il est composé de deux à quatre assemblages de maisons en fosse qui partagent une zone commune. Il ne contient pas d'architecture publique mais des cimetières ont été découverts à proximité. La présence d'artéfact (obsidienne et poterie non locale), ainsi que des assemblages botaniques diversifiés, posent l'hypothèse d'une spécialisation locale dans la production d'artisanat (King, 1985) ou l'exploitation de certaines ressources (Gasser et Miksicek, 1985).

- La ferme

Une ferme est occupée saisonnièrement par un seul groupe social (de 2 à 3 familles) (Cable et Mitchell, 1988). Elle présente une structure composée de maisons en fosse (qui mesurent plus de 10 m²) autour d'une place centrale (Sires, 1984), où des céréales et autres espèces cultivées sont stockées et séchées, et de fosses à ordures. Les fermes sont souvent localisées à la périphérie des villages ou hameaux, à proximité des canaux et des champs. Elles ne contiennent ni architecture publique, ni cimetière.

- Les fieldhouses

Ce sont des structures individuelles relativement complexes occupées au cours des phases de semis, plantation, récolte, stockage et cueillette. Elles sont donc implantées dans ou à proximité des champs. Ce sont des habitations sub-rectangulaires d'une superficie de 2 à 10 m² et de formes très variées (Crown, 1983 ; Cable et Mitchell, 1988). Ces habitations contiennent généralement un foyer composé de galets faiblement aménagés, ce qui laisse supposer une utilisation temporaire. A proximité, des structures plus petites, ovales à circulaire, sans foyer, dont la fonction n'est pas connue, ainsi que des fosses de stockage (Henderson, 1987b ; 1995, Mitchell, 1989) ont été dégagées. Les données archéologiques ont montré que ces maisons étaient occupées probablement durant toute la saison agricole au cours de la Formative/Pionnière (500-750 apr. J.-C.). Progressivement, il semblerait qu'elles ne soient utilisées que ponctuellement, au cours des moments critiques que sont la période de semis et de récolte.

Une autre fonction potentielle est à relier à l'expansion géographique des Hohokam.

Lorsque de nouveaux canaux d'irrigation étaient construits, les maisons des champs puis ensuite les fermes servaient d'habitat temporaire avant l'établissement d'un hameau puis d'un nouveau village, comme l'ont montrées les fouilles préventives le long d'un système d'irrigation majeur, le Canal System 2 (Fig. 37) (Rice, 2001).

3.2. Evolution de l'environnement au cours des deux derniers millénaires

3.2.1. *État de la recherche paléoclimatique*

Les principales données et analyses sur les changements climatiques des deux derniers millénaires reposent sur des études dendroclimatiques. Les résultats obtenus renseignent sur les variations dans le régime des précipitations et les températures.

Les conifères utilisés dans le cadre de ces études sont plus réactifs aux pluies hivernales et par conséquent les reconstructions climatiques restituent plus les variations hivernales qu'estivales.

Salzer (2000) a reconstruit l'évolution des températures pour les 1450 dernières années, en se basant sur des études de cernes de bois mesurées sur des pins dans le nord de l'Arizona. Ceux de Cook et al. (2004) reposent également sur l'étude des cernes de bois pour restituer le Palmer Drought Severity Index (PDSI) au cours de la saison estivale. Les travaux du programme CLIMAS (Climate Assessment for the Southwest) à l'Université d'Arizona (Tucson) et le National Oceanic and Atmospheric Administration ont permis de comprendre les variabilités climatiques sur le long terme, l'impact sur les communautés humaines et les systèmes naturels dans le Sud-Ouest américain. Les données de Ni et al. (2002) nous renseignent sur l'évolution des précipitations hivernales dans le bassin de Phoenix. Peterson en 1994 a reconstruit les précipitations estivales en se basant sur l'étude du pollen de pin dans le sud-ouest du Colorado, et Davis (1994) s'appuya sur les pollen dans les lacs d'Arizona.

Les travaux de Rose (1994) ont permis de déterminer le rythme des sécheresses dans le bassin amont de la Salt River. Graybill (1989) et Nials et al. (1989) ont reconstruit la décharge de la Salt et Gila River depuis les deux derniers millénaires, en se basant également sur des reconstructions dendrohydrologiques. Dean (1988) a tenté de déterminer les variabilités spatiales des précipitations dans le sud du plateau du Colorado.

Enfin, il ne faut pas oublier les études de rythmicité des paléocrues, notamment celles d'Ely (1997), Mehringer (1967), Mehringer et al. (1967), Van Devender et al. (1987), Rodbell et al. (1999), Partridge et Baker (1987), basées sur des dépôts fluviaux (« slackwater deposits »). Le paragraphe suivant synthétise l'ensemble de ces données paléoclimatiques.

3.2.2. *Evolution du climat au cours des deux derniers millénaires*

Les conditions climatiques jusqu'en 750 apr. J.-C. (périodes Formative-Pionnière) sont relativement stables. Des épisodes frais et humides alternent avec des conditions chaudes (Salzer et Kipfmüller, 2005), plus marquées à la fin de la période Pionnière. Entre 800 et 900 apr. J.-C. (période Coloniale), quelques épisodes de faible décharge fluviale associée à des sécheresses (récurrence de 30 à 40 ans) sont enregistrés le long de la Gila (Salzer, 2000), mais les dynamiques hydriques sont optimales le long de la Salt avec des pluies régulières spatialement uniformes (Graybill, et al., 2006).

L'**optimum climatique médiéval**, bien exprimé dans le Sud-Ouest américain (ex : Swetnam, 1993 ; Millspaugh et al., 2000 ; Mohr et al., 2000 ; Brunelle et Anderson, 2003 ; Swetnam et al., 2000 ; Mason et al., 2004, Benson et al., 2002) s'étend de 900 à 1300 apr. J.-C. Il regroupe la période pré-Classique (fin de la période Coloniale (900-950 apr. J.-C.) et la période Sédentaire (950-1150 apr. J.-C.)), la transition pré-Classique-Classique et le début de la période Classique (1150-1300 apr. J.-C.).

Cette phase climatique s'exprime par des décharges fluviales plus faibles et des sécheresses de courte durée (entre 10 et 15 ans), notamment entre 985 et 1030 apr. J.-C., puis entre 1067 et 1121 apr. J.-C. (Graybill et al., 2006). Au sein de cette période chaude, deux périodes humides et fraîches ont été observées entre 1030-1060 apr. J.-C. puis entre 1121-1150 apr. J.-C. (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004 ; Esper et al., 2002 ; Salzer et Kipfmüller, 2005). Le premier épisode est ponctuel mais est associé à une inversion des tendances pluviométriques avec la dominance d'un régime nival. Ces deux épisodes se traduisent par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des crues à l'échelle du bassin de Phoenix (Graybill et al., 2006).

Le Petit Optimum Médiéval est suivi par le **Petit Age Glaciaire** (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004, Esper et al., 2002). Les conditions froides et humides favorisent une intensification des crues entre 1400 et 1700 apr. J.-C. (Graybill et al., 2006). Deux épisodes d'accalmie et d'augmentation des températures sont enregistrés entre 1400-1460 apr. J.-C. et 1550 et 1600 apr. J.-C. (Hirschboeck et Meko, 2005 ; DeMenocal, 2001). Puis, de 1700 à 1800 apr. J.-C., les conditions climatiques s'améliorent avec une remontée notable des températures (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004 ; Esper et al., 2002).

3.2.3. Données géoarchéologiques disponibles dans les bassins versants étudiés

3.2.3.1. Avancée et état de la recherche géoarchéologique dans le Sud-Ouest américain

Tout au long du 20^{ème} siècle, les problématiques archéologiques se sont focalisées sur l'émergence culturelle des Amérindiens. Entre 1920 et 1950, la mise en place d'une chronologie d'occupation à l'échelle régionale est la principale problématique des archéologues et la géologie va aider à comprendre la stratigraphie des sites.

A cette époque, le Sud-Ouest américain intéresse déjà les quaternaristes et stratigraphes à cause des conditions environnementales extrêmes dans lesquelles les communautés se sont développées. Les études se multiplient en Californie, Nevada, Arizona et au Nouveau Mexique.

Les premières analyses stratigraphiques fines dans le Sud-Ouest Américain sont le fruit des travaux de Kirk Bryan et Ernst Antevs dans les années 40, considérés à ce jour comme les pères de la géoarchéologie nord américaine (Haynes, 1990). Suivant leurs traces, C. Vance Haynes (ex : 1964, 1968) apporte de nouvelles méthodes et perspectives sur l'étude des séquences alluviales et propose pour la première fois des modèles régionaux d'aggradation et d'érosion.

L'intérêt des archéologues pour les méthodes géoarchéologiques se poursuit dans les années 70 et 80 notamment grâce aux travaux de Butzer (1971, 1982) en géographie préhistorique, qui insiste sur l'importance de la géoarchéologie dans la restitution des environnements passés.

Son travail complète la recherche de Haynes sur les sites de Curry Draw et Lehner Ranch Arroyo dans la vallée de la San Pedro et de la Santa Cruz, deux affluents de la Gila (Haynes, 1981, 1987, 1990 ; Haynes et Huckell, 1986).

Au cours de la même période, les travaux de Schiffer (1983) se penchent sur la formation des sites et ceux de Limbrey (1983) sur la paléohydrologie. Les travaux de Ferring en géoarchéologie (1994), Stein et Farrand sur les sols archéologiques (1985), Holliday en géoarchéologie des grandes plaines (1997) associent finalement cette méthode à la recherche anthropologique dans des programmes interdisciplinaires et universitaires.

3.2.3.2. Synthèse des études géoarchéologiques et géomorphologiques dans le bassin de Phoenix

- *Etat de la recherche*

Les études sont nombreuses et les processus morphogénétiques bien identifiés grâce à des approches systématiques et des datations radiocarbone régulières. C'est le cas le long de la Gila River (Huckleberry, 1991 ; Waters, 1996, 2000 ; Waters et Ravesloot, 2001) (Fig. 32a et b) et de ses deux affluents les rivières Santa Cruz (Freeman, 1997 ; Haynes and Huckell, 1986 ; Huckell et Bruce, 1988) et San Pedro (Wallace et Doelle 1997, 2001 ; Haynes, 1987). Mais les études systématiques qui visent à restituer les contraintes environnementales des Hohokam (élargissement du cours d'eau et perte des terres, sécheresse, incision) sont relativement rares. Le long de la Salt, seuls deux projets ont tenté de comprendre l'évolution des dynamiques socio-environnementales à haute résolution temporelle. La première étude fait partie d'un programme d'archéologie préventive, conduit par «Statistical Research Inc» (Onken et al., 2004) à proximité de la confluence entre la Salt, la Gila River et l'Agua Fria (Fig. 32a).

Des dates radiocarbone ainsi que des dates OSL (Optical Stimulated Luminescence) ont permis de corréliser ces données à celle de Waters (2000, 2001), indiquant que ces zones ont des histoires géomorphologiques similaires (Tab. 1 et Fig. 32).

Le second programme, également en archéologie préventive, a été réalisé par «Archaeological Consulting Service» en amont du Phoenix métropolitain, à proximité de la ville de Mesa (Phillips et al., 2004). Une synthèse chronostratigraphique de leurs résultats est présentée indépendamment dans la Fig. 33.

- *Histoire géomorphologique du bassin de Phoenix*

L'ensemble des travaux réalisés permet d'affirmer que l'émergence culturelle des Hohokam s'intègre dans une période de stabilité géomorphologique (Waters et Ravesloot, 2001) associée à l'aggradation fluviale et éolienne des plaines de la Gila et de la Salt jusqu'en 900 apr. J.-C. (Fig. 32, Unité II et III ; Fig. 33 b).

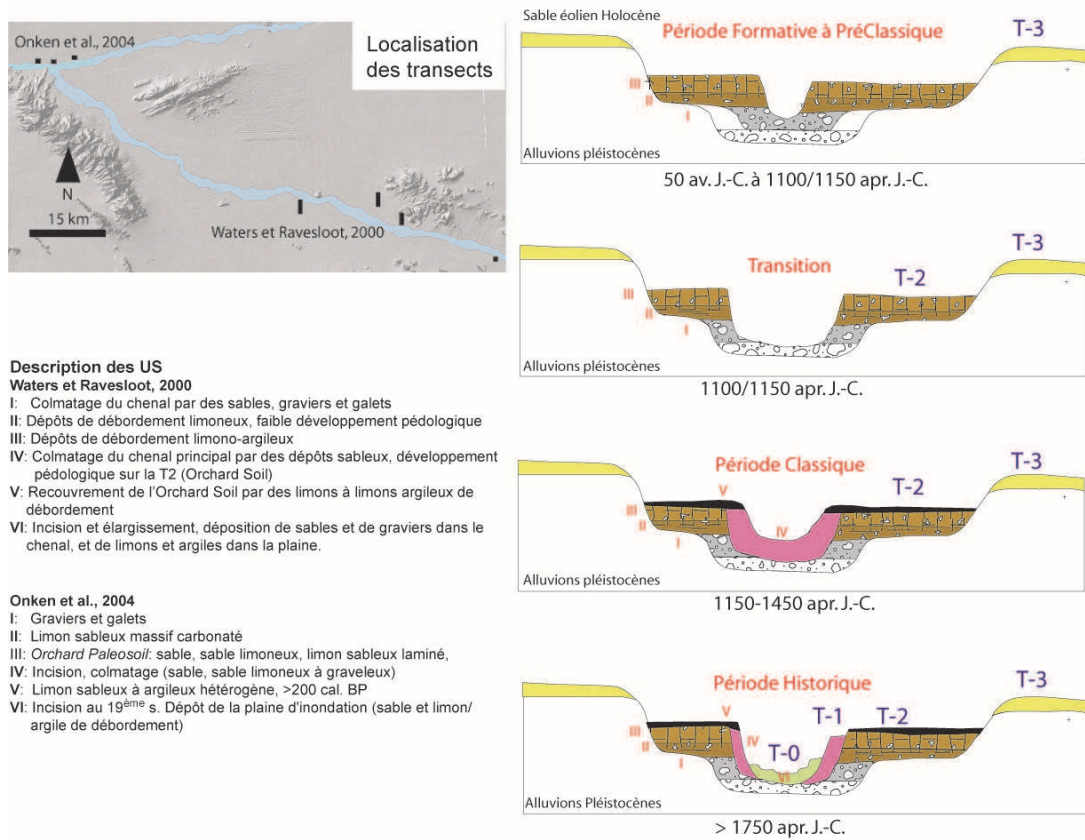
Une phase de pédogénèse est observée le long de la Salt River entre 50 av. J.-C. et 200 apr. J.-C. (Powell et al., 2004 ; Onken et al., 2004) (Fig. 32 b). Entre 800 et 950 apr. J.-C. (période Coloniale) quelques zones marécageuses (cienegas) se développent en amont, en bordure de la Salt (Fig. 33 c).

Entre 900 et 1150 apr. J.-C., une augmentation des dynamiques hydrosédimentaires est enregistrée dans les plaines alluviales. La Gila s'élargit (Fig. 32 a) et une phase érosive caractérisée par une couche de graviers et un changement morphologique fluvial vers un système en tresse est observé le long de la Salt (Fig. 33 c). Les auteurs envisagent fortement une phase d'incision de la Gila, Salt, Tonto Creek et Santa Cruz (Onken, 2004, Waters and Ravesloot, 2001 ; Waters, 1998 ; Mabry, 2006) entre 1050 et 1150 apr. J.-C. (Fig. 32 a et b, Fig. 33 d). Cette phase d'incision régionale pourrait être liée à l'intensification des crues (Bull, 1991; Ely, 1997 ; Enzel et Wells, 1997; Graf, 1983; Webb, 1987; Webb et Hasbargen, 1997, Nials et al., 1989 ; Van Devender et al., 1987), et à un changement dans le régime des précipitations. Cette incision favorise le développement pédologique (Orchard Soil) sur la nouvelle terrasse formée (terrasse T2 pour la Gila, terrasse Lehi pour la Salt) (Fig. 32, Unité III, Fig. 33 e).

Le chenal se colmate (Unité IV) jusqu'au 15^{ème} s. apr. J.-C. le long de la Salt (Onken et al., 2004) puis l'aggradation des plaines reprend rapidement après cet épisode (Fig. 32, Unité V). Autour de 1450 apr. J.-C., la Santa Cruz et la San Pedro enregistrent un nouveau creusement du chenal principal (Water and Ravesloot, 2001), mais ceci n'a été observé ni le long de la Salt, ni le long de la Gila et ne permet donc pas d'affirmer qu'un forçage environnemental est responsable du déclin culturel des Hohokam.

L'aggradation de la plaine se poursuit jusqu'en 1870 apr. J.-C., période autour de laquelle ces cours d'eau, et notamment la Gila River, subissent une nouvelle phase d'incision (Fig. 33 f). Cet épisode scelle la dominance des dynamiques naturelles et signe l'entrée du bassin de Phoenix dans une période d'urbanisme et de contrôle des dynamiques fluviales.

a) Localisation des transects et stratigraphie alluviale de la moyenne vallée de la Gila et de la confluence Salt/Gila (Waters et Ravesloot, 2001; Onken, Waters et Homburg, 2004)



b) Comparaison de l'histoire géomorphologique dans la moyenne vallée de la Gila et au niveau de la confluence Salt/Gila

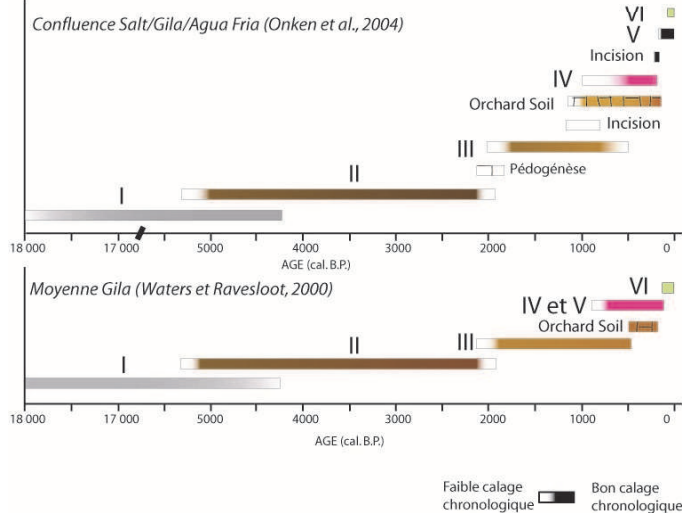


Fig. 32 : Histoire séquentielle des paysages de la moyenne vallée de la Gila et de la confluence Salt/Gila

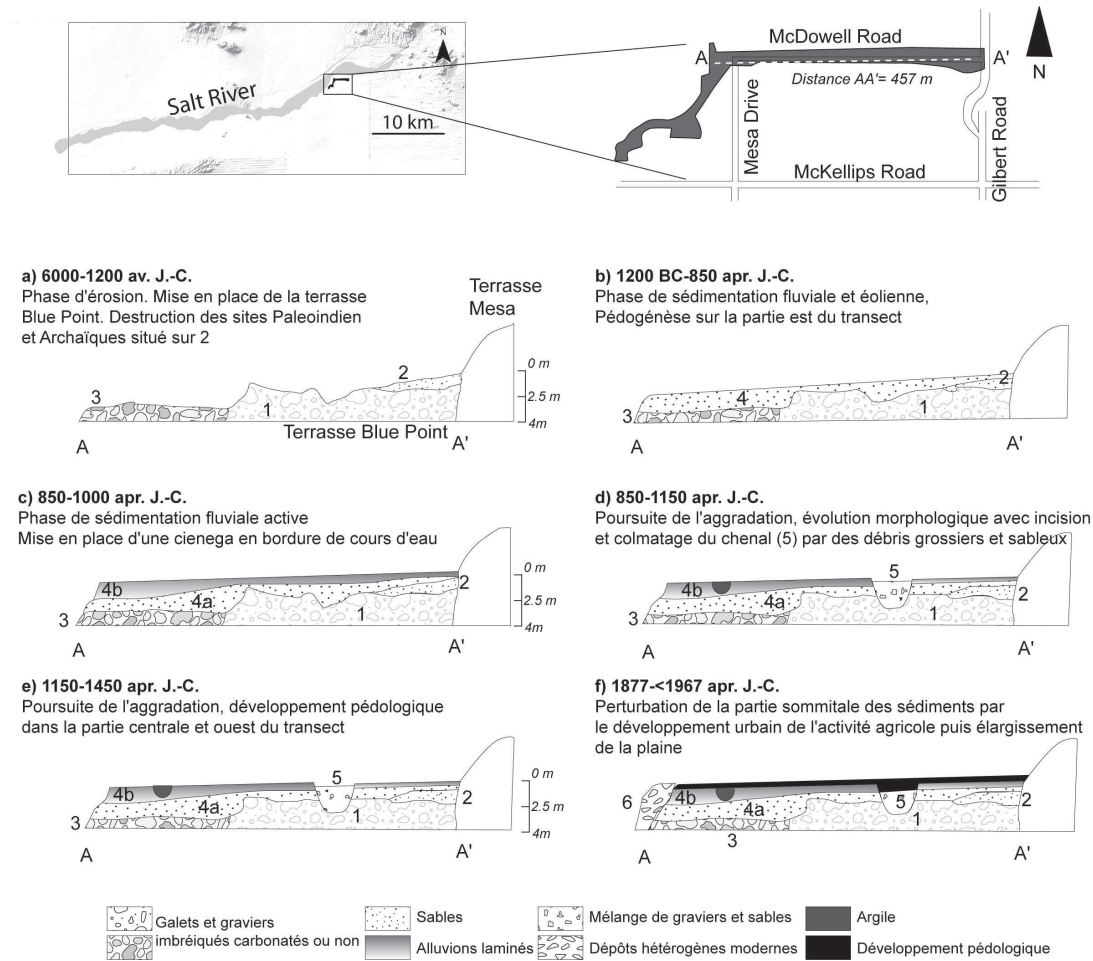


Fig. 33 : Synthèse des données géomorphologiques en amont de la Salt: transect effectué dans la terrasse Lehi (Phillips et al., 2004)

4. Conclusion

Dans ce second chapitre, nous nous sommes penchés, de façon régressive, sur l'histoire culturelle et environnementale des Akimel O'Odham et des Hohokam, en observant les contraintes climatiques, humaines et hydrologiques, à haute et basse fréquence, auxquelles ces populations ont fait face depuis les deux derniers millénaires. Les données historiques écrites fournissent une illustration des réponses systémiques aux problèmes écologiques et sociaux (mobilité, migration, diversification des pratiques agraires en réponse aux crues et aux sécheresses). Les données archéologiques mettent en relief les épisodes de ruptures culturelles et leurs causes potentielles auxquels les analyses paléoenvironnementales et géomorphologiques n'ont que partiellement répondues. L'étude de remplissages de canaux et de formations alluviales bien répartis géographiquement va permettre d'affiner les dynamiques morphogéniques identifiées et d'estimer avec une résolution plus fine leur impact sur la gestion de l'eau dans le bassin de Phoenix. Mais il s'agit avant tout de présenter ces différentes modes de gestion de l'eau et les pratiques associées, ainsi que leurs évolutions.

Chapitre 3

S'approprier le désert : organisation et aménagement du territoire fluvial au cours des deux derniers millénaires

1. Introduction	94
2. La gestion de l'eau et les pratiques agraires	94
2.1. Les techniques de production agricole et cultures associées	94
2.2. Description des structures hydrauliques rencontrées en plaine alluviale : les systèmes d'irrigation et de stockage d'eau	102
2.3. L'agriculture sèche : principe et description des structures rencontrées sur les terrasses et cônes alluviaux	112
3. Occupation et aménagement de l'espace fluvial de la période Archaïque à Protohistorique	115
3.1. Dans la basse vallée de la Salt	115
3.2. Dans la moyenne vallée de la Gila	129
4. Conclusion	134

1. Introduction

Dans le bassin semi-désertique de Phoenix, c'est majoritairement le besoin en eau qui dicte les conduites et les techniques agricoles. L'organisation des terres cultivées et leur pérennité repose sur des facteurs naturels tels que le climat, la couverture pédologique, la topographie et des caractéristiques inhérentes à chaque bassin versant hydrographique contrôlé. Ces quatre facteurs impliquent un choix quant aux techniques d'irrigation (structure et forme des canaux, entretien et protection des berges) et aux types de cultures. Afin d'optimiser la productivité agricole, différents types de gestion agricole (monoculture ou pluculture, variation dans le calendrier agricole) ont pu être adoptés par les populations du bassin de Phoenix.

2. La gestion de l'eau et les pratiques agraires

2.1. Les techniques de production agricole et cultures associées

2.1.1. Organisation des champs agricoles Hohokam

Les données écrites étant inexistantes, la compréhension du parcellaire Hohokam est très limitée. Seules quelques études de terrain et des approches théoriques et ethnographiques ont permis de comprendre partiellement l'organisation des champs agricoles.

Le long de la Salt River, seule une zone très localisée a préservé l'organisation des champs préhistoriques. Elle se situe dans le *Park of the Canals* à Mesa, à l'ouest de Phoenix, et a été alimentée par les canaux du système d'irrigation Lehi. Les champs sont parcourus par de longues buttes parallèles (billons) qui rappellent l'irrigation moderne par bandes de terre pratiquée par les colons. Ceci permet à l'eau de couvrir toute la surface du champ et de pénétrer plus facilement dans le sol (Fig. 34).

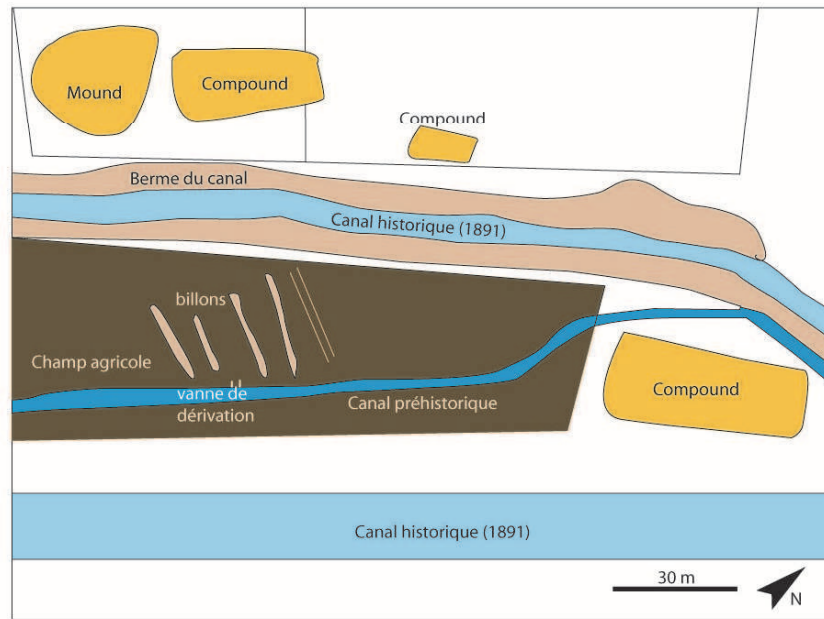
L'analyse des photos aériennes (Herskovitz, 1974 ; Masse 1981, 1991) a mis en relief une organisation des systèmes hydrauliques en « toile d'araignée ». Howard (2006), en considérant l'espace délimité par les canaux comme étant des parcelles agricoles, estima que les Hohokam cultivaient de 0.73 à 2.1 hectares par foyer (moyenne sur 26 parcelles) le long du Canal System 1 (Fig. 37). Les champs avaient des largeurs relativement stables, de 33 à 54 m, et des longueurs, plus variables, entre 150 et 380 m (Fig. 35). Leur taille devait dépendre du nombre de personnes au sein de chaque foyer, mais également de l'organisation sociale des communautés, des héritages et de l'influence de certaines familles. Howard comptabilise le nombre de champs le long des canaux latéraux ou de distribution à 31.5, soit 31.5 foyers. Il est fort probable que la majeure partie des champs irrigués appartenant et entretenus par ces foyers se situaient dans un territoire agricole à une distance inférieure à 2.5 km du village (Lees, 1973).



Canal préhistorique (photo de L. Purdue)

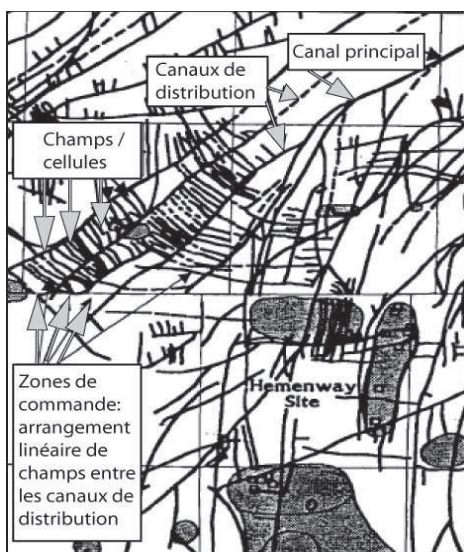


Canal historique (photo de L. Purdue)

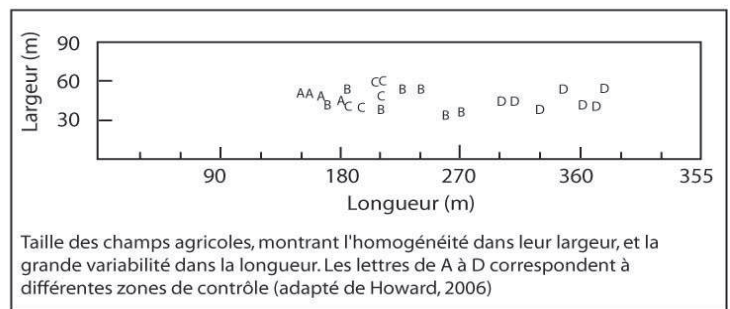


Zone de dérivation d'eau et champs agricoles à Park of the Four Canals (adapté de Howard, 2006)

Fig. 34 : Park of the four canals: canaux d'irrigation et champs agricoles préhistoriques



adapté de Howard, 2006



Taille des champs agricoles, montrant l'homogénéité dans leur largeur, et la grande variabilité dans la longueur. Les lettres de A à D correspondent à différentes zones de contrôle (adapté de Howard, 2006)

Fig. 35 : Organisation potentielle des champs agricoles: gestion et taille des champs le long du CS1

2.1.2. Organisation du parcellaire des Akimel O'Odham (17^{ème} au 19^{ème} s.)

2.1.2.1. Configuration des parcelles

Nombreux sont ceux qui ont apprécié la « *beauté, l'ordre et l'organisation* » de ces parcelles très fertiles (Emory, 1848 ; Bartlett, 1854). Russel en 1908 a retranscrit les propos du père Font parti en expédition en 1775 : « *Les parcelles, très propres et découpées en sections, sont entourées par des piquets [cailloux ou fossés] et traversées par 5 canaux. Elles sont localisées sur les berges de la rivière, qui s'élargissent pendant la saison des pluies. Pendant la basse saison, il est possible de traverser la rivière car l'eau n'arrive qu'au genou. A cette époque, elle ne rentre même pas dans les canaux, et il est impossible d'ensemencer* ». Les champs étaient rectangulaires, contigus, de largeur égale mais de longueur différente (généralement 30 m sur 60 m) (Emory, 1848).

2.1.2.2. Sélection des parcelles

Des personnes qualifiées choisissaient les terres cultivables et l'alignement du canal en fonction des sols et des potentialités de drainage et d'irrigation. Le chef d'un district (village) et un de ses adjoints réunissaient les villages (en général de 1 à 3) concernés par l'exploitation de nouvelles terres et distribuaient les parcelles, de façon généralement peu équitable. Les terres étaient nivelées en répartissant la terre des zones hautes dans les zones de plus basse altitude. 0.80 à 2 ha cultivés permettaient d'alimenter un foyer de 5 personnes (Castetter et Bell, 1942), ce qui est relativement similaire à la taille des champs Hohokam (Howard, 2006).

2.1.2.3. Fertilisation et contraintes environnementales

La teneur en éléments nutritifs, notamment l'azote N et le potassium K sont des facteurs limitant dans le bassin de Phoenix (Ackerly et al., 1987). Afin d'y remédier, certaines parcelles étaient mises en jachère avec l'exploitation alternée des buttes de semis (Stewart, 1940 ; Castetter et Bell, 1942). La rotation des cultures était également pratiquée (Haury, 1976 ; Gasser, 1982 ; Turney, 1929). Bien que les champs fussent entretenus (Nabhan, 1979), un certain nombre d'espèces rudérales y étaient tolérées, voire encouragées du fait de leur apport nutritif, textile et agricole (Rea, 1981, 1983 et 1997). C'est le cas des prosopis (mesquite) qui augmentent la qualité des sols et son humidité. Ils bordaient les champs, et poussaient, pour certains, au sein même des parcelles (Castetter et Bell, 1942). La litière formée par les feuilles était enterrée autour des plantes cultivées (Nabhan, 1985) afin de fertiliser les sols.

Enfin les Akimel O'Odham tiraient avantage de la recharge naturelle en nutriments par les eaux d'irrigation (Nabhan, 1984). Toutefois, à l'opposé des agriculteurs blancs qui favorisaient l'inondation des champs sur une longue durée, les volumes d'eau déversés dans les champs par les Akimel O'Odham étaient réduits mais plus fréquents afin d'éviter la formation de croûtes épaisses.⁶

⁶ "... they said they did not irrigate too much because it would bake the land; and if they irrigated a little at a time they would have a good crop" (Forbes, 1911).

Cette pratique augmente la teneur en limons et argiles du sol et limite sa perméabilité sur la durée (Forbes, 1911 ; FAO, 1973). Elle favorise également le ruissellement et il est fréquent d'observer une forte érosion et incision (ravinement) des canaux. Pour y remédier, il est nécessaire de favoriser le développement de la végétation en bordure des fossés. L'accumulation de sel dans certaines zones a fortement limité la productivité agricole. En réponse à une mauvaise gestion des canaux de drainage (Lippincott, 1900) ou des remontées de nappe (Grossmann, 1871), les Akimel O'Odham abandonnaient fréquemment les terres agricoles (Halseth, 1932). Dans la vallée de la Gila, l'alcalinité et la salinité des sols nécessitaient 20% d'eau d'irrigation supplémentaire (Ackerly, 1988 ; Calvin, 1951 ; Emory, 1848 ; Southworth, 1919).

Dans un autre registre, afin de lutter contre les ravageurs (notamment le criquet), les Akimel O'Odham introduisaient des lapins dans les champs ou enfumaient les parcelles (Castetter et Bell, 1942).

2.1.3. Espèces cultivées, encouragées ou exploitées ?

2.1.3.1. **Espèces cultivées**

Tout comme ailleurs en Amérique centrale, les principales espèces cultivées par les Hohokam sont le maïs, le haricot, la courge et le coton.

Le maïs (*Zea Mays*) a été introduit en Arizona vers 1000 av. J.-C. dans la région du Sonora et fut initialement cultivé comme complément alimentaire à la chasse et la cueillette. Le maïs est très clairement cultivé de la période Pionnière à Sédentaire (600-1150 apr. J.-C.), bien que certaines données archéologiques aient montré une diminution de sa consommation au cours de la période Classique (1150-1450 apr. J.-C.) (Kwiatkowski, 2003).

Les espèces de haricots cultivées sont similaires à celles exploitées au cours de la période Historique. Le haricot tépari (*Phaseolus acutifolius*), bien que rarement mis au jour, a probablement été introduit d'Amérique centrale au cours de la période Pionnière. Cette espèce, très résistante à la sécheresse et à la salinité, peut être plantée deux fois dans l'année. Les autres espèces comme le *Canavalia ensiformis* (haricot jack), *Phaseolus lunatus* (haricot Lima) ont été découvertes dans les sites archéologiques de la période Sédentaire soit autour de 975 apr. J.-C. (Schoenwetter, 1962) ce qui suggère un échange continu des compétences agricoles entre le Sud-Ouest américain et l'Amérique centrale.

Les deux espèces principales de courges cultivées sont le *Cucurbita Argyrosperma* (Courge Striped Cushaw) et le *Cucurbita Moschata* (Courge musquée). Elles ont été cultivées dans l'ensemble du territoire Hohokam (Gish, 1985 ; Teague et Crown, 1982-1984) en bordure de cours d'eau, et sur les piémonts dès la période Pionnière (Gasser, 1990).

Les traces de culture de coton sont attestées uniquement en bordure des cours d'eau, et notamment le long de la Gila River (Gasser et Kwiatkowski, 1991). Les Hohokam cultivaient le *Gossypium Hirsutum var. punctatum* (Gasser et Kwiatkowski, 1991) dont le cycle végétatif de 85 jours pouvait probablement permettre une biculture.

Les Akimel O’Odham cultivaient également le maïs (*Zea mays*), espèce authigène à courte période de maturation (Forbes, 1911), le haricot (*Phaseolus acutifolius* : haricot tépari ; *Canavalia ensiformis* : haricot jack ; *Phaseolus lunatus* : haricot Lima) et la courge (*Cucurbita Argyrosperma* et *Cucurbita Moschata*).

2.1.3.2. Espèces encouragées

L’agave (*Agave sp.*) n’était pas domestiquée à proprement parler du fait de son cycle végétatif très long. Sa présence était encouragée à la base des piémonts sur des zones rocheuses (Fish et al., 1992) et à la limite des zones irriguées (Gasser et Kwiatkowski, 1991; Mitchell, 1989).

De nombreuses traces de son exploitation ont été mises en évidence à des altitudes nettement inférieures à son habitat naturel (Gasser et Kwiatkowski, 1991 ; Fish et Fish, 1992). Le long de la Salt River, sa consommation est attestée notamment sur la rive nord, sur les sites de La Ciudad (Boher, 1987), El Caserio (Kwiatkowski, 1989a), La Lomita (Kwiatkowski, 1990), Casa Buena (Gasser, 1988a) et Grand Canal Ruins (Kwiatkowski, 1989b) (Fig. 26). Elle aurait même été identifiée sur le site Pionnier de La Cuenca del Sedimento à Tempe (Miksicek, 1989). Certains suggèrent qu’elle aurait progressivement remplacé le cactus Saguaro (*Opuntia*) (Kwiatkowski, 1988) ou aurait pu servir d’alternative à des cultures trop exigeantes en eau, comme le maïs (Gasser et Kwiatkowski, 1991). De même, le cactus cholla (*Opuntia Cyllindropuntia*) a été découvert en dehors de son habitat naturel. Il aurait pu être planté dans des zones domestiques (Bohrer, 1991).

Les Akimel O’Odham consommaient également les bourgeons et le cactus cholla (*Opuntia Cyllindropuntia*) au printemps ainsi que les graines, bourgeons et fruits du Saguaro (*Carnegiea gigantea*). Ils exploitaient également les massettes (*Typha sp.*) qui sont une bonne source de nutriments (pollen et fruits). Les racines broyées peuvent servir de farine et apportent autant de matière grasse, protéine et carbohydrates que le maïs, le blé ou le riz (Harrington, 1967).

2.1.3.3. Espèces domestiquées

L’évolution morphologique de certaines graines a poussé des chercheurs à proposer la domestication de cinq espèces. C’est le cas de l’orge sauvage (*Hordeum pusillum*) (Bohrer, 1987) observé dans de nombreux sites le long de la Salt et de la Gila dès la période Coloniale ; du crucillo Mexicain (*Condalia warnockii*), petit buisson dont les baies ressemblent à celles du genévrier, d’une amarantacée (*A.hypochondiacus*) qui apparaît tardivement, du tabac (*Nicotiana rustica*), et enfin d’une espèce ressemblant au piment domestiqué (*Capsicum annum*).

2.1.3.4. Espèces natives exploitées pendant la saison fraîche

Seules les espèces natives peuvent être exploitées et récoltées au cours de la saison fraîche (de février à mai). Leur développement peut être favorisé dans les zones non cultivées ou laissées vacantes.

C'est le cas de l'orge sauvage (*Hordeum pusillum*) exploité dès la période Pionnière (Bohrer, 1984), des *Chenopodium spp.*, de la moutarde (*Descurainia sp.*) et d'autres graminées (*Phalaris sp.* et *Astragalus sp.*).

Parmi les taxons exploités chez les Akimel O'Odham, le mesquite domine (*Prosopis sp.*). Cette espèce de ripisylve (Mitchell, 1989) produit une gousse qui peut être consommée de diverses façons, notamment pendant les années à faible débit hydrique (Stone, 1981), voire de disette. C'est une bonne source en carbohydrates et en protéines (Castetter et Bell, 1942; Gasser et Kwiatkowski, 1991) et les gousses récoltées sur une zone de 1.1 à 2.4 ha peuvent apporter les calories nécessaires pour une personne pendant une durée de 1 an (Kwiatkowski, 1994).

De nombreuses autres espèces étaient exploitées à des fins alimentaires, comme les graines du peuplier oriental (*Populus fremontii*), du paloverde (*Cercidium floridum*), de l'amarante (*Amaranthus sp.*), de l'arroche, et de la moutarde sauvage principalement ; la partie végétative des chenopodiacées (*Atriplex sp.*), de l'oseille (*Rumex sp.*) et le yucca (*Yucca sp.*) (Russel, 1908 ; Castetter et Bell, 1942 ; Nabhan, 1979 ; Hodgson, 2001).

2.1.4. Pratiquaient-ils la monoculture ou la biculture ?

Du fait des variabilités dans les périodes de croissance, notamment pour le maïs et le coton, un même groupe dépendant d'un système d'irrigation commun devait posséder le même calendrier agricole et les décisions individuelles devaient être limitées (Howard, 2006). Chaque groupe responsable de l'allocation de l'eau le long d'un canal principal ou de distribution, dit *command area* (Howard, 2006), aurait donc planté à la même période. Le long d'un autre système, un léger décalage temporel aurait permis aux agriculteurs de bénéficier d'une arrivée d'eau plus sûre.

Les récoltes auraient eu lieu entre juillet et novembre (Ackerly, 1989), au moment où l'eau est la plus rare (Nials et al., 1989). Des cultures bisannuelles sont envisagées (Bohrer, 1970), avec une réouverture des vannes pour le second cycle de plantation avec l'arrivée des pluies de mousson à la fin de l'été. Dans ce contexte, la seconde culture aurait été soumise à des températures et une salinité plus élevées que la première plantation de mars, et la productivité aurait été bien plus faible.

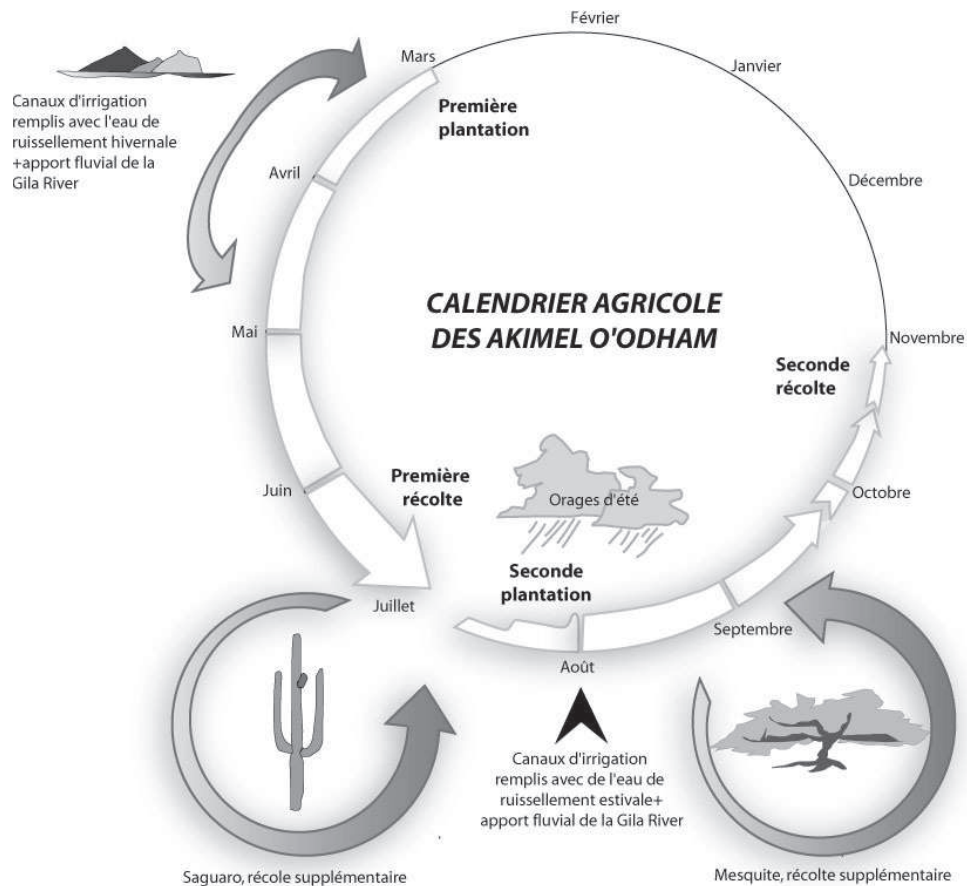
Les communautés Akimel O'Odham pratiquaient principalement la monoculture bisannuelle. La plantation de maïs, haricot, courge avait lieu au début du printemps, après les derniers gels et au début des crues nivales, lorsque les feuilles apparaissent sur le peuplier oriental (Castetter et Bell, 1942) (Fig. 36).

Une seconde période de plantation (coton et tabac) avait lieu au mois d'août, juste après la récolte de saguaro (Fig. 36). Avant chaque semis, la terre était irriguée puis mise à sécher. Les graines n'étaient jamais plantées en ligne mais dans de petits talus d'environ 15 cm de hauteur et espacés de 80 cm. Environ 4 graines étaient plantées à 10 à 15 cm de profondeur dans ces talus. Ces dernières étaient parfois humidifiées avant d'être plantées, surtout lorsque la première plantation avait échoué (crues, rongeurs).

Ensuite, selon les espèces cultivées, chaque parcelle était irriguée de 3 à 5 fois entre la plantation et la récolte, mais la première irrigation pré-plantation était souvent l'unique

suite au déficit hydrique de la Gila. Les rendements étaient les plus élevés avec des irrigations entre le début de la période végétative et la floraison (Castetter et Bell, 1942).

Des camps temporaires, établis pour la récolte (Rea, 1997), et des « *maisons des champs* » occupées tout au long de l'été permettaient de préparer et sécher les cultures avant de les ramener au village (Castetter et Bell, 1942).



adapté de Bohrer, 1970

Fig. 36 : Calendrier agricole des Akime O'Odham dans la Gila River Indian Community

2.1.5. La pratique du feu

Les recherches liées à la pratique du feu à des fins agricoles sont rares. Le projet Queen Creek Station et Salt-Gila Project (Fish et Miksicek dans Bohrer, 1991) a mis en évidence la présence de macrocharbons de buissons dans les réservoirs et en bordure de fossés associés à la disparition des Composées (*Ambrosia* sp.).

On suppose que les Hohokam ont mis le feu à de larges zones pour favoriser le développement de certaines graminées pendant la saison fraîche (Gasser, 1987).

Bohrer (1992, 1997) suggère également que l'utilisation du feu aurait permis d'éclaircir certaines zones à des fins agricoles et aurait favorisé le développement de l'association végétale dite *Chapparal* (équivalent des associations de garrigue).

Cette hypothèse repose sur des pratiques historiques de feux volontaires visant à regrouper les rongeurs et les lapins dans des zones spécifiques (Rea, 1997).

2.1.6. *Variabilité spatiale des ressources végétales et implications*

Quatre facteurs influent sur la variabilité spatiale des ressources végétales (Gasser et Kwiatkowski, 1991).

2.1.6.1. **Disponibilité et répartition naturelle de la végétation**

De façon logique, les données archéobotaniques suggèrent que les Hohokam installés à proximité de certaines ressources végétales exploitables, comme le mesquite (près des bosquets sur la rive nord de la Salt), les cactus (sur certains bajadas), le plantain (le long de McClellan wash) ou l'agave (le long de l'Agua Fria), ont développé des stratégies adaptatives et ont exploité ces ressources de façon préférentielle.

2.1.6.2. **Préférences ethniques**

Au moins quatre espèces présentent une distribution interrégionale anormale. C'est le cas de l'agave, qui a été mise en évidence hors de son biotope naturel. L'orge sauvage, dont l'habitat naturel est situé dans le bassin de Tucson, a été identifié principalement dans la périphérie nord du territoire des Hohokam et dans le bassin de Phoenix. A l'opposé, les graines de moutarde ont été observées dans le bassin de Tucson alors que leur biotope naturel se situe dans le bassin de Phoenix. Il a donc été suggéré que cette variabilité résulte de certaines préférences et traditions culinaires qui se sont poursuivies au cours des périodes historiques (Crosswhite, 1981).

2.1.6.3. **Variabilité liée à des spécialisations locales à des fins commerciales**

Certains ont suggéré qu'au cours de la période Classique, des sites se seraient spécialisés dans la production de certaines espèces à des fins commerciales (Gasser, 1988 b). Ainsi le long de la Salt, les données carpologiques suggèrent que le village de Los Hornos aurait pu se spécialiser dans l'exploitation du cactus, le village de La Ciudad dans l'orge sauvage, et Las Colinas dans la production de maïs (Gasser and Miksicek, 1985). Le long de la Gila, le village de Snaketown se serait spécialisé dans la production de saguaro et de mesquite, et les villages d'Escalante, Las Dosas et Upper Santan dans le coton (Purdue et al., en cours ; Gasser et Miksicek, 1985) (Fig. 26).

2.1.6.4. **Processus post-dépositionnels**

La compréhension de l'économie végétale repose principalement sur des études palynologiques et carpologiques effectuées intra site (fosses, canaux, etc.). La préservation préférentielle de certaines espèces végétales est indiscutable (Bohrer, 1976 ; Gasser et Adams, 1981 ; Munson et al., 1971 ; Pearsall, 1989) et du fait d'une conservation parfois minime, les spectres polliniques sont souvent similaires et peu diversifiés. Plusieurs espèces sont observées de façon récurrente dans les dépôts.

La famille des Chenopodiaceae (chénopodiacées et amarantacées) domine dans les spectres polliniques archéologiques (40 à 60%). Le type *Ambrosia* et la famille des composées sont également présents, atteignant parfois 30 à 40 % du spectre pollinique.

Enfin l'arroche du désert (*Atriplex* sp.) (Turner et Brown, 1982) et le maïs (*Zea Mays*) présentent généralement un pourcentage élevé, à l'opposé du coton, qui pollinise très peu.

2.1.7. Remarque sur l'économie et l'utilisation des ressources disponibles sur la durée

Cette thématique sera nettement plus développée dans la partie IV. Deux points sont à mentionner : 1) au cours de la période PréClassique (750-1150 apr. J.-C.), l'ensemble des espèces cultivées est attesté dans les corpus et les ressources naturelles exploitées sont réduites. 2) La principale évolution au cours de la période Classique (1150-1450 apr. J.-C.) est l'augmentation de la pratique de la cueillette puis la réduction des ressources locales disponibles.

2.2. Description des structures hydrauliques rencontrées en plaine alluviale : les systèmes d'irrigation et de stockage d'eau

2.2.1. Origine et évolution des systèmes d'irrigation Hohokam

On a longtemps pensé que le développement de l'irrigation et l'apogée de la civilisation Hohokam étaient liés à une influence méso-américaine. Aujourd'hui, une origine autochtone de l'irrigation est nettement envisagée. Ceci a été confirmé par la découverte de canaux dans le bassin de Tucson daté de 1000 av. J.-C. (Mabry, 1995). Les premiers canaux mis au jour dans le bassin de Phoenix datent de 100 apr. J.-C. (Henderson, 1989) et attestent d'une continuité entre des pratiques agraires nettement plus anciennes et le développement de la culture Hohokam au cours du 2^{ème}-3^{ème} s. apr. J.-C.

La construction de canaux d'irrigation est clairement attestée dans le bassin de Phoenix dès 300 apr. J.-C. (Haury, 1976) mais leur utilisation se généralise dès 550 apr. J.-C. et ce jusqu'à 1450 apr. J.-C. (Masse, 1981 ; Nicholas, 1981 ; Ackerly, 1982).

Initialement de petite taille, pour ceux construits au cours de la période Pionnière (600-750 apr. J.-C.), leur taille et la superficie irriguée sont doublées au cours de la période Sédentaire (950-1150 apr. J.-C.) (Nicholas et Neitzel, 1984) et la structure linéaire des réseaux évolue vers un système dendritique.

Au cours de la période Classique (1150-1450 apr. J.-C.), les canaux ne sont plus creusés dans la moyenne vallée de la Gila et le long de la Salt, mais de petits canaux à configuration nettement moins optimale (Turney, 1924) et de nouvelles interconnexions entre canaux ont été mis au jour (Neitzel, 1987).

2.2.2. Structure, localisation et fonctionnement

2.2.2.1. Structure générale des réseaux d'irrigation construits dans les vallées de la Salt et de la Gila

Les systèmes d'irrigation construits le long de la Salt sont très différents de ceux de la Gila River. Il est essentiel d'avoir une vision topographique et géomorphologique du paysage pour comprendre leur organisation.

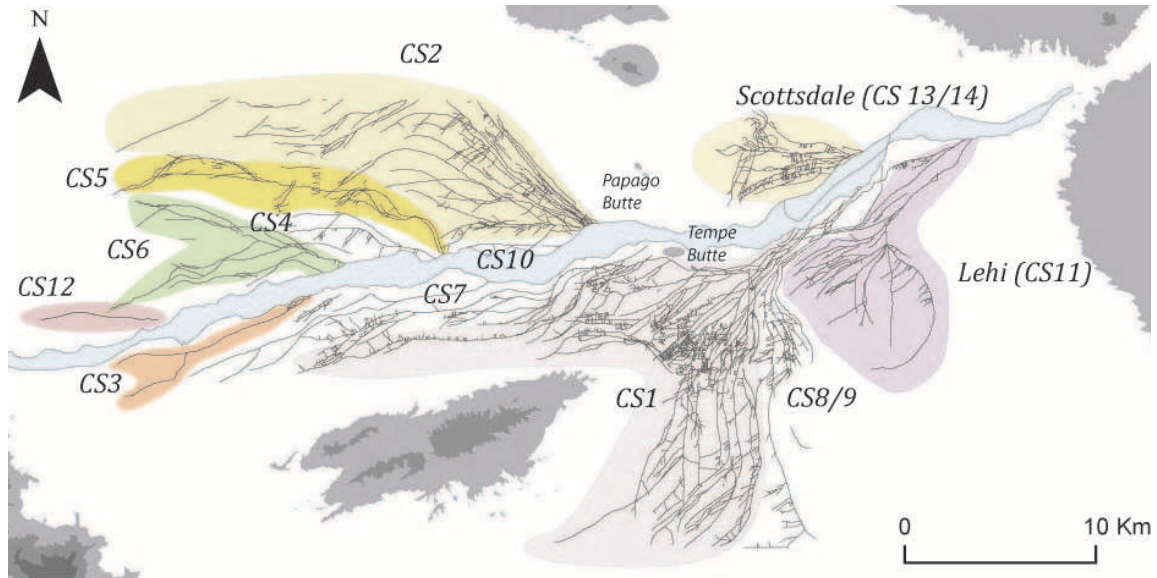
Le long de la Salt River, au moins 14 systèmes d'irrigation ont été dégagés et cartographiés (Dart, 1989), dont quatre principaux (Fig. 37). Ces systèmes occupent une grande partie de la vallée, où la faible pente (0.019 m/km en moyenne) orientée ouest-est, permet la pratique de l'irrigation gravitaire. Les deux systèmes majeurs les plus en amont sont le **Scottsdale Canal System** sur la rive nord, et le **Lehi System** sur la rive sud. L'embouchure probable des canaux du Scottsdale System est située sur la terrasse Mesa à une altitude moyenne probable de 380 m. Les canaux suivent la pente naturelle moyenne de 0.09 % sur environ 6 km (Fig. 37). Les vannes d'entrée des canaux du système Lehi sont situées sur la terrasse Lehi, à une altitude moyenne de 390 m. Ils s'écoulent sur une pente d'environ 0.18% pendant environ 8 km, puis une zone de plus faible altitude sur la terrasse Mesa favorise leur expansion plus au sud où ils s'écoulent alors avec un gradient probable de 0.12% sur une distance similaire (Fig. 37).

Le **Canal System 1** est construit sur la rive sud de la Salt à une altitude de 374 m; sur la terrasse Lehi pour les canaux les plus anciens, puis sur la terrasse Mesa pour les plus tardifs. Les vannes d'entrée sont situées bien en amont sur la terrasse Lehi, ce qui facilite la dérivation de l'eau et son écoulement sur une pente de 0.17% pendant presque 10 km. Un replat topographique permet la construction des canaux sur la terrasse Mesa qui s'écoulent alors sur presque 15 km avec une pente de 0.08 % (Fig. 37).

Le **Canal System 2** est situé sur la rive nord-ouest de la Salt. L'embouchure des canaux, bien qu'à faible altitude (350 m), est située au niveau d'une zone de résurgence d'eau entre Tempe et Papago Butte (Fig. 37). Le pendage naturel est favorable à un bon écoulement de l'eau sur la terrasse Lehi et les canaux sont rapidement construits sur la terrasse Mesa en suivant les courbes de niveau. Plus au nord, ils traversent de nombreux cônes alluviaux latéraux et ont un gradient très variable, ce qui limite leur efficacité.

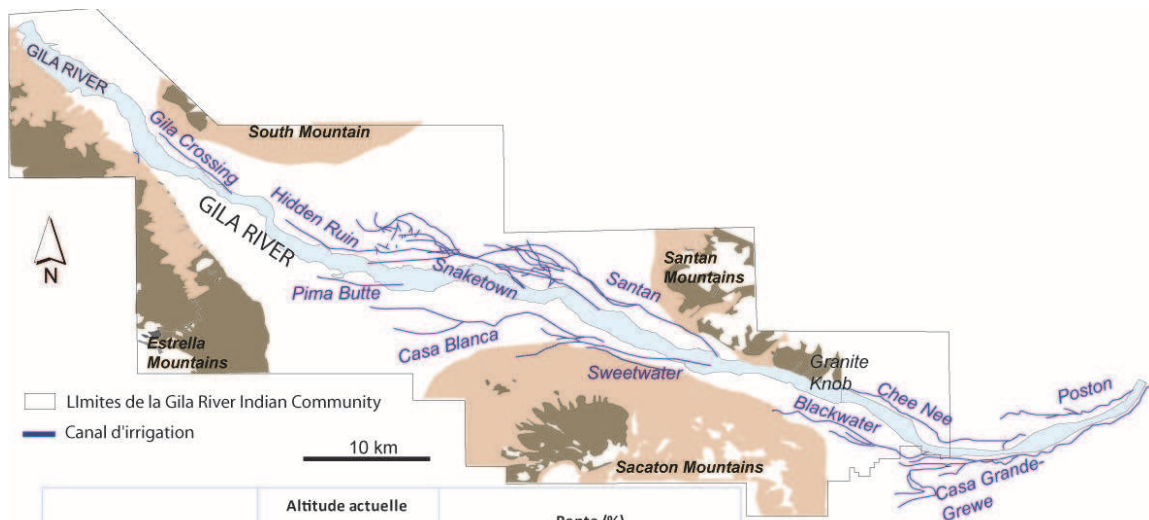
La topographie de la Gila River est nettement différente. Les terrasses ne sont pas larges et ne permettent pas une expansion latérale de l'irrigation comme le long de la Salt River. La configuration générale des systèmes d'irrigation est donc en ruban (Hodder et Orton, 1976) (Fig. 38) et les canaux s'écoulent du sud-est au nord-ouest avec une pente moyenne de 0.14-0.16%, relativement homogène à l'échelle du territoire de la communauté (Fig. 38). 13 systèmes d'irrigation préhistoriques sont cartographiés le long de la moyenne Gila. Trois de ces systèmes (Canal System 1, 3, et Canal Laveen) ont leurs prises d'eau dans la Salt, mais ils s'étendent dans la Gila River Indian Community (Howard et Huckleberry, 1991 ; Midvale, 1968 ; Turney, 1929 ; Woodson et Neily, 1998).

Les réseaux Pinal, Grewe-Casa grande, Poston, Chee Nee, Blackwater, Santan, Casa Blanca, Gila Butte et Snaketown ont leurs prises d'eau sur la Gila River, et sont relativement bien étudiés (ex : Crown, 1984 ; Dart, 1983 ; Midvale, 1963, 1965 ; Woodson et Davis, 2001 ; Gregory et Huckleberry, 1994). Cholla Butte, Granite Knob, Sacaton, Pima Butte, Hidden Ruin et Gila Crossing sont quant à eux bien moins compris (Fig. 38). Du fait de la faible expansion spatiale de ces réseaux de canaux, les communautés le long de la Gila River ont dû diversifier leurs méthodes culturales. Ainsi, d'autres structures, comme celles liées à l'agriculture sèche (terrasses, rock piles, voir section 2.3) ont été mises en évidence à proximité des habitations.



CANAL SYSTEM MAJEUR	Altitude actuelle moyenne des vannes d'entrée (supposées)	Pente (%)	
		Terrasse Lehi	Terrasse Mesa
Scottsdale Canal System	382 m	/	0.09
Canal System 1	374 m	0.17	0.08
Canal System 2	350 m	0.19	0.09
Lehi System	390 m	0.18	0.12

Fig. 37: Les 14 principaux systèmes d'irrigation le long de la Salt River (fond de carte Howard et Huckleberry, 1991 ; système d'irrigation de Turney, 1929)



CANAL SYSTEM MAJEUR	Altitude actuelle moyenne des vannes d'entrée (supposées)	Pente (%)	
		Terrasse 2/ Terrasse 3	Terrasse 2
Santan System	390 m	/	0.14
Casa Blanca System	380 m	/	0.16
Casa Grande/Grewe System	456 m	/	0.16
Blackwater System	437 m	0.14	/
Snaketown System	364 m	0.16	/
Poston System	450 m	/	0.19

Fig. 38: Les principaux systèmes d'irrigation dans la Gila River Indian Reservation (Woodson, 2003)

2.2.2.2. Organisation et fonctionnement au cours des périodes préhistoriques

Les structures hydrauliques construites ont une configuration similaire dans l'ensemble du bassin de Phoenix, mais un degré d'efficacité très variable. Il existe trois types de canaux hiérarchisés qui peuvent être construits sur de très grandes distances (Fig. 39a). Les canaux principaux dérivent l'eau de la rivière et l'acheminent vers des canaux de distribution. Ces derniers la répartissent dans des canaux latéraux, qui l'évacuent dans les champs. En général, ils sont droits et régulièrement espacés, parallèles ou perpendiculaires aux canaux de distribution (Graybill et al., 1989). Des vannes d'entrée contrôlent l'entrée d'eau.

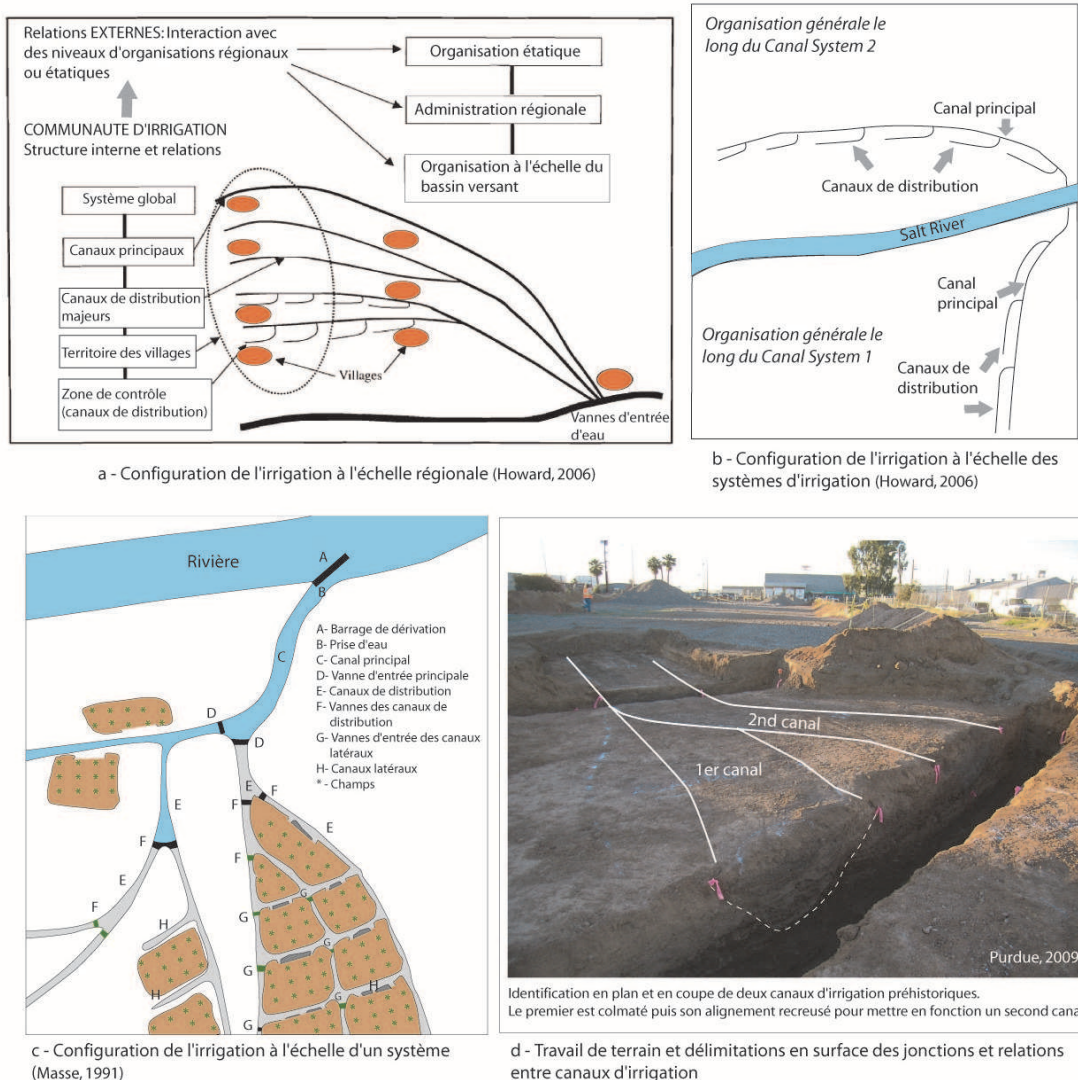


Fig. 39: Organisation interne des systèmes d'irrigation

Etant donné que les Hohokam ne possédaient que des outils en bois comme des pelles, il est fort probable qu'ils aient cherché la simplicité lors de la construction de leurs canaux, en prenant avantage de conditions existantes. Selon Patrick (1903), les premiers canaux étaient construits dans des zones topographiques plus basses ou dans de petits cours d'eau en cours d'incision le long de la plaine alluviale.

Afin de dériver l'eau de façon optimale, les prises d'eau ont été positionnées à des endroits stratégiques, notamment au niveau de résurgences d'eau. C'est le cas du Canal System 2, le long de la Salt, et des systèmes Casa grande, Santan, Casa Blanca, Snaketown le long de la Gila (Gregory et Nials, 1985 ; Haury, 1976 ; Midvale, 1965). Les zones non irrigables devaient être le lieu d'habitation (Nials et al., 1989). Les variations topographiques ont fortement influencé la configuration des systèmes.

Les canaux sont orientés est-ouest le long du Canal System 2 (Fig. 39 b), mais nord-sud le long du Canal System 1. A l'opposé, les canaux le long de la Gila sont limités spatialement par les terrasses élevées. Ils suivent pour la plupart une orientation sud-est/nord-ouest, excepté pour les zones où les eaux de ruissellement sont canalisées.

Une fois dans les champs, l'irrigation serait du type « inondation par ruissellement » (Nials et Gregory, 1989) (Fig. 39 c) dans une parcelle découpée en billons de terre parallèles, peu espacés et plus profonds que les canaux d'irrigation (Nials et Gregory, 1989). L'eau est déversée dans la parcelle par des brèches régulièrement espacées le long des canaux latéraux.

Il est également possible que l'irrigation se soit faite par imbibition. Il s'agit d'un système dans lequel le champ ou le compartiment est divisé en petites sections rectangulaires de surface horizontale. Les cuvettes sont remplies d'eau qu'on laisse s'infiltrer, l'excédent éventuel étant évacué par drainage.

Lorsqu'il s'agit de lessiver les sels du sol, on peut maintenir la hauteur d'eau pendant des périodes considérables en alimentant les cuvettes de façon continue. Cette méthode nécessite une main-d'œuvre relativement importante (Walker, 1989).

L'absence de données écrites interdit de comprendre l'organisation sociale, politique et économique des Hohokam. Ils appartiennent à une « communauté d'irrigation », définie comme une unité socio-économique composée d'habitations individuelles qui partagent un même système d'irrigation (Doyel, 1981 ; Gregory et Nials, 1985 ; Howard, 1987).

Les informations relatives au régime foncier et au droit à l'eau ne nous sont pas parvenues. Quelles structures gèrent la distribution de l'eau ? Sont-elles similaires à celles qui gèrent les institutions politiques locales (Hunt et Hunt, 1976) ?

Seules les archives historiques et les données ethnographiques, complétées par quelques données archéologiques et théoriques permettent de répondre à certaines de ces questions et de construire des modèles de gestion de l'eau ⁷.

⁷ Il existe aujourd'hui **4 modèles de gestion de l'eau** :

1) **La compétition irrégulière** : Ce modèle « premier arrivé, premier servi » (Turney, 1929) implique que communautés installées en aval des systèmes disposent d'un volume d'eau plus faible que les communautés en amont. 2) **La compétition régulée** (Ackerly et al., 1987), système autour duquel l'organisation socio-politique est structurée autour de la distribution de l'eau et chaque grand village contrôle un secteur donné. 3) **Une société état** ? Les agriculteurs produisent le minimum d'effort pour subvenir à leurs besoins (Boserup, 1965), sans créer de surplus (Sahlin, 1972 ; Chayanov, 1966) excepté si une autorité locale les y contraint. C'est grâce à elle que les agriculteurs poursuivent leurs activités annexes, c'est à dire échanges, commerce, rituels, production de céramique (Dietler et Hayden, 2001; Earle, 1997; Johnson et Earle, 1987; Kolata, 1993; Stanish, 1994 d'après Erickson, 2006), ce qui a été observé chez les Hohokam. Cette théorie a été critiquée par les historiens, ethnographes et géographes (Butzer, 1996 ; Denevan, 2001 ; Doolittle, 2000 ; Gelles, 1995, 2000 ; Hunt 1988, 1989, 1994, 2000 ; Mabry, 1996, 2000 ; Mitchell, 1973 ; Netting, 1993).

2.2.2.3. Organisation et fonctionnement au cours des périodes historiques

50 à 60 % de l'alimentation des Pimas-Maricopas reposait sur l'agriculture irriguée (Castetter et Bell, 1942 ; Doolittle, 2000). Trois systèmes distincts coexistaient au 19^{ème} siècle le long de la Gila et étaient contrôlés par un comité : le canal Santan, le canal Casa Blanca et les Flats. Les trois comités décidaient de l'attribution spatiale et temporelle de l'eau sur la base d'un système égalitaire. La construction des canaux principaux et des barrages de dérivation était une pratique communautaire à l'échelle de plusieurs districts. Les canaux étaient creusés manuellement, ou avec l'équivalent d'une pelle, et la terre évacuée à l'aide de paniers.

Les canaux étaient de taille supérieure aux besoins en eau d'irrigation (Southworth, 1915) afin d'alimenter les champs en particules fines qui fertilisaient les champs. L'irrigation pratiquée était par ruissellement. Chaque district possédait 3 « *ditch riders* », qui contrôlaient et attribuaient l'eau en échange d'une portion des récoltes.

Les familles appartenant au même district devaient nettoyer leurs canaux au même moment, le plus souvent au printemps, puis avertir les comités afin de remettre le canal en fonctionnement. Les petits canaux qui alimentaient directement les parcelles en eau étaient entretenus à l'échelle de la famille (Castetter et Bell, 1942).

2.2.3. Structures associées aux canaux d'irrigation

Les structures associées à l'irrigation gravitaire sont rarement mises en évidence. Seules certaines structures de base sont occasionnellement mises au jour.

2.2.3.1. Vannes pour l'entrée et le contrôle de l'eau

Deux types de vannes ont été décrits. Les premières sont situées à l'embouchure des canaux (Adams, 1976 ; Doolittle, 1990) et visent à élever le niveau de l'eau afin qu'elle circule de façon gravitaire dans les canaux d'irrigation (Doolittle, 1990). Elles sont très rarement préservées car fréquemment détruites par l'évolution des cours d'eau (Dart, 1989). Il est fort probable qu'elles ressemblaient aux prises d'eau historiques (Nials et Gregory, 1989 ; Doolittle, 1990), construites de petit bois, buches, terre et pierres dans une zone étroite du cours d'eau ou à proximité d'un méandre (Font, 1775 dans Bolton, 1930). L'eau était acheminée vers les champs, situés des deux côtés du canal, ce dernier étant fermé à son niveau terminal pour augmenter le niveau de l'eau.

Ces derniers ont montré que l'interaction entre les systèmes traditionnels agricoles et l'état est vouée à l'échec et diminue l'efficacité agricole (Brookfield, 2001; Lansing, 1991; Netting, 1993). 4) **Un système individuel et communautaire** : les communautés Hohokam ont un système de pouvoir bimodal (égalitaire et inégalitaire). Les larges systèmes d'irrigation correspondent à un système d'interaction et de propriété géré à l'échelle de la communauté en entier (Abbott, 2000 ; Elson et Abbott, 2000 ; Fish et Fish, 2000 ; Harry et Bayman, 2000). L'irrigation à petite échelle a été observée sans organisation politique (Nicholas, 1981) et aurait donc pu être gérée à l'échelle du foyer (Lees, 1973).

Les secondes vannes sont des structures végétales construites à la jonction entre deux canaux d'irrigation (Howard, 1987) ou entre un canal et un champ (Nials et Gregory, 1989) pour contrôler l'arrivée de l'eau. Une a été découverte par Cushing lors de la fouille du village de Los Muertos (vallée de la Salt) (Haury, 1945; Ackerly et al., 1987). Une autre a été observée au sein d'un canal de distribution à proximité du village de La Ciudad (Howard, 1987) (Fig. 40). Le long de la Gila, le village de Snaketown (Haury, 1976) a également révélé des structures similaires.

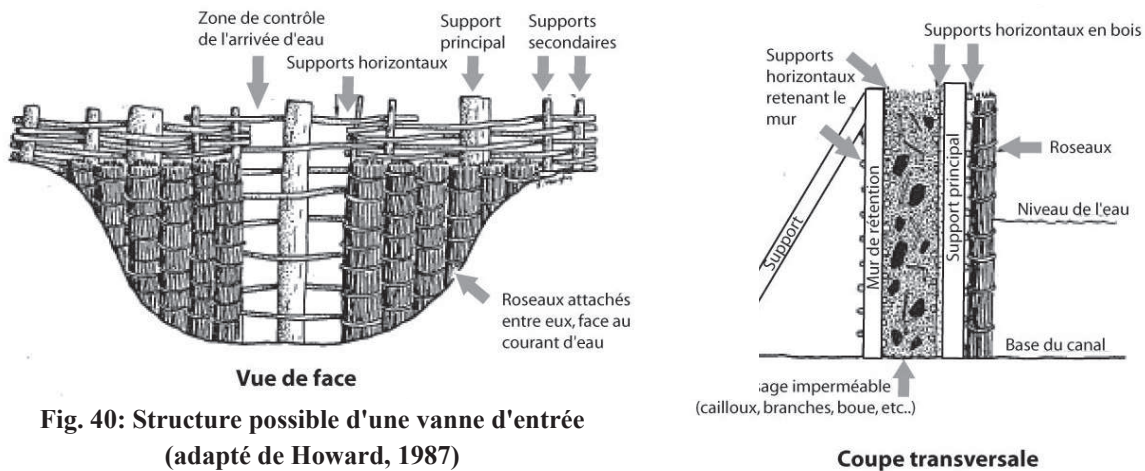
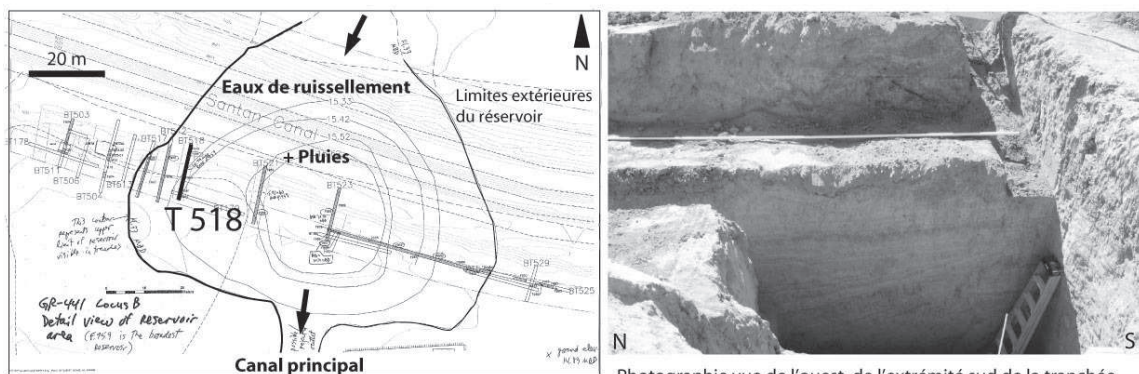


Fig. 40: Structure possible d'une vanne d'entrée
(adapté de Howard, 1987)

2.2.3.2. Les réservoirs

Ces structures sont très clairement attestées (Ackerly et al., 1987 ; Bayman et al., 1997 ; Dart, 1983 ; Masse, 1980) et visent à stocker de l'eau à des fins domestiques (Crown, 1984). Alimentés par les canaux d'irrigation, les réservoirs ne possèdent généralement pas d'exutoires (Ackerly et al., 1987), excepté lorsqu'ils alimentent des canaux d'irrigation (Purdue et al., 2010) (Fig. 41). Ils sont de taille variable mais certains peuvent atteindre 70 m de long à 40 m de large, et 4 m de profondeur. L'eau pouvait être stockée de façon temporaire, mais des études paléoécologiques ont montré que certains réservoirs stockaient de l'eau tout au long de l'année (Palacios-Fest, 1997a), parfois à une certaine distance de l'alimentation en eau (Bayman et al., 2004).



Vue en plan du réservoir préhistorique (1150-1300 apr. J.-C.) alimentant le village de l'Upper Santan, Gila River Indian community

Photographie vue de l'ouest de l'extrémité sud de la tranchée 518. Observation du remplissage supérieur laminé du réservoir (Miles, 2007)

Fig. 41 : Vue en plan et photographie d'un réservoir d'eau préhistorique, Upper Santan Village, Gila River Indian Community

Des bassins de décantation ont également été mis au jour. Ces derniers accumulaient les particules en suspension présentes dans l'eau d'irrigation (Nials et Fish, 1988) à la fois pour limiter le colmatage des canaux mais aussi pour fournir du matériel fin nécessaire à la fabrication de poteries.

2.2.4. *Contraintes, adaptations potentielles et efficacité*

Les canaux gravitaires, construits de main d'homme, sont très fragiles. Un certain nombre de critères sont à respecter (vitesse, pente, etc.). Les Hohokam ne possédaient probablement pas la connaissance nécessaire pour construire des structures hydrauliques parfaites mais une grande partie de celles construites met toutefois en évidence une forte adaptation aux contraintes environnementales.

2.2.4.1. Variations latérales du cours d'eau

L'élargissement ou les variations latérales du lit mineur ont pu assécher ou rendre inutilisables les barrages et prises d'eau des systèmes d'irrigation. En effet, l'absence d'arrivée d'eau dans les canaux signe un échec de toutes les cultures plantées le long de ce canal principal, des canaux secondaires qui en dérivent, mais également des canaux latéraux qui distribuent l'eau dans les champs. A l'opposé de la rive, les vannes d'entrée des canaux peuvent être entièrement détruites par la migration du chenal principal.

Graf (1983) a montré que la Salt, très mobile, a tendance à migrer latéralement lorsque les décharges dépassent 570 m³/s (analyse des variations latérales de la Salt sur 112 ans). Par conséquent les prises d'eau auraient dû être reconstruites tous les 2 à 5 ans (Ackerly, 1989 ; Graf, 1983 ; Masse, 1981). Certains secteurs sont sensibles à cette mobilité. Entre Tempe et Country Club Drive plus en amont (8 km), la Salt tend à migrer vers le sud, et de façon égale entre le nord et le sud en aval de 48th Street. La mobilité de la Salt River est la plus réduite entre Tempe et les Papago Buttes. De façon identique, la Gila est très mobile au niveau de sa confluence avec la Salt (Graf, 1981) (mobilité de plus de 1 km).

Quelques données éparses sur l'irrigation historique en amont de la Salt (Jones Ditch et Government Ditch) ont mis en évidence plusieurs points intéressants (Hackbarth, 1992) sur l'entretien des systèmes. Les vannes d'entrées des canaux étaient détruites 4 à 5 fois par an et leur alignement a été modifié presque 5 fois en 30 ans d'utilisation (Velasco Ditch, de 1875 à 1905). Les pluies printanières favorisaient le ruissellement et l'engorgement des cours d'eau temporaires détruisant les canaux qui les traversaient.

La rechenalisation des canaux peut être une signature des variations latérales du cours d'eau. Elle a été identifiée le long du CS1 (Ackerly et Henderson, 1989) ; du CS2 (Ackerly et al., 1987 ; Howard, 1987 ; Masse, 1976) et à Snaketown (Hauray, 1976). Des écoulements diffus dans les canaux peuvent également résulter d'un tel évènement.

Aucune trace d'adaptation n'a été observée.

2.2.4.2. Siltation

La siltation correspond à la déposition de sédiments fins dans les canaux. Ce phénomène est favorisé par la fermeture des vannes dans les canaux, par les circulations d'eau à faible vitesse et par le développement de la végétation.

Cette siltation a été observée dans de nombreux canaux dont certains pouvaient se colmater en deux ans, comme le suggèrent les données historiques dans le bassin de Tucson (1886-1887) (Dart, 1986 ; Turney, 1929 ; Huckleberry, 1987). Une diminution du gradient et de la taille des canaux favorise d'autant plus ce phénomène. Cet effet rétroactif a probablement eu de fortes conséquences sur la gestion et l'entretien des structures. Pour limiter la siltation dans les canaux, il faut augmenter le gradient du canal, diminuer la largeur des canaux ou nettoyer plus souvent le fond du canal. Des nombreuses preuves de canaux recreusés et nettoyés ont été fournies (Woodbury, 1960 ; Masse, 1981) et les buttes qui longent les canaux sont probablement composées de ces sédiments évacués après nettoyage (Woodbury, 1960; Dart, 1986). Une autre possibilité aurait été d'adapter la forme des canaux pendant leur phase de construction, voire même de construire des canaux parallèles, qui permettent de dériver l'eau lorsque l'un des deux canaux n'est pas fonctionnel. Ceci a été mis en évidence le long de Canal System 2 (Rogge et al., 2002).

2.2.4.3. Evaporation et perte d'eau par percolation

Pour réduire l'évaporation et la perte d'eau dans les canaux, les Hohokam ont modifié leur morphologie. Un canal plus large accélèrera l'évaporation, un canal plus profond stockera l'eau pendant une durée plus longue.

La mise au jour de canaux en escalier permettant la circulation pérenne d'eau dans un second canal de plus petite taille pendant des périodes plus sèches (Busch et al., 1976) atteste de l'adaptation aux conditions sèches. Une alternative à la perte d'eau était de tapisser le fond des canaux avec de l'argile brûlée, comme observé très occasionnellement dans certains canaux Hohokam (Busch et al., 1976 ; Hodge, 1983). Cette dernière hypothèse, dont l'efficacité est attestée aujourd'hui, est toutefois controversée car l'argile s'est probablement déposée de façon naturelle.

2.2.4.4. Intensité des débits et érosion

Les systèmes d'irrigation construits dans le bassin de Phoenix sont sensibles aux crues, notamment les barrages de dérivation et les vannes d'entrée, comme l'ont montré des contextes analogues historiques (Ackerly et Henderson, 1989). Certains systèmes historiques ont été entièrement abandonnés suites aux crues au début du 20^{ème} s. (Zarbin, 1984, 1986). Les Hohokam ont adapté la morphologie de leurs canaux aux fortes décharges et à la capacité érosive de l'écoulement. Près des vannes d'entrée, les canaux sont larges et profonds pour ensuite tendre, vers la fin du réseau, à un rapport largeur/profondeur nettement plus faible (Ackerly et al., 1987). La forme parabolique des canaux est la plus fréquemment observée. Des canaux en V et des canaux à fond plat (type trapèze) ont également été mis en évidence. Les buttes qui longent les canaux peuvent également protéger les canaux et les habitations des crues dans la plaine.

Les principales zones sensibles à l'érosion et nécessitant le plus d'entretien sont les jonctions entre canaux et les structures hydrauliques dont l'alignement est sinueux. A la jonction de certains canaux, des zones élargies (« jonction pools »), ralentissant la vitesse de l'eau tout en limitant l'érosion, ont été observées (Ackerly et al., 1987; Masse, 1987, 1991). D'autres élargissements, appelés bassins de décantation, ont été construits pour limiter l'érosion et favoriser la déposition de matière fine, évitant qu'elle ne circule en aval du système (Haury, 1976 ; Masse, 1987). Les berges et le fond du canal pouvaient également être aménagés et protégés en ajoutant des pierres ou même de l'argile (Doyel et Elson, 1985 ; Rankin et Katzer, 1989; Rodgers, 1977). Le long du New River Drainage, un affluent de la Salt River, le fond de certains canaux est tapissé de pierres sans doute pour limiter l'érosion (Doyel et Elson, 1985).

Enfin, Dart (1986) a décelé de nombreuses connections entre les canaux de distribution du Canal System 2, dont certaines s'écoulent sur plusieurs kilomètres. Il suggère qu'elles avaient pour but de répartir l'eau dans un ensemble de systèmes lors de phases de crues ou de débit importants qui colmatent et détruisent certaines sections des réseaux.

2.2.4.5. Développement de la végétation

Lors de phases de faible circulation d'eau, la végétation se développe dans les canaux. Les données historiques montrent que le développement des algues était tel qu'au cours des périodes estivales que des curages annuels étaient indispensables. La présence de phréatophytes, associée à des dépôts organiques (Masse, 1976 ; Turney, 1929) est souvent attestée. Pour lutter contre ce phénomène, les Hohokam pouvaient augmenter la profondeur de leurs canaux (Busch et al., 1976) pour avoir un impact sur la vitesse de l'eau mais également brûler cette végétation (Fig. 42).



Fig. 42: Canal d'irrigation principal, avec un remplissage argileux à la base et une couche cendreuse au sommet, indiquée par les flèches

2.2.4.1. Maladie

Les canaux peuvent transporter ou générer in situ des maladies (Fink et Merbs, 1991). Certaines données récentes obtenues dans les secteurs agricoles et pâturés du centre de l'Arizona (Kayed, 2004 ; Gerba, 2007) ont mis en évidence la présence de Salmonelle et Campylobacter après les fortes pluies et le développement de Giardia, Cryptosporidium, Norovirus, E. Coli dans les eaux d'irrigation.

Par ailleurs, les données historiques ont mis en évidence les fortes diarrhées résultant de l'utilisation de l'eau dans les canaux à des fins domestiques (Carlin, 1981).

2.3. L'agriculture sèche : principe et description des structures rencontrées sur les terrasses et cônes alluviaux

Du fait de l'ampleur des structures hydrauliques dans les plaines alluviales, peu d'attention a été prêtée à l'agriculture sèche. Certaines études (Crown, 1984) ont montré que ces pratiques se sont mises en place dès la période Coloniale (750 apr. J.-C.). La diversification des techniques, plus qu'une réponse à une surexploitation des sols et à une augmentation démographique, pourrait alors être une adaptation à un environnement en constante évolution et apporter des ressources supplémentaires en cas de récoltes insuffisantes.

2.3.1. Les « rock piles », « check dam » et terrasses agricoles

Les structures liées à l'agriculture sèche sont donc attestées dès la période préclassique, mais leur utilisation est plus répandue au cours de la période Classique, notamment dans les zones périphériques. Les terrasses, alignements rocheux, et « rock piles » exploitent et canalisent les eaux de pluie et de ruissellement afin de conserver l'eau le plus longtemps possible.

Les *rock piles* sont des assemblages organisés de cailloux observés sur les hautes terrasses et sur les piémonts (Midvale, 1963, 1965 ; Debowski et al., 1976 ; Doelle, 1976 ; Dart, 1983 ; Crown, 1984) (Fig. 43). Ces agglomérats de six galets ou plus, d'origine locale le plus souvent, sont régulièrement espacés (tous les quelques mètres) sur des pentes inférieures à 1%. Ils favorisent la pénétration de l'eau, l'humidification du sol, une faible évapotranspiration et constituent des zones privilégiées de culture. Des traces d'exploitation du maïs (Miksicek, 1983d ; Fish, 1983) et d'agave (Miksicek, 1984a), associées à des fours à proximité, ont été mises en évidence.

Des alignements de galets en quadrillage, bien plus structurés et délimitant des jardins, ont été observés sur les hautes terrasses de la Gila, sur des pentes entre 1 et 2% (Crown, 1987).

Les *terrasses* ne sont pas systématiquement identifiées. Elles ont été notées le long de la Salt River sur des zones aux pentes plus ou moins prononcées. C'est le cas à South Mountain pour le site de Los Hornos (Wilcox et al., 1990) et le site Classique (1300-1450 apr. J.-C.) de Loma del Rio, où des terrasses en forme de croissant suivent la morphologie des Papago buttes (Fig. 44). Des restes d'agave ont été identifiés dans les dépôts de ces terrasses.



Amas de roches observés sur les piémonts et les terrasses élevées pour s'adapter aux conditions sèches et limiter l'évaporation de l'eau après les pluies.

Ici, la photographie montre un "rock pile" observé dans la communauté de Marana, entre Phoenix et Tucson par Fish et al., 1992



Coupe transversale d'un "rock pile" dans laquelle on voit la partie basale plus foncée et humide.

Photographie de Fish et al., 1992

Fig. 43: Amas rocheux à but agricole : les *rock piles*



Fig. 44 : Terrasses agricoles observée à Loma del Rio, Papago Park, Tempe (photo de G. DeLange, 2010)

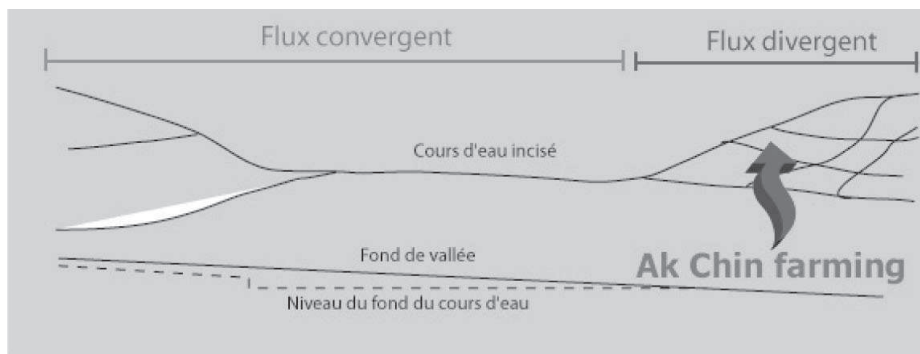
Enfin, sur des pentes de 2 à 8 %, des structures à usage indéterminé, les *check dams*, ont été mises au jour. Ce sont des amas rocheux placés en travers de cours d'eau temporaires sur les piémonts. Les particules charriées par ce cours d'eau se déposent derrière la retenue. Les Hohokam auraient pu cultiver derrière ces retenues, mais ces zones sont très instables (Woosley, 1980).

Une seconde hypothèse suggère que ces constructions avaient pour but de protéger les champs agricoles en aval des piémonts en freinant le ruissellement et en empêchant le ravinement.

2.3.2. *L'Ak-Chin farming*

L'agriculture sèche dans le Sud-Ouest américain est *l'Ak-Chin farming* (mot Tohono O'Odham pour bouche du cours d'eau) (Fig. 45). Elle consiste à collecter les eaux de pluie à l'embouchure des cônes alluviaux, sur une surface relativement plate et large, riche en fertilisants naturels : excréments d'oiseaux, feuilles et autre compost (Johnson, 2006). Des arbres et buissons sont plantés artificiellement en bordure de cette zone de rétention d'eau afin de réduire la vitesse du courant. Les graines sont plantées directement dans ces dépôts boueux.

L'évidence archéologique de cette pratique n'est pas attestée dans le bassin de Phoenix, mais certaines fouilles ont toutefois localisé des habitations temporaires, associées à des productions agraires, à proximité d'arroyos dans la vallée de la Santa Cruz et à proximité de Tucson dès la période Coloniale (Gasser, 1990 ; Gish, 1990 ; Miksicek, 1990).



Principe de l'Ak Chin farming: les champs sont situés aux extrémités des cours d'eau temporaires, et alimentés en eau après les pluies



Les poteaux visibles et les débris végétaux diminuent l'intensité des crues qui se déversent dans le champ (adapté de Nabhan, 1979, photo de T. Sheridan)



Ce petit fossé relie les zones de rétention d'eau aux champs (adapté de Nabhan, 1979, photo de T. Sheridan)

Fig. 45: Principe de l'Ak Chin farming ou agriculture sèche. Les champs ont une taille comprise entre 0.8 et 1.6 ha (Worster, 1985). Ils sont implantés sur de faibles pentes avec un sol profond (min 1.50 m). Leur emplacement dépend de l'orientation de la décharge (Hack, 1942) et de sa capacité d'érosion. Pour un développement optimal, au moins 300 mm d'eau doivent inonder le champ au moins 2 fois dans l'année sous la forme de plusieurs inondations de 75 à 150 mm (Fogel, 1975).

3. Occupation et aménagement de l'espace fluvial de la période Archaique à Protohistorique

Après avoir présenté les différentes techniques de gestion de l'eau, nous proposons ici, sur la base d'une étude diachronique paléo-paysagère et archéologique, une reconstruction de l'organisation et de l'aménagement du territoire. Nous confrontons les données relatives à la répartition de l'habitat (en fonction de sa position géomorphologique et de sa sensibilité aux crues) à celles qui évoquent la gestion de l'eau (construction des structures hydrauliques).

3.1. Dans la basse vallée de la Salt

Les résultats présentés ont été obtenus grâce à une base de données composée de 181 sites archéologiques occupés de la période Pionnière à la période Historique. Ces sites représentent pour la plupart les principaux villages pour lesquels une chronologie est établie. L'information relative à ces sites a été obtenue dans la base de données en ligne *Azsite*, et complétée par la cartographie de Howard et Huckleberry, 1991.

Les études relatives aux canaux d'irrigation sont rarement mises en relation avec l'évolution culturelle des Hohokam. L'analyse diachronique est indispensable à la compréhension de l'organisation du système, et seulement deux études menées le long de la Salt River ont tenté de restituer cette évolution et son impact sur l'organisation socio-politique. Nicholas en 1984 dans son article « *Canal Irrigation and Sociopolitical Organization in the Lower Salt River Valley : a Diachronic Analysis* » s'est penchée sur un système majeur, le Canal System 1 de même que deux systèmes mineurs, les Canal System 6 et 7 (Fig. 37). Howard et Huckleberry en 1991 ont reconstruit l'évolution de Canal System 2 de Turney, sur la rive nord de la Salt. Leur résultats sont présentés dans l'ouvrage : « *The Operation and Evolution of an Irrigation System: The East Papago Canal Study* ». Les cartes d'évolution des systèmes d'irrigations présentées ici correspondent à la synthèse de ces travaux, et ont été pour la plupart estimées par la datation de canaux principaux. De façon hypothétique, il a paru pertinent de rajouter les canaux secondaires et tertiaires, qui dépendent des canaux principaux, bien que ces derniers n'aient pas été automatiquement datés.

3.1.1. Période Archaique

Les premières traces d'occupation attribuées culturellement aux Hohokam ont été mises en évidence dans les villages de Pueblo Patricio (Cable et al., 1985 ; Henderson, 1995) sur la rive nord de la Salt, le village de La Cuenca del Sedimento sur la terrasse Lehi le long de la rive sud (Henderson, 1989) et sur les cônes détritiques dans l'actuelle ville de Scottsdale (rive nord amont) (Fig. 26).

Ces sites comprennent des maisons en fosse et une céramique brune uniforme, ainsi que des traces d'exploitation du maïs et de l'amarante (Elson et Lindeman, 1994 ; Miksicek, 1992 ; Smith, 1995).

La découverte d'un canal dans le village de la Cuenca del Sedimento met en évidence une technologie bien présente à cette période, bien qu'utilisée à petite échelle (Henderson, 1989 ; Marmaduke et Henderson, 1995).

3.1.2. *Périodes Formative et Pionnière (450-750 apr. J.-C.)*

Découpée en phases Vahki (450-500 apr. J.-C.), Estrella (500-550 apr. J.-C.), Sweetwater (550-650 apr. J.-C.) et Snaketown (650-750 apr. J.-C.), cette période est globalement caractérisée par la production de céramiques décorées rouge-sur-grise (red-on-grey) et rouge-sur-brune (red-on-brown).

3.1.2.1. Répartition de l'habitat

L'habitat est caractérisé par des fermes dispersées occupées de façon semi-permanente ou permanente. De longues maisons carrées, atteignant parfois plus de 50m², sont construites autour d'une place centrale sur les limites des plaines alluviales-terrasses. Les *fieldhouses*, occupées de façon temporaire, sont situées dans la plaine alluviale. Les premières communautés agricoles se seraient déplacées à chaque saison, de façon à exploiter la terre par une agriculture irriguée par les eaux de crues (Cable et Doyel, 1985 ; 1987 ; Doyel, 1991 ; Henderson, 1989, 1995). Vingt sites (villages et cabanes des champs) de la période Pionnière ont été répertoriés dans la basse vallée de la Salt, avec 11 d'entre eux sur la terrasse Mesa, 7 dans la plaine alluviale, 1 sur la terrasse Pleistocène Sawik, et 1 sur les bajadas (Fig. 46). La répartition de l'habitat semble indépendante de l'unité géomorphologique, bien que des hameaux s'implantent progressivement sur les hautes terrasses à la fin de la période Pionnière.

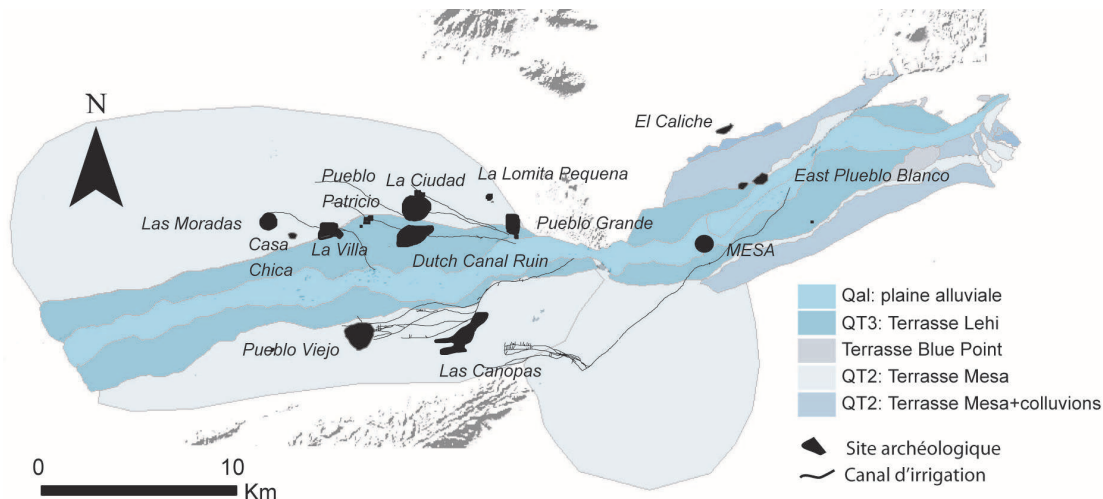


Fig. 46: Répartition de l'habitat et canaux d'irrigation construits au cours de la période Pionnière. Phase Snaketown : les villages de Pueblo Patricio (Cable et al., 1982 ; 1983 ; 1984 ; 1985), Dutch Canal Ruin (Greenwald et Ciolek-Torrello, 1988), La Cuenca del Sedimento (Henderson, 1989 ; Masse, 1987), Pueblo grande et Las Moradas se développent sur la rive nord de la Salt. A la fin de la période Pionnière, des villages aussi éloignés que La Lomita Pequena et La Ciudad sont implantés sur les hautes terrasses. Le long de la rive sud, les villages de Las Canopas et Pueblo Viejo sont également construits. Plus en amont, les communautés s'installent dans la zone de Scottsdale, le long de la terrasse Lehi (Ackerly et Henderson, 1989 ; Hackbarth et al., 1995 ; Morris, 1969).

3.1.2.1. Gestion de l'irrigation

Les systèmes d'irrigation des périodes Formative et Pionnière sont peu connus. La faible proportion de canaux mis au jour semble suggérer une exploitation diversifiée du territoire. Des canaux, courts et linéaires, appartenant au Canal System 1 et 2, sont construits (Henderson, 1987b ; Howard et Huckleberry, 1991).

La véritable maîtrise de l'hydraulique se serait développée de façon intense autour de 500 apr. J.-C. (Cable et Doyel, 1985, 1987 ; Greenwald et al., 1994 ; Henderson 1987b, 1995 ; Howard et Huckleberry, 1991 ; Howard et Wilcox, 1988) avec une irrigation des premières et secondes terrasses de la Salt et la Gila (Greenwald et Ciolek-Torrello, 1988 ; Haury, 1976).

3.1.3. Période coloniale : 750-950 apr. J.-C.

Découpées en phases Gila Butte (750-850 apr. J.-C.) et Santa Cruz (850-950 apr. J.-C.), la période coloniale est caractérisée par la construction massive de villages et de canaux d'irrigation, généralement en amont et en aval des constructions de la période Pionnière.

3.1.3.1. Organisation et répartition de l'habitat

Dès la période Coloniale, une diversification de la taille et de la fonction des sites se met en place (Gregory, 1991). Les sites de petite taille se distinguent des villages au sein desquels des structures publiques sont incorporées (Howard, 1985 ; Wilcox et al. 1981 ; Wilcox et Sternberg, 1983). En parallèle, les *fieldhouses* se structurent en ensembles complexes et favorisent l'hypothèse selon laquelle l'agriculture est gérée à l'échelle d'un foyer. Les maisons dans ces diverses unités du territoire sont généralement de taille inférieure à celle de la période Pionnière (22 m²) (Wilcox et al, 1981), de forme carrée, rectangulaire et/ou ellipsoïdale, avec des entrées uniques sur le côté. Leur organisation devient relativement spécifique, avec l'agrégation de 2 à 4 structures dont l'entrée donne sur une zone commune de travail dite cour, et typiquement associée à une zone de crémation (Gregory, 1984 ; Sires, 1984). Il est fort probable qu'un groupe situé le long d'un canal d'irrigation aurait à cette époque auto géré son système, sa construction et son entretien (Hunt et al., 2005).

Les sites archéologiques (villages et habitations à usage agricole) sont situés sur différentes unités morphologiques. Quarante-six sites ont été répertoriés dans la basse vallée de la Salt dont 28 villages et 18 zones d'accumulation d'artéfacts. Parmi ces villages, 23 d'entre eux sont situés sur la terrasse Mesa, seulement 2 sur la basse terrasse Lehi, 2 sur les bajadas et 1 sur la terrasse Pleistocène Sawik (Fig. 47). On observe donc un éloignement de l'habitat permanent au cours de la période Coloniale. Les basses plaines alluviales sont probablement occupées saisonnièrement à des fins agricoles (Greenwald et Ciolek-Torrello, 1988) comme le montre la découverte de *fieldhouses* et de zones d'accumulation d'artéfacts qui se concentrent pour moitié dans la plaine alluviale et pour moitié sur la terrasse Mesa.

3.1.3.2. Gestion de l'irrigation

Cette période est caractérisée par une forte expansion des systèmes d'irrigation. Sur la rive nord on assiste à la principale expansion du Canal System 2 (Howard et Huckleberry, 1991) vers le sud-ouest et le nord-ouest. Certains canaux situés dans la plaine alluviale semblent abandonnés à la fin de la phase Gila Butte (750-850 apr. J.-C.), de même que les sites de Pueblo Patricio et Dutch Canal Ruin. A la fin de la phase Santa Cruz (850-950 apr. J.-C.), neuf canaux principaux étaient probablement en cours d'utilisation.

Le long du système Scottsdale, deux canaux majeurs, le canal Pima et le canal Camino sont construits dans la plaine alluviale et les terrasses supérieures Mesa et Sawik.

Sur la rive sud de la Salt, les données sont éparées. Il semble que de nouveaux canaux sont construits vers l'ouest sur la terrasse Mesa et alimentent les nouveaux villages de Pueblo Primero, Los Cremaciones et La Plaza plus en amont.

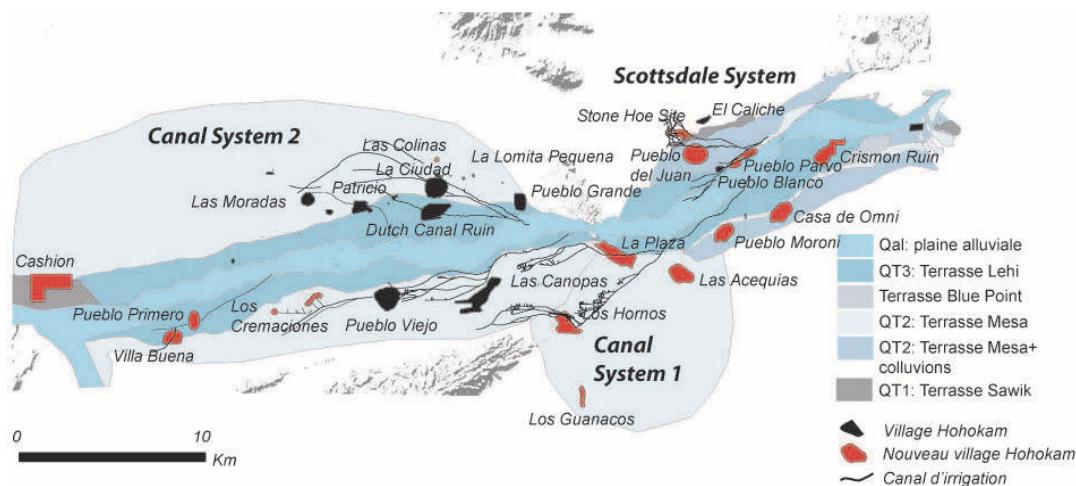


Fig. 47 : Répartition de l'habitat et canaux d'irrigation construits au cours de la période Coloniale. Sur la rive nord, l'habitat se concentre dans les villages de la Ciudad (Wilcox, 1987), Los Solares (Henderson, 1987b ; Rice, 1987), Pueblo Grande, Las Moradas. Le long de la rive sud, de nouvelles communautés s'installent dans les villages de La Plaza, Los Hornos, Los Guanacos, Las Acequias, Pueblo Moroni, Casa de Omni et Crismon Ruin. Le long du Scottsdale System, sur la rive nord en amont, une véritable communauté se met en place autour de 750-850 apr. J.-C. avec l'occupation des villages de Pueblo Blanco, Pueblo Parvo, El Caliche, Pueblo del Juan et Stone Hoe sur la terrasse Mesa (Nicholas et Feinman, 1989 ; Wilcox et Sternberg, 1983).

3.1.4. Période Sédentaire (950-1150 apr. J.-C.)

3.1.4.1. Répartition et organisation de l'habitat

L'augmentation démographique au cours de la période Sédentaire est clairement attestée sur les rives nord et sud de la Salt. Sur la rive nord, l'expansion des villages et canaux d'irrigation s'oriente vers le nord et l'ouest. Le long de la rive sud, les canaux et les villages s'éloignent de la plaine alluviale.

Sur un ensemble de 30 sites clairement occupés au cours de la période Sédentaire, 10 villages sont situés sur la terrasse Mesa, contre 6 dans la plaine alluviale.

La tendance est différente pour les sites composés d'artéfacts isolés qui sont pour moitié situés dans la plaine alluviale.

A partir de 1050 apr. J.-C., deux événements majeurs signent une évolution de l'organisation du territoire. De nouveaux villages se développent en amont du Canal System 1, à la limite de la plaine alluviale et de la terrasse Mesa, au niveau de l'emplacement actuel de la ville de Mesa. Ces villages s'organisent autour du nouveau système d'irrigation Lehi (Fig. 48).

En parallèle, de nombreuses *fieldhouses* disparaissent de la plaine alluviale (Cable et al., 1984 ; Hendersen et Clark, 2004). Le nombre exact de sites que cela représente n'est pas connu, mais la surface cultivée est réduite d'environ 6000 ha (Howard, 1993). Cet abandon des plaines résulte soit d'une intensification des crues (Nials et al., 1989) ou de raisons socio-politiques. En effet, la disparition des *fieldhouses* pourrait indiquer un changement dans la gestion des terres, avec l'hypothèse d'une gestion à plus large échelle (Cable et Doyel, 1984; Hendersen, 2003). L'abandon de ces zones (Greenwald et al., 1994 ; Henderson, 1995) n'est pas une idée acceptée par tous car la plaine alluviale reste une zone fertile par la recharge en éléments nutritifs après les crues. Les terrasses les plus élevées n'en perçoivent pas les bénéfices et les conditions édaphiques sont nettement plus contraignantes (Cable et Doyel, 1984 ; Forbes, 1902).

L'organisation interne de l'habitat reste similaire à celle de la période Coloniale, si ce n'est une légère évolution dans l'architecture publique avec des maisons généralement de forme ellipsoïdale d'une taille moyenne de 24m² (Wilcox et al., 1981).

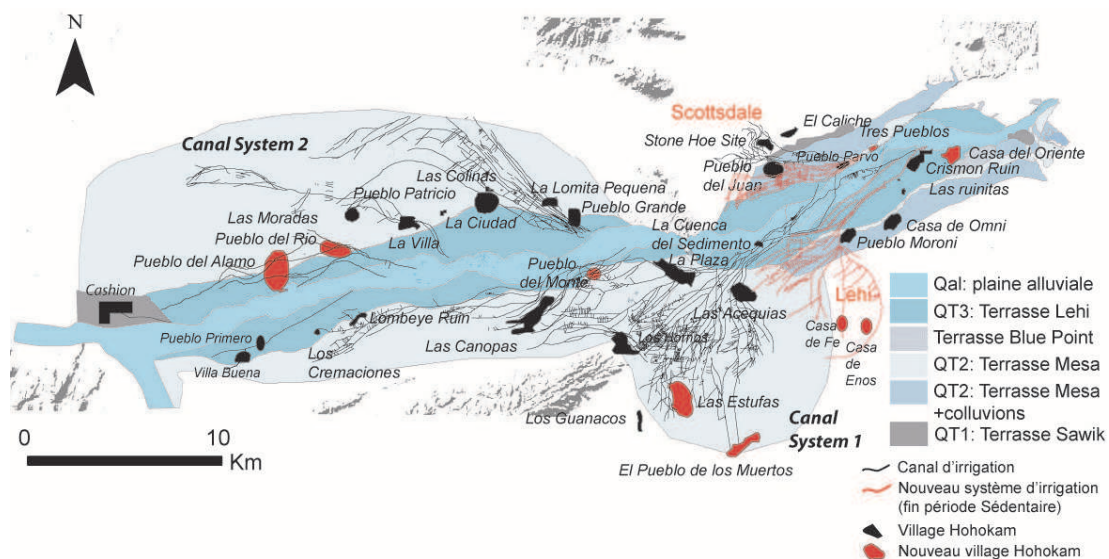


Fig. 48 : Répartition de l'habitat et construction de canaux d'irrigation à la fin de la période Sédentaire. Les villages occupés sont pour la plupart identiques à ceux de la période Coloniale. Par manque de dates, il est probable que cette carte synthétique ne présente pas tous les sites, ni tous les canaux en utilisation au cours de la période Sédentaire.

3.1.4.1. Gestion de l'irrigation

On assiste au cours de la période Sédentaire à l'expansion maximale des systèmes d'irrigation. Cette phase de construction majeure implique une administration nettement plus complexe, comme le confirment l'emplacement presque systématique des villages le long des canaux et la construction généralisée de *ball courts*. Les champs se situent à une moyenne de 2.8 à 3 km des villages (Cable et Doyel, 1984).

Le long du Canal System 2, des canaux sont construits vers le nord, mais leur gradient, vitesse et décharge sont nettement moins optimaux que ceux construits au cours de la période Coloniale. Les canaux du Canal System 1 suivent un schéma similaire avec des canaux qui suivent un axe NNE-SSW. Le Scottsdale System est peu utilisé, notamment dans les basses plaines. Ce système est reconfiguré à la fin de la période Sédentaire (Hackbarth et al., 1995; Doyel et al., 1995) avec une phase d'expansion majeure vers l'ouest (Howard, 1993).

Un nouveau système d'irrigation (Le Lehi System) est également construit entre 1000 et 1100 apr. J.-C. à l'emplacement actuel de la ville de Mesa (Howard, 1987). Ce système correspond à la dernière construction majeure opérée le long de la Salt River.

3.1.5. Période Classique (1150-1450 apr. J.-C.)

3.1.5.1. Répartition de l'habitat

Dès la fin de la période Sédentaire, les villages, au sein desquels la population a augmenté, contiennent un *platform mound*⁸, des canaux d'irrigation, des hameaux, des fermes, des *fieldhouses*. Les villages les plus larges sont protégés par un mur d'enceinte et sont généralement localisés au niveau de la partie terminale d'un système. Les nouvelles structures d'habitation sont légèrement plus petites (22.1 m²) et renforcées par des murs en caliche. Associé à cela, et de façon logique, la gestion du territoire agricole évolue. La distance entre les villages et les champs est réduite à 0.9-1 km (Cable et Doyel, 1984). Ceci pourrait impliquer une répartition de la population plus effective, dans des structures à proximité de leurs champs ou à un besoin de mieux la protéger.

Malgré ces changements, l'architecture domestique n'évolue pas (Howard, 1982) (Lehi System), comme le montre l'occupation continue des maisons en fosse, de la période Sédentaire à Classique.

Les données démographiques indiquent une augmentation de la population de la basse vallée de la Salt entre 1050 et 1300 apr. J.-C. avec une population qui aurait atteint 24 000 personnes (Dean et al., 1994 ; Doelle, 1995). 62 nouveaux sites ont été enregistrés pour la période Classique. Au cours de la période Civano (1300-1375 apr. J.-C.), la réimplantation des sites sur la terrasse Lehi est confirmée par l'établissement d'une dizaine de villages et signe la fin d'une déprise agraire. Ce regain d'intérêt pour les basses terres peut être lié à la pression démographique, à l'intensification agricole, mais également à des changements géomorphologiques. La dynamique de peuplement est très différente en aval de la zone centrale où une sorte de *no man's land* se met en place (Wilcox, 1988).

La fin de la période Classique, dite phase Polvoron (1375-1450 apr. J.-C.) (Chenault, 1996 ; Crown, 1991 ; Sires, 1983 ; Teague et Crown, 1984) est caractérisée par le déclin et l'abandon de la majeure partie des sites dans la zone centrale culturelle des Hohokam.

⁸Ce sont les villages situés en amont et en aval des systèmes d'irrigation comme les villages de Las Colinas, Pueblo Primero, Pueblo del Rio, Pueblo del Alamo, Pueblo Viejo dans desquels les *platform mounds* sont construits.

L'organisation du territoire s'articule autour d'habitats très dispersés, une poterie de faible qualité et une stratégie de subsistance mixte.

3.1.5.1. Gestion de l'irrigation

Au moins 16 systèmes d'irrigation sont en fonctionnement au cours de la période Classique (Crown, 1987 ; Doyel, 1981 ; Gregory et Nials, 1985 ; Howard, 1987) mais la représentation des canaux dans la Fig. 49 est pour grande partie hypothétique. L'expansion spatiale est maximale et la principale gestion observée est le raccordement de canaux les uns aux autres, non pas par simple accrétion mais par expansion graduelle (Nicholas et Feinman, 1989).

Le long du Canal System 1, six canaux principaux sont en fonctionnement, certains datant de la période Sédentaire, d'autres étant entièrement construits, permettant ainsi l'irrigation de 45 000 ha (Howard, 2006)⁹. Le long du Canal System 2, l'expansion des canaux vers le nord s'achève à la fin de la période Soho (1250 apr. J.-C.).

Un certain nombre d'entre eux, entre la Ciudad et Casa Buena, sont par ailleurs abandonnés. Le long du Scottsdale System, le nombre de canaux sur les terrasses holocène et pléistocène augmente nettement puis ces derniers sont abandonnés au cours du 15^{ème} s.

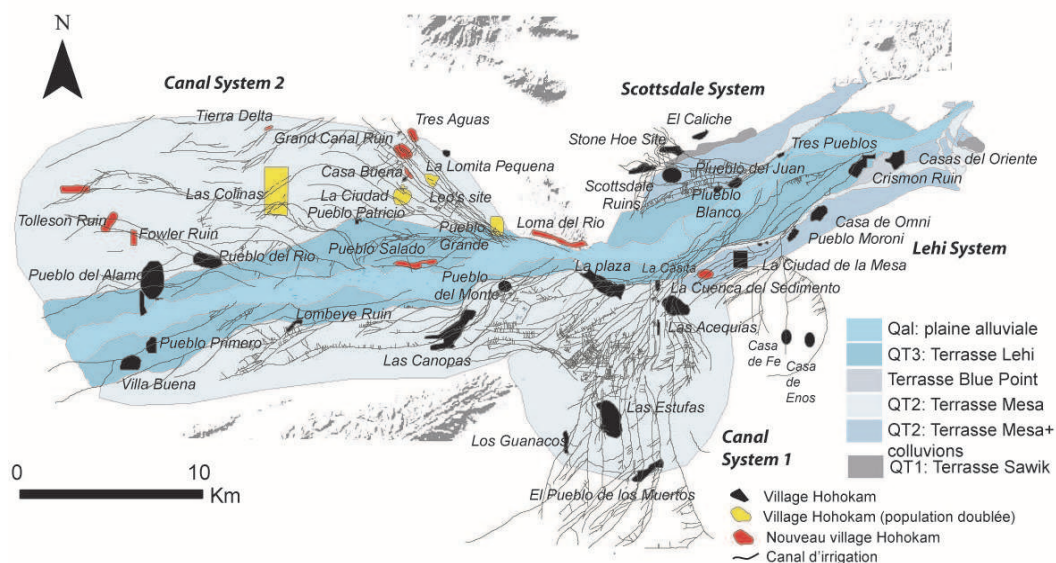


Fig. 49 : Répartition de l'habitat et construction de canaux au cours de la période Classique. La population double dans les villages de La Lomita, La Ciudad et Las Colinas, Pueblo Grande (Abbott et Foster, 2003). Les villages de Casa Buena, Grand Canal Ruins, Tres Aguas, Leo's Site, La Casita, Tierra Delta sont construits.

⁹ Cette superficie irriguée est similaire à celle cultivée vers 1800 dans la basse vallée, suite à laquelle la limite en eau disponible a été atteinte (Howard, 1993)

3.1.6. Périodes Protohistorique et Historique (?-1900 apr. J.-C.)

3.1.6.1. Répartition de l'habitat

Les données relatives à la répartition de l'habitat sont éparses pour la période Protohistorique (1450(?)-1694 apr. J.-C.). Sires (1984) caractérise cet épisode culturel par une organisation de l'habitat de type *rancheria*. A ce jour, il est attesté que d'autres villages, comme Pueblo Salado, occupé au cours de la période Classique Soho sur la terrasse Lehi, sont abandonnés presque un siècle après le déclin officiel des Hohokam (Greenwald et Stein, 1992). Les données relatives à la pratique de l'irrigation sont toutefois inexistantes.

L'occupation du territoire dans la basse vallée de la Salt n'est pas connue entre 1694 et 1865 apr. J.-C. En revanche, dès 1865, la rive nord de la Salt est rapidement colonisée à la suite de la construction du Fort Mc Dowell, à la confluence entre la Verde et la Salt River. Des Mexicanos en provenance du désert du Sonora et à la recherche de travail s'installent juste au sud de l'actuelle ville de Phoenix (Smith's Hay Camp) (Marin, 2006) (Fig. 50). Ils commencent à défricher les berges de la Salt et participent à la construction du Swilling Ditch en 1868, à l'emplacement des vannes d'entrées du Canal System 2 préhistorique (Fig. 50). L'habitat est initialement dispersé le long des canaux. Quelques hameaux se développent, centralisés autour des commerces locaux et des tavernes (Fig. 50). Cette organisation du territoire évolue autour de 1870 avec la désignation d'un centre commercial et d'échange (Luckingham, 1989), Phoenix, implanté sur la terrasse Mesa, protégé des crues et éloigné des bosquets de mesquite dans la plaine.

A cette même date, l'assèchement progressif de la Gila pousse des groupes Pimas et Maricopas (alliés depuis 1830 contre les Apaches) installés le long de la Gila, à se déplacer dans les plaines de la Salt et à s'implanter le long du système Lehi. Ils éclaircissent les berges végétalisées et curent les anciens canaux. Dès 1877, les Mormons s'installent sur la rive sud de la Salt, dans le même secteur. Pour des raisons religieuses liées à la présence des Pimas-Maricopas, le groupe se scinde rapidement et presque l'ensemble de la communauté migre le long de la San Pedro River.

Les habitants sur place s'adaptent rapidement, collaborent avec les indiens pour les travaux agricoles et construisent le Hardy Ditch et le Utah Ditch (Fig. 50).

En 1878, la présence des indiens, dont le nombre atteint 600 à 700 (Agent Indien J.H. Stout dans Shaw, 1974), crée des conflits entre agriculteurs blancs. Ils sont déplacés dans une réserve nouvellement établie en 1879, le long de l'ancien système Scottsdale, sur la rive nord de la Salt, où ils commencent à cultiver et exploiter ce secteur.

3.1.6.2. Gestion et contraintes liées à l'irrigation

Au cours du 19^{ème} siècle, tous les agriculteurs disposaient du droit à l'eau et de très nombreux canaux, gérés à l'échelle de la famille, ont été creusés et exploités dans la basse vallée de la Salt. Leur organisation était chaotique et a conduit à de nombreux conflits entre agriculteurs.

Ces canaux ont été progressivement abandonnés ou consolidés dans un système plus efficace dès 1897 avec 6 canaux principaux sur la rive nord et 6 sur la rive sud¹⁰ (Fig. 50).

Leur configuration rappelle alors celle des systèmes préhistoriques (Turney, 1929), bien que les canaux soient plus courts et déversent l'eau directement dans des canaux latéraux. Parallèlement à leur construction, la population augmente de façon exponentielle.

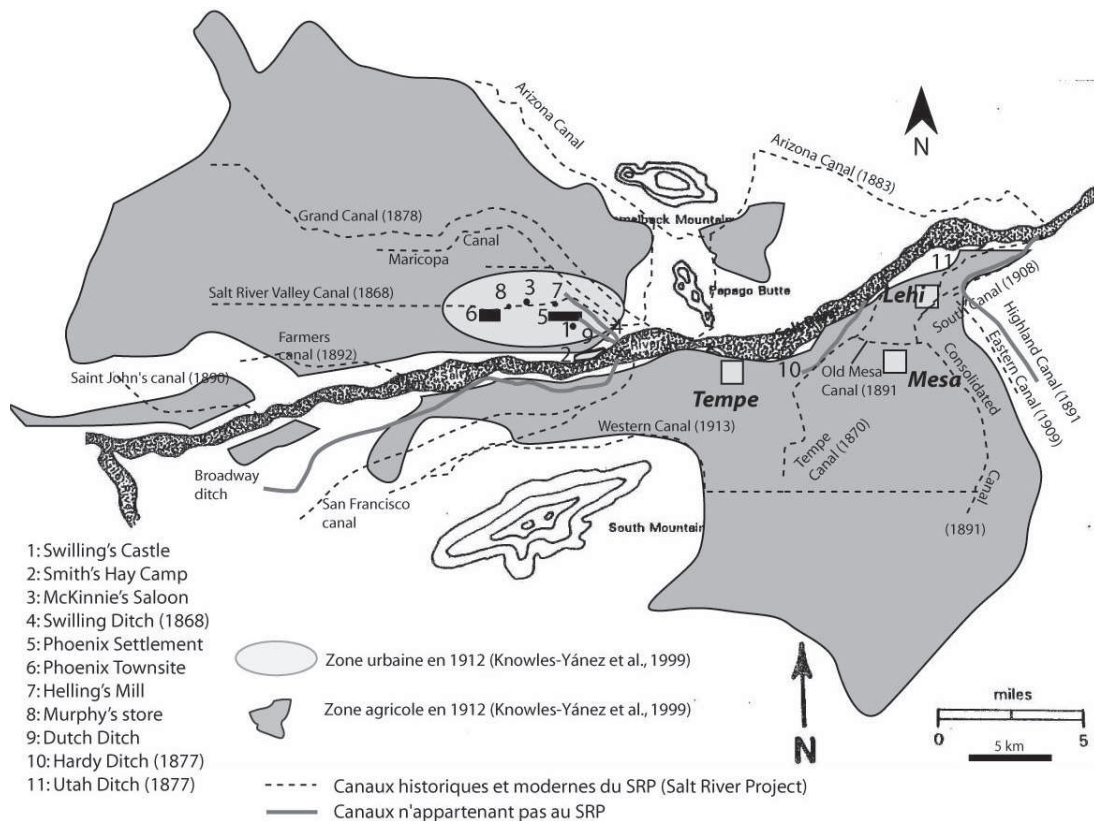


Fig. 50 : Répartition de l'habitat et canaux d'irrigation au début de la période Historique. Les premiers hameaux sont centralisés autour de Swilling's Castle-Phoenix Settlement (36th St et Washington), Murphy's store (7th St et van Buren) et McKinnie's saloon (20th St et van Buren, village de Le Ciudad) (Greenwald et Stein, 1992). En moins de 10 ans, les canaux *Swilling Ditch*, *Saint John's canal*, *Wilson's*, *Collins*, *Chiviri*, *Salt River*, *California*, *Jones*, *Smith* et de petits canaux Mexicains sont construits sur la rive nord. Sur la rive sud, les canaux *Prescott*, *Madox*, *Van Orme*, *Watson* et *Enterprise* sont construits en aval de Tempe. A Tempe, les canaux *San Francisco*, *Kirkland*, *Mckinney*, *Hayden* et *Tempe* sont construits et les canaux *Hardy* et *Utah* le long de l'ancien système *Lehi*. La localisation de l'ensemble de ces canaux n'est pas connue.

¹⁰ En 1897, les 6 canaux de la rive nord de la Salt sont : Arizona, Grand, Maricopa, Salt River Valley, Farmer's et St'Johns ; et les 6 canaux de la rive sud : Consolidated, Highland, Old Mesa, Utah, Tempe et San Francisco.

3.1.7. Période moderne (> 1900 apr. J.-C.)

Dès l'arrivée massive des colons, le paysage se transforme et la gestion de l'eau devient une des priorités des Phoeniciens. En 1912, seules quelques zones dans la vallée de la Salt sont encore en eau, notamment en amont de Phoenix suite aux débordements des réservoirs, et dans la partie centrale et aval de la vallée par les résurgences d'eau et le retour d'eau d'irrigation à la rivière (Fuller, 2008). Initialement construits à des fins agricoles et malgré leur impact sur la prévention des crues (Chin et al., 1991), les barrages ont asséché la rivière, excepté pour Tempe Town Lake, une zone récréative proche de Phoenix. Cependant, en période de crue ou de fort ruissellement il est possible de voir de l'eau dans le lit de la rivière (Central Arizona Water Survey, 1983) (Fig. 51) et d'irriguer les plaines et les terrasses de la Salt (Fig. 52).

De 1941 à 1965, l'augmentation de la population dans la basse vallée de la Salt est exponentielle. Infrastructures, zone de traitement des eaux usées, carrières de graviers, et même l'aéroport sont construits dans la plaine alluviale (U.S. Army corps of Engineers, 1966). Le Salt River Project prend conscience de la diminution croissante des réserves souterraines et du besoin grandissant en eau qui menace la population civile, l'agriculture et l'industrie. Le Central Arizona Project, qui dérive l'eau de la Colorado River, est créé en 1968. C'est un canal de dérivation de 541 km de long qui dérive l'eau de la Colorado River pour alimenter les zones centrales et sud de l'Arizona. Cet aqueduc est le plus large et coûteux système d'approvisionnement en eau jamais construit aux Etats-Unis.

Lorsque de fortes crues s'abattirent en 1965 ($1900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), en 1978 (3450 et $3964 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et 1980 ($4813 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), une majeure partie des infrastructures construites dans le lit de la Salt fut entièrement détruite (ponts, parkings, aéroport).

L'importance des dommages causés par la crue de 1993 ($3500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) montre à la fois l'absence de planification et de prévisions hydrologiques, mais également le fonctionnement imprévu et intense de la Salt River. De nos jours, les changements subis par la rivière sont supérieurs aux potentielles réponses géomorphologiques (Roberge, 2002). Afin d'y pallier, des aménagements récents (levées et ponts monolithiques) capables de résister à de fortes crues ont été construits. Malheureusement, leur proximité à la rivière va favoriser l'érosion en aval, transformant le cours d'eau en un drain après les orages. Le meilleur aménagement possible actuel de la Salt River serait de retirer toutes les constructions trop proches de la rivière (Roberge, 2002).



Fig. 51 : Vue de l'est de la Salt River partiellement en eau en 1930 au niveau de 48th street. Prise d'eau du Grand Canal (SRP, 1930)



Fig. 52 : Vue de l'ouest d'un canal d'irrigation en terre en 1930. Intersection entre McDowell Road et 106th street. (SRP, 1930)

3.1.7.1. Conclusion : emprise et déprise agricole, pérennité de l'habitat préhistorique

Cette section nous a permis d'entrevoir des dynamiques d'occupation du territoire de la période Pionnière à la période moderne dans la basse vallée de la Salt. Depuis deux millénaires, les Hohokam, Akimel O'Odham et les Colons se sont installés à proximité de ce cours d'eau permanent.

Au cours de la période Pionnière (600-750 apr. J.-C.), les Hohokam implantent leurs villages au cœur de la basse vallée et construisent leurs canaux au niveau des zones de

résurgence d'eau. Dès le début de la période Coloniale (750-950 apr. J.-C.), ils construisent en amont et en aval de cette zone centrale, puis progressivement tendent à s'éloigner vers le sud de la rive sud, et le nord de la rive nord (évolution de l'occupation en forme d'éventail) au cours de la période Sédentaire (850-1150 apr. J.-C), puis Classique (1150-1450 apr. J.-C). L'occupation historique du territoire est identique à celle de la période Pionnière.

Il est possible d'analyser avec plus de détails l'évolution spatiale et diachronique de l'occupation du territoire au cours de la période Protohistorique afin d'estimer la densité de l'occupation par période culturelle, de comprendre les phases d'agrégation et de dispersion, et de préciser le lien entre dynamique fluviale et évolution des implantations. Nous ne prendrons en considération ici que les sites pour lesquels un cadre chronologique est disponible. La base de données représente 181 sites (données Azsite : 136 villages, 45 zones de concentration d'artéfacts, cf. Fig. 26). Nous avons découpé le paysage en quatre unités géomorphologiques : des plus anciennes au plus récentes, les terrasses Sawik, Mesa, Lehi (plaine alluviale Hohokam), et les cônes détritiques (cf Fig. 10 et Fig. 53a).

Une première observation de la répartition diachronique des sites (Fig. 53b) met en évidence l'augmentation de la population dès la période Coloniale. La légère chute du nombre de sites occupés au cours de la période Sédentaire fait référence à l'abandon des basses terres dès 1050 apr. J.-C et la phase d'agrégation. Au début de la période Classique, 62 villages sont occupés dans la basse vallée de la Salt. Cette occupation prend en compte les villages existants dont la population a doublé à la fin de la période sédentaire et les nouveaux villages occupés pendant une très courte durée (moins de 150 ans).

Dans un second temps, nous avons analysé l'évolution diachronique de la localisation des villages du bassin de la Salt sur les quatre unités géomorphologiques identifiées (Fig. 53c). Les résultats montrent que presque 40 % d'entre eux sont situés dans la plaine alluviale (future terrasse Lehi) au cours de la période Pionnière et Classique, contre 4% au cours de la période Coloniale et 20 % au cours de la période Sédentaire. En parallèle, l'occupation de la terrasse Mesa, qui atteint 55% dès la période Pionnière, atteint son maximum au cours de la période Coloniale avec 80% des villages. Bien que de moindre ampleur, l'occupation de la terrasse Sawik augmente au cours de la période Sédentaire à Classique (de 4 à 12 %) probablement en relation avec la construction du système d'irrigation Lehi en amont.

En conséquence, trois hypothèses peuvent être proposées :

- 1) Une occupation réduite de la plaine alluviale (terrasse lehi) au cours des phases Coloniale et Sédentaire pourrait résulter d'une prise de conscience du risque lié à l'implantation des villages en bord de cours d'eau ;
- 2) Une dynamique sédimentaire intense limite la construction des villages et des réseaux hydrauliques dans la plaine, la période Pionnière et Classique correspondant à une phase d'accalmie hydrosédimentaire ;

3) La gestion des terres au cours de la période pré-Classique (période Coloniale et Sédentaire) se distingue nettement de la période Classique.

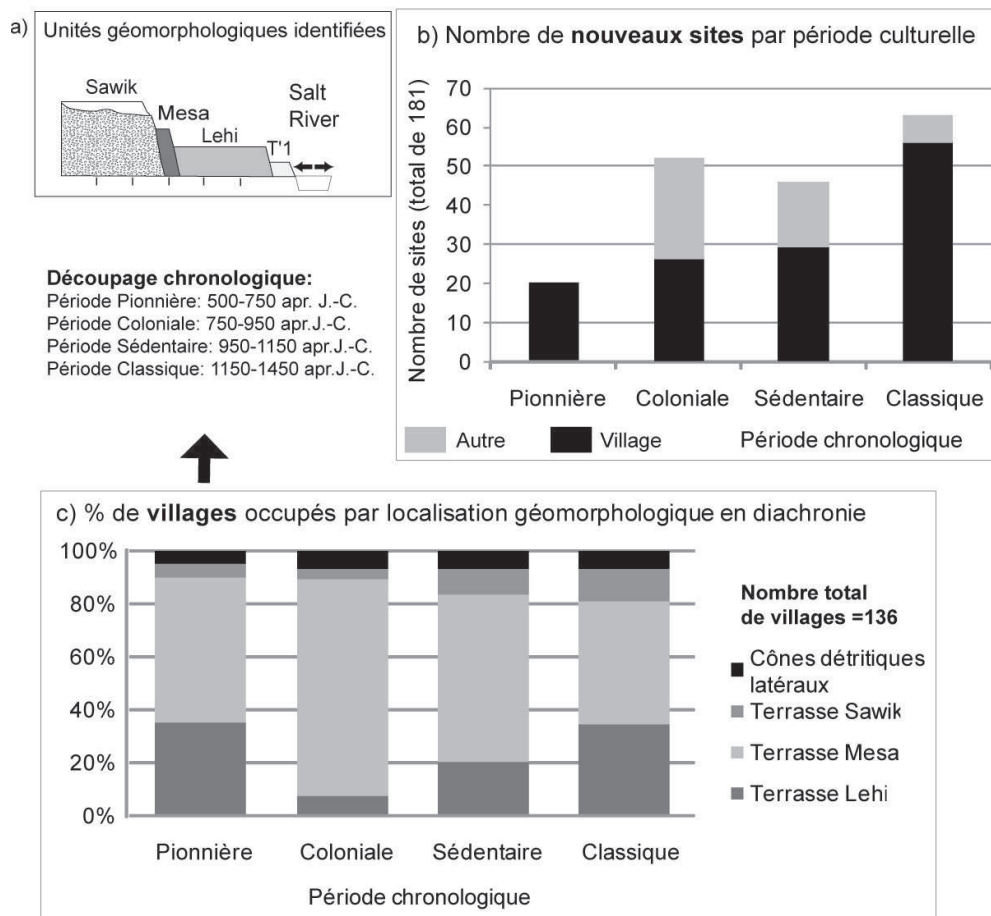


Fig. 53 : Localisation géomorphologique des villages Hohokam en diachronie

Afin de tester la validité de ces hypothèses, nous avons analysé simultanément l'ensemble des sites archéologiques, leur période d'abandon et la localisation géomorphologique des sites abandonnés (Fig. 54).

Les sites occupés au cours de la période Pionnière sont également répartis sur la plaine alluviale (terrasse Lehi) et la terrasse Mesa. 35% de ces sites (n=20) sont abandonnés à la fin de la période Sédentaire, et ce quelle que soit leur localisation (plaine ou terrasse).

Les sites de la période Coloniale (n=52) dominent sur la terrasse Mesa (30 sites). 30% de ces sites sont abandonnés à la fin de cette période culturelle et 52% d'entre eux à la fin de la période Sédentaire. La plus grande partie des sites abandonnés sont situés sur la terrasse Mesa (53% pour la fin de la période Coloniale et 62% pour la période Sédentaire). Ceci indique un abandon des sites dans la plaine plus important à la fin de la période Coloniale qu'à la fin de la période Sédentaire. La majeure partie de ces sites sont des occupations permanentes ou *villages*.

L'ensemble de ces résultats permet de proposer l'hypothèse que l'implantation des villages sur la terrasse Mesa, qui reste une unité géomorphologique stable, et l'abandon des sites dans la plaine à la fin de la période Coloniale témoignent d'une prise de conscience du risque hydrosédimentaire en réponse, peut-être, à un fort régime des crues, associé à des évolutions morphologiques du cours d'eau et une perte des terres cultivables en plaine.

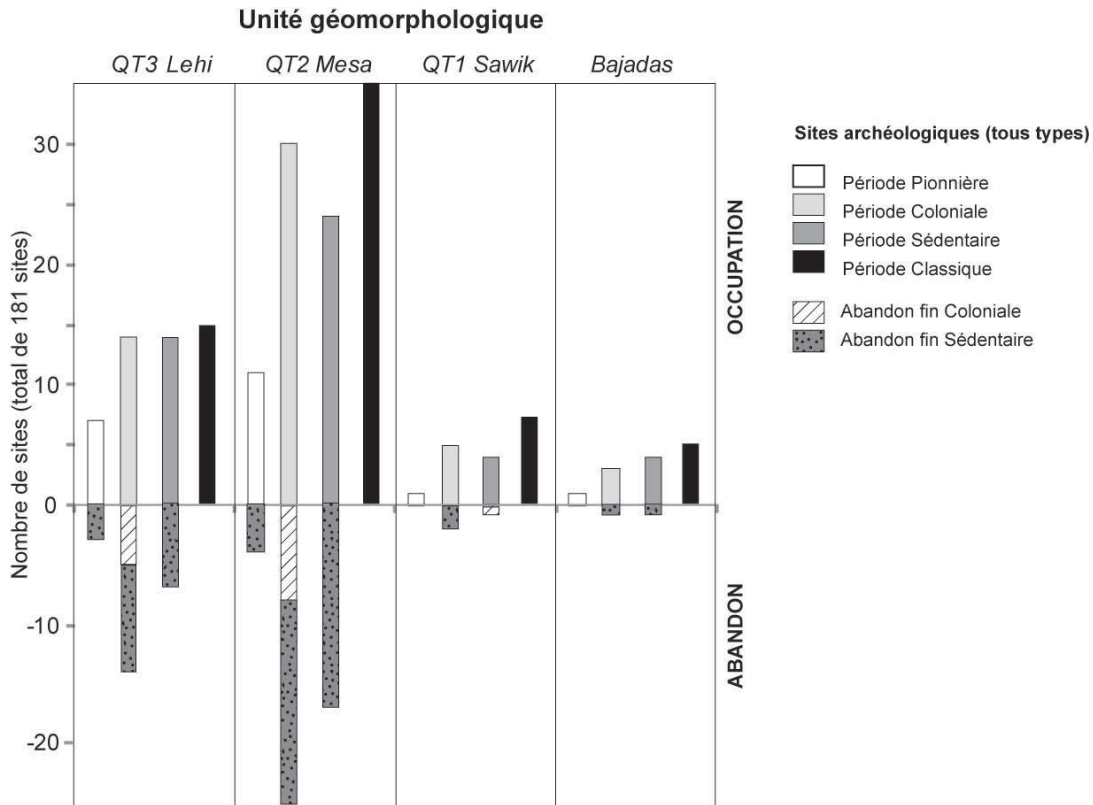


Fig. 54 : Sites archéologiques abandonnés de la période Pionnière à Classique

De la même façon qu'au cours de la période Coloniale, une grande partie des sites occupés au cours de la période Sédentaire sont implantés sur la terrasse Mesa, à l'abri des crues. Toutefois, on observe une diminution du nombre total de sites, ce qui correspond probablement à la phase de déprise agraire dans les plaines entre 1050-1150 apr. J.-C. 56 % des sites occupés (n=47) sont abandonnés à la fin de cette période et 65% d'entre eux sont situés sur la terrasse Mesa.

Ce sont des habitations temporaires ou *fieldhouses* qui sont abandonnées dans la plaine (voir section 3.1.4.1) (dont le nombre attesté est inférieur au nombre des villages pour des raisons taphonomiques) et des villages sur la première terrasse. A la fin de la période Sédentaire, des traces d'occupation sont à nouveau attestées dans les basses terres, mais en faible proportion. Cette reconquête du territoire peut être liée à une accalmie temporaire des dynamiques hydrosédimentaires. A la fin de cette période, l'abandon simultané des villages implantés sur les terrasses, où la contrainte fluviale est réduite, et des habitations temporaires dans la plaine, pourrait également impliquer des dynamiques sociales, en relation avec la gestion du territoire.

La dynamique évolue au cours de la période Classique. Le nombre de sites sur les formations géomorphologiques stables (bajadas, la terrasse Sawik) et la terrasse Lehi augmente. Leur dispersion contraste avec celle des périodes culturelles précédentes. L'ensemble de ces sites sont abandonnés à la fin de la période Classique.

La reconquête des plaines peut être favorisée par une réduction des dynamiques hydrosédimentaires ; l'occupation d'unités géomorphologiques à plus forte pente et plus éloignées des cours d'eau peut impliquer une diversification des moyens de subsistance. Ces hypothèses seront discutées dans les parties II et IV de ce travail.

3.2. Dans la moyenne vallée de la Gila

3.2.1. Période Archaique/Formative

Le long de la Gila, des recherches récentes ont montré les traces d'agriculture autour de 1000 av. J.-C. (Hard et Roney, 1998) et une période nouvellement intitulée « *Early agricultural Period* » regroupe les occupations à vocations agricoles établies entre 1500/1200 av. J.-C. à 200 apr. J.-C. (Huckell, 1995). De la période Archaique à la période Pionnière, les sites sont principalement localisés au niveau de zones de transition d'unités physiographiques, afin de bénéficier d'autant de ressources que possible (Eiselt et al., 2002).

3.2.2. Période Pionnière : 450-750 apr. J.-C.

Les premiers villages, Snaketown (zone centrale rive nord), Grewe (amont, rive sud) et Upper Santan (Centre, rive nord) se développent autour de 500 apr. J.-C. (Craig, 2001 ; Haury, 1976) au cours de la phase Vahki. La construction de canaux d'irrigation est mal attestée (Gregory, 1994), mais certains sont déjà en fonctionnement à proximité de Casa Blanca, sur la rive sud. Au cours de la phase Snaketown (700-750 apr. J.-C.), les villages de Snaketown (Haury, 1976) et le secteur de Gila Butte (Swarthout et Blank-Roper, 1984) sont clairement alimentés par des eaux d'irrigation. Ces canaux mesuraient environ 5 km de long et leur prise d'eau était localisée à proximité de zones de résurgence d'eau (Pima Butte, Gila Butte, Olberg Butte, Granite Knob, Cholla Butte) ou au niveau d'une courbe du cours d'eau (Gregory, 1994). Ils alimentaient un unique village souvent localisé à mi-chemin dans le canal (Woodson, 2003) (Fig. 26 et Fig. 55).

3.2.3. Périodes Coloniale et Sédentaire: 750-1150 apr. J.-C.

La période Coloniale est également le témoin d'une forte augmentation du nombre de sites archéologiques et de canaux construits. Les 19 systèmes d'irrigation recensés sont probablement en fonctionnement et certains sont consolidés comme le Cholla Butte et le Chee Nee (Gregory, 1994 ; Woodson et Rice, 2002), puis le Granite Knob et Santan au cours de la période Sédentaire (950 et 1150 apr. J.-C.) (Woodson, 2003) (Fig. 55).

L'augmentation démographique et l'expansion des réseaux hydrauliques se poursuivent au cours de la période sédentaire.

Les villages de Snaketown (Fig. 26), qui possède 2 *ball courts*, de nombreux mounds, une place centrale et une centaine de maisons, et de Grewe, qui contient plusieurs centaines de maisons et 5 *ballcourts*, se démarquent toujours. Progressivement toutefois, les sections les plus à l'est de Grewe sont abandonnées, alors que le village migre progressivement vers l'ouest à la fin de la période Sédentaire (Craig, 2001). Snaketown est également abandonné autour de 1050 apr. J.-C. (Gladwin et al., 1965, Wilcox et al., 1981).

3.2.4. Période Classique : 1150-1450 apr. J.-C.

Au cours de la période classique, le nombre de site et leur taille augmentent en amont de la rivière, mais les grands villages en aval, comme Snaketown (Wilcox, 1979) sont abandonnés. Les sites sont principalement localisés sur la terrasse T2 et sont toujours alimentés par des canaux d'irrigation. Une des premières observations concernant leur organisation est l'agrégation des systèmes d'irrigation Pinal et Grewe en Casa Grande Canal, qui atteint 32 km (Crown, 1987 ; Gregory, 1994 ; Gregory et Nials, 1985 ; Midvale, 1963, 1965 ; Woodson et Rice, 2002); et des systèmes Snaketown et Gila Butte en Snaketown-Gila Butte canal (bien que cette dernière configuration ne soit pas clairement attestée) (Fig. 38). D'autres systèmes restent identiques, comme les systèmes Poston, Blackwater. Enfin le Hidden Ruin, Gila Crossing et Estrella canal system semblent utilisés au cours de la période Classique (Randolph et Greenspan, 2003). L'emplacement du système Estrella suggère une irrigation de type Ak-Chin, attestée chez les Pimas (Akimel O'Odham) sur les bajadas des Santan et Sacaton mountains au cours des périodes historiques (Cattetter et Bell, 1942 ; Woodson et Davis, 2001).

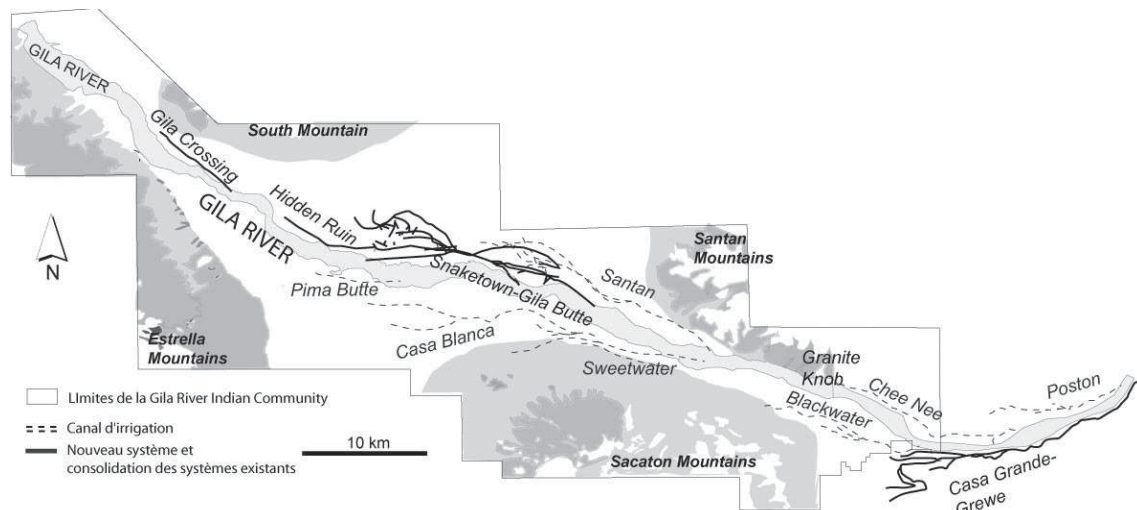


Fig. 55 : Cartographie des canaux d'irrigation en utilisation dans la Gila River au cours de la période Classique (Woodson, 2003)

3.2.5. Période Protohistorique (1450-1694 apr. J.-C.)

Très peu de données sont disponibles pour la période Protohistorique. Une dizaine de villages semblent occupés au cours de cette période entre Casa Grande et la confluence Salt-Gila, mais leur localisation n'est pas connue avec exactitude (Southworth, 1915).

On sait toutefois que l'habitat était concentré autour de Casa Blanca et Sweetwater. L'habitat dispersé suit une organisation de type *rancheria*, qui consiste en un foyer familial autosuffisant et politiquement autonome (Doelle, 1981) (Fig. 56). Certains pratiquaient l'irrigation mais la localisation exacte des canaux n'est pas connue. Elle était probablement centrée sur la rive sud de la Gila entre Pima Butte à l'ouest, et Blackwater à l'est (Woodson, 2003 ; Ezell, 1961 ; Southworth, 1919 ; Debowski et al., 1976). Par ailleurs, les écrits des missionnaires, qui font référence à l'exploitation du coton et du melon, n'évoquent l'irrigation que sous forme de méthode potentiellement efficace (Wilson, 1999).

3.2.6. Période Historique (1700-1900 apr. J.-C.)

3.2.6.1. Répartition de l'habitat

Au moins 4 villages (districts) sont implantés sur les berges de la Gila au cours de la période Historique. Ils se superposent probablement à des villages occupés au cours de la période Protohistorique (Eiselt et al., 2002) (Fig. 56).

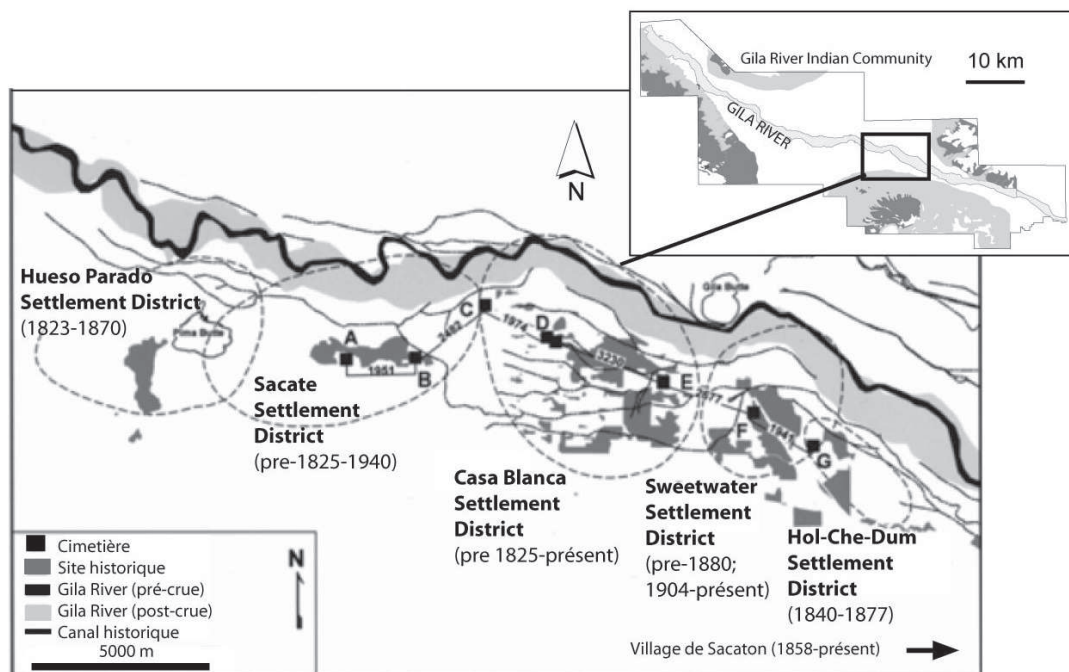


Fig. 56 : Canaux d'irrigation et districts au cours de la période protohistorique/historique (Darling et al., 2004). Le district de Sacaton, occupé dès le 17^{ème} s., puis abandonné suite aux raids Apache (Winter, 1973) devient un centre culturel dès 1850. Le district de Sweetwater est caractérisé par des villages occupés au cours du 18^{ème} siècle puis abandonnés autour de 1880. Les villageois se déplacent alors dans le district de Sacaton et Blackwater. Le district de Casa Blanca, qui correspond à un ancien village établi autour de 1777 (Wilson, 1999), devient un centre administratif et commercial dès 1850.

La distribution des villages évolue fréquemment au cours de cette période (Spier, 1933). L'implantation des villages en bordure de terrasse a longtemps été une stratégie de défense et de repérage des raids Apaches au cours desquels les Akimel O'Odham se cachaient dans les forêts de mesquite dans la plaine alluviale (Ezell, 1983).

Au cours du 19^{ème} siècle les attaques répétées ont rapproché les habitations espacées de 100-150 m à 40-50 m les unes des autres (Ezell, 1961) et ont favorisé une implantation sur la rive sud de la Gila. Les fréquentes variations latérales du cours d'eau ont également contribué à l'implantation de l'habitat en hauteur (Durivage, 1937 ; Darling et al., 2004 ; Randolph et al., 2002 ; Waters et Ravesloot, 2003). Les Pimas (Akimel O'Odham) cultivaient et irriguaient des zones relativement plates, distantes de 1,6 à 6,5 km de la rivière, sur la première terrasse ou encore la *s-shelin jived* (Darling et al., 2004). Les basses plaines, envahies par les prosopis et trop alcalines/salines (Spier, 1933), servaient principalement de lieu de collecte.

3.2.6.2. Gestion de l'irrigation

44 canaux sont construits par les Pimas entre 1800 et 1900 (Woodson, 2003) (Fig. 56 et Fig. 57). Les premiers construits, autour de 1800, sont les canaux Ancient Maricopa, Old Santa Cruz, Bridlestood, Old Snaketown, Old Sranucka, Bapchil, Old mount Top et Ancient Sweetwater. Ils sont localisés entre Pima Butte et la confluence entre la Gila et la Little Gila River (Fig. 56). Leur construction favorise un développement de l'agriculture entre 1800 et 1850. Les Akimel O'Odham approvisionnent les militaires installés le long de la Salt. Entre 1850 et 1880 une phase de construction majeure est attestée, en lien avec l'installation de pionniers blanc à l'amont de la réserve indienne et suite à la fin des hostilités avec les Apaches (Ezell, 1961 ; Upham, 1983). Les villages et canaux des secteurs de Old Santan, Sacaton, Pima Butte, Gila Crossing sont à nouveaux cultivés et exploités (Fig. 57). Ces systèmes sont identiques à ceux utilisés au cours de la période préhistorique. A partir de 1864, les canaux Pimas sont faiblement alimentés en eau et progressivement abandonnés suite à la surexploitation agricole par les pionniers et la dérivation totale de l'eau en amont de leur territoire (Fig. 58).

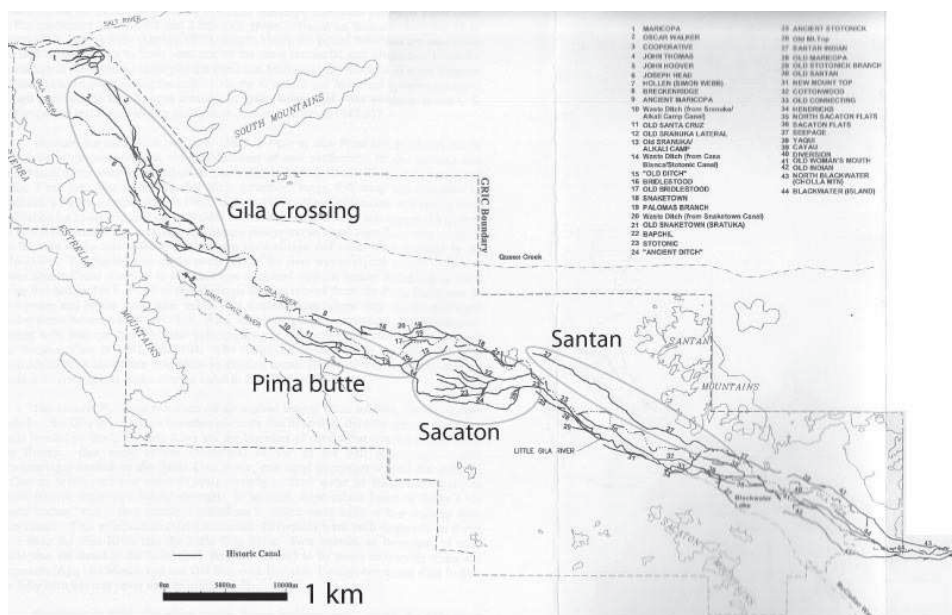


Fig. 57 : Localisation des canaux Pimas/Maricopas après 1850 dans la moyenne vallée de la Gila (Woodson, 2003)

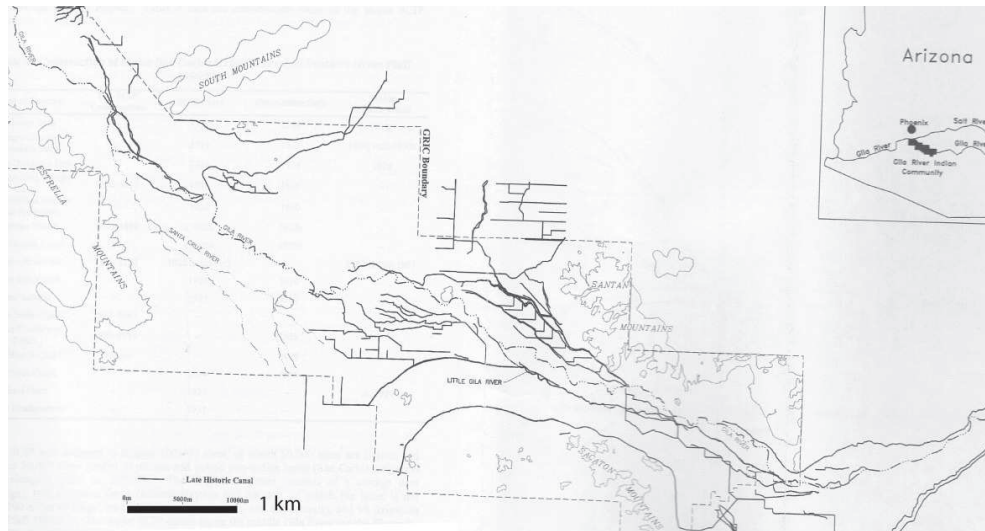


Fig. 58 : Localisation des structures hydrauliques après 1864 dans la moyenne vallée de la Gila (Woodson, 2003)

3.2.7. Période moderne (>1900 apr. J.-C.)

Après avoir rapidement évalué l'apport potentiel qu'apporterait le détournement de la Gila River, l'US Bureau of Reclamation commença une série de projets entre 1908 et 1912 sur la réserve de façon à irriguer 20 000 ha de terres, mais l'eau manquait déjà suite aux dérivations d'eau construites par les colons.

En mai 1916, le congrès autorisa la construction d'un barrage, le Florence Dam (Ashurt-Hayden Diversion Dam) à la frontière sud de la Gila River Indian Reservation, pour l'irrigation de 25 000 ha de terres indiennes, privées et publiques, dans le comté du Pinal. Le barrage fut achevé en 1920, utilisé pour la première fois en 1922. Des terres agricoles devaient être préparées et plus de 2 000 000 des derniers mesquites furent arrachés.

Dans la partie amont du bassin versant, l'unique réservoir est le San Carlos Reservoir résultant de la construction du barrage Coolidge en 1928. Ce barrage devait permettre l'irrigation de 40 000 ha de terre sur la réserve et les terres publiques/privées. Malheureusement des études préliminaires surestimèrent la quantité d'eau initialement disponible et le réservoir ne fut jamais exploité (US Department of Interior, 1963). Il ne fut rempli que 3 fois, en 1941, 1983 et 1993, au cours de crues majeures.

En conséquence, la rivière s'assécha entièrement à son entrée dans la réserve. Le Bureau of Indian Affairs tenta d'y pallier en construisant d'autres barrages dans la basse vallée de la Gila dans les années 30, mais sans succès.

Face aux dérivations légales et illégales d'eau depuis le début du siècle, à l'assèchement de « leur » rivière et grâce à la loi sur l'Indian Claims Commission Act, les Akimel O'Odham commencèrent à porter en justice leurs droits à l'eau dès le début des années 50. Après moult négociations le contrat pour la dérivation d'eau du Central Arizona Project fut signé en 1992, et en 1996, le Pima-Maricopa Irrigation Project, le premier système d'irrigation autogéré depuis le 19ème siècle, fut créé. C'est dans ce contexte qu'un certain nombre de canaux préhistoriques et de nombreuses découvertes archéologiques ont été mis au jour.

4. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté les différents modes de gestion de l'eau et des sols. Les Hohokam et les Akimel O'Odham pratiquaient l'irrigation, l'agriculture sèche et disposaient de réservoirs à des fins domestiques et architecturales. Ils cultivaient les plaines et les premières terrasses (maïs, courge, haricot, coton) grâce à des systèmes d'irrigation tertiaires qui formaient une structure en *toile d'araignée* à l'échelle des deux vallées étudiées, la dérivation de l'eau étant contrôlée par des barrages végétaux et des vannes. La pérennité des systèmes hydrauliques sur la longue durée est bien mise en relief car la localisation des vannes d'entrée et la configuration des alignements des canaux est identique de la période Préhistorique à moderne, dans la basse vallée de la Salt comme dans la moyenne vallée de la Gila. Les données historiques montrent par ailleurs que les contraintes fluviales, et notamment les changements à haute fréquence, ont poussé les agriculteurs Akimel O'Odham à diversifier leurs pratiques et à exploiter au maximum les ressources naturelles. Leur mobilité est en revanche une adaptation aux changements à basse fréquence (ou événement catastrophe qui conduit à la perte des terres cultivables).

Malheureusement, il est difficile de repositionner ces données dans un contexte politique et économique pour la période préhistorique. L'analyse de l'évolution spatiale et diachronique de l'occupation du territoire et de la gestion de l'eau a précisé le lien entre dynamique fluviale et implantation de l'habitat (principalement les habitats temporaires). Toutefois, les informations relatives au régime foncier et au droit et à l'eau ne nous sont pas parvenues. Quelques modèles ont été proposés (Howard et Wilcox, 1988 ; Fish, 1996) avec la définition de zones de commandes, regroupées autour d'une architecture publique commune ou d'un village au sens large (inclus les occupations temporaires autour du village). Au sein de ces zones de commande, les *ball courts* et les *platform mounds* pourraient témoigner d'une gestion administrative et peut-être communautaire, qui aurait pris part à la résolution des conflits liés à l'eau (Elson, 1998 ; Lindauer et Blitz, 1997 ; Whittlesey et Ciolek-Torrello, 1992 ; Wilcox, 1991). Notre étude ne pourra pas trancher pour l'un ou l'autre de ces modèles d'organisation sociale. Elle pourra toutefois contribuer à comprendre le fonctionnement de l'agrosystème, et notamment le type de système agraire envisageable en fonction des signatures environnementales identifiées par système d'irrigation.

Partie II

Identification et chronologie des dépôts naturels et anthropiques



CONTENU DE LA PARTIE II

CHAPITRE 1 :

Démarche et méthode : reconnaissance et acquisition des données pédo-sédimentaires

La reconstitution des dynamiques socio-environnementales, en relation avec les changements climatiques et les occupations humaines depuis les deux derniers millénaires, est fondée sur une démarche géoarchéologique et paléoenvironnementale. Les choix méthodologiques dépendent du secteur et de l'objet d'étude ainsi que de l'état actuel des connaissances. Dans notre contexte, ils requièrent la classification et la création de référentiels à la fois de terrain et de laboratoire.

Dans un premier temps, nous identifions, caractérisons et classifions les formations sédimentaires dans le bassin de Phoenix. Cette première étape définit la stratégie d'échantillonnage, et permet de mettre en place un premier phasage pédo-sédimentaire.

CHAPITRE 2 :

Analyse chronostratigraphique et pédo-sédimentaire des structures hydrauliques et des héritages holocènes des bassins de la Salt et de la Gila

Ce second chapitre présente les analyses stratigraphiques conduites dans les structures hydrauliques et les formations alluviales des bassins de la Salt et de la Gila ainsi que leur chronologie de mise en place. Cinq systèmes d'irrigation ont été étudiés dans la basse vallée de la Salt et trois dans la moyenne vallée de la Gila. Les formations alluviales sont présentées conjointement, en fonction de leur localisation géographique. L'approche de terrain est complétée par une synthèse bibliographique de l'analyse stratigraphique de remplissages de canaux bien datés. Sur la base de ces résultats, nous présentons une première synthèse diachronique des dynamiques morphogéniques et caractérisons le fonctionnement des réseaux hydrauliques sur la longue durée.

CHAPITRE 1

Démarche et méthode :

Reconnaissance et acquisition des données pédo-sédimentaires

1. Apport d'une étude géoarchéologique fluviale hors site : stratégie adoptée et limites inhérentes au secteur d'étude	140
1.1. Problématiques et approche	140
1.2. Localisation des sites d'études dans le bassin de Phoenix	140
2. Caractérisation des éléments structurants les dépôts naturels	142
2.1. Les milieux fluviaux	143
2.2. Dépôts de versants	149
2.3. Dépôts éoliens	153
2.4. Synthèse des facies observés	153
3. Reconnaissance des structures hydrauliques : estimation des paramètres naturels et anthropiques	155
3.1. Principe de l'approche	155
3.2. Repérage des réseaux fossiles	155
3.3. Discrimination entre canaux et chenaux naturels	156
3.4. Processus taphonomiques	159
4. Méthodes de datation	161
4.1. Période concernée, stratégie et limites inhérentes à l'objet d'étude	161
4.2. Les datations absolues : méthode adoptée, limites et stratégie d'échantillonnage	162
4.3. Les datations relatives : approche typo-chronologique et chronostratigraphique	167
4.4. Mise en place de diagrammes âge-profondeur	168
5. Conclusion : premiers questionnements et stratégie d'échantillonnage	169

1. Apport d'une étude géoarchéologique fluviale hors site : stratégie adoptée et limites inhérentes au secteur d'étude

1.1. Problématiques et approche

Les principales problématiques posées visent à comprendre :

- 1) la gestion agricole dans le bassin de Phoenix
- 2) l'impact de cette activité sur la stabilité d'un environnement anthropisé et les risques encourus par les sociétés Hohokam et Akimel O'Odham.

Pour cela, il s'agit de restituer la dynamique fluviale, l'évolution de la couverture pédologique et les phases de stabilité paysagère associées, l'exploitation du territoire et ses modalités et ce par le biais d'enregistrements pédo-sédimentaires hors sites, bien calés chronologiquement. L'approche se veut interdisciplinaire, systématique et multiforme (Bravard et Prestreau, 1997). Différentes échelles spatiales (locales à régionales) et temporelles (d'évènements instantanés T aux tendances sur le court, moyen ou le long terme) sont considérées. Malgré la complexité liée à l'emboîtement de ces échelles spatio-temporelles, et les débats qui en ont résulté (Leveau et al., 1997), il convient à ce jour d'adopter cette démarche inhérente à la discipline de la paléogéographie (Boulin, 1977) afin d'appréhender le paysage comme un système (Macaire, 1990 ; Amoros et al., 1988).

Malheureusement, l'approche est limitée par l'accessibilité au secteur d'étude et les données disponibles. La ville de Phoenix est entièrement urbanisée et les projets de fouilles préventives ne s'intéressent que très peu aux dynamiques naturelles. Le long de la Gila River, l'appartenance des terres à la communauté indienne limite fortement, voire interdit leur accès, bien que l'intérêt porté au paléoenvironnement soit plus marqué. Malgré ces limites et afin de répondre à nos objectifs dans la mesure du possible, les méthodes de la géomorphologie fluviale, de la sédimentologie et de la pédologie ont été adoptées. Nous avons tout d'abord caractérisé les milieux de sédimentation en contexte naturel et semi-anthropisé puis nous avons reconstruit les dynamiques chronostratigraphiques et morphogéniques dans le bassin de Phoenix.

1.2. Localisation des sites d'études dans le bassin de Phoenix

Deux objets d'études ont été privilégiés : les remplissages de canaux et les formations alluviales. Ces dernières, sélectionnées de façon préférentielle dans la plaine alluviale, apportent une information directement ou en lien avec le fonctionnement du cours d'eau. Elles ont été mises en évidence majoritairement dans les carrières de graviers (fluviosols/salisols) et occasionnellement dans le cadre de fouilles préventives. Les canaux d'irrigation reliés aux systèmes fluviaux nous procurent une information secondaire sur la dynamique hydrosédimentaire et l'adaptation humaine, tout en nous informant sur les phases de stabilité et d'accrétion sédimentaire en contexte de plaine alluviale et sur les basses terrasses. Ils ont été mis en évidence exclusivement dans le cadre de fouilles préventives.

Le long de la Salt River, 12 séquences stratigraphiques naturelles situées sur la terrasse Lehi et 17 canaux d'irrigation construits sur les terrasses Lehi et Mesa ont été étudiés. Dans la moyenne vallée de la Gila, 17 canaux d'irrigation construits sur la terrasse T2 et des cônes détritiques Holocènes et 5 séquences stratigraphiques appartenant à la terrasse T1 ont été analysés. L'ensemble des résultats ne sera pas présenté ici, faute de calage chronologique.

La Fig. 59 localise les différents sites étudiés et le Tab. 4 liste les projets et sites fouillés ainsi que les analyses réalisées. L'ensemble des données pédo-sédimentaires a été récolté en fonction des autorisations obtenues et des opportunités d'observations stratigraphiques. Les analyses de laboratoire n'ont pas été systématisées, faute de temps, et pour des raisons pratiques d'accès au laboratoire.

Site - année	Compagnie	Nbre de canaux / séquences étudiés	Analyses			
			Géo-archéologique	Susceptibilité Magnétique	Micromorphologique	
Salt River						
Canaux d'irrigation						
1	Riverview at Dobson-2005	Mesa Southwest Museum	3	X	X	X
2	Ecoplan- 2007	Ecoplan	3	X	X	X
3	La Lomita- 2007	Soil System Inc.	1	X	X	X
4	Desert Archaeology-2009	Desert Archaeology	7	X	X	NON
5	Old John Canal- 2007	Soil System Inc.	1	X	X	X
6	Cashion Site- 2007	Soil System Inc.	1	X	X	X
7	GR 1078	GRIC-CRMP	1	X	X	X
Séquences stratigraphiques						
7	Champ-2007	GRIC-CRMP	1	X	X	X
8	SRMG- 2006	SRMG	3	X	X	X
9	Vulcan- 2007	Vulcan	1	X	X	X
10	1 st Street- 2007	Analyse indépendante	1	X	X	NON
11	Hayden Mill- 2006	ACS	1	X	X	X
1	Riverview at Dobson-2005	Mesa Southwest Museum	3	X	X	X
4	Desert Archaeology-2009	Desert Archaeology	2	X	x	NON
Gila River						
Canaux d'irrigation						
12	Santan Canals- 2006	GRIC-CRMP	6	X	X	X
12	Santan Canals+champs-2008	GRIC-CRMP	8	X	X	NON
13	Casa Blanca Canals-2007	GRIC-CRMP	3	X	X	X
Séquences stratigraphiques						
12	Santan Canals (dépôts adjacents)	GRIC-CRMP	1	X	X	X
13	Casa Blanca Canals-2007	GRIC-CRMP	1	X	X	X
14	Maricopa Plant- 2007	Gila River Sand and Gravel	1	X	X	X
15	Santan Plant- 2007	Gila River Sand and Gravel	1	X	X	X

16	Florence- 2005	Analyse indépendante	1	X	X	X
----	----------------	----------------------	---	---	---	---

Tab. 4 : Liste des projets, nombre de structures mises au jour et analyses réalisées. La numérotation des sites sur la colonne de gauche renvoie à la Fig. 59.

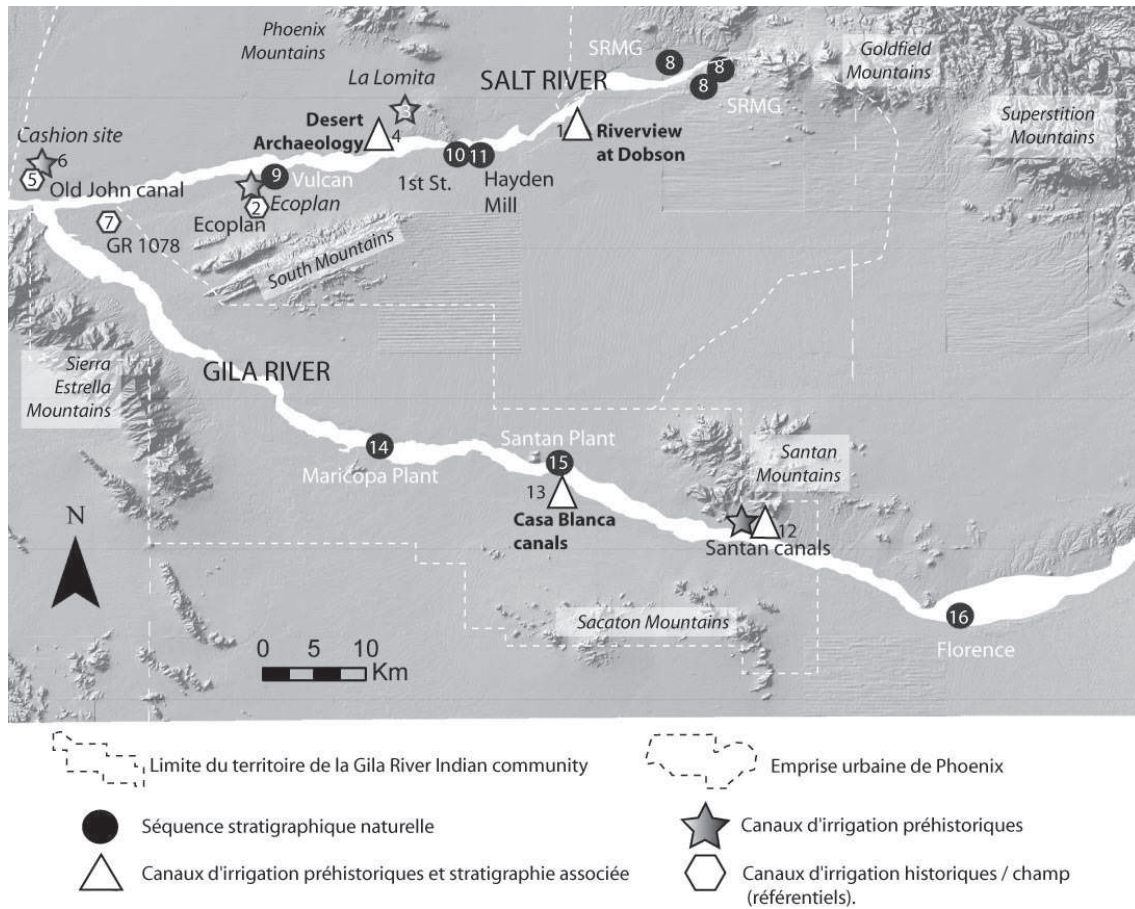


Fig. 59 : Localisation des sites d'étude le long de la Salt et de la Gila Rivers. La numérotation des sites renvoie au Tab. 4.

2. Caractérisation des éléments structurants les dépôts naturels

L'acquisition des données de terrain repose sur des études de coupes stratigraphiques en plaine alluviale et sur les basses terrasses, complétées par l'étude des dynamiques de versant. Elles restituent les évolutions morphologiques de la rivière ainsi que les dynamiques de ravinements, qui sont le résultat de changements climatiques (Bravard, 1992 et Schumm, 1977) mais également d'activités humaines à l'échelle du bassin versant. Ces études permettent plus largement d'estimer l'impact des dynamiques morphosédimentaires sur les réseaux hydrauliques qui sont directement connectés au chenal actif ou aux cours d'eau temporaires sur les cônes alluviaux détritiques.

2.1. Les milieux fluviaux

Il n'existe pas de classification bien établie des alluvions en contexte désertique, et celle proposée par Miall (1985), bien qu'elle permette une caractérisation précise et systématique de terrain (limites stratigraphiques, traits pédologiques, variations texturale et structurale, couleur), n'est pas directement applicable à nos contextes. Il n'a pas été possible d'effectuer une typologie des formes et dépôts actuels dans le bassin versant de la Salt, trop urbanisé, et de la Gila, dont l'accès est interdit. Nous proposons donc une classification des facies alluviaux holocènes dont la signification hydrodynamique reposera sur des typologies déjà établies (Devilleers, 2005) et la bibliographie existante sur la dynamique fluviale en contexte semi-aride.

Les dépôts observés regroupent les sédiments de crue, les remplissages de chenaux et les paléosols. Ils sont situés à proximité du chenal ou dans les zones plus distales et se mettent en place suite aux crues, à l'évolution hydromorphologique ou l'avulsion du cours d'eau (Reading, 1996).

2.1.1. *Dépôts de plaine d'inondation et basses terrasses holocènes*

2.1.1.1. **Caractéristiques générales et reconnaissance de terrain**

Dans la basse vallée de la Salt et de la Gila, les dépôts d'inondation sont très fréquents, mais difficilement accessibles (urbanisation, agriculture). Plusieurs critères descriptifs permettent de les reconnaître individuellement (Baker et al., 1988 ; Benito et al., 2003) : 1) Identification d'une couche argileuse au sommet de l'unité, 2) Observation de surfaces d'érosion, 3) Variation de texture et de couleur qui indique des fluctuations dans l'énergie de déposition ou des sources sédimentaires différentes. 4) Traces d'oxydation et de carbonatation qui permettent de séparer les unités stratigraphiques. Associées à une accumulation de matière organique et une microstructure de type grumeleuse, elles peuvent correspondre à des petits paléosols fluviaux, parfois cumuliques, 5) Les laminations et le granoclassement des dépôts.

Quatre types de signatures sédimentaires associées à des épisodes de crue ont été identifiés et signent une dynamique fluviale et des régimes hydriques spécifiques (Fig. 60).

- Les dépôts de crues hétérogènes correspondent au mélange de particules fines et grossières et caractérisent un écoulement en suspension uniforme. Les courants sont d'intensités variables mais capables de charrier des particules grossières mises en suspension par la turbulence du fond (Salvador et al., 2005). Les particules sédimentent brièvement après un arrêt brutal des écoulements (Devilleers, 2005).
- Les dépôts de crue granoclassés résultent d'une suspension graduée et d'une sédimentation rythmée. Ce granoclassement positif a été observé sur le terrain mais l'observation à l'échelle microscopique a permis de mettre en évidence des microlaminations granoclassées discrètes.

La suspension graduée est définie par des écoulements faibles au sommet de la séquence élémentaire qui ne peuvent charrier que des particules fines. Pour cela, la période d'écoulement doit être longue, la lame d'eau importante et la chute d'énergie moins brutale (Reading et al., 1986 ; Blair, 2000 ; Jones et al., 2001 ; Campy et Macaire, 2003 d'après Devillers, 2005).

- Les sédiments à litages parallèles ont généralement une structure massive et une texture limoneuse à sableuse. Ceci les rapproche des écoulements à suspension granoclassée mais la limite abrupte et l'aspect massif en font plus un intermédiaire entre la suspension uniforme et graduée. Ils sont souvent observés en contexte semi-aride et associés à des crues éclair (Reading et al., 1986 ; Daniels, 2003 d'après Devillers, 2005).

- Difficilement discriminable de la sédimentation graduée, la sédimentation par décantation a également été observée. Les dépôts ont une texture très fine et sont piégés dans des plans d'eaux temporaires ou permanents, selon le niveau de la nappe phréatique (Salvador, 2005). Ils sont souvent observés dans les paléochenaux et canaux d'irrigation, et occasionnellement dans la plaine.

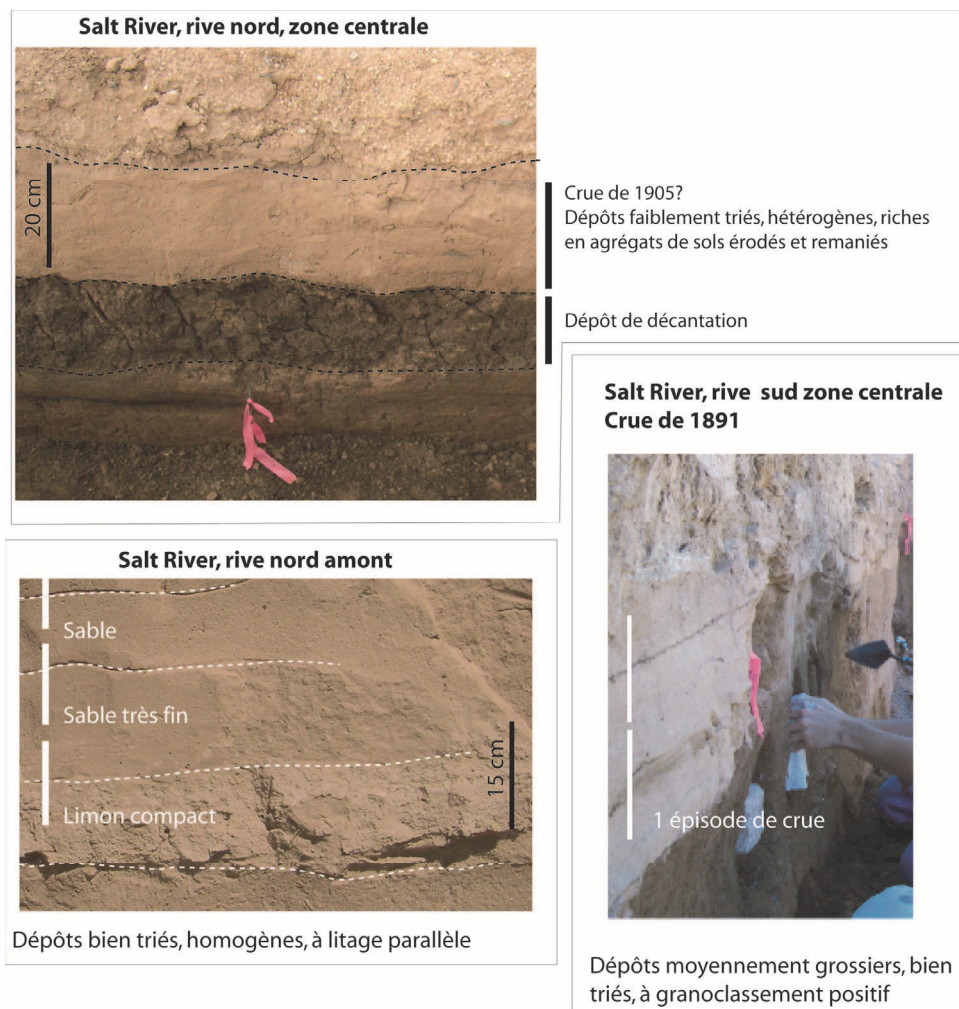


Fig. 60 : Variabilité sédimentaire des dépôts de crues

2.1.1.2. Paléosols simples à cumuliques

Une fois les sédiments déposés, ils sont soumis à l'action des agents physiques, chimiques et biologiques. En contexte semi-désertique les traits pédologiques sont liés à une exposition en surface courte et à une pédogénèse incomplète. Ils sont reconnaissables sur le terrain par la présence de traits structuraux/texturaux, biologique et organiques (Retallack, 1988 ; Wright et Marriott, 1993 ; Kraus et Aslan, 1993 ; Reading, 1996). La faible différenciation des faciès litho- et pédostratigraphiques sur le terrain a favorisé les analyses micromorphologiques, qui permettent de distinguer ces processus à une micro-échelle. Les paléosols sont de deux types : les paléosols simples et les paléosols cumuliques.

- Paléosols simples

-Les traces organiques sont rares mais visibles grâce à la présence de traces racinaires carbonatées et/ou ferrugineuses.

-La microstructure est généralement prismatique, polyédrique à grumeleuse.

-Les horizons et profils sont mal définis (Kraus et Aslan, 1993) et l'horizon A n'est jamais observé.

- Paléosols cumuliques

Ils correspondent à la superposition de paléosols simples (Fig. 61). Les horizons sont faiblement différenciés mais des différences de couleur, de compaction, et de structure dans une moindre mesure, permettent d'identifier plusieurs phases de déposition.

Chaque paléosol présente des traces organiques qui parfois pénètrent dans les horizons sous-jacents et les homogénéisent partiellement.



Fig. 61 : Paléosols cumuliques le long de la séquence de Gila Florence

- Signification géomorphologique et implications

Plusieurs hypothèses peuvent être posées sur la signification géomorphologique des paléosols :

- 1) La présence de paléosols signe une période de stabilité paysagère. Leur degré de maturité dépend de leur position dans le paysage (plaine ou terrasses) et peut être extrapolé aux conditions climatiques ainsi qu'à la stabilité du cours d'eau (diminution de la fréquence des crues) et à celle du bassin versant, qui s'exprime notamment par présence de végétation qui protège les pentes et stabilise les plaines.
- 2) La formation d'un paléosol n'est pas pour autant synonyme de stabilité morphosédimentaire. L'incision du cours d'eau et le développement de terrasses peut favoriser le développement pédologique dans des secteurs protégés de ces dynamiques fluviales (Allen, 1974 ; Behrensmeyer et Tauxe, 1982 ; Retallack, 1986). Dans certaines zones distales, ce sol reste en surface et forme alors un sol relique. Plus à proximité du chenal, il peut être enterré à posteriori. Les paléosols peuvent également être rencontrés dans des plaines distales peu touchées par l'accrétion ou dans des contextes d'avulsion de chenaux (Allen, 1974 ; Wright et Marriott, 1993 ; Willis et Behrensmeyer, 1994).
- 3) Les paléosols cumuliques résultent d'épisodes répétés, mais temporaires, de mise en surface. Plus cette mise en surface est longue, plus les sédiments évolueront sous l'effet de la pédogénèse. Une reprise de la sédimentation, de faible intensité, enterre ces dépôts qui préservent alors leurs caractéristiques acquises en surface. Il sera difficile de distinguer ces paléosols entre eux si les conditions pédoclimatiques sont similaires entre chaque épisode de sédimentation (Wright et Marriott, 1993 ; Morrison, 1978).

2.1.2. Dépôts de terrasse pléistocène

Les formations pléistocènes dans le bassin de Phoenix sont facilement identifiables grâce à l'observation systématique d'un horizon pétro-calciqie cimenté de couleur blanche, le caliche, à moins d'1 mètre de profondeur (Fig. 62). Plusieurs stades d'évolution ont été distingués (Stuart et Dixon, 1973 ; Reeves, 1970, 1976). Le premier stade s'exprime par la précipitation de carbonates sur les faces inférieures de galets ou gravillons ainsi que des accumulations péri-racinaires lorsque la texture est plus fine. Progressivement, le calcium précipite de façon continue dans la matrice sédimentaire, puis se cimente sur la partie supérieure de l'horizon carbonaté (Fig. 62).

L'origine de ces formations semble être multiple :

- Une remontée capillaire de la nappe phréatique (Blake, 1902 ; Rothrock, 1925 ; Theis, 1936 dans McGrath, 1984) et des phénomènes de battement de nappe sur le long terme peuvent être responsables de ces accumulations carbonatées (Blank et Tynes, 1965).
- Plus récemment, certains chercheurs ont proposé une origine pédogénétique (Price, 1940 ; Brown, 1956 ; Reeves, 1970 ; Kaemmerer et Revel, 1991)
- Une dernière hypothèse suggère que des dépôts atmosphériques riches en particules carbonatées ont favorisé la mise en place de ces profils (Moussavi-Harami et al., 2009).

La présence de nodules de caliche dans les dépôts alluviaux ou dans les sédiments de remplissages de canaux indique des épisodes d'érosion des sols anciens sur les terrasses ou cônes alluviaux pléistocènes. Par ailleurs, ces formations ont été exploitées par les Hohokam sous forme de ciment (mélange de caliche et de particules argileuses à froid) qui compose les murs et planchers des maisons en fosse.

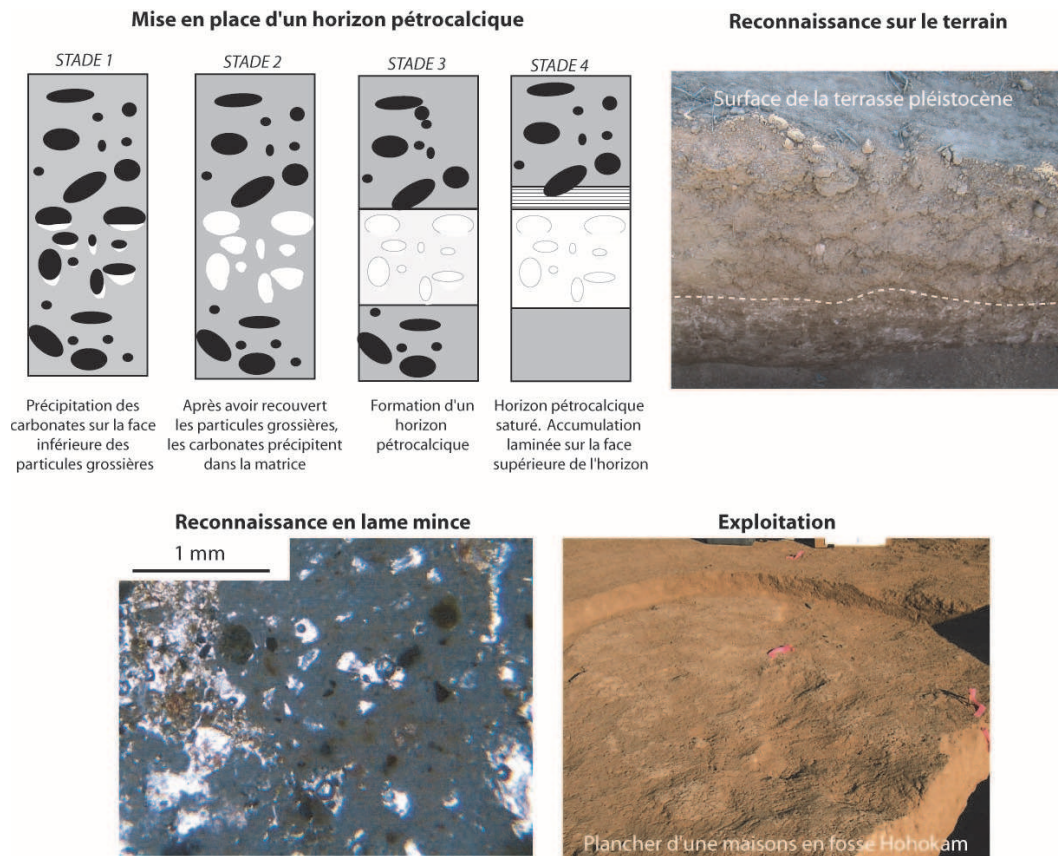


Fig. 62 : Caliche : formation, reconnaissance et exploitation

2.1.3. Dépôts de lit mineur

Six facies ont été observés dans les paléochenaux de la Salt et de la Gila. La plus grande partie de ces facies est de texture fine, argileuse à sableuse.

- Les *figures de stratification oblique planaire sableuses* (foreset bedding) et homogènes meubles (Fig. 63). Observées sous forme d'ensemble sédimentaire unique ou groupé de petite taille (< 15 cm), elles sont séparées par l'absence de déposition, une phase d'érosion ou un changement abrupt (McKee et Weir, 1953). Cet ensemble correspond à un cortège de rides qui progradent sous l'action de courants dans des eaux peu profondes (Harms et al, 1975 ; Lopez-Gomez et Arche, 1993). La surface d'érosion plane entre les deux faisceaux suggère que les rides ont des crêtes rectilignes (Campy et Macaire, 2003). Leur présence signale des épisodes de décharge hydrique de faible intensité ou de décrue (Cojan, 1993).

Des stratifications obliques planaires bidirectionnelles ont également été observées et suggèrent une variation des paléocourants.

- Les *laminations ondulées* (wavy bedding) continues ont également été mises au jour. Elles sont composées d'une alternance de dépôts sableux et de couches à texture plus fine (type boue) (Fig. 63). Cette structure résulte d'intervalles d'écoulements rapides et de phases de stagnation d'eau (Martin, 2000) dans un environnement sédimentaire peu profond (Schieber, 1990). Les microdunes sableuses se mettent en place sous forme de rides de courant unidirectionnelles au cours de phases d'écoulement rapide mais de faible dynamique. A la fin de la crue, l'eau stagnante riche en matière en suspension dépose ses particules de façon préférentielle dans les zones creuses des rides et seule une fine couche est observable sur les crêtes (Reineck et Wunderlich, 1968). Les recherches antérieures ont mis en évidence les laminations ondulées dans des environnements côtiers et les estuaires (Clifton, 1982) mais très rarement en contexte fluvial (Martin, 2000 ; Terwindt et Breusers, 1972).

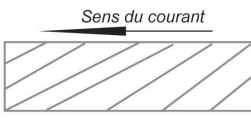
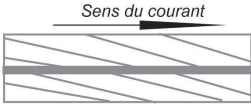

	Description et typologie	Interprétation
	Sables meubles à stratification obliques planaires (foreset bedding). Angle < 35 °, épaisseur < 15cm, base et surface plane	Migration de mégarides dans des eaux peu profondes au sommet de laisses de sable (Harms et al, 1965; Lopez-Gomez et Arche, 1993) Bas régime de courant et décrue (Cojan, 1993)
	Sables meubles à stratification obliques planaires (foreset bedding). Angle < 35 °, épaisseur < 15cm, base et surface plane	
	Sables fins à limons à laminations ondulantes (wavy bedding)	Alternance d'écoulements rapide et de phases de stagnation d'eau (Martin, 2000), dans un environnement peu profond (Schieber, 1990)

Fig. 63 : Figures syn-sédimentaires observées en plaine alluviale

- Les *stratifications entrecroisées* en cuillère (cross bedding) ont été observée, mais principalement dans les remplissages de canaux dont le profil étudié se situe à proximité du chenal principal. Les dépôts sont à dominante sableuse et sont occasionnellement riches en charbons de bois. Ces stratifications sont formées lorsqu'un courant agité induit la formation de rides dans les sédiments du fond du chenal, puis leur migration.

- Des formations à *stratifications parallèles* sont également observées sous la forme de sables à limons sableux à laminations parallèles. Ces sables sont associés à un écoulement torrentiel en période de crues.

- *Dépôts de décantation*. Des dépôts très fins, de texture argileuse et de couleur brune, ont été observés dans certains chenaux. Ils présentent des traces de laminations horizontales, faiblement préservées suite à l'activité biologique, visible par les traces racinaires oxydés et/ou carbonatées. Ces dépôts attestent d'écoulements diffus mais rythmés dans les chenaux, associés au développement de la végétation. Ils résultent soit d'un niveau de l'eau très faible, ou correspondent à une dynamique de décantation en plaine distale, associée à une déconnexion ou l'éloignement du chenal actif avec cette partie de la plaine.

- *Dépôts grossiers de lit mineur*. Si le matériel est disponible dans le bassin versant, les dépôts de lit mineur peuvent être constitués de galets de taille variable (cm à dm) intégrés dans une matrice sableuse.

Cette formation résulte d'écoulement importants à forte charge solide, mais de courte durée, ce qui ne permet pas le transport des sédiments fins (Devillers, 2005).

2.2. Dépôts de versants

Comprendre le fonctionnement des processus de l'érosion hydrique en contexte semi-aride est indispensable pour discuter de la stabilité des systèmes agraires car ces processus ont un impact direct sur le fonctionnement des réseaux d'irrigation, la pérennité des champs agricoles et leur fertilité.

Sur les versants et les piémonts des formations montagneuses, la morphogénèse est régie par des dynamiques éoliennes et hydriques (Coudé-Gaussen, 2002). Dans le Sud-Ouest américain, l'érosion hydrique est la plus importante car elle est à la fois un agent d'érosion et de déposition. La section suivante présente les facteurs de cette érosion et les formes qu'elle engendre.

2.2.1. Les facteurs de l'érosion hydrique en contexte semi-aride

De nombreux facteurs contribuent à l'érosion hydrique en contexte semi-aride, mais la part relative de chacun de ces paramètres est difficile à estimer.

De nombreuses études géomorphologiques dans le Sud-Ouest américain considèrent le climat comme le facteur de contrôle dominant dans l'évolution des paysages (Gerson et Yair, 1975 ; Budel, 1982 ; Bull, 1997). En Arizona, les précipitations de fortes intensités liées aux orages estivaux sont le principal agent d'érosion et de transport (Leopold, 1951 ; Hereford et Webb, 1992 ; Hereford, 1993). Le volume de sédiments érodé dépend de :

1) *la pente*, de son gradient, et de sa forme (FAO, 1983 ; Roose, 1994)
 2) *la lithologie* et de son degré d'infiltration et de sa dureté. Une faible infiltration des roches affleurantes dures augmente le ruissellement et l'érosion des sols.
 3) *les conditions d'humidité*. Des intervalles plus humides favorisent le développement d'un couvert végétal qui protège les versants de l'érosion (Langbein et Schumm, 1958). En contexte semi-aride, un recouvrement végétal supérieur à 40% les protègent de l'érosion, en favorisant l'infiltration de l'eau (Roose et al., 1993 ; Garcia-Ruiz et al., 1996). A l'opposé, si les conditions sont sèches et les pentes dénudées, l'érosion est accentuée (Kochel et al., 1997). La rapidité avec laquelle la végétation s'ajuste à ces changements climatiques de courte durée n'est pas connue.

4) *les sols et leur exploitation*. En contexte désertique, la résistance à l'érosion hydrique est plus faible pour les sols superficiels (Ryan, 1982) où le faible taux de matière organique limite leur stabilisation. Dans notre secteur, l'érosion résulte du défrichement des versants au cours de la période Hohokam et de la canalisation des eaux pluviales, auxquels s'ajoute le pâturage au cours des périodes historiques (Graf, 1978).

Le défrichement fragilise la cohésion des sols. La formation d'une croûte de surface réduit l'infiltration et favorise l'érosion sous l'effet des pluies. Ces sols superficiels humifères contribuent à la charge solide transportée par les cours d'eau temporaires. La canalisation des eaux pluviales sur les piémonts, si faiblement contrôlée, peut favoriser un ruissellement concentré. Le sol soumis au pâturage intensif se tasse, devient plus compact, le ruissellement s'accroît et favorise alors la formation de ravines, et de ravins à plus large échelle.

2.2.2. Les formes de l'érosion hydrique identifiées

Dans le Sud-Ouest américain, l'augmentation des débits solides associée à l'érosion hydrique contribue à la formation de coulées de débris, de ravines, mais également à l'accélération et à la réactivation de la partie terminale des cônes détritiques (Bull, 1997).

2.2.2.1. **L'érosion diffuse en nappe**

Les processus de colluvionnement observés au moment des pluies s'expriment par des phases de ruissellement diffus qui donnent naissance à des nappes colluviales hétérogènes sur les zones de distribution des cônes détritiques. Le déplacement s'effectue par effet splash puis par la formation de flaques et ensuite par ruissellement en nappe (sheetwash).

2.2.2.2. **L'érosion concentrée**

Lorsque l'eau de ruissellement dépasse une certaine vitesse, l'énergie se concentre sur les lignes de plus forte pente. L'érosion s'exprime alors par des creusements de taille variable et par la formation très rapide d'un réseau extensif de ravines (gullies) puis à une plus large échelle de véritables ravins (arroyo) dont la profondeur peut atteindre plus d'une dizaine de mètres (McFadden et McAuliffe, 1997 ; Vogt, 2003). Les arroyos ont été observés principalement au nord et au sud de l'Arizona, dans les zones à plus forte pente (Vogt, 2003) (Fig. 64), mais également dans le bassin de Phoenix à la fin du 19^{ème} siècle, en réponse à des changements climatiques rapides et du pâturage incontrôlé.

Dans les vallées du bassin de Phoenix, la principale dynamique observée est celle du ravinement. Cette érosion s'exprime par la réactivation de la partie terminale des cônes de déjection latéraux holocènes à la suite d'évènements pluviométriques annuels ou plus exceptionnels. Le modèle morphologique des cônes détritiques terminaux inclut une zone d'alimentation caractérisée par des chenaux, une zone centrale composée de dépôts diffus de ruissellement et enfin une partie terminale où les dépôts colluviaux de texture fine alternent avec des particules d'origine éolienne ou fluviale (Reading, 1996) (Fig. 65).

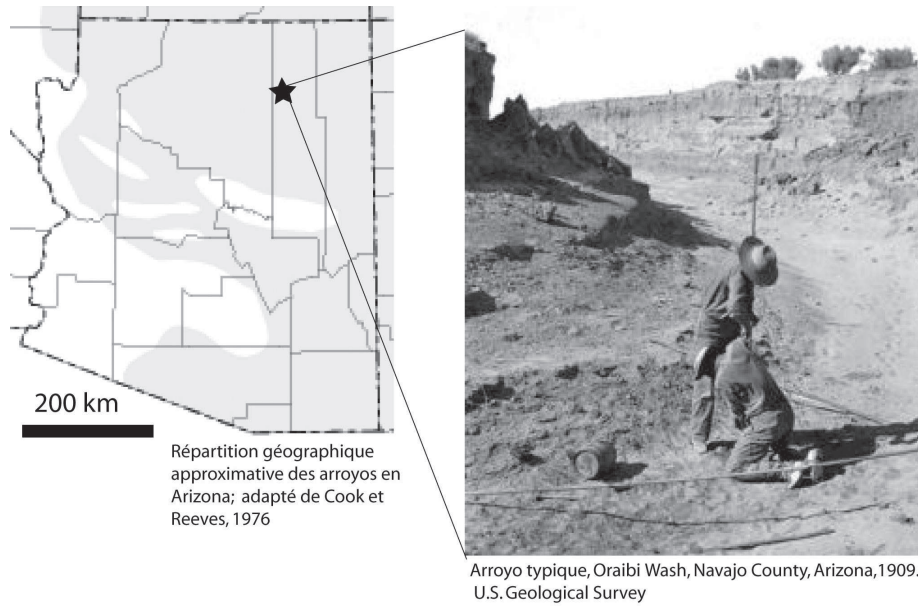


Fig. 64 : Répartition géographique approximative des arroyos en Arizona

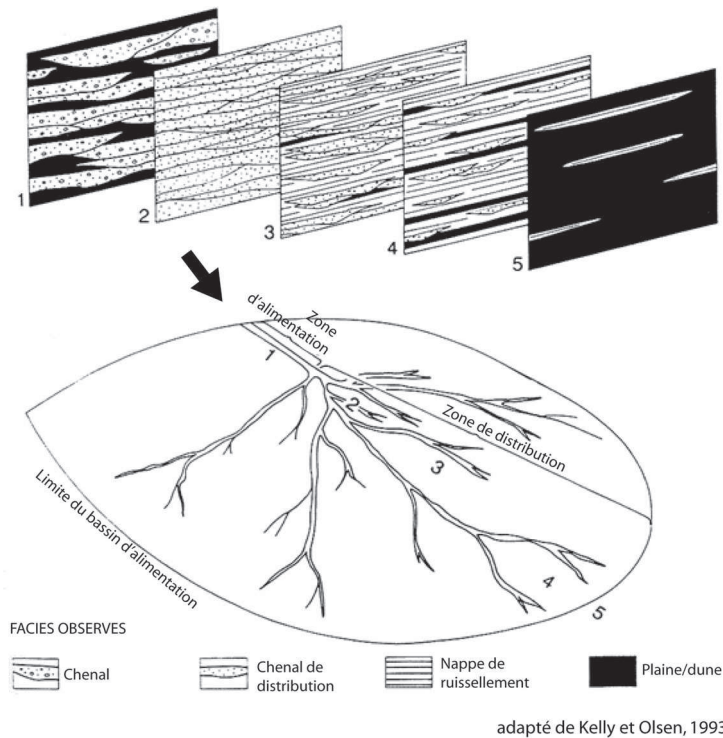


Fig. 65 : Model hypothétique de la partie terminale des cônes détritiques et évolution des faciès sédimentaires de l'amont vers l'aval (Kelly et Olsen, 1993). Ces dynamiques ont été observées sur les cônes holocènes des Santan Mountains, des Phoenix Mountains, des Papago Buttes, et dans une moindre mesure de South Mountain (Fig. 66).

La moyenne vallée de la Gila présente des affleurements très sensibles à l'érosion (les montagnes Santan et Sacaton) (Fig. 66) mais cette érosion reste localisée à la partie centrale de la moyenne vallée. Dans la basse vallée de la Salt, les zones sensibles à l'érosion sont spatialement étendues sur presque l'ensemble de la rive nord et de la rive sud (Fig. 66). Dans les canaux d'irrigation et les formations alluviales proches de ces affleurements géologiques, l'érosion locale ne s'exprime pas directement par un processus de colluvionnement, mais plutôt par un ruissellement en nappe et des crues

éclair sur les piémonts et cônes détritiques qui érodent les sols et détruisent les buttes qui longent les canaux (buttes composées des sédiments dégagés lors du creusement des canaux et de leur curage). Certaines unités stratigraphiques des remplissages de canaux sont composées de dépôts graveleux de composition minéralogique locale, plus ou moins arrondis selon le substrat érodé, qui contrastent fortement avec les alluvions. Ces dépôts sont généralement mal triés et intégrés dans une matrice qui provient soit de l'érosion des couches sous-jacentes fines, des sols superficiels sur les piémonts et/ou zones basses, ou au mélange avec des alluvions (Fig. 67).

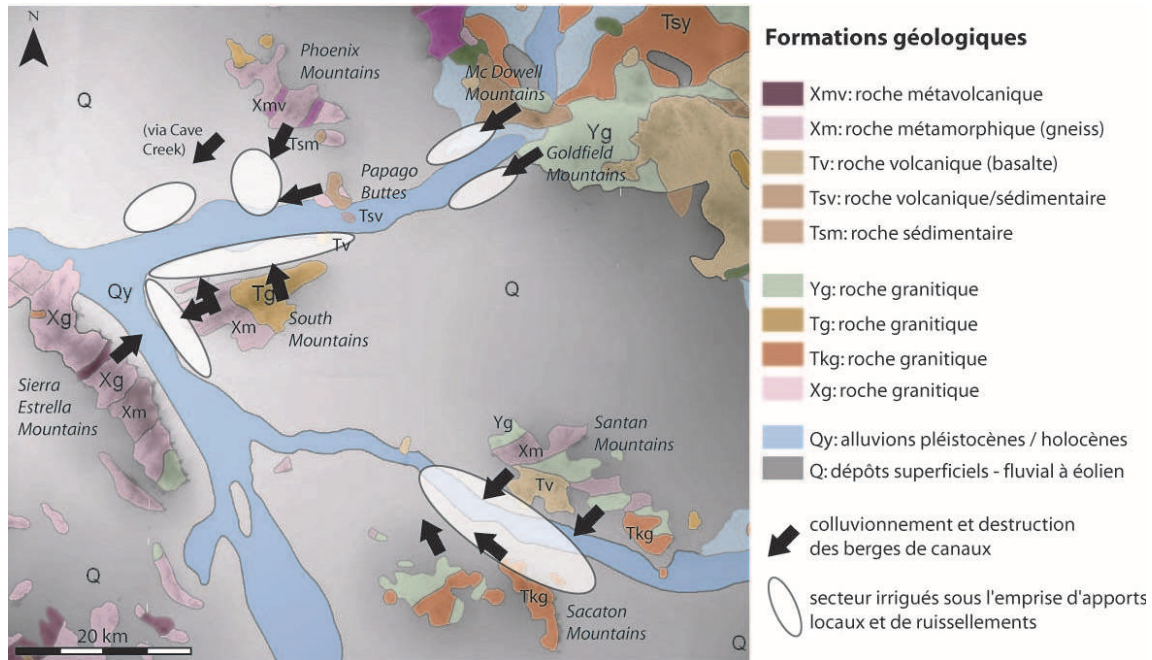


Fig. 66 : Zones sensibles à l'activité locale érosive



Fig. 67 : Coupe transversale de l'extrémité digitée d'un cône déritique (Salt River, rive nord, zone centrale, projet Desert Archaeology, profil est) en provenance des Papago Buttes. La tracé noir délimite une ravine (80cm/20 cm) colmatée par des graviers (< 2 cm) dans une matrice limoneuse, qui érode des formations fluviales limoneuses.

En remarque, il convient d'ajouter que l'eau de ruissellement a été dérivée au cours des périodes préhistoriques afin d'alimenter les canaux en eau ou irriguer directement les parcelles agricoles (Crown, 1984). La différenciation entre processus naturel et anthropique est donc difficile à établir.

L'érosion des sols agricoles après de fortes pluies et leur fragilisation liée à l'activité humaine est déterminable grâce aux observations pédologiques de terrain et aux analyses micromorphologiques (structure, traits texturaux, matière organique, type et densité de la couverture végétale). L'étude du régime des feux peut également faciliter la compréhension des processus érosifs suite à des épisodes de sécheresse prolongée (ex : Campbell et al., 1977 ; Berger, 2003 ; Swetnam et Betancourt, 1998 ; Pierce et al., 2004).

2.3. Dépôts éoliens

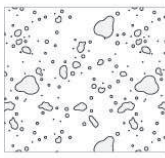
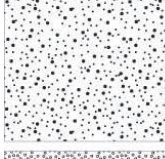
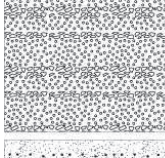
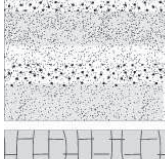
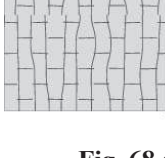
Sur le terrain, seule l'étude de la stratification et du tri peut nous permettre de distinguer les sédiments éoliens des sédiments alluviaux. Les laminations laissées par les rides éoliennes ont un classement inverse, sont souvent plus fines et possèdent une épaisseur uniforme (Hunter, 1977, 1981 ; Kocurek et Dott, 1981 ; Kocurek, 1991 ; Swezey et al., 1996). Elles sont caractérisées par trois types de stratifications (Kocurek et Dott, 1981) : stratifications croisées liées à l'écoulement des grains sur la dune, lamines résultant de la chute des grains, et laminations montantes suite à l'action du vent. Dans le désert du Sonora, l'érosion éolienne s'exprime par une activité continue de faible intensité, avec un vent chargé en particules fines, mais également sous la forme de tempêtes de sable. Des études minéralogiques, géochimiques et magnétiques récentes suggèrent qu'une partie de ces particules éoliennes provient de la Colorado River (Muhs et al., 2003) et de la remobilisation des sédiments alluviaux le long de large systèmes fluviaux.

Dans le bassin de Phoenix, les sédiments éoliens ne sont pas reconnus sur le terrain car ils sont dépourvus de figures sédimentaires excepté les laminations occasionnelles, ce qui les rend difficile à distinguer des dépôts fluviaux laminés surtout si ces particules éoliennes proviennent de la remobilisation d'alluvions. Seule l'analyse microscopique ou granulométrique peut nous permettre cette distinction (cf partie III, Chapitre II).

2.4. Synthèse des facies observés

La Fig. 68 synthétise les différents facies observés en contexte de plaine d'inondation et sur les versants (Fig. 68).

Ces facies peuvent être altérés par l'effet de processus post-dépositionnels comme la pédogénèse, l'érosion ou l'accrétion, selon leur distance au chenal principal, les rythmes de crues, et l'intensité des dynamiques érosives.

	Description et typologie	Type de sédimentation et caractéristiques
	Dépôts graveleux à matrice fine, nombreux agrégats de sols, signature de l'érosion locale	Ruissellement en nappe ou en ravines en provenance des cônes détritiques latéraux: niveau de l'eau faible et crue rapide
	Dépôts hétérogènes à agrégats de sols sans figure de sédimentation	Crue érosive et rapide par apport longitudinal
	Alternance de sédiments fins compacts et sédiments plus grossiers	Dynamique intermédiaire entre crue rapide et crue rythmée
	Dépôts à granoclassement positif, avec sédiments grossiers à la base et fins au sommet	Crue rythmée: durée de la crue longue
	Dépôts très fins à structure prismatique	Phase de stagnation d'eau dans les chenaux, micro-dépressions et plaine distale puis assèchement (fin de crue)

adapté de Devillers, 2005

Fig. 68 : Figures sédimentaires observées en plaine d'inondation

- Accrétion

Lorsque l'apport sédimentaire est lent et continu, comme en contexte de plaine distale ou proximale (lorsque le chenal principal est étroit et caractérisé par des dynamiques fluviales de faible intensité), les traits pédo-sédimentaires des dépôts sous-jacents sont préservés. Cette séquence dilatée est composée de sols monophasés cumuliques qui peuvent être distingués les uns des autres si les conditions pédoclimatiques évoluent entre chaque phase de déposition (Reading, 1996).

Si la sédimentation est rapide à épisodique, dans des contextes de sédimentation par crue-éclair dans la plaine d'inondation par exemple, les dépôts sont scellés par des sédiments épais et leur partie sommitale peut-être érodée et remaniée. La pédogénèse, qui se développe sur le matériau nouvellement apporté, peut pénétrer en profondeur et donner naissance à des formations composites. Lorsque le développement pédologique est bien dissocié entre les deux formations, on assiste à la formation d'un ensemble composé qui préserve les traits pédo-sédimentaires sous-jacents (Reading, 1996).

- Pédogénèse et/ou érosion

Lorsque l'apport sédimentaire est réduit à absent (plaine distale, réduction de la fréquence des crues), les dépôts sont sujets à l'érosion et/ou à l'évolution pédologique. Sous l'effet de l'érosion éolienne ou hydrique, ils forment des limites stratigraphiques irrégulières avec le matériau de couverture composé d'horizons A érodés ou de colluvions, dans notre contexte. Les traits sédimentaires peuvent être préservés et le profil forme ainsi un sol cumulique érodé (Reading, 1996 ; Courty et Fedoroff, 2002).

S'il n'y a pas de matériau d'accrétion (terrasses anciennes, type terrasse Mesa ou Sawik), les sédiments érodés à surface irrégulière peuvent reprendre leur dynamique pédologique ou entamer de nouveaux processus pédologiques si les conditions environnementales locales ont évolué. Les dépôts prennent alors le nom de sol polygénétique.

3. Reconnaissance des structures hydrauliques : estimation des paramètres naturels et anthropiques

3.1. Principe de l'approche

L'archéologie agraire est fondée sur les méthodes de la géographie rurale, la géomorphologie, la paléoécologie, l'agronomie et la taphonomie (Berger et Jung, 1996). Elle vise à reconstruire le fonctionnement de l'agrosystème (milieu, cultures, pratiques agraires) grâce à deux approches distinctes.

- La première approche considère l'agrosystème comme le résultat d'activités humaines. Elle se focalise principalement sur l'analyse et la typologie des pratiques agraires qui restent descriptives. L'agrosystème n'est pas évalué en tant que tel, mais seuls les processus sont pris en compte.
- La seconde approche vise à considérer l'agrosystème comme un sujet. Elle a pour objectif de reconstruire les relations entre les formes du paysage agraire et ses représentations sociales par le biais d'approches écologiques et sociologiques. Initialement cantonnée à la mise à jour de structures d'habitat, cette nouvelle archéologie agraire s'intéresse depuis une dizaine d'années aux traces (Boissinot, 1997 ; Berger, 2000) comme les horizons cultivés, trous de plantation, fossés de drainage et canaux d'irrigation.

3.2. Repérage des réseaux fossiles

Les principales traces agraires visibles en surface dans le bassin de Phoenix correspondent à des canaux d'irrigation sur les plaines et les terrasses (Fig. 69) ainsi que les structures liées à l'agriculture sèche et à la dérivation/canalisation d'eau sur les piémonts¹¹. C'est grâce à des travaux de cartographie continus dès le 19^{ème} siècle, fondés sur des prospections, fouilles de terrains et photos aériennes, que la majeure partie des réseaux d'irrigation a été décrite et cartographiée dans le bassin de Phoenix. Les documents existants (cartographie de Howard et Huckleberry, 1991 ; photo aérienne de 1934 (Fig. 70)) géoréférencés grâce à un logiciel SIG et chargés dans un GPS, permettent de diriger les travaux de terrain.

¹¹ Les traces de pratiques culturelles comme le labour ne sont pas identifiées. Les données ethnologiques suggèrent que les Pimas ne pratiquaient pas le labour en tant que tel, mais creusaient des trous de semis avec des bâtons (Castetter et Bell, 1942). Cette pratique a été identifiée le long de la Gila dans des parcelles Hohokam (Purdue et al., nd). Par ailleurs, l'hypothèse de l'absence de pratiques culturelles spécifiques est confortée par l'inexistence d'outils agricoles préhistoriques.

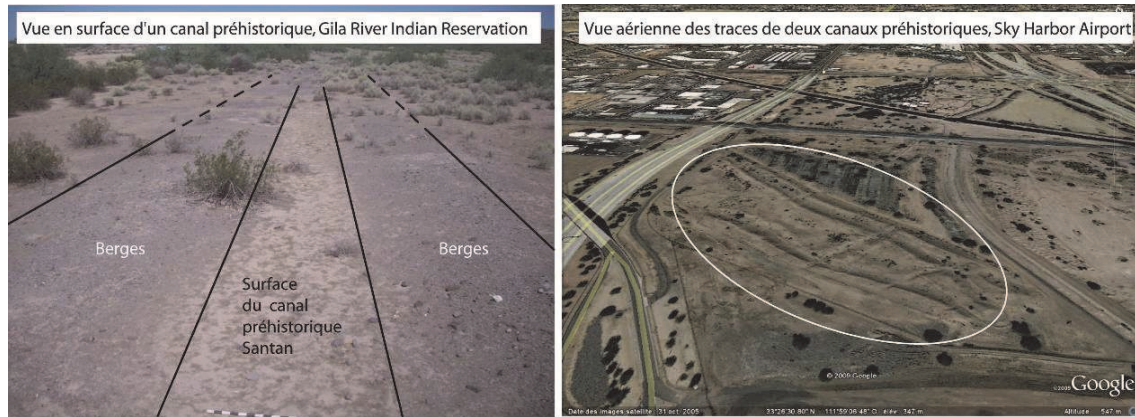


Fig. 69 : Repérage des canaux d'irrigation préhistoriques

Contrairement aux travaux en Europe où la photo-carto-interprétation a permis de reconstruire l'histoire des terroirs (ex : Berger et Jung, 1996; Jung, 1998 ; Berger, 2001 ; Chouquer, 1996; Chouquer et Favory, 1991), l'approche diachronique et l'étude des parcelles est quasi-inexistante dans le bassin de Phoenix, excepté dans les travaux récents de Howard (2006). Ceci est à relier en partie à la structure foncière actuelle des terres, à l'urbanisation maximale qui caractérise la ville de Phoenix (Fig. 70), l'accès limité aux terres indiennes et l'activité agricole.

Malgré quelques décalages géographiques entre la cartographie mise en place et le repérage sur le terrain, un grand nombre de canaux d'irrigation ont été recoupés, stratigraphiquement décrits et échantillonnés par des archéologues, peu familiarisés avec les méthodes de la géoarchéologie. Les données sont pour la plupart subjectives, succinctes et difficilement exploitables.

Il existe donc un premier fossé entre l'approche théorique et le terrain, un second entre le terrain et la description des données pour enfin mettre à jour un troisième fossé dans l'acquisition de la donnée. En effet, les rapports qui concentrent l'information sont difficilement accessibles.

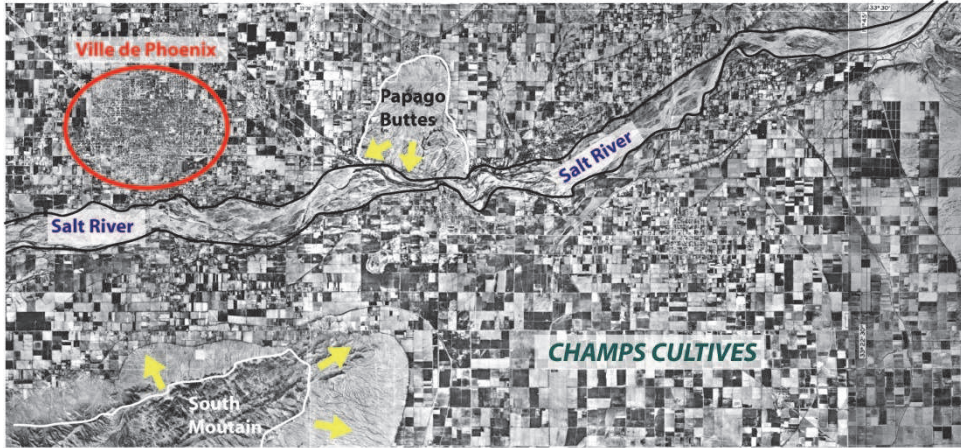
3.3. Discrimination entre canaux et chenaux naturels

En fonction de la localisation géomorphologique d'un projet, chenaux et canaux d'irrigation sont parfois observés simultanément. Or le profil d'un canal d'irrigation peut ressembler fortement à celui d'un chenal naturel. Quatre critères permettent cependant de les distinguer l'un de l'autre (Fig. 71).

3.3.1. Alignement

L'alignement d'un chenal naturel est sinueux. Les canaux, quant à eux, sont des structures anthropiques relativement alignées (Fig. 69).

Photographie aérienne de la lower Salt River Valley (1934), et des parcelles agricoles



Photographie aérienne de la lower Salt River Valley (2011), et de l'urbanisation



Fig. 70 : Urbanisation en 1934 et 2009, destruction des canaux préhistoriques

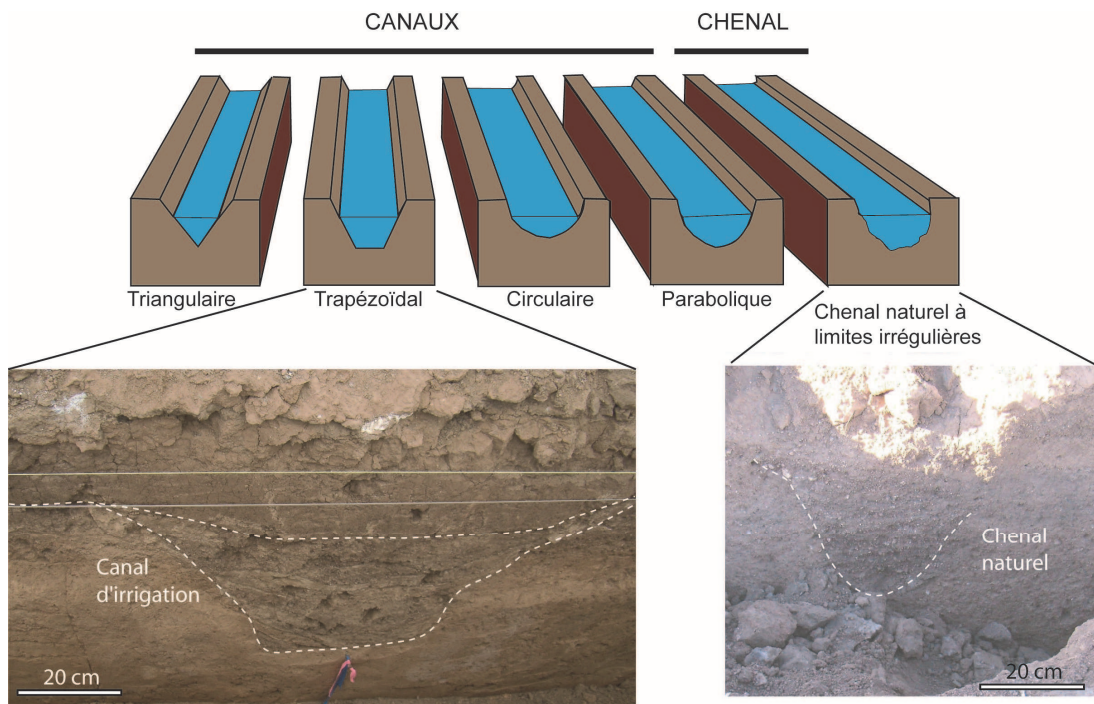


Fig. 71 : Distinction entre un chenal naturel et un canal de forme trapézoïdale

3.3.2. *Forme*

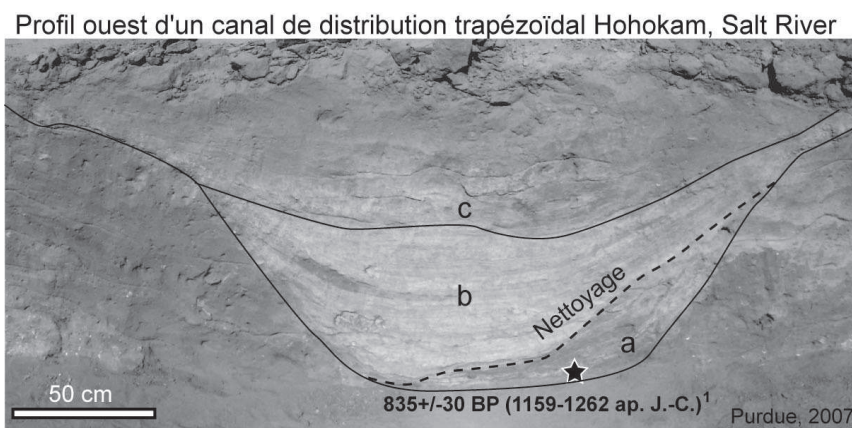
Les chenaux sont caractérisés par leur irrégularité morphologique. La forme des canaux est variable, mais quatre formes, plus ou moins régulières, ont été identifiées dans notre secteur : triangulaire, trapézoïdale, parabolique et occasionnellement circulaire (Fig. 71).

3.3.3. *Type de remplissage*

Les canaux d'irrigation sont colmatés par une succession de dépôts, laminés ou non. Ces sédiments sont souvent fins, avec des facies argileux en alternance avec des sables fins. Des dépôts de pente et d'effondrement de berges/glisement des buttes sont régulièrement observés et souvent interstratifiés avec des artefacts archéologiques, comme des tessons, qui peuvent servir de marqueurs chronologiques. Le remplissage des chenaux est massif et plus grossier. Aucune trace d'activité humaine n'est généralement visible.

3.3.4. *Signature de l'entretien des structures hydrauliques*

L'activité humaine dans les canaux est identifiable par le biais de l'entretien et du curage (Fig. 72). La texture des sédiments et les limites stratigraphiques permettent de discriminer entre un entretien humain ou une phase érosive d'origine fluviale. Le curage anthropique, généralement vertical sur les berges, est facilement reconnaissable.



Canal actif: a) limon brun clair organique; b) limon brun très clair laminé
c) dépôts post-abandon hétérogènes. Référence date¹ : Lyon 5055.

Fig. 72 : Trace d'activité humaine dans un canal d'irrigation

Les nettoyages de canaux entraînent une suppression de l'information sédimentaire. Par conséquent, la signature environnementale dans un canal consiste en une succession de phases de sédimentation, d'arrêt, de nettoyage, et de suppression de l'information sédimentaire. Cet impact anthropique pousse d'autant plus à l'analyse systémique. Afin de pallier cette destruction anthropique d'une partie du remplissage sédimentaire, l'étude de plusieurs profils d'un même canal peut permettre de proche en proche d'obtenir des séquences sédimentaires plus complètes.

En parallèle à ces phases de nettoyage, les canaux contiennent des traces de brûlis in situ afin de détruire la végétation, ainsi que des aménagements de berges (galets, placage de terre+caliche). Sur le terrain, ces traits spécifiques sont donc à décrire systématiquement car ils peuvent être liés à une évolution des débits liquides et solides dans le cours d'eau.

3.3.5. *Signature de l'activité fluviale et filtre humain*

Les dynamiques de remplissages dans les fossés sont diagnostiques du fonctionnement de l'hydrosystème (Berger, 2001). De façon logique, des dépôts sableux signent une forte activité détritique dans le cours d'eau principal et inversement des passées argileuses vont être intuitivement associées à une phase de faible circulation d'eau. Un facteur anthropique doit toutefois être pris en compte : il s'agit de la protection et du contrôle des structures hydrauliques. Bien que rarement conservées, l'existence de vannes et barrages est clairement attestée. Leur rôle de filtre va conduire à une signature sédimentaire biaisée, qui ne résulte pas d'une dynamique hydrologique donnée. Ainsi, des dépôts argileux à limoneux peuvent résulter de phases de stagnation d'eau mais également de phases de détritisme hydrique poussé contre lesquelles les communautés agricoles se protègent. La compréhension du contexte paléohydrologique global et sa mise en relation avec les remplissages des canaux devrait permettre de discriminer l'activité naturelle de l'anthropique.

Par ailleurs, les dépôts observés dans des canaux intermédiaires sont le résultat d'une circulation d'eau et de sédiments dans de multiples conduits hiérarchisés. Les extrapolations faites sur le fonctionnement des nappes phréatiques et l'ensemble du bassin versant doivent donc être prudentes.

3.4. Processus taphonomiques

Les premières et dernières phases de fonctionnement des fossés peuvent être difficiles à percevoir et même avoir totalement disparu suite à des processus naturels ou anthropiques, historiques ou modernes (Fig. 73) (Berger et Jung, 1996 ; Brochier, 1991).

Sur les zones stables que sont les terrasses anciennes (pléistocènes), les canaux sont généralement peu profonds, et ce sont principalement les pratiques agraires comme le labour qui altèrent la partie sommitale de ces fossés.

La topographie préhistorique et les canaux en surface ont été gommés par l'activité agricole mécanique historique et moderne. Certains processus naturels comme l'érosion par colluvionnement ou alluvionnement peuvent également éroder et/ou enfouir ces canaux. Dans les plaines alluviales et les basses terrasses, les canaux sont couverts par des limons de débordement et de crues, de même que par des dépôts alluvio-colluviaux qui altèrent leur remplissage.

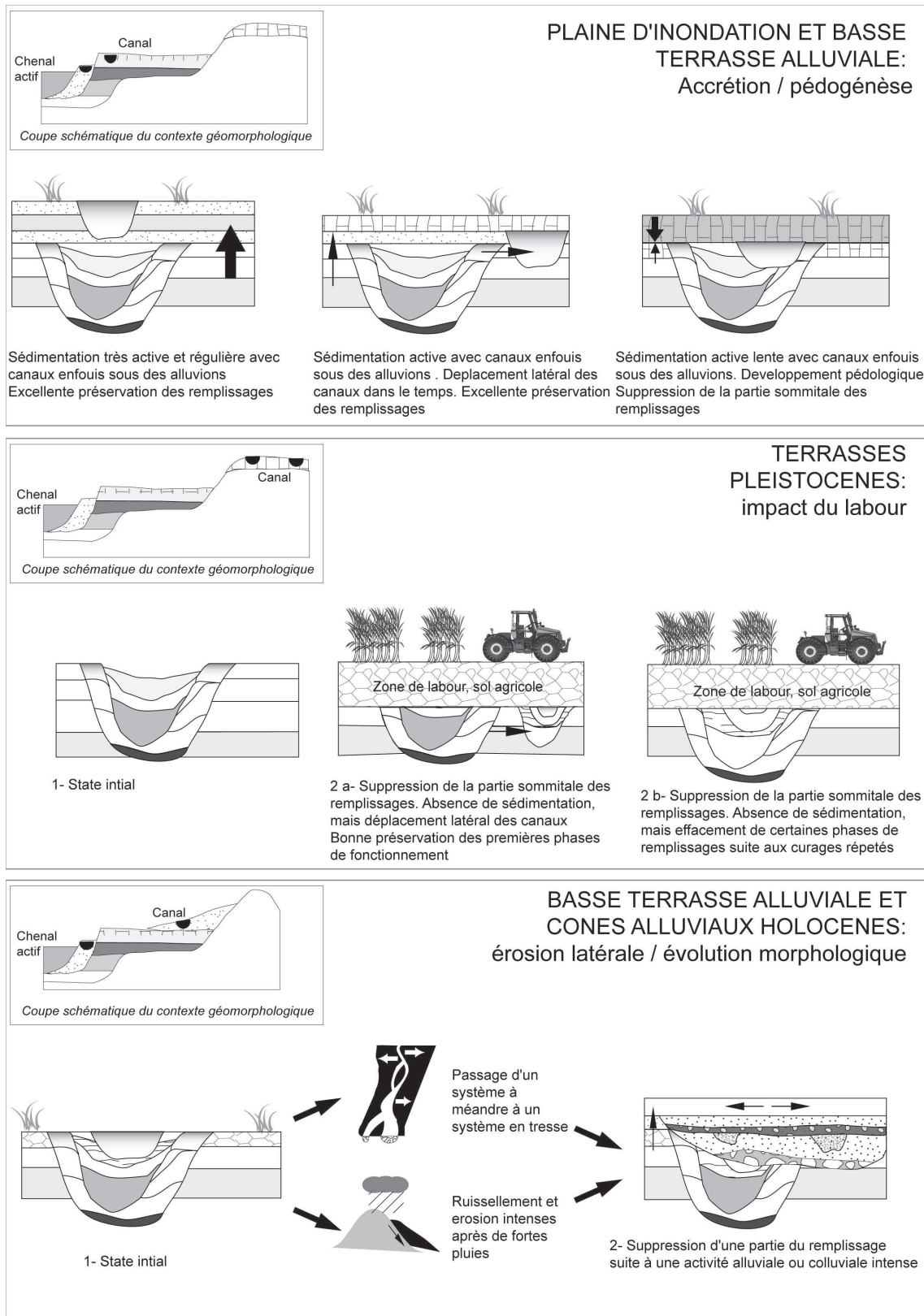


Fig. 73 : Processus taphonomiques dans les canaux selon leur localisation géomorphologique (adapté de Berger, 1999)

4. Méthodes de datation

4.1. Période concernée, stratégie et limites inhérentes à l'objet d'étude

Dans le cadre de ce travail, plusieurs types de datations couvrant les deux derniers millénaires ont été employées : datations typochronologiques, chronostratigraphiques, et datations absolues.

La datation des structures hydrauliques est complexe. Les canaux d'irrigation sont des structures construites, fréquemment reconstruites, entretenues et colmatées. Les sédiments observés à la base du canal sont postérieurs à sa construction mais une date effectuée dans les premiers dépôts permet toutefois d'approcher avec un léger décalage sa mise en service. Les datations obtenues dans la partie sommitale du remplissage signent la fin d'utilisation du fossé. Cette situation idéale est observée lorsqu'un canal est utilisé de façon continue. Malheureusement, l'activité anthropique altère fortement cette interprétation (Fig. 74). En effet, les remplissages sédimentaires peuvent correspondre à une sédimentation de quelques dizaines d'années, pour un canal utilisé en réalité pendant plusieurs siècles.

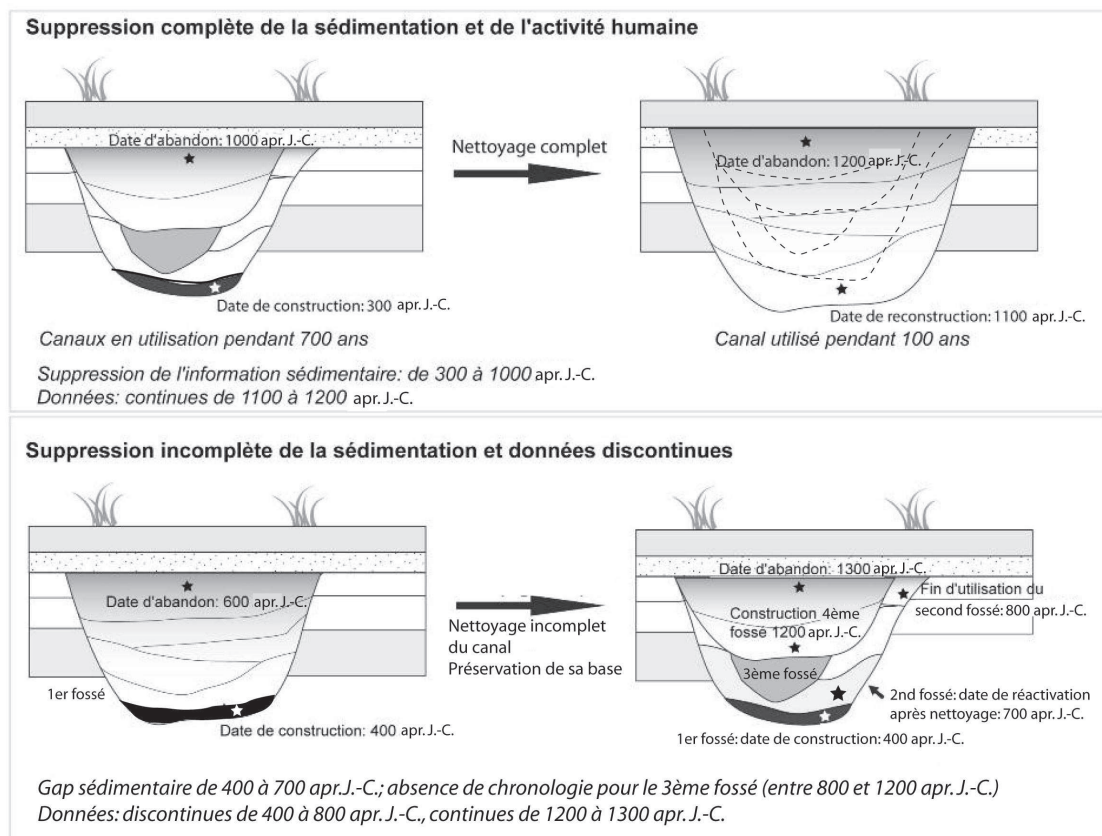


Fig. 74 : Chronologie et gap sédimentaire dans les canaux : exemple de l'impact de l'activité humaine

Le nettoyage de ces fossés, en supprimant une partie de l'information sédimentaire peut conduire à des gaps sédimentaires. Les canaux ne permettent donc pas d'établir des diagrammes âge-profondeur.

Par ailleurs, le matériel traditionnellement datable (charbons, graines et matière organique) est très rarement préservé et a favorisé le développement de nouvelles méthodes de datations (OSL).

4.2. Les datations absolues : méthode adoptée, limites et stratégie d'échantillonnage

Les dates chronométriques utilisées dans le Sud-Ouest américain sont de trois types. Les premières sont radioactives et correspondent aux datations radiocarbone sur matériel organique, les secondes reposent sur des phénomènes cycliques et sont dites archéomagnétiques et les dernières sont basées sur des défauts cristallins et sont dites luminescentes. Chacune de ces méthodes sera décrite et ses limites présentées de façon synthétique. Elles ont en effet toutes été utilisées dans le cadre de notre étude, mais rarement de façon combinée.

4.2.1. Datations radiocarbone

4.2.1.1. Principe et limites

C'est la méthode de datation radiométrique la plus commune. La technique par spectromètre de masse et accélérateur de particules (AMS) mesure directement le rapport $^{14}\text{C} / \text{C}$ total dans le sédiment, et ne nécessite que quelques mg de carbone. Du fait des variations du carbone dans l'atmosphère au cours du temps, les dates mesurées sont présentées en années radiocarbone BP avec une déviation standard de 1 sigma et doivent être calibrées en années calendaires avec une quasi-certitude à 2 sigmas (95 %) via des courbes de calibration. Cette méthode utilise un algorithme de distribution de probabilités et donne la probabilité qu'un échantillon corresponde à un âge calendaire. Dans ce travail, c'est la courbe IntCal04 (Reimer et al, 2004) qui a été utilisée.

Trois limites liées à l'utilisation des dates radiocarbone doivent être évoquées (Shott, 1992).

1- Une des premières est liée à la validité de la méthode en elle-même. La tranche culturelle qui nous intéresse est relativement récente et les dates radiocarbone ne sont pas adaptées à des dépôts presque contemporains. Par ailleurs, la configuration de la courbe de calibration montre des plateaux radiocarbone notamment entre 1040 et 1180 apr. J.-C. et 1300 et 1420 apr. J.-C., et les dates situées dans ces intervalles, qui nous intéressent tout particulièrement, présentent une plus grande chance d'erreur (McCartney et al., 1994 dans Eiselt et Wells, 2003). Par ailleurs, les dates dont l'intervalle de confiance dépasse 200 ans ne devraient pas être prises en compte car elles dépassent la durée de chaque phase culturelle Hohokam (Waterbolk, 1983 ; Dean, 1991).

2- Il existe également des limites inhérentes au matériel prélevé. La première limite résulte de l'effet vieux bois (Schiffer, 1982).

Une datation effectuée sur la partie centrale de l'arbre, le duramen, donnera des résultats nettement plus anciens que la date réelle de la mort de l'arbre.

Deuxièmement, en contexte désertique, la dégradation des espèces végétales arbustives peut être très lente. Ceci est dû à la faible activité fongique (Scheffer, 1971) mais également à la résistance de certaines espèces à la dégradation. C'est le cas de l'ironwood (*Olneya Tesota*), du mesquite (*Prosopis* spp) et du paloverde (*Cercidium* spp.) qui sont des espèces arbustives natives du désert du Sonora exploitées par les Hohokam depuis la période Pionnière (4-5^{ème} s. apr. J.-C.).

3- Enfin, les charbons peuvent provenir d'horizons plus anciens ou plus récents par le biais de processus de pédobioturbation, d'entretien du canal et de sapements des berges au cours de leur fonctionnement, propices au déstockage sédimentaire (Berger et Jung, 1999b).

4.2.1.2. Echantillonnage

Le remplissage des canaux d'irrigation résulte d'un apport sédimentaire fluvial et les particules charbonneuses peuvent avoir été charriées sur une longue distance. Par conséquent, les particules charbonneuses isolées, qui donneront lieu à des dates erronées et souvent trop anciennes, n'ont pas été prélevées, et seuls les lits de charbons ont été échantillonnés. Ils correspondent le plus souvent à des brûlis in situ afin de détruire la végétation annuelle qui pousse dans les canaux. D'autres lits de charbons moins concentrés (brûlis locaux ou larges incendies dans le bassin versant amont) ont également été échantillonnés. Malheureusement la détermination des échantillons préalablement à la datation n'a pas été effectuée.

La quantité de matière organique carbonisée étant souvent insuffisante, ce sont principalement des microcharbons qui ont été échantillonnés. Sur certains sites, notamment sur les séquences stratigraphiques naturelles, presque 10 kg de sédiments bruts ont été prélevés et tamisés à 1mm, 500 µm et 250 µm, puis triés sous la binoculaire afin de prélever les microcharbons. Cette approche fastidieuse a permis d'obtenir un certain nombre de dates, mais du fait de l'absence complète de matière organique/carbonisée dans plusieurs séquences, leur calage chronologique précis n'a pu être obtenu.

Les moyens financiers impartis étant malheureusement trop faibles, des datations par OSL, décrites ci-dessous, idéales dans ce genre de contexte, n'ont pu être conduites de façon exhaustive.

4.2.1.3. Résultats

En fonction du projet, certaines dates ont été effectuées directement par les entreprises privées. En revanche, lorsque les problématiques n'étaient pas les mêmes ou le budget des projets n'incluait pas de datations, les échantillons prélevés ont été envoyés au Centre de Datation par le Radiocarbone à Lyon par le biais des appels d'offre annuels ARTEMIS du département INSHS du CNRS. Un total de 39 dates radiocarbone a été envoyé à Villeurbanne (Tab. 5) et 4 dates radiocarbone ont été obtenues par les compagnies privées.

Type, localisation et site	Echantillons	Code laboratoire	Age 14C BP	$\pm 1 \sigma$ (95 %)	Age calibré apr.J.-C. à 2 σ	Statut
Salt River						
Carrières de graviers						
SRMG	LOG 5, US 8	Lyon-5388	385	30	1444-1630	Accepté
	LOG 5, US 12	Lyon-5059	155	30	> 1650 (< 1800)	Accepté mais peu précis
	LOG 6, US 5	Lyon-5389	690	30	1272-1384	Accepté
	LOG 6, US 12	Lyon-4940	405	45	1429-1632	Accepté
	LOG 4, US 4	Lyon-5060	/	/	moderne	Rejeté
	LOG 4, US 15	Lyon-5390	570	30	1306-1421	Accepté
	LOG 4, US 18	Lyon-5391	385	30	1142-1619	Accepté
	LOG 4, US 21	Lyon-4941	235	35	>1532	Accepté
Vulcan	LOG 4, US 27	Lyon-5392	285	30	1516-1662	Accepté
	US 8	/	/	/	/	Echantillon perdu
1St Street, Tempe	US 11	Lyon-5393	1335	30	650-764	Accepté mais semble ancien
	US 4	Lyon-6384	355	30	1451-1640	Accepté
Canaux préhistoriques						
RAD	T 206, US 8	Lyon-4515	915	30	1029-1209	Accepté
	T 206, US 13	Lyon-4943	305	30	1488-1651	Accepté
	T 204, US 8	Lyon-4942	1380	35	611-675	Accepté
Cashion	T 890, US 8	Lyon-5054	1135	30	783-984	Accepté
	T 890, US 16	Lyon-5055	835	30	1159-1262	Accepté
	T 890, US 38	Lyon-5056	780	30	1215-1278	Accepté
La Lomita	US 6	Lyon-6382	765	30	1219-1281	Accepté
	US 12	Lyon-6383	675	30	1276-1387	Accepté
Desert Arch.	T 8, US 5	Lyon-6296	905	30	1033-1213	Accepté
	T 8, US 11	Lyon-6297	975	30	1017-1153	Accepté
	F3 nat, US 4	Lyon-6298	935	30	1025-1166	Accepté
	F1 nat, US 39	Lyon-6299	850	30	1056-1257	Accepté
	F3, US 8	Lyon-6300	755	30	1221-1283	Accepté
	F3, US 20-22	Lyon-6301	760	30	1220-1282	Accepté
	F 10, US 1	Lyon-6381	990	30	993-1150	Accepté
Ecoplan	F 17, US 2	Lyon-6302	735	30	1257-1289	Accepté
	F 1, US 1	Beta n°233411	790	40	1220-1270	Accepté
	F 1, US 13	Beta n°233645	730	40	1260-1290	Accepté
Gila River						
Carrières de graviers						
Santan	LOG 2-US 9	Lyon-5396	220	30	> 1644 (< 1800)	Accepté
	LOG 2-US 14	Lyon-5397	3030	35	1395-1133 av. J.C.	Rejeté
Maricopa	LOG 3- US 4	/	/	/	/	Manque de matériel à dater
	LOG 3- US 14	Lyon-5395	250	30	1529-1797	Accepté
Gila Florence	US 6b	Lyon-6303	1700	30	256-413	Accepté mais semble ancien
	US 20	/	/	/	/	Manque de matériel à dater
Canaux préhistoriques						
Santan canals Casa Blanca canals	F 779,US 59.3	Lyon-5058	510	30	1402-1442	Accepté
	F 962, US 59.2	Lyon-5057	900	30	1035-1214	Accepté
	F 6, US 59.8	Lyon-6304	1580	30	414-549	Accepté
	F 8, US 2.1.c	Lyon-6305	2930	30	1059-1024 av. J.C.	Accepté
	F 2.03, US 59.8	Lyon-6306	1620	40	357-539	Accepté

Tab. 5 : Liste des datations radiocarbone obtenues dans le cadre de notre étude

4.2.2. La datation par luminescence stimulée optiquement (OSL)

4.2.2.1. Principe

Le manque de matériel traditionnellement datable en contexte semi-désertique a favorisé le développement de la méthode OSL depuis environ 5 ans (Berger, 2003). Cette approche repose sur les propriétés qu'ont les matériaux d'émettre un rayonnement après stimulation optique (Aitken, 1985) (Fig. 75).

Certains minéraux accumulent et piègent dans leur structure cristalline de l'énergie qui provient du rayonnement cosmique et de la radiation terrestre (α , β , γ). Au cours de processus érosifs et du transport sédimentaire, les sédiments sont exposés à la lumière, et cette luminescence accumulée au cours des temps géologiques s'efface. Une fois les sédiments déposés et enfouis, ils accumulent à nouveau l'énergie des rayonnements cosmiques et atmosphériques. C'est la dose de radiation reçue entre l'enfouissement et l'analyse en laboratoire qui est alors mesurée grâce à l'équation suivante : Age = dose accumulée/dose annuelle. Cette équation sans dimension donne des âges calendaires et ne nécessite pas de calibrations.

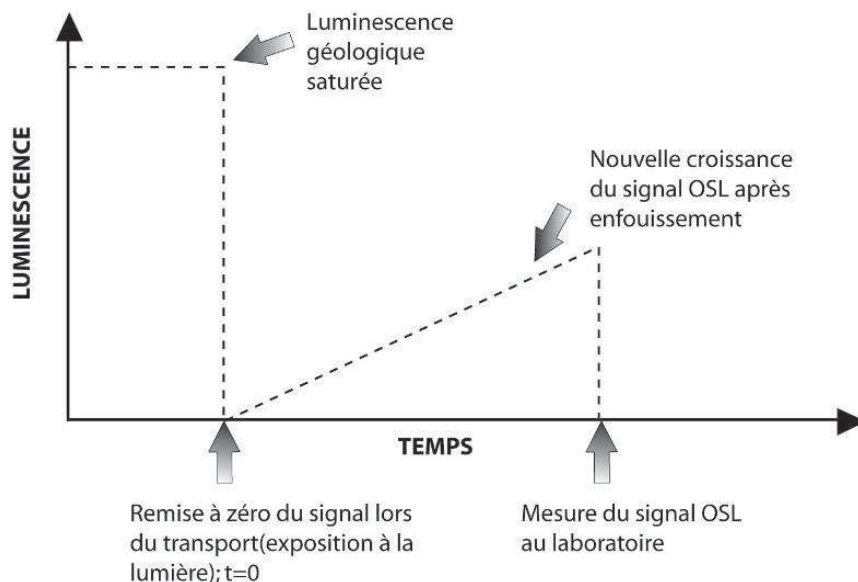


Fig. 75 : Principe de la datation par luminescence stimulée optiquement

4.2.2.2. Echantillonnage

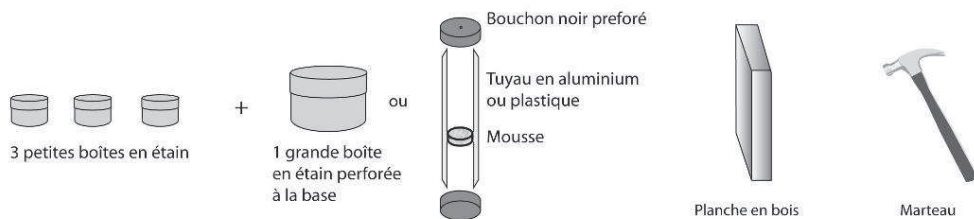
Plusieurs techniques sont envisageables mais toutes doivent éviter une exposition accidentelle à la lumière (blanchiment). En fonction de la texture des sédiments à dater, un certain type de matériel est nécessaire au prélèvement (Fig. 76).

L'échantillonnage peut être effectué de jour ou de nuit. Les dépôts non consolidés, grossiers, ou de structure grumeleuse, qui pourraient être exposés à la lumière, mélangés au cours de l'échantillonnage ou dans le tube de prélèvement, doivent être prélevés de nuit. Dans ce cas là, il est nécessaire d'avoir des filtres (type LEE-England n°158 deep orange) à placer sur la lampe torche, de même que des sacs de prélèvement noirs opaques.

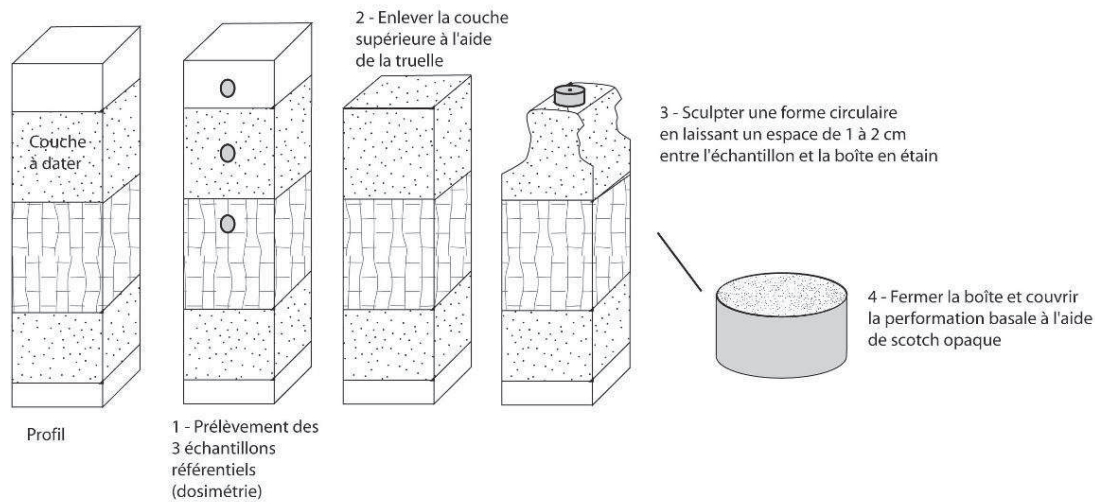
Les sédiments à prélever sont préférentiellement de texture sableuse fine à moyenne et doivent être situés à un minimum de 30 à 40 cm de profondeur. Dans le cas de sédiments meubles, il est préférable d'utiliser un tube en aluminium de 10 à 15 cm de long, affilé de l'extérieur, et des cylindres en mousse à positionner contre le sédiment afin qu'il ne se mélange pas, le tout scellé par des bouchons noirs. Lorsque les sédiments sont compacts, il est possible d'utiliser une boîte en étain d'une capacité de 250 ml, perforée à sa base.

Deux boîtes sont généralement nécessaires, à remplir par des sédiments prélevés dans la même couche, mais à deux localisations différentes. Dans le cas de prélèvements dans un canal d'irrigation, un échantillon de contrôle doit être pris dans les sédiments naturels à côté du canal.

Matériel nécessaire



1er protocole (sols compacts):



2nd protocole (sols meubles):

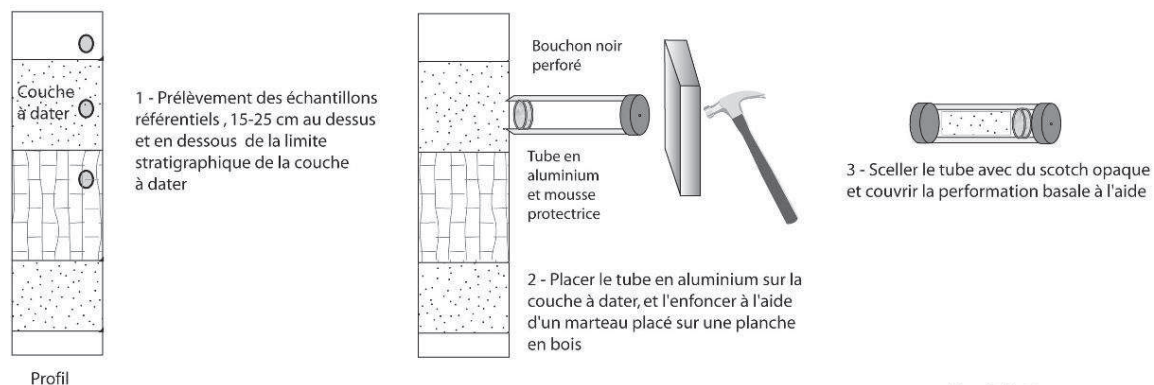


Fig. 76 : Principe de l'échantillonnage des datations à luminescence stimulée optiquement

En complément, il est nécessaire de prélever des échantillons pour mesurer K, U et Th de référence en laboratoire. Un fragment de sol doit être prélevé dans la couche d'intérêt, celle sous-jacente et celle la recouvrant. Pour cela, trois boîtes en étain sont nécessaires, chacune d'une capacité de 30 ml. Dans le cas de la datation d'un canal d'irrigation, des échantillons de référence doivent être pris dans toutes les couches autour des sédiments à dater et ce dans une périphérie de 30 cm.

4.2.2.3. Limites

Cette méthode optique de datation doit être affinée notamment en ce qui concerne la définition des protocoles expérimentaux. Le prélèvement des échantillons référentiels dosimétriques (Th, U, K) en relation avec la microlamination des sédiments peut poser de nombreux problèmes. Par conséquent, il est nécessaire de corréliser les dates OSL avec des datations AMS (ou autres) dans les mêmes prélèvements sédimentaires. Les résultats de ces corrélations ont montré des similitudes générales bien que des différences de un à plusieurs siècles, de même que des inversions de dates (Berger et al., 2003 ; Berger et al., 2008) ont été observées.

Les datations OSL ont été conduites uniquement en collaboration avec les compagnies privées. Malheureusement, du fait des conditions économiques actuelles dans le secteur de l'archéologie à Phoenix, des datations initialement prévues n'ont pas été effectuées (Mesa Southwest Museum, dans le cadre du projet Riverview at Dobson, 30 dates). Plusieurs dates échantillonnées dans le cadre du projet DESERT ARCHAEOLOGY le long de la Salt River, qui vient de s'achever, sont en attente. Les seules datations OSL disponibles à ce jour le long de la Salt River sont au nombre de 2, et ont été obtenues grâce à l'étude de deux canaux préhistoriques en collaboration avec la compagnie ECOPLAN. Dans la Gila River Indian Community, seule une date est à ce jour disponible dans le canal d'irrigation principal du système Santan. Une autre est en attente dans le canal Casa Blanca.

4.3. Les datations relatives : approche typochronologique et chronostratigraphique

L'approche typochronologique est basée sur l'évolution des formes et décors des céramiques Hohokam. Elle repose sur des corpus de références bien établis et diagnostiques d'une période chronologique (Tab. 6) avec une résolution qui approche le demi-siècle. Il est possible de dater des structures hydrauliques par cette approche. Les fossés implantés à proximité des sites d'habitats ont fourni un certain nombre de vestiges céramiques primaires, de par leur fonction de dépotoir, qui datent relativement bien l'utilisation du fossé.

Malheureusement, ce matériel peut également être retrouvé en position secondaire. Il provient alors d'apport latéraux par ruissellement suite à des pluies intenses, auquel cas la date obtenue fournit un terminus post quem. Afin d'obtenir des repères chronologiques plus précis, il est préférable de combiner les datations typochronologiques à des datations absolues.

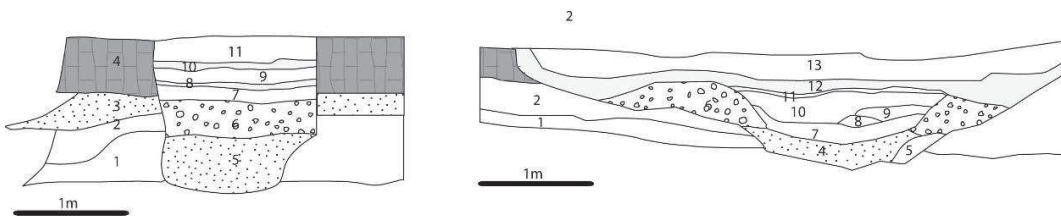
Période	Chronologie (apr. J.-C.)	Phases culturelles	Céramique diagnostique
Formative/ Pionnière	450-500	Vahki	Vahki Plain
	500-550	Estrella	Estrella red-on-gray
	550-650	Sweetwater	Sweetwater red-on-grey
	650-750	Snaketown	Snaketown red-on-gray Snaketown red-on-buff
Coloniale	750-850	Gila Butte	Gila Butte red-on-buff
	850-950	Santa Cruz	Santa Cruz red-on-buff
Sédentaire	950-1150	Sacaton	Sacaton red-on-buff
Classique	1150-1300	Soho	Casa Grande red-on-buff
	1300-1375	Civano	Casa Grande red-on-buff Gila Polychrome

adapté de Abbott, 2008

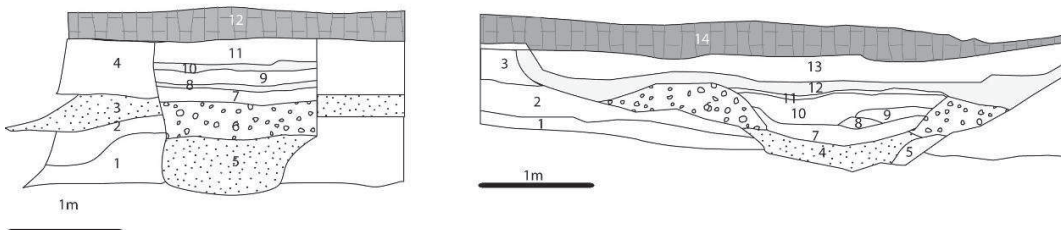
Tab. 6 : Découpage typo-chronologique de la culture Hohokam

Lorsque le contexte stratigraphique le permet, il est possible d'estimer l'âge relatif d'un dépôt grâce aux corrélations stratigraphiques. Ainsi, dans le cas de canaux d'irrigation construits au niveau de ou recouvert par la même couche sédimentaire (dépôts de débordement, paléosols) et possédant un remplissage plus ou moins similaire, il est cohérent d'estimer une période d'utilisation simultanée (Fig. 77). Enfin, la présence de structures archéologiques dont la relation stratigraphique avec l'objet d'étude à dater a été clairement établie, permet une attribution chronologique indirecte.

1er cas: construction au niveau d'un paléosol présentant des caractéristiques pédosédimentaires identiques



2nd cas: recouvrement par un paléosol présentant des caractéristiques pédo-sédimentaires identiques


Fig. 77 : Principe de la datation chronostratigraphique dans les canaux d'irrigation

4.4. Mise en place de diagrammes âge-profondeur

Les méthodes de construction des diagrammes âge-profondeur reposent sur des interpolations et modèles de régressions linéaires, qui semblent les plus adaptés en contexte fluvial (Bennett, 1994), et qui utilisent des dates radiocarbone calibrées (Bartlein et al., 1995).

La relation dans un diagramme âge-profondeur repose sur une équation de type $y = ax+b$, où a représente la vitesse de sédimentation et b le niveau le plus ancien daté.

Les diagrammes âge-profondeur ne sont pas adaptés à l'analyse des structures hydrauliques du fait de la discontinuité de l'enregistrement sédimentaire. Par conséquent, ces diagrammes n'ont pu être mis en place que pour les séquences stratigraphiques naturelles bien dilatées. Seules deux séquences le long de la Salt River (SRMG) répondent à ces critères. Il existe toutefois des limites à cette approche qui sont les limites inhérentes aux datations radiocarbone et les variations de rythmes sédimentaires entre deux datations.

5. Conclusion : premiers questionnements et stratégie d'échantillonnage

La description analytique s'est faite en se basant sur l'unité stratigraphique qui signe une dynamique de déposition et une activité pédologique spécifique in situ. Plusieurs questions initiales doivent être systématiquement posées à chacune des US identifiées pour discuter de leur origine et de leur genèse (Tab. 7).

Premiers questionnements :
Dans un canal:
-perturbations post-dépositionnelles liée à la bioturbation
-remontée de nappe post-dépositionnelle
-origine des sédiments (alluviale, colluviale, éolienne)
-dépôts anthropiques ou naturels ?
-effondrement de berge
-traces d'activité humaine
Sur une séquence stratigraphique naturelle :
-présence d'un paléosol
-origine des sédiments (alluviaux, colluviaux, éoliens)
-position dans la plaine alluviale (dépôts de crue, fond de chenal, levée de berge)

Tab. 7 : Premiers questionnements sur le terrain en fonction de l'objet d'étude

Pour répondre à ces questions, certains marqueurs ont donc été décrits systématiquement au sein de chaque unité stratigraphique (Tab. 8). L'échantillonnage s'est voulu exhaustif afin de poursuivre des analyses de laboratoire présentées dans la partie III. Dans les US représentatives, nous avons prélevé un échantillon brut pour les analyses paléoécologiques et de susceptibilité magnétique et un échantillon micromorphologique pour des lames minces de grande taille.

Afin de construire un cadre chronologique fin, chaque unité stratigraphique présentant du matériel organique datable par la méthode classique du ^{14}C a également été échantillonnée. Les restes organiques sont toutefois rarement préservés ce qui a engendré des problèmes de calage chronologique pour certaines parties du remplissage, voire même pour certaines séries de fossés.

Critères descriptifs de terrain	Observations	Signification
Texture	Sable, limon, argile, graviers fins	Dynamique de dépôt et origine des sédiments
Tri	Homogénéité des dépôts : présence de graviers, galets, agrégats de sols	Processus de déposition
Couleur	Munsell color chart	Teneur en matière organique et charbons, présence de traits d'oxydation ou de réduction, sources sédimentaires
Structure	Massive, polyédrique, prismatique, grumeleuse, laminée	Dynamique de déposition et transformation post-dépositionnelle
Marqueurs anthropiques	Tessons	Activité humaine à proximité, utilisation du canal comme dépotoir, sapement des berges ou des bermes
Marqueurs paléoécologiques	Charbons, coquilles, graines	Paléoenvironnementale, activités locales (brûlis)
Traits biologiques	Racines/radicelles (organique, porosité résiduelle, rhizolithes ferromanganiques, pseudomycelium), traces d'activité de la faune	Bioturbation moderne ou contemporaine de la couche stratigraphique
Limites stratigraphiques	Nette, ondulante, graduée	Rythme de sédimentation, limites érosives, homogénéisation pédologique

Tab. 8 : Critères descriptifs et interprétation des données pédo-sédimentaires de terrain

CHAPITRE 2

Analyse chronostratigraphique et pédo-sédimentaire des structures hydrauliques et des héritages holocènes des bassins de la Salt et de la Gila

1. Le Bassin de la Salt River	172
1.1. Le Canal System 1 (secteur amont, rive sud)	172
1.2. Le Scottsdale System (secteur amont, rive nord)	184
1.3. Le Canal System 2 (zone centrale, rive nord)	191
1.4. Le Canal System 7 (zone avale, rive sud)	205
1.5. Le Canal System 12 (zone avale, rive nord)	214
1.6. Conclusion et premières interprétations diachroniques sur les dynamiques morphogéniques et le fonctionnement des réseaux hydrauliques	220
2. Le Bassin de la Gila River	228
2.1. Casa Blanca System (zone centrale, rive sud)	228
2.2. Santan Canal System (zone centrale, rive nord)	238
2.3. Systèmes Poston/Casa Grande (zone amont, rive nord et sud)	247
2.4. Conclusion et premières interprétations chronostratigraphiques	252

1. Le Bassin de la Salt River

Les résultats présentés dans cette section sont doubles. Une première information sur les remplissages de canaux a été obtenue dans les rapports de fouilles préventives. Cinquante et un canaux ont été sélectionnés, en fonction de leur pertinence chronologique et géoarchéologique. Le catalogue ainsi créé est présenté en Annexe 3. En complément, un certain nombre de canaux a fait l'objet d'une étude micromorphologique et paléoenvironnementale. Un total de 63 canaux a donc été étudié dans les Canal System 12, 7, 2, 1 et le Scottsdale System (Fig. 78). Ces résultats sont complétés par l'étude stratigraphique de formations alluviales qui renseignent sur les rythmes de crues et les évolutions morphologiques de la Salt.

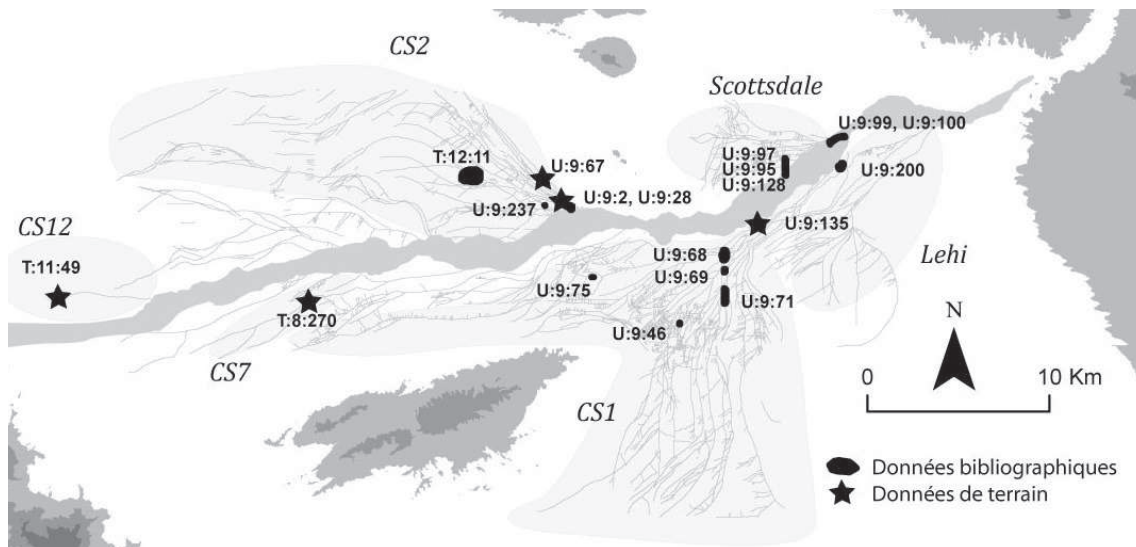


Fig. 78 : Ensemble des canaux d'irrigation étudiés dans la basse vallée de la Salt par système d'irrigation

1.1. Le Canal System 1 (secteur amont, rive sud)

1.1.1. Etude des remplissages de canaux appartenant au Canal System 1

1.1.1.1. Synthèse des travaux antérieurs

- Approche et mise en place des facies environnementaux

Les corrélations pédosédimentaires que nous avons réalisées entre les remplissages de canaux décrits dans les rapports de fouille reposent exclusivement sur la texture et la couleur. La chronologie repose sur des dates archéomagnétiques, radiocarbones et chronostratigraphiques. L'observation détaillée des remplissages, des rythmes de dépositions et des successions d'US nous a permis de construire 5 dynamiques hydrosédimentaires qui ont pour vocation de retranscrire les grandes tendances fluviales observées et non pas tous les facies identifiés dans les remplissages de canaux (Tab. 9).

Type	Description facies	Conséquence et interprétation
1	Argile, limon argileux (laminés)	Faible circulation d'eau à eau stagnante, traces de végétation
2	Argile/sable ou limon en alternance	Sédimentation rythmée et contrastée (saisonnalité?)
3	Limon laminé	Sédimentation rythmée de moyenne compétence
4	Sable à limon sableux laminé	Sédimentation rythmée de forte compétence
5	Limons sableux à sables massifs	Moyenne à forte dynamique hydrique suivie par une phase de réduction de la compétence, puis par l'abandon ou le nettoyage des canaux
6	Sable grossier/graviers/sables interstratifiés	Evènement (local/fluvial) de très forte intensité suivie par l'arrêt de la circulation d'eau- abandon ou nettoyage de canaux

Tab. 9 : Facies sédimentaires identifiés dans les canaux d'irrigation, source bibliographique

• Résultats

Vingt huit canaux appartenant au canal system 1 et replacés dans un cadre chronologique ont été étudiés (Tab. 10). 75 % des canaux étudiés sont situés sur la terrasse Mesa. Nous avons également estimé le nombre d'épisodes de curage visible.

Code (ASM)	Nombre de canaux	Ref.
Az U:9:46	3	Herskovitz, 1981
Az U:9:75	1	Bontrager, 1989
Az U:9:68	13	Ackerly et Henderson, 1989 ; Masse, 1987
Az U:9:69	5	Ackerly et Henderson, 1989
Az U:9:71	3	Ackerly et Henderson, 1989
Az U:9:200	2	Powell et Boston, 2004
Az U:9:201	1	Powell et Boston, 2004

Tab. 10 : Corpus des canaux étudiés le long du CS1, source bibliographique

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux ci-dessous (Tab. 11). Les facies sédimentaires sont présentés dans un ordre chronologique de déposition.

Période	Site (ASM)	Ref.	Période d'utilisation (apr.-J.-C.)	Unité géomorphologique	Distance aux vannes d'entrée (km)	Nombre de curages visibles	Type de facies observé
Pionnière	U:9:201	7	380-540	QT3	6,6	3	4,3,4,5
Coloniale	U:9:68 , L2	5a	700-865	QT2	7,7	0	5,2
	U:9:68 , L1	102	700-935		7,7	10	4,1,6/3,3,6,3
	U:9:69, L3	4	800-950		7,9	0	2/6
	U:9:68 , L2	5b	>=915-940		7,7	3	4,2,6,1,4
	U:9:68 , L2	17	915-940		7,7	0	4,5,6
Sédentaire	U:9:68 , L2	6	940-980	QT2	7,7	0	5,1
	U:9:68 , L2	89	980-1025		7,7	0	2,3,1
	U:9:68, L1	46	905-1025		7,7	3	1,2,1
	U:9:68 , L2	16a	910-1025 à 1150		7,7	3	1,2,1,5
	U:9:71	1	900-1050	?	0	1,5	
	U:9:68 , L2	11	915-1025, > 915-940, < 940-1025	QT2	7,7	0	5,5
	U:9:69, L3	3	910-1025		7,9	1	5
U:9:68 , L2	16b	980 à 1150	7,7		4	5,2,5,2	

	U:9:200	1	690-1000	Qa1	6,6	2	5/6,6
	U:9:68 , L2	4	940-1200	QT2	7,7	3	6,3,6,2,5,1
	U:9:68 , L2	3	940-1150?		7,7	8	(2,2,2),3,(6,6)
	U:9:68 , L2	3b	1000-1200		7,7	8	6,3,1,3
	U:9:68, L2	10	980-1150		7,7	2	2,5,1
Classique Soho	U:9:68, L2	2	1150-1300		QT2	7,7	6
	U:9:69, L3	8	1160-1280	7,9		1	5,1,5
	U:9:69, L3	7	1160-1280	7,9		5	1,4
	U:9:75	1	1200-1325	1,55		1	1 (5)
	U:9:46	22	1150-1300	1,2		1	1
Classique	U:9:71	2	1175-1550	QT2	?	1	1,5
	U:9:46	19	1150-1450		1,2	1	1,1
	U:9:46	12	1150-1450		1,2	1	1,4,1
	U:9:69, L3	1	1160-1450		7,9	0	1/5,1,5
Classique Civano	U:9:201	13	1235-1300	QT1	6,6	4	5,1,5
	U:9:71	3	1300-1550	QT2	?	0	2,1,5

Tab. 11 : Chronologie, faciès sédimentaires identifiés dans les canaux du Canal System 1 et nombre de curages visibles, source bibliographique

- Entre 380 et 540 apr. J.-C. (Période Pionnière)

Un seul canal de la période Pionnière a été étudié. Son remplissage composé de sables laminés (faciès 4) et massifs témoigne soit d'une sédimentation rythmée de forte compétence, soit de canaux potentiellement efficaces, bien entretenus, ce qui semble être le cas du canal étudié.

- Entre 700 et 950 apr. J.-C. (Période Coloniale)

Le remplissage des canaux est principalement composé de sables grossiers hétérogènes et à stratifications entrecroisées (faciès 6), ainsi que de sables laminés (faciès 4). La dynamique sédimentaire est rythmée et de très forte compétence malgré l'emplacement des structures étudiées à presque 7 km des vannes d'entrée du système. Certains canaux subissent une chenalisation, comme le suggèrent les sables à stratifications entrecroisées qui rappellent les séquences de remplissage des chenaux naturels. Cette tendance se poursuit jusqu'à la fin de la période Coloniale. Le taux de siltation élevé favorise l'abandon de certaines structures, colmatées trop rapidement, et l'entretien privilégié d'autres, notamment des canaux principaux.

- Entre 950 et 1150 apr. J.-C. (Période Sédentaire)

Trois dynamiques ont été observées. Leur chronologie a été restituée grâce aux structures U:9:68, Locus 2, F 3 et 4. A la fin de la période Coloniale/début de la période Sédentaire, probablement entre 900 et 1000 apr. J.-C., certains canaux sont colmatés par des sédiments de texture argileuse (faciès dominant 1). Ces argiles sont laminées pour la plupart, excepté pour les faciès de colmatage final des structures.

Ces écoulements plus diffus dans les canaux peuvent être mis en relation avec une réduction de la compétence du cours d'eau. Quelques lamines limoneuses à sableuses indiquent une augmentation temporaire de la dynamique hydrique (facies 2).

La seconde dynamique se met en place entre 915-1025 apr. J.-C. Elle peut être contemporaine ou légèrement postérieure à la première dynamique. Elle est caractérisée par la sédimentation dominante de sables et de limons sableux massifs dans les canaux (facies 5) qui traduisent une augmentation progressive de la dynamique sédimentaire. Des sables à stratifications entrecroisées (facies 6) se superposent. Aucun dépôt de crue n'a été identifié, mais leur absence peut résulter de la position des structures hydrauliques étudiées sur la terrasse Mesa. Des sédiments de texture fine (facies 1) signent l'eutrophisation finale des canaux qui ne sont plus entretenus.

Enfin, des facies légèrement plus grossiers - lamines sablo-argileuses à limoneuses (facies 2 et 3) - se déposent entre 950 et 1150 apr. J.-C. (troisième dynamique). L'ensemble des structures hydrauliques sont abandonnées à la fin de la période Sédimentaire. Les nouveaux canaux construits au cours de la période Classique sont localisés plus au sud.

- Entre 1150 et 1450 apr. J.-C. (Période Classique)

Les canaux utilisés au cours de cette période traduisent une dynamique très différente. Ceux exploités au cours de la période Soho sont colmatés par des limons argileux à argiles granoclassés (facies 1) qui indiquent des phases de faible circulation d'eau. Des dépôts sableux massifs sont interstratifiés avec ces dépôts fins (facies 5). Ils résultent d'une augmentation temporaire mais intense de la compétence. Cette dernière est plus marquée à la fin de la période Classique (phase Civano) (facies 2) au cours de laquelle des sédiments sableux et argileux granoclassés signent un retour à des apports d'eau rythmés, peut-être saisonniers, et donc a une efficacité plus prononcée des canaux.

1.1.1.2. Le projet Riverview at Dobson (Période Coloniale à Classique)

Le projet *Riverview at Dobson* (Az U : 9 : 135 ASM) (Fig. 79) a été conduit en 2005 par le Mesa Southwest Museum, aujourd'hui l'Arizona Museum of Natural History. Ce projet concerne une centaine d'hectares situés à proximité de l'actuelle ville de Mesa, à l'amont de la basse vallée de la Salt. Le secteur est encadré par deux autoroutes au nord et à l'ouest, 8th street au sud, et Dobson Road à l'est. D'un point de vue géomorphologique, les canaux étudiés sont situés sur la plaine alluviale holocène de la Salt (terrasse Lehi-QT3), à moins d'1 km de la rivière (Fig. 79). Les sols fertiles, de type fluviosols, ont été cultivés au cours des périodes historiques, ce qui a probablement conduit à l'érosion des parties supérieures des canaux, du moins par l'activité de labour.

- Contexte archéologique

Le projet Riverview at Dobson et les projets antérieurs (Masse, 1987 ; Ackerly et Henderson, 1989 ; Mitchell et Motsinger, 1998) ont mis au jour plus d'une vingtaine de canaux appartenant au Canal System 1 (presque la totalité des canaux), certains mesurant 13 m de large et 5 m de profondeur, les premiers étant construits autour de 50

apr. J.-C. (Ackerly et Henderson, 1989). Leur concentration dans ce secteur est favorisée par la présence d'une zone topographique basse et étroite entre la plaine alluviale et la terrasse Mesa. Les canaux y ont une orientation ouest-est, puis se dirigent vers le sud et alimentent les zones occupées aujourd'hui par les villes de Mesa, Tempe, ainsi que Chandler et la Gila River Indian Community plus au sud.

Les canaux étudiés sont localisés au niveau des vannes d'entrée du système. Ils enregistrent donc la dynamique fluviale avec une forte précision, avec un biais modéré des pratiques hydrauliques. Des demandes de financement (National Science Foundation) ont été menées par D. Abbott (ASU), Jerry Howard (Arizona Museum of Natural History) et Glen Berger (University of Nevada) afin de systématiser la datation OSL de ces canaux.

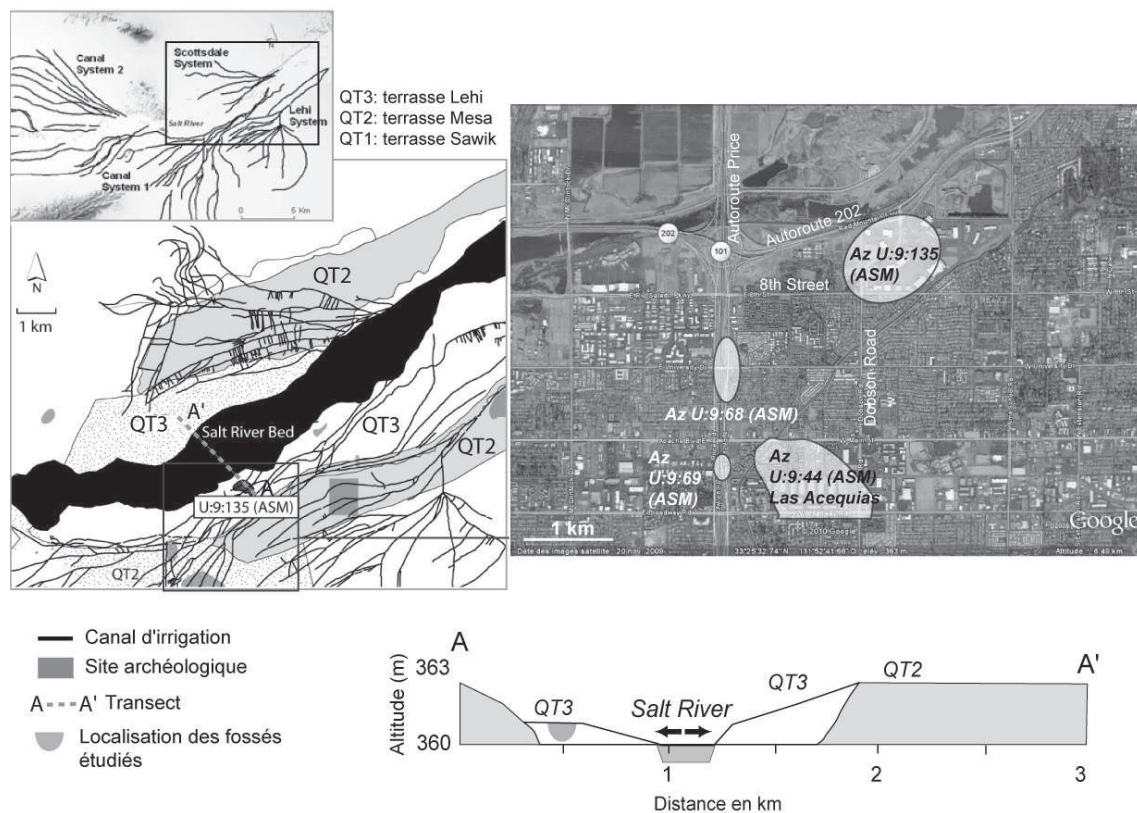


Fig. 79 : Localisation du projet Riverview at Dobson (AZ U : 9 :135 ASM) et sites archéologiques

Quatre sites archéologiques principaux ont été enregistrés dans une périphérie de 1 km de la zone d'étude (Fig. 79).

Sur les sites Az U : 9 :135 (ASM) et Az U :9 :69 (ASM), seules quelques maisons en fosses et des canaux ont été mis en évidence dans l'alignement de l'autoroute 202.

Le site Az U : 9 :68 (ASM) porte le nom de La Cuenca de Sedimento et a été identifié pour la première fois par Turney en 1929. Ce site a été surnommé « le bassin de sédimentation » car de nombreuses dépressions topographiques associées aux canaux ont été observées. Turney a alors suggéré que les Hohokam avaient élargi leurs canaux afin de diminuer la vitesse d'écoulement de l'eau et favoriser la sédimentation des particules en suspension. En réalité, ces zones élargies correspondent à des variations naturelles de la topographie et les Hohokam y ont construit leur canaux (Masse, 1987 ; Ackerly et Henderson, 1989).

Leur gradient y est faible, ce qui a favorisé leur colmatage accéléré. Enfin le village de Las Acequias, Az U :9 :44 (ASM), fouillé pour la première fois en 1887 et 1888, est également proche de la zone.

Les analyses directement liées au projet Riverview at Dobson et conduites par David Abbott ont mis en évidence la quasi-absence de céramiques de la période pré-Classique, ce qui suggère une activité humaine réduite dans ce secteur au cours de cette période. En revanche, les céramiques de la période Classique dominent dans le corpus et indique une activité humaine plus proche du cours d'eau à cette époque (Abbott, communication personnelle).

- *Description, échantillonnage et chronostratigraphie*

Trois tranchées ont été étudiées : T 110, T 206 et T 204. Elles ont mis en évidence une succession de canaux d'irrigation superposés, séparés par des épisodes de crue et d'aggradation de la plaine alluviale. Le canal T 110 ne sera pas présenté ici, suite à la perte de nombreux échantillons micromorphologiques et au manque de chronologie.

Canal T 206 (Fig. 80)

Dans la tranchée T 206, 2 canaux superposés ont été observés. Le canal inférieur, qui mesure 2,60 m de profondeur et 1,40 m de largeur, est construit au sommet d'un horizon limoneux brun à structure prismatique fine, comme d'autres canaux dans le secteur. Des limites stratigraphiques discontinues ont permis d'identifier 6 épisodes de curage. Les premières phases de déposition (US 1a et 1b) ont été effacées par l'un de ces épisodes. Les 5 autres phases de fonctionnement sont caractérisées par la succession de dépôts sableux à limoneux (US 2 à 8), puis par un ralentissement des flux, et l'observation de sédiments argileux en alternance avec des dépôts de texture limono-sableuse à sableuse (US 9 à 23). La partie supérieure du canal est érodée par des sédiments naturels qui traduisent un fort élargissement de la plaine alluviale de la Salt associée au passage à un tressage sablo-limoneux. Ces chenaux naturels sont couverts par d'épais sédiments de crue au sommet desquels le second canal a été creusé. Ce dernier, qui mesure 75 cm de profondeur et 75 cm de largeur, semble rapidement colmaté par des dépôts de texture très fine alternant avec des passées nettement plus grossières.

13 échantillons micromorphologiques ont été échantillonnés (9 dans le canal et 4 dans les dépôts de crue), mais 1 d'entre eux (US VII) a été égaré au cours du transport. 5 échantillons charbonneux ont été prélevés dans cette tranchée mais seuls les deux échantillons prélevés à la base et au sommet du second canal, contenant suffisamment de matériel datable, ont permis d'estimer le fonctionnement de ce dernier entre 1029-1209 apr. J.-C. et son abandon entre 1488-1651 apr. J.-C.

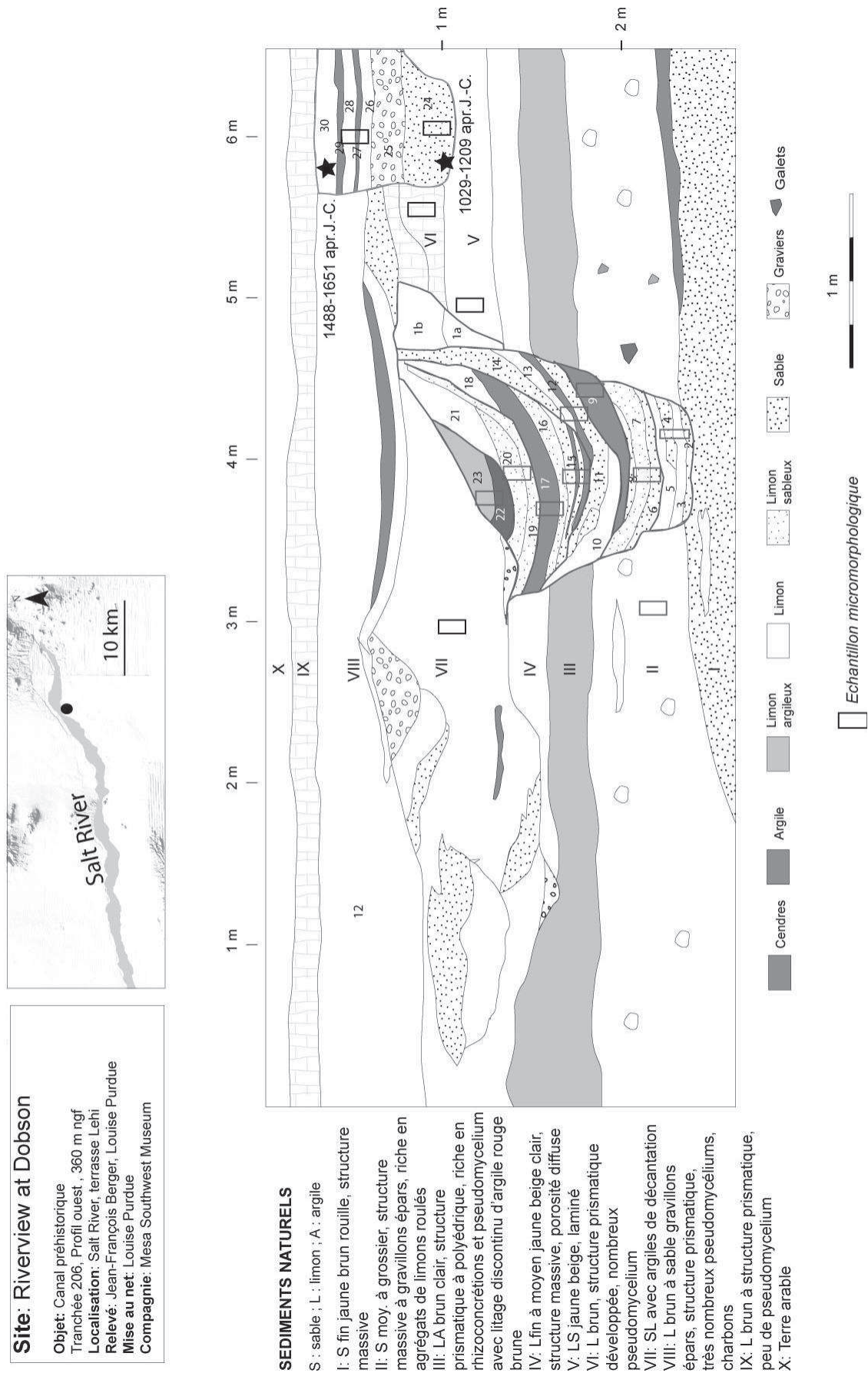


Fig. 80 : Profil et description du canal T 206, projet Riverview at Dobson

Canal 204

Dans cette tranchée, 3 canaux superposés ont été mis au jour (Fig. 81).

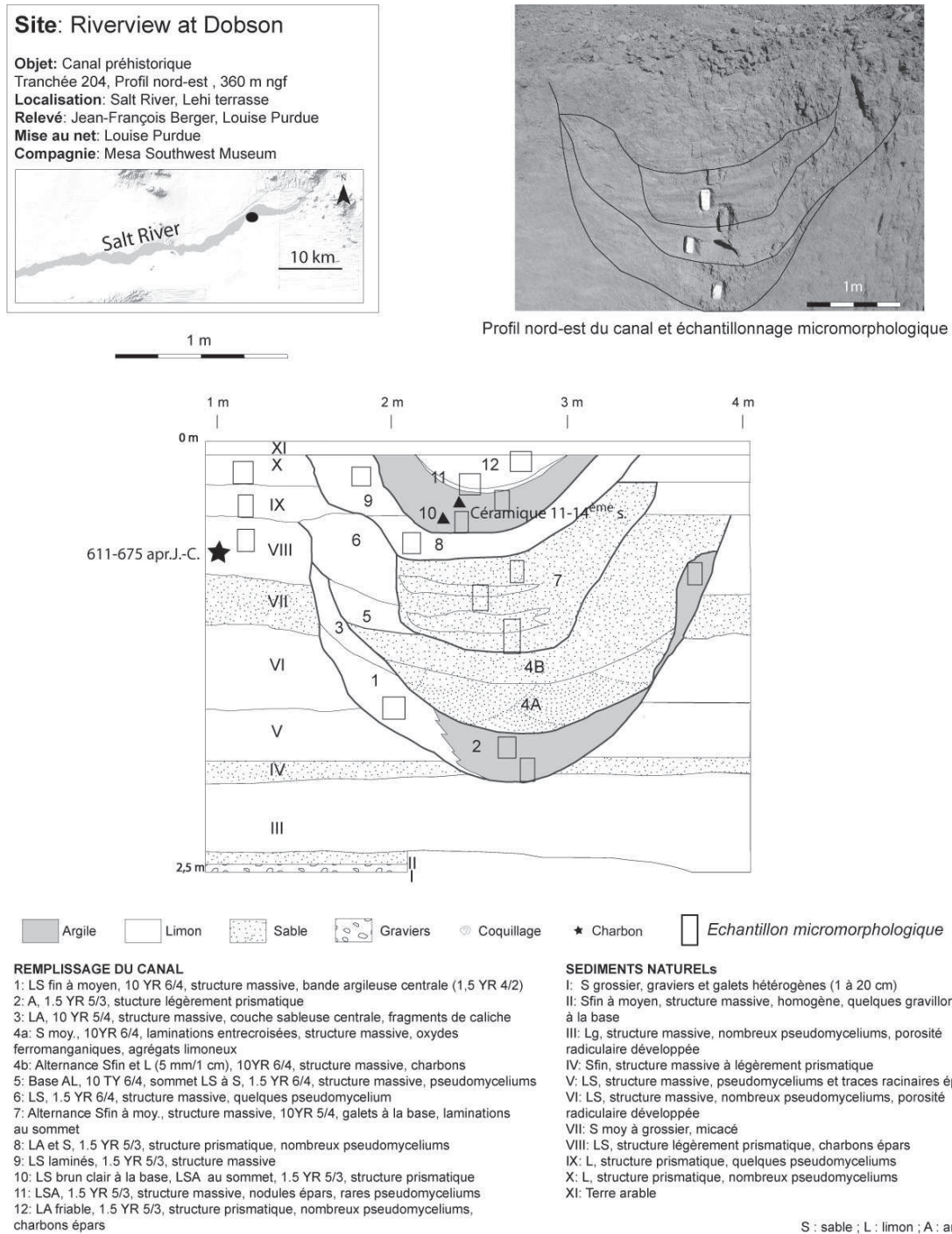


Fig. 81 : Profil et description du canal T 204, projet Riverview at Dobson

Le premier canal (1,75 m de profondeur, 2m de largeur) est construit au sommet d'une couche de limons sableux charbonneux (US VIII-IXa). Les premières phases de fonctionnement (US 1 à 3) sont de texture fine argileuse à limono-argileuse, ce qui suggère des écoulements diffus.

Après un premier curage, le canal est rapidement colmaté par des dépôts sableux dont certains présentent des stratifications entrecroisées (US 4a à 6).

Ce premier canal est enterré sous des limons bruns de crues (US IXa) dont la forte bioturbation traduit une diminution de la vitesse de sédimentation et donc probablement des rythmes de crue. Un second canal (1,25 m de profondeur et 1,50 m de largeur) est creusé dans le même alignement au sommet de l'US IX b, mais est rapidement colmaté par des sables à stratifications entrecroisées (US 7), et enterré sous de nouveaux limons de crue (US X). Enfin un nouveau canal de taille nettement inférieure (2m de largeur, 85 cm de profondeur) et de forme évasée est rempli par des sédiments limono-argileux et sableux laminés (US 8 et 9), puis par des limons sablo-argileux jusqu'à son colmatage (US 10 à 12).

19 échantillons micromorphologiques ont été prélevés, dont 3 dans les dépôts de crues jouxtant le canal. Un échantillon radiocarbone prélevé dans l'US VIII a révélé une construction du premier canal postérieure à 611-675 apr. J.-C. (Lyon 4942), soit la période Pionnière-Sweetwater. Les tessons prélevés dans le canal supérieur (US 10), datés de 1000 à 1300 apr. J.-C., indiquent un fonctionnement à la fin de la période Sédentaire/ période Classique. Ces deux dates suggèrent une dérivation de l'eau continue de la période Pionnière à Classique.

1.1.2. Evolution de la plaine alluviale et rythmes de crues de la période préhistorique à moderne

1.1.2.1. Le projet Riverview at Dobson

- Description des formations alluviales

Le fonctionnement des canaux du Canal System 1 au niveau de leur embouchure a été fortement perturbé par l'évolution morphologique du cours d'eau et les crues qui les ont colmatés. Ces dernières, en élevant le niveau de la plaine alluviale, ont complexifié les stratégies d'apport et de distribution de l'eau.

L'approche de terrain a permis de restituer la chronologie d'évolution de la plaine dans ce secteur. Malheureusement les données d'élévation n'ont pas été accessibles. Les corrélations proposées sont présentées Fig. 82.

Quatre périodes de crues ont été mises en évidence entre 600-1100 apr. J.-C., avec une phase d'évolution morphologique vers un système en tresse entre 1050-1150 apr. J.-C (fin de la période Sédentaire) et enfin une dernière période de crue visible après 1488-1651 apr. J.-C (entre la période Protohistorique et la période Historique). Il est possible que l'activité agricole moderne et le nivelage des terres associé aient érodé d'autres archives sédimentaires d'épisodes de crues.

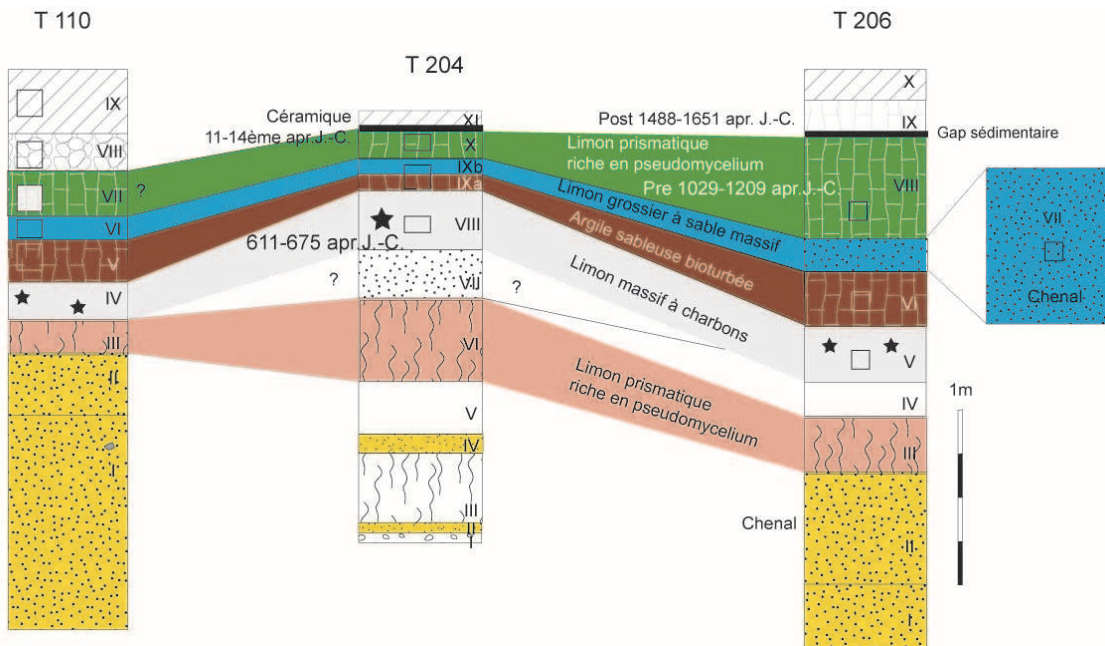


Fig. 82 : Corrélations chronostratigraphiques entre les sédiments de plaine d'inondation des tranchées T 110, 204 et 206, projets RAD

- Proposition de corrélations pédosédimentaires entre les canaux étudiés

Des corrélations chronostratigraphiques ont permis de caler le fonctionnement des canaux d'irrigation étudiés (Fig. 83). Un seul est en fonctionnement après 675 apr. J.-C. (période Pionnière/Coloniale), tous sont utilisés entre 700 et 1400 apr. J.-C. (période Coloniale à Classique). Dans la T 204, le premier canal est construit au sommet de l'US VIII. Après son colmatage, ce canal est enterré sous l'US IX a et b, au sommet de laquelle un nouveau canal est creusé.

Une nouvelle structure, visible dans la T 206, est creusée au sommet de l'US VI (ie IX a dans T 204). Par conséquent, son fonctionnement est antérieur au second canal dans T 204. Enfin, deux structures sont construites au sommet de l'US X (T 204) et VIII (T 206). Elles sont considérées comme contemporaines.

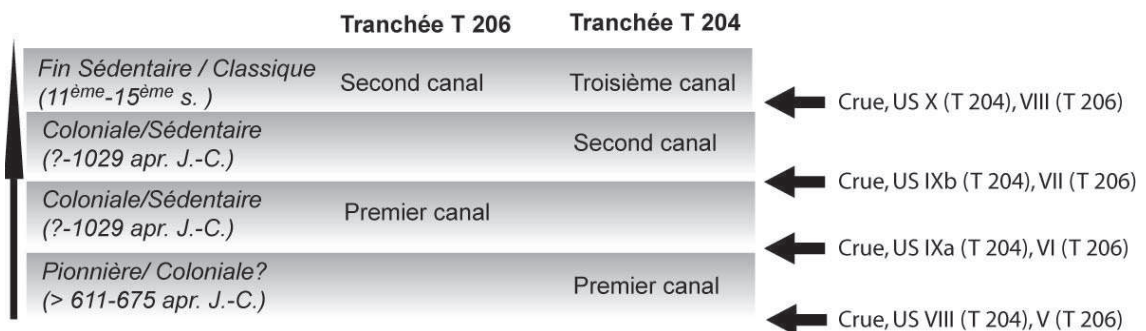


Fig. 83 : Corrélations chronostratigraphiques des canaux d'irrigation, projet RAD

1.1.2.2. SRMG LOG 5

• Géographie et chronologie

Sur les terres de l'entreprise Salt River Material Group, dans la partie amont de la basse vallée de la Salt, une séquence de dépôts de débordement a été étudiée (Fig. 84). Elle n'est pas située sur la terrasse Lehi, mais sur une terrasse non identifiée que nous appellerons T'1.

14 unités stratigraphiques ont été identifiées sur 1,5 m de hauteur. Deux échantillons charbonneux ont été prélevés. Le premier (US 9) a donné une date entre 1444 et 1630 apr. J.-C. avec une probabilité maximale autour de 1470 apr. J.-C. soit au cours de la période Protohistorique. 50 cm plus haut, une date réalisée dans l'US 12 indique une sédimentation postérieure à 1650 apr. J.-C. avec une probabilité maximale autour de entre 1650 et 1800 apr. J.-C., soit au cours de la période historique.

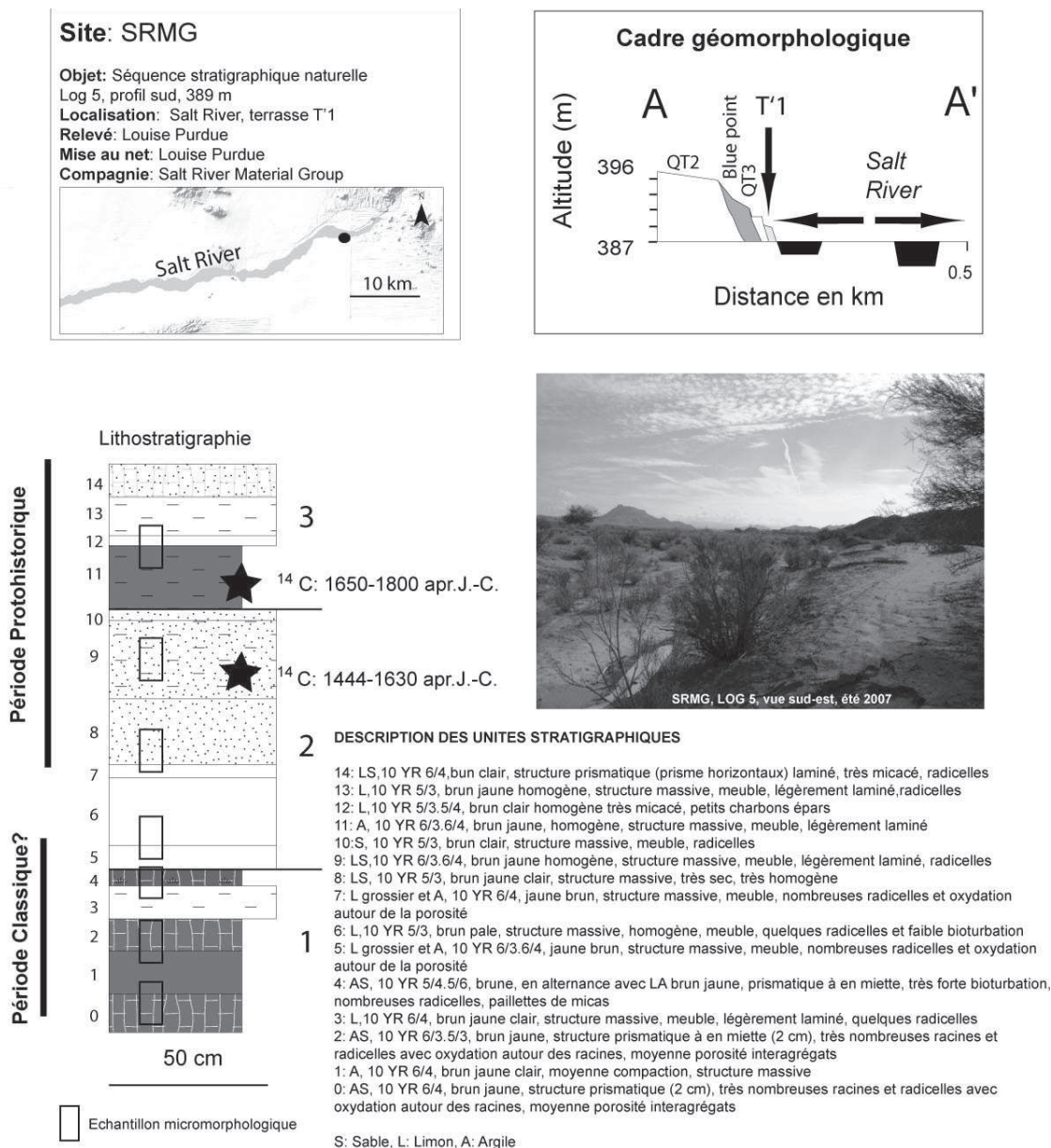


Fig. 84 : Log stratigraphique n°5, SRMG, Salt River

Trois grandes phases sont identifiées.

1) La première phase correspond à la sédimentation de dépôts fins à structure prismatique à bioturbée. Des argiles sableuses bioturbées ont été observées (US 1, 2, 4). Elles contiennent de nombreuses racines et radicules qui témoignent d'un développement de la végétation. Leur structure atteste de cycles humectation-dessiccation répétés. Des argiles (US 1) et des limons massifs (US 3), de couleur brun jaune, partiellement laminés, s'interstratifient à ces dépôts. Ils indiquent une sédimentation rythmée et une mise en surface de durée réduite.

2) Cette dynamique évolue au cours de la seconde phase (US 5 à 10), avec la sédimentation de sables brun jaune clair laminés à structure massive. Ils traduisent une reprise de l'aggradation dans la plaine au cours de la période Protohistorique (15^{ème}-17^{ème} s.).

3) Une légère réduction des dynamiques hydrosédimentaires est observée dans les US 11 à 14. Des limons sableux à sables limoneux laminés, brun clair et à structure massive se déposent. Quelques radicules ont été observées.

Sept échantillons micromorphologiques ont été prélevés de même que des sédiments en vrac dans l'ensemble des US pour l'analyse magnétique.

1.1.3. Conclusion partielle

Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs dynamiques hydrosédimentaires et morphogéniques et permettent d'établir un premier phasage chronostratigraphique dans ce secteur :

1) Les canaux d'irrigation en utilisation entre le 4^{ème} et le 5^{ème} siècle sont colmatés par des sables grossiers. Une période de crue est identifiée plus tardivement dans le secteur du Canal System 1 entre 600 et 675 apr. J.-C. (Période Pionnière).

2) Entre 750 et 950 apr. J.-C. (Période Coloniale) de nombreux canaux sont construits dans la plaine alluviale où des feux sont attestés. Ces structures sont colmatées par des sables à sables grossiers présentant des lamines et des stratifications entrecroisées.

3) Une stabilisation des plaines est observée jusqu'à 1000 apr. J.-C. (Période Coloniale et Sédentaire). De nombreux canaux sont construits et colmatés par des sédiments fins laminés pour la plupart qui traduisent des écoulements réduits.

4) A partir de 1000 apr. J.-C. et jusqu'à 1150 apr. J.-C. (fin de la période Sédentaire), les canaux sont colmatés par des sables et limons massifs laminés et à stratifications entrecroisées. Cette dynamique sédimentaire de forte compétence est probablement associée à un plancher alluvial élevé et une évolution morphologique du cours d'eau. De nombreux canaux sont abandonnés et enterrés sous des dépôts de crue. De nouvelles structures sont creusées dans la plaine, mais colmatées et abandonnées à leur tour.

5) Cette dynamique évolue à partir de 1150 apr. J.-C. et jusqu'à 1450 apr. J.-C. (période Classique). Les canaux sont colmatés par des limons argileux granoclassés. Ils traduisent une sédimentation rythmée, mais de compétence variable. Ces dépôts sont interstratifiés de sables massifs qui traduisent une intensification temporaire des dynamiques hydrosédimentaires.

6) La fin de la période Classique est marquée par une déprise agraire. Une stabilisation des plaines est observée dans le secteur du Canal System 1, sur la terrasse

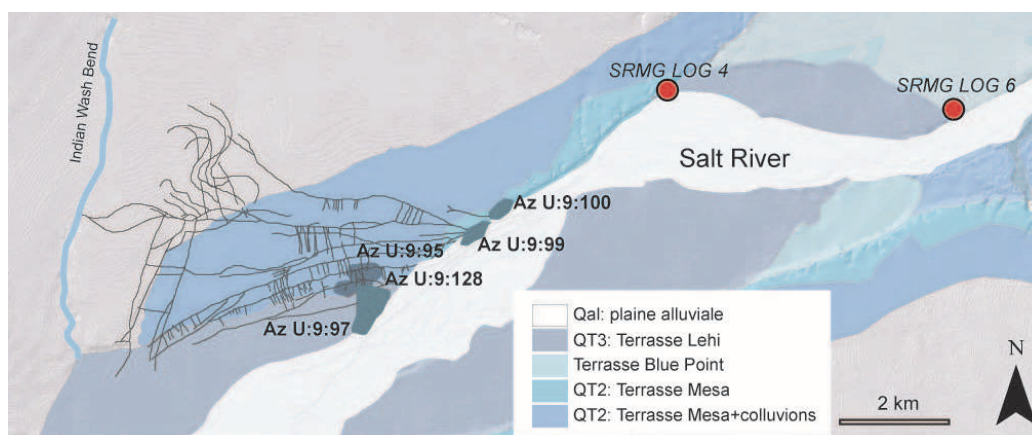
T'1, probablement autour du 15^{ème}-16^{ème} s. apr. J.-C. Cette dynamique est de courte durée et une intensification des dynamiques hydrosédimentaire est observée entre le 15^{ème} et le 17^{ème} siècle, avec le dépôt de sables et de limons laminés dans la plaine. Cette dynamique se poursuit jusqu'à la période historique au moment de laquelle une nouvelle incision est observée.

1.2. Le Scottsdale System (secteur amont, rive nord)

Le Scottsdale System est composé de deux sous systèmes. Le premier, construit sur la terrasse Lehi est limité spatialement par la terrasse Mesa au Nord et le cours d'eau intermittent Indian Wash Bend à l'est, qui aurait pu récolter le surplus d'eau. Seul 600 ha pouvaient être cultivés. Le second, dit le haut système, est situé sur la terrasse Mesa et permettait d'irriguer environ 2700 ha. Les vannes d'entrée devaient être situées sur la terrasse Lehi plus en amont (Huckleberry, 1995). Aucun travail de terrain n'a été effectué le long du Scottsdale System pour des raisons administratives. Les structures hydrauliques que nous avons analysées d'un point de vue géoarchéologique proviennent de deux rapports de fouilles, et de l'analyse de deux séquences stratigraphiques dans une carrière de graviers (SRMG) (Fig. 85).

1.2.1. *Etude des remplissages de canaux appartenant au Scottsdale System*

Comme la synthèse effectuée le long du CS1, nous avons analysé le remplissage sédimentaire de 14 structures hydrauliques du système Scottsdale (Fig. 85). La description des faciès sédimentaires est similaire à celle présentée dans la section 1.3.1.1 (Tab. 9). Les résultats sont présentés dans le Tab. 12.



Code (ASM)	Nombre de canaux	Ref.
Az U:9:99	5	Hackbarth et al., 1995 ; Huckleberry, 1995
Az U:9:100	1	Hackbarth et al., 1995 ; Huckleberry, 1995
Az U:9:97	5	Doyel et al., 1995
AZ U:9 :95	1	Doyel et al., 1995
Az U:9:92	1	Doyel et al., 1995
Az U:9:128	1	Doyel et al., 1995

Fig. 85 : Localisation des canaux d'irrigation étudiés le long du système Scottsdale, et des carrières de graviers

Période	Site (ASM)	Référence du canal	Période d'utilisation (apr. J.-C.)	Unité géomorphologique	Nombre de nettoyages visibles	Type de facies observé	Distance aux vannes d'entrée (Km)
Coloniale	U:9:99	22	700-990	QT3	3	5,3,3,5	2
Coloniale/ Sédentaire	U:9:128	53-56 / DD	650-1000	QT2	0	2	6
	U:9:97	13 / R	650-1000	QT3	2	4,5	4
	U:9:92	5 / D	650-1000	QT3	2	3,4,1	4
	U:9:95	52 / G	650-1000	QT2	0	1,3,5	6
	U:9:97	27-28 / Y/Z	650-1000	QT3	5	5/6,6/1,2,4	4
Sédentaire/ Classique	U:9:99	21	1025-1210	QT3	1	1	2
	U:9:99	24	1010-1260	QT3	2	1,5,1,3,2	2
Classique Soho	U:9:99	20	1200-1325	QT2	0	1,5	2
	U:9:99	23	1250-1325	QT2	0	1	3
Classique	U:9:97	14 / S	1150-1450	QT3	1	4,5,1	4
	U:9:97	10 / W	1150-1450	QT3	8	6,5,1,5,1	4
Classique Civano	U:9:97	11 / X	1300-1450	QT3	1	5,4	4
	U:9:100	1 / A	1300-1550	QT2	4	1,2,1	3

Tab. 12 : Chronologie, facies sédimentaires identifiés dans les canaux du Scottdale System et nombre de curages visibles, source bibliographique

- Entre 700 et 900 apr. J.-C. (Période Coloniale)

Il est difficile d'extrapoler des tendances générales à partir d'un seul canal étudié, bien que ce dernier soit un canal principal. Son remplissage est caractérisé par des dépôts sableux (facies 5) qui érodent les berges du canal puis par des limons homogènes (facies 3) qui signent une dynamique hydrique de moyenne énergie mais des taux de siltation très importants.

- Entre 650 et 1000 apr. J.-C. (Période Coloniale/Sédentaire)

Le remplissage des canaux est très hétérogène pour cette période. Cette variabilité est liée à l'imprécision de la chronologie mais également à la nature des canaux étudiés (canaux de distribution ou latéraux). Aucun facies ne domine mais le facies 5 est le plus représenté. Les sables massifs qui le caractérisent indiquent une sédimentation brutale de forte compétence. Dans la plaine alluviale, des sables grossiers à laminés (facies 6 et 4) ont été observés.

La sédimentation est irrégulière, avec des épisodes de déposition rythmée (montée/chute du niveau de l'eau bien exprimée), et d'autres plus brutaux. Le système est abandonné à la fin de la période Coloniale, notamment dans les basses terres, et ce jusqu'à la fin de la période Sédentaire.

- Entre 1000 et 1250 apr. J.-C. (Période Sédentaire/Classique)

Les deux canaux étudiés situés dans la plaine alluviale ont un remplissage composé d'argile (facies 1) et de sable laminés ou massifs (facies 2/5). Cette dynamique rappelle celle enregistrée entre 1200 et 1450 apr. J.-C. (ci-dessous), et il est possible que les dynamiques soient contemporaines.

- Entre 1200 et 1450 apr. J.-C (Période Classique)

Les canaux utilisés au cours de la période Classique sont caractérisés par le facies 1, composé d'argile à argile limoneuse, massive à finement laminée, observée quelque soit la position géomorphologique des canaux étudiés. Ces argiles sont interstratifiées avec des sables massifs (facies 4) à laminés (facies 5), voire des sables grossiers dans la plaine (facies 6) dont l'origine (locale ou fluviale), n'est pas connue. Cette alternance entre sédiments granoclassés fins et dépôts plus grossiers indique des conditions hydrosédimentaires contrastées. Au cours de la période Civano (1300-1450 apr. J.-C), des sédiments granoclassés sablo/argileux font leur apparition, comme cela a été observé le long du CS1. Ils traduisent une sédimentation rythmée avec une montée et une chute du niveau de la Salt bien marquées, ou résultent d'un contrôle de l'arrivée d'eau par les Hohokam par le biais des vannées d'entrée.

1.2.2. Evolution de la plaine alluviale et rythmes de crues de la période PréClassique à la période Protohistorique

L'étude de deux séquences stratigraphiques situées sur les terres de l'entreprise SRMG ont permis de restituer les rythmes de crues de la Salt River dans ce secteur, légèrement en amont du tracé du Scottsdale Système.

1.2.2.1. SRMG LOG 6

La séquence SRMG LOG 6 se situe 4,5 km à l'est de SRMG LOG 4 (Fig. 86). Elle mesure 2.40 m de hauteur et a été mise en évidence grâce à une incision régressive qui se poursuit depuis la période historique. La séquence étudiée se situe en bordure de terrasse Lehi, mais sur une zone de plus faible altitude (appelée T'1).

La texture grossière des dépôts, les lamines ondulées et les chenaux suggèrent une localisation dans le lit mineur de la Salt. Ils témoignent d'une phase d'aggradation dans la plaine, qui pourrait débiter au cours de la période Classique. Aucun échantillon micromorphologique n'a été prélevé, mais deux échantillons de charbons ont été datés.

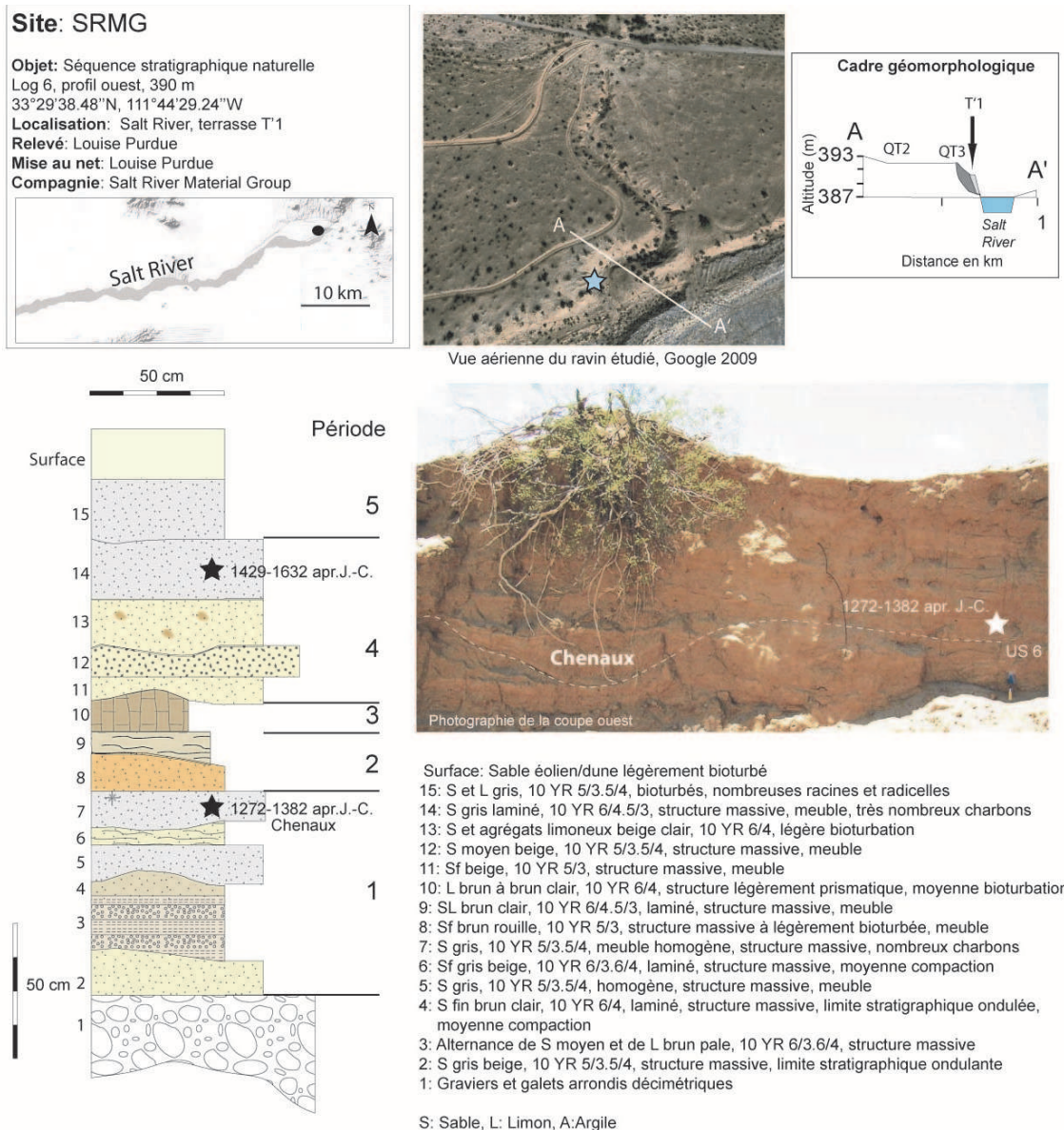


Fig. 86 : Lithostratigraphie et description de la séquence SRMG LOG 6, Salt River

- 1) La première période de déposition est composée de sables laminés brun gris clair (US 1-7) qui se superposent à des galets pluri-décimétriques du lit de la Salt. La limite stratigraphique ondulante suggère une dynamique érosive prononcée et une sédimentation rythmée. Au sommet de l'US 6, un chenal a été mis en évidence, indiquant une possible évolution morphologique du cours d'eau juste avant 1272-1384 apr. J.C. Le chenal identifié mesure 2.5 m de largeur et environ 1 m de profondeur. Il est colmaté par des sédiments limoneux à sableux beige. Nous posons l'hypothèse d'une évolution vers un système à chenaux multiples. La couche sus-jacente (US 7) est de texture similaire mais les nombreux charbons témoignent d'incendies autour de 1272-1384 apr. J.-C. avec une probabilité maximale vers 1285 apr. J.-C.
- 2) Des sables laminés et massifs de couleur beige à brune (US 8-9) se superposent à ces dépôts.
- 3) Des limons à structure légèrement prismatique (US 10) indiquent une phase de stabilité temporaire de la plaine.

4) La quatrième phase (US 11-14) est composée de sables beiges à gris riches en charbons et agrégats de sols, qui traduisent une phase d'érosion des sols favorisée par un couvert végétal réduit. Cette phase de sédimentation est centrée autour de 1429-1632 apr. J.-C. avec une plus forte probabilité autour de 1453 apr. J.-C. soit la fin de la période Classique.

5) L'US sus-jacente (US 15) est composée de sables et de limons bioturbés. Le développement de l'activité biologique traduit un ralentissement de l'aggradation de la plaine, probablement au cours de la période historique. Cette mise en surface peut être associée à l'incision du cours d'eau à la fin du 19^{ème} s. La surface de la séquence correspond à des sédiments éoliens bioturbés.

1.2.2.2. SRMG LOG 4

La séquence SRMG LOG 4 mesure 4.40 m de hauteur et est située dans le lit majeur de la Salt (Fig. 87). Elle contient des sédiments de la période Classique à Historique (Terrasse Lehi et T'1). 28 unités stratigraphiques ont été distinguées, 16 échantillons micromorphologiques ont été prélevés, de même que 5 échantillons de charbons pour les dates radiocarbone. Cinq phases ont été distinguées.

1) La première phase est composée de limon et d'argile sableuse brun clair (US 1 à 4). La structure des dépôts est prismatique et des traces d'activité biologique ainsi que des radicelles ont été observées. Par conséquent cette phase indique une aggradation de la plaine ralentie, avec des épisodes de mise en surface répétés au cours desquels les processus pédologiques se développent partiellement (circulation latérale et verticale de l'eau). Cette première phase n'est pas datée.

2) La seconde phase correspond au développement d'un paléosol cumulique brun prismatique (US 5-7). Les dépôts sont bioturbés mais sont surtout riches en charbons et en cendres qui témoignent d'un feu in situ. La date de cet événement n'est pas connue.

3) A ce paléosol se superposent des limons, limons sableux et limons graveleux brun jaune, laminés et à structure massive (US 8 à 17) qui se déposent jusqu'à 1421 apr. J.-C. (période Classique Soho). L'aggradation de la plaine est rapide et rythmée comme le suggèrent les lamines centimétriques à décimétriques observées. Les limons graveleux traduisent des épisodes de compétence plus forte et correspondent peut-être à des dépôts de fond de chenal.

4) Un second épisode de stabilisation temporaire de la plaine est observé (US 18), entre 1442 et 1618 apr. J.-C. (fin de la période Classique, début de la période Protohistorique). Cette US est composée de l'alternance d'argile et de limon sableux de couleur brun jaune, riches en charbons. Quelques lamines semblent préservées, mais l'ensemble de la couche présente une structure prismatique très fine et des radicelles. La mise en surface peut être postérieure à la sédimentation de la dernière lamine.

5) Enfin, une reprise de l'aggradation est observée dès le 16^{ème} s (US 19-28). Elle est caractérisée par le dépôt de limon sableux et de sable brun jaune, à structure massive et à forte capacité érosive, comme le suggèrent les agrégats de sols et les galets épars. Ces dépôts sont riches en charbons. Les nodules de carbonates secondaires et les pseudomycéliums résultent probablement de processus pédologiques actuels.

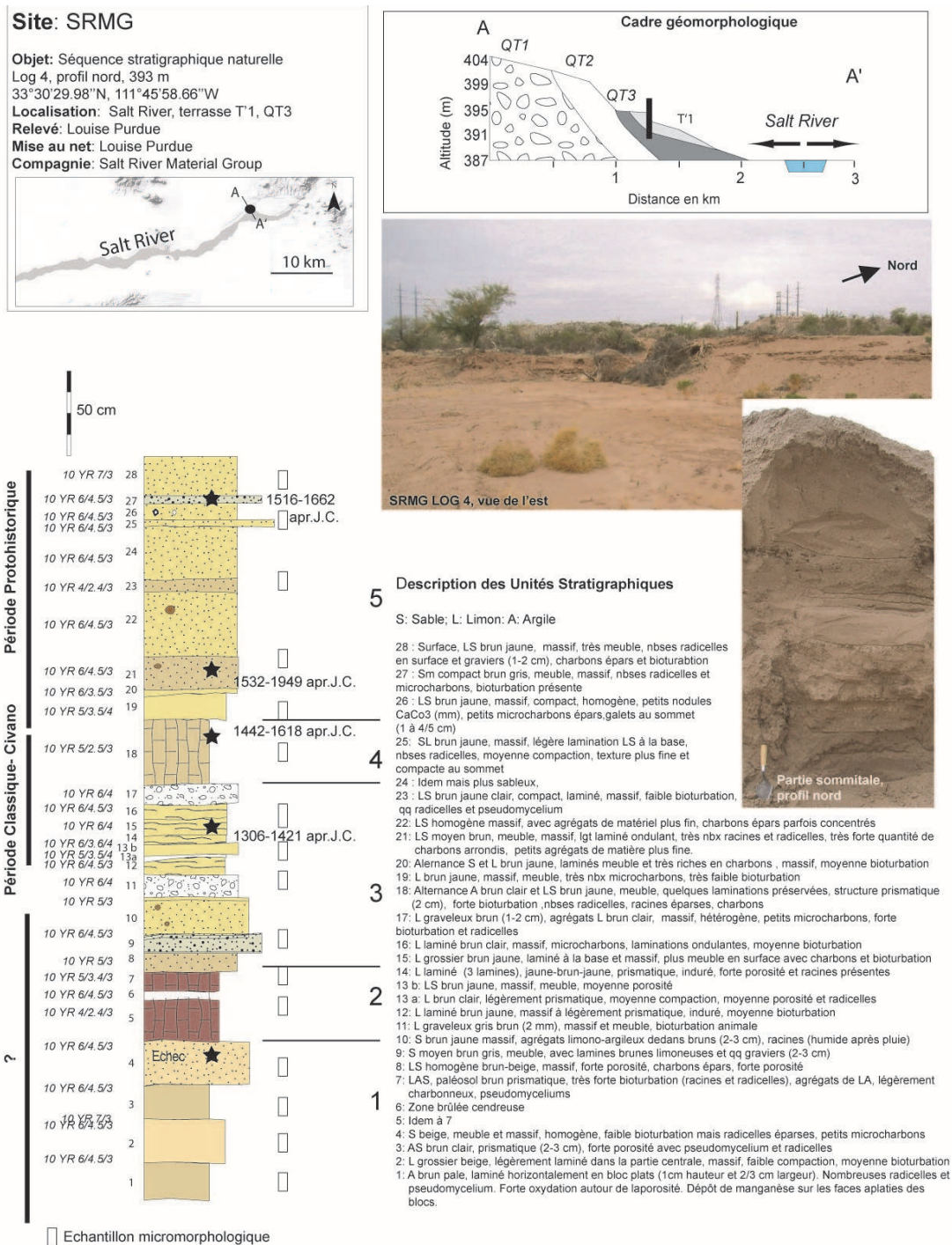


Fig. 87 : Lithostratigraphie et description de la séquence SRMG LOG 4, Salt River

1.2.3. Conclusion partielle

L'analyse des remplissages de 15 structures hydrauliques et de deux séquences stratigraphiques permet de proposer une première synthèse chronostratigraphique dans le secteur de Scottsdale, de la période Coloniale à Classique (Fig. 88). Les remplissages de canaux entre **750 et 950 apr. J.-C** (période Coloniale) sont caractérisés par la sédimentation de sables à forte capacité érosive et de limons, puis de sables massifs, grossiers à laminés.

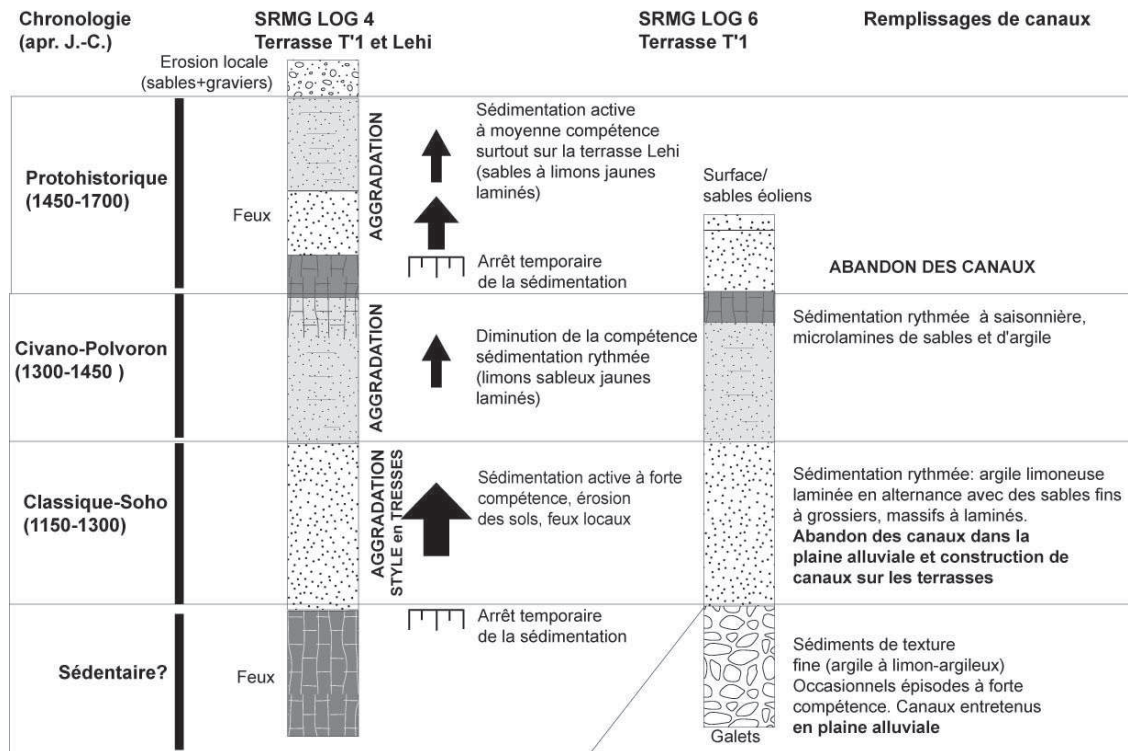


Fig. 88 : Synthèse chronostratigraphique partielle le long du système Scottsdale

Une grande partie des canaux sont abandonnés à la fin de cette période, et seules quelques structures hydrauliques fonctionnent au cours de la période Sédentaire.

Dans la plaine alluviale (terrasse Lehi), un épisode de stagnation d'eau (argiles partiellement laminées) a été observé. La date de mise en place de ces dépôts n'est pas connue, mais l'hypothèse d'une déposition **entre le 9^{ème} et le 11^{ème} s.** est envisagée. Ceci serait en accord avec le remplissage argileux des quelques canaux en fonctionnement au cours de cette même période, qui traduit des écoulements diffus et de faible énergie. La plaine alluviale se stabilise, les processus pédologiques se développent et des épisodes d'incendies sont observés. Nous posons l'hypothèse que cette stabilisation des plaines correspond à un épisode d'incision qui conduit à la formation de la terrasse Lehi.

Entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (période Classique Soho), une phase d'aggradation, de forte compétence et très érosive est observée. Des sables fins à grossiers, massifs à laminés, se déposent dans la plaine alluviale (future terrasse T'1), sur des galets du lit de la Salt. Les nouveaux canaux construits à la fin de la période Sédentaire sont colmatés par des sables massifs, de même que par des dépôts très fins argileux, qui attestent d'écoulements contrastés, peut-être en réponse à l'effondrement des berges des canaux et à la destruction des vannes d'entrée.

Entre 1300 et 1440 apr. J.-C. (période Classique Civano), une sédimentation rythmée, entrecoupée d'épisodes d'exondation a été observée dans la plaine. Dans les canaux (terrasses Lehi et Mesa), une sédimentation rythmée, peut-être saisonnière, est attestée et suggère des conditions d'irrigation optimales (lamines argilo-sableuses granoclassées).

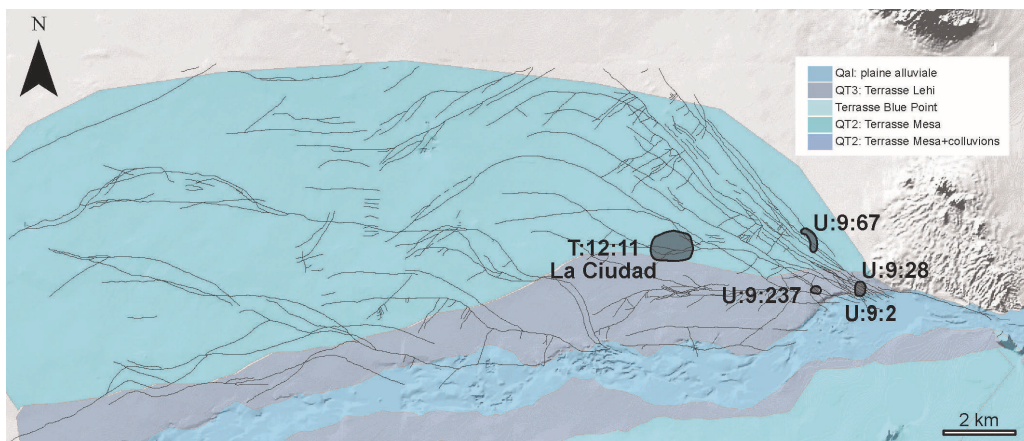
Entre 1440 et 1620 apr. J.-C. (fin de la période Classique/début Protohistorique), une seconde phase de stabilité associée à un développement pédologique est observée sur les sédiments laminés de la terrasse T¹. Puis, une nouvelle période d'aggradation de compétence élevée puis plus réduite est enregistrée, après **1530 apr. J.-C jusqu'à 1662 apr. J.-C.** L'absence de sédimentation postérieurement à la période Protohistorique pourrait résulter d'une migration du chenal, de l'érosion des dépôts supérieurs des séquences ou d'une nouvelle phase d'incision.

1.3. Le Canal System 2 (zone centrale, rive nord)

1.3.1. *Etude des remplissages de canaux appartenant au Canal System 2*

1.3.1.1. Synthèse des travaux antérieurs

19 canaux appartenant au CS2 et présentés dans des rapports de fouilles ont été étudiés (Fig. 89) et sont décrits en Annexe 3C. Leur remplissage (texture et couleur) a été analysé et classifié selon la description présentée dans le Tab. 9. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tab. 13. Certains canaux sont évoqués plusieurs fois, suite à leur utilisation prolongée.



Site	Code (ASM)	Nombre de canaux	Ref.
Pueblo grande	Az U:9:2	6	Masse, 1976
	Az U:9:28	4	Masse, 1976 ; Bradley, 1999
La Ciudad	Az T:12:11	6	Ackerly et al., 1987
La Lomita	Az U:9:67	1	Mitchell, 1990
	Az U:9:237	2	Rogges et al., 2002

Fig. 89 : Localisation et corpus des canaux étudiés le long du CS2, source bibliographique

Période	Site (ASM)	Référence du canal	Période d'utilisation (apr.J.-C)	Unité géomorphologique	Nombre de nettoyage visibles	Type de faciès observé	Distance aux vannes d'entrée (km)
Coloniale	T:12:11	1310	800-950	QT2	0	6,5,1	6
	T:12:11	247.01	800-950		3	3,6,1,5,1	6
	T:12:11	287	800-900		0	3-4	6
Sédentaire	U:9:67	15	900-1025	QT2	2	1 (3)	2.9
	U:9:2	11	950-1150	QT3	2	2,5	0.6
	T:12:11	62	950-1150	QT2	0	6	6
	T:12:11	247.02	950-1150		2	5,2,1	6
	U:9:2	1	950-1150	QT3	2	5,1+Crue+4,6,4	0.6
	U:9:2	5	950-1150		1	3,6,4,5,1	0.6
	U:9:2	7	950-1150		11	1,4/2,1,2,5,5,5,6,6	0.6
	U:9:2	8	950-1150		5	5,6,3/6,1,5,4	0.6
Sédentaire/ Classique	T:12:11	1311	950-1150	QT2	3	2,6,3,1,3,1	6
	U:9:237	3	990-1160	QT3	1	2,6,6,2	1.5
	U:9:2	4b	1000-1150?		2	4,5,1	0.6
	U:9:237	2	1010-1260		2	6,3,6,1,5,1,3,1	1.5
Classique	U:9:28	2	1150-1450	QT3+cônes détritiques	0	5,1	0.6
	U:9:2	4a	1150-1300		3	5,4,5,6,5	0.6
	U:9:28	1	1150-1300		0	4/6,1	0.6
	U:9:28	N	1150-1300		1	6/1, 2	0.6
	U:9:2	5	1150-1300	QT3	0	2	0.6
	U:9:28	5	1150-1300		1	2	0.6

Tab. 13 : Chronologie, faciès sédimentaires identifiés dans les canaux du CS2 et nombre de curages visibles, source bibliographique

- Entre 800 et 950 apr. J.-C. (Période Coloniale)

Seuls trois canaux, situés à presque 6 km des vannes d'entrée du système ont été analysés. Leur remplissage est composé de sables fins à grossiers massifs (faciès 5) qui traduisent une hydrologie intense. Cette dynamique perturbe l'ensemble du système, même les structures implantées sur la terrasse Mesa. Leur colmatage final est composé d'argile qui traduit des phases d'écoulement réduit, peut-être en réponse à la destruction partielle des canaux ou des vannes d'entrée ou à l'atterrissement et l'eutrophisation naturelle du réseau à la suite de son abandon.

- Entre 900 et 1150 apr. J.-C. (Période Sédentaire)

La période sédentaire est bien représentée et peut être découpée en trois tendances. La chronologie entre la première et la seconde dynamique a été établie grâce à l'étude du canal U :9 :2, F 7. La troisième phase a été caractérisée grâce aux structures U :9 :237, F 2 et T :12 :11, F 1311.

La première phase est caractérisée par les faciès 2 et 1, qui indiquent une dynamique hydrique de faible à moyenne intensité avec la sédimentation d'argile dans les canaux construits sur les terrasses et d'argile sableuse laminée dans les canaux de la plaine alluviale.

Ce faciès résulte d'une sédimentation rythmée, avec une montée/chute du niveau des eaux bien exprimée. L'hypothèse d'une dynamique saisonnière est posée, de même qu'une potentialité d'irrigation optimale.

La seconde phase est caractérisée par une sédimentation de très forte énergie (faciès 5 et 6). Des sables grossiers sont identifiés dans les remplissages de canaux construits dans la plaine et sur les terrasses.

Certains des dépôts grossiers contiennent des traces de laminations, mais une grande partie d'entre eux présente une structure massive. Cette dernière signe une sédimentation brutale de très forte compétence qui rappelle des épisodes de crues éclair. Les canaux sont fréquemment entretenus et reconstruits sur des dépôts de crue identifiés dans la plaine alluviale.

La dernière dynamique enregistrée jusqu'en 1250 apr. J.-C. est caractérisée par les faciès 1, 2 et 3. Une sédimentation rythmée de compétence moyenne (argile laminée et/ou limon/argile laminés) est identifiée dans les canaux construits dans la plaine alluviale et sur la terrasse Mesa. Ces dépôts sont scellés par des argiles qui sont associées à l'eutrophisation progressive des canaux et leur abandon.

- Entre 1150-1300 apr. J.-C. (Période Classique)

Deux dynamiques ont été mises en évidence. Le remplissage de certains canaux est caractérisé par le faciès 5, qui indique une dynamique de sédimentation à forte charge détritique (sables massifs). En parallèle, au cours de la Période Soho, un certain nombre de canaux situés à l'embouchure des vannes d'entrée sont colmatés et détruits par des sédiments sableux à sablo-graveleux peut-être en provenance des Papago Buttes (faciès 6). Cette ambiance sédimentaire est généralement suivie par un ralentissement progressif des débits et l'abandon des canaux. En effet, à l'aval des zones perturbées, des accumulations argileuses ont été observées. Dans le canal N sur le site U :9 :28 (ASM), des artéfacts et des céramiques ont été identifiés sur des sédiments boueux. Des empreintes de pieds nus ont même été découvertes ainsi qu'un petit chemin menant à la zone d'eau stagnante (Bradley, 1999). Il semblerait donc que le canal, malgré son dysfonctionnement, ait été exploité à des fins domestiques voire architecturales (accumulation d'argile pour la construction du *platform mound* de Pueblo grande) (Bradley, 1999).

Une seconde dynamique a été identifiée dans le remplissage de 3 canaux implantés dans la plaine alluviale. Le faciès 2 y est bien représenté ; il indique la sédimentation de sables et d'argiles granoclassées qui témoignent d'un retour à une sédimentation rythmée, peut-être saisonnière à la fin de la période Classique.

1.3.1.2. Le projet La Lomita (Az U :9 :67 ASM)

Le canal de La Lomita a été fouillé avec la compagnie privée Soil System Inc en 2007. Il s'écoule avec un alignement sud-est/nord ouest et alimente le village de la Lomita sur la terrasse pléistocène Mesa (Fig. 90). Ce village (Az U :9 :87 ASM) (Mitchell, 1990) est composé de maisons en fosses (environ 22, dont certaines ont brûlé), de zones de

stockage, de fours et d'un cimetière. Le secteur est irrigué dès la fin de la période Coloniale-début de la période Sédentaire (875-950 apr. J.-C.).

Des vestiges de la période Classique ont également été mis au jour, mais les fouilles n'ont révélé que la partie nord-ouest d'un village bien plus grand. Une vingtaine de maisons en fosses y ont été découvertes. Le canal étudié se situe dans cet intervalle chronologique. Au nord-ouest du village, le hameau de El Caserio (Az T:12:49 ASM) (Mitchell, 1989b) est occupé de façon permanente de la période Coloniale à Classique. La Lomita Pequeña (Az U:9:66 ASM) (Mitchell, 1988), implanté à 500 m au nord est de La Lomita, est occupé dès la période Coloniale et s'agrandit au cours de la période Sédentaire pour devenir un hameau composé probablement d'une quarantaine de personnes (Mitchell, 1988). Le site est abandonné autour de 1020-1050 apr. J.-C.

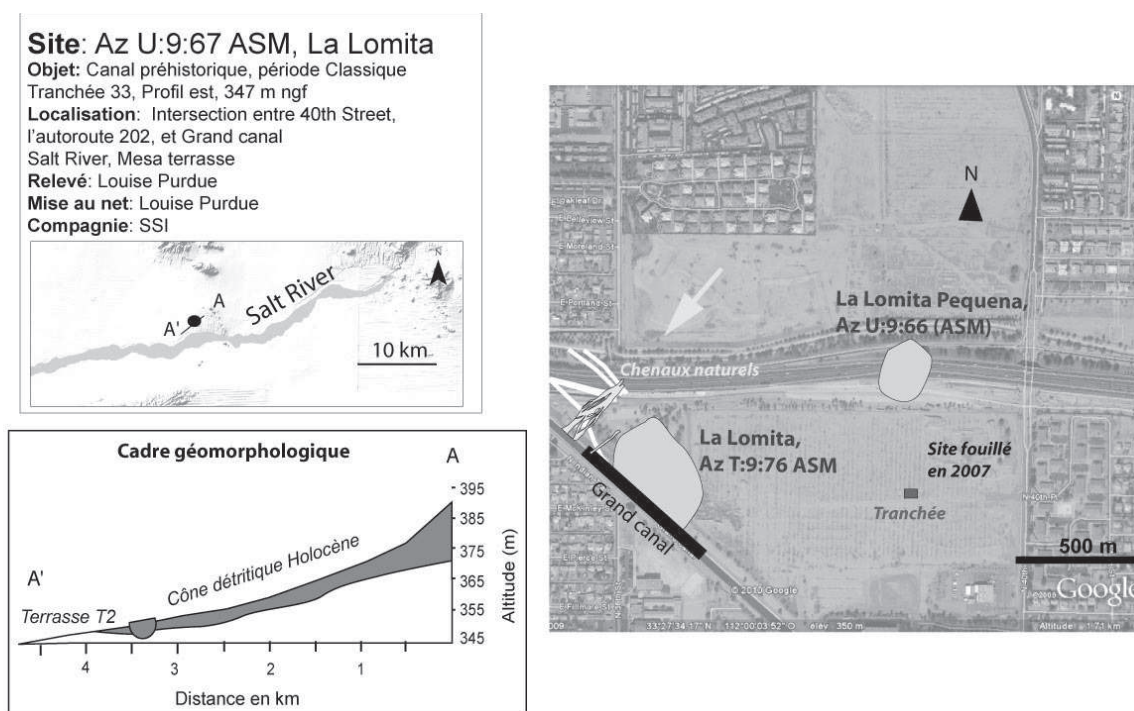


Fig. 90 : Localisation des villages de La Lomita et La Lomita Pequeña, et localisation du canal étudié. Mise en évidence des dynamiques érosives dans ce secteur (Huckleberry, 1990)

- Description, échantillonnage et chronologie

Le canal, creusé dans du caliche induré, mesure 4 m de largeur et 1,25 m de profondeur (Fig. 91). Il a été utilisé au cours de la période Classique, phase Civano (13^{ème}-14^{ème} s.). Quatre phases de fonctionnement ont été distinguées et trois épisodes de nettoyages sont attestés entre l'US 7-8, l'US 8-9 et l'US 11-12.

1) Les premières US de remplissage (US 1 et 2) suggèrent un épisode d'effondrement des berges. Les sédiments à la base du canal (US 3 à 9) sont composés limons graveleux bruns hétérogènes puis de limons sableux beiges riches en agrégats de sols qui témoignent d'une forte dynamique hydrique et érosive. Une date radiocarbone obtenue sur des charbons prélevés dans l'US 6 indique un dépôt entre 1219 et 1282 apr. J.-C.

2) Les US 10-11 sont composées d'argiles rougeâtres qui traduisent des écoulements diffus.

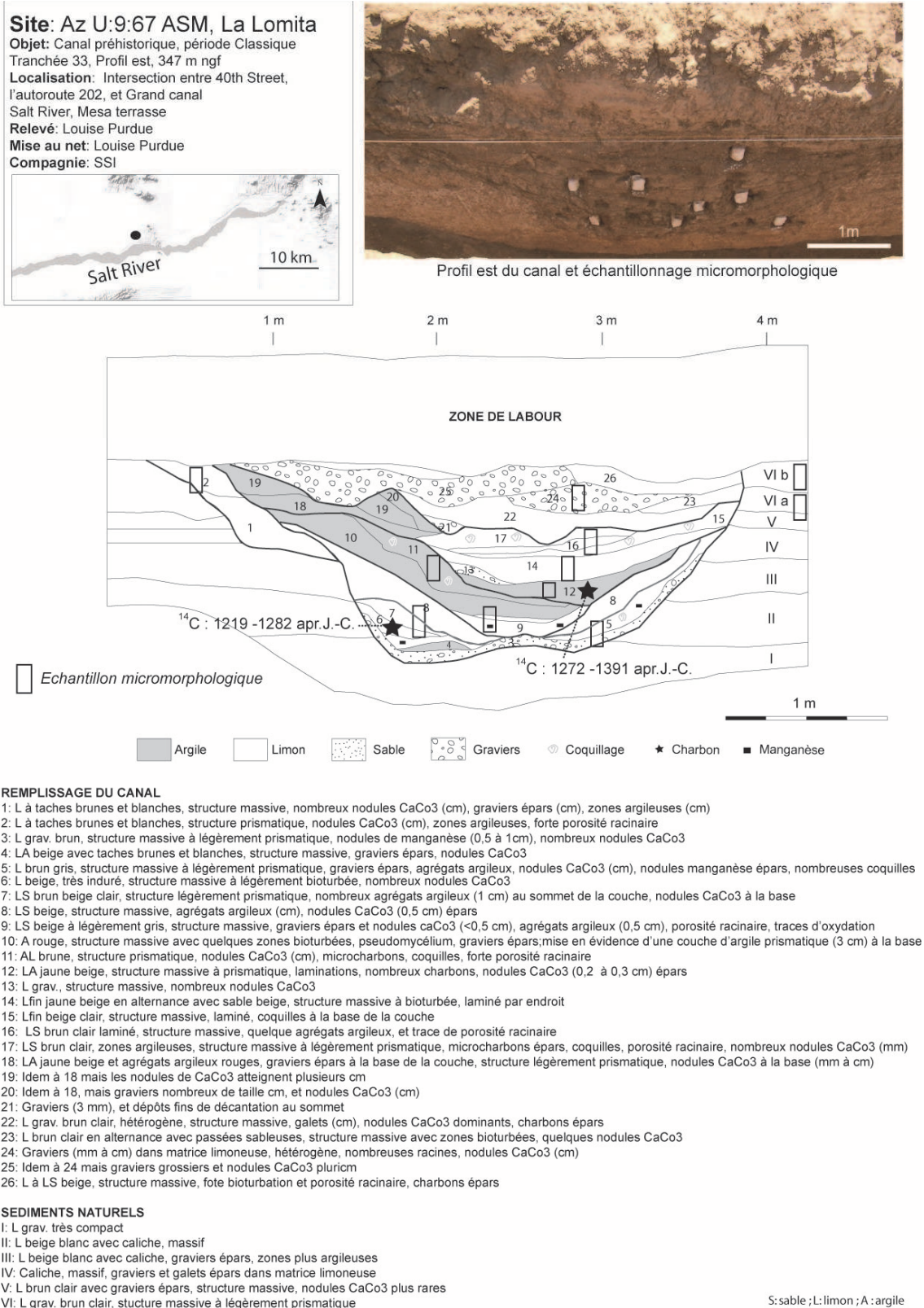


Fig. 91 : Stratigraphie et description du canal Az U :9 :67 (ASM) appartenant au Canal System 2

3) La troisième phase (US 12-17) est caractérisée par la sédimentation de limons et sables laminés brun jaune qui indiquent une sédimentation régulière de moyenne énergie. Une date a été obtenue dans l'US 12. Elle indique une reprise de la sédimentation dans le canal autour de 1272-1391 apr. J.-C.

4) Les US 18-20 sont de texture argileuse et signent des écoulements réduits associés à l'eutrophisation progressive du canal. Elles sont érodées et recoupées par les US 21 à 26 composées de limons graveleux et de graviers. Cet apport sédimentaire semble provenir de la réactivation du chenal temporaire de Cave Creek.

Onze échantillons micromorphologiques ont été prélevés et des sédiments en vrac ont été échantillonnés dans chaque US pour la susceptibilité magnétique. 7 échantillons palynologiques ont également été prélevés, mais n'ont pas été analysés faute de budget.

1.3.2. Evolution de la plaine alluviale et rythmes de crues de la période pré-Classique à la période Protohistorique

Des travaux de terrain effectués en 2009 en collaboration avec la compagnie Desert Archaeology (Az U :9 :28 (ASM)) à la transition entre la terrasse holocène Lehi et des cônes détritiques en provenance des Papago Buttes, à l'embouchure du Canal System 2 (Fig. 92), nous ont permis de mesurer l'impact de l'érosion locale et des crues sur le fonctionnement du Canal System 2. Les travaux effectués ont également dégagé un réseau de canaux dont le fonctionnement a été fortement perturbé par ces dynamiques.

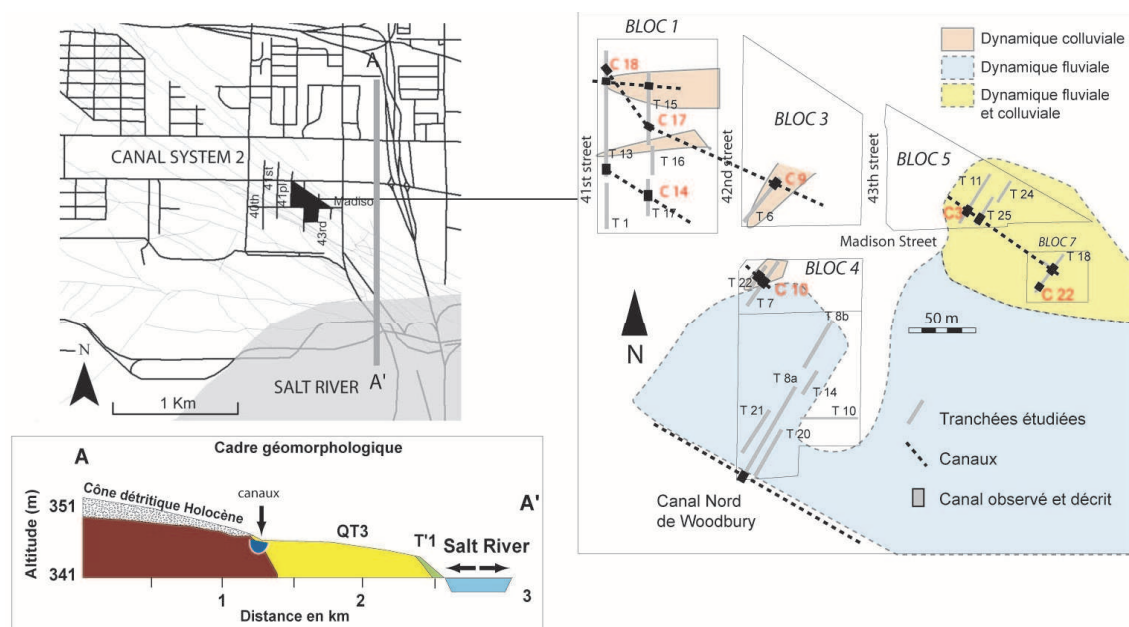


Fig. 92 : Cadre géomorphologique et localisation des tranchées effectuées sur la terrasse Lehi en collaboration avec l'entreprise Desert Archaeology

1.3.2.1. Régime de crues

L'histoire de la plaine alluviale de la période Sédentaire à Historique a été restituée par l'observation détaillée de la tranchée 8 dans le bloc 4 (Fig. 92, Fig. 93) ainsi que par le remplissage de canaux utilisés au cours de la période Sédentaire (Fig. 96).

Deux épisodes de crues de texture limono-sableuse sont attestés (Fig. 93, US 1-2) probablement au cours de la période Coloniale/Sédentaire. **Une période de crue** a été mise en évidence au cours de la période Sédentaire. La première crue (US 4), de texture argileuse, se dépose entre 1017-1153 apr. J.-C., avec le plus de probabilité autour de 1028 apr. J.-C. Ces dépôts sont couverts par des limons à limons sableux bioturbés (US 5 et 6), et dont la couleur jaune à brune semble indiquer un développement organique et une phase de stabilité temporaire sur la plaine.

Une dernière période de crue (US 9) de texture limoneuse est observée entre 1033-1213 apr. J.-C., avec une date de probabilité maximale autour de 1156 apr. J.-C.

Un gap sédimentaire est ensuite observé entre la période Sédentaire et la période historique. Trois hypothèses peuvent être posées : 1) la construction d'un canal d'irrigation visible à l'extrémité sud de la tranchée a protégé la zone de crues importantes, 2) la dynamique sédimentaire est réduite après la période Sédentaire. Si cette hypothèse était validée, on observerait le développement d'un paléosol au sommet de l'US 9, ce qui n'est pas le cas, 3) l'activité humaine ainsi que l'effet des crues de 1891 et 1905 a pu éroder la partie sommitale des dépôts.

En effet, la dernière dynamique de déposition enregistrée date de la période historique. Une fosse recoupe l'US 9. Elle est colmatée par des dépôts charbonneux et cendreux ainsi qu'une **zone »boueuse** » (argileuse fine prismatique) dans laquelle des os de ruminants ont été mis au jour (post 1870) (US 10-12). Ces sédiments restent de 20 à 30 ans en surface, puis sont enfouis sous des dépôts de crue grossiers dont la mise en place remonte à 1891 ou 1905 (Huckleberry, communication personnelle). Ces dépôts de crue sont caractérisés par la formation de petits chenaux colmatés par des sables fins à grossiers (US 16 à 19).

1.3.2.2. Remplissage des canaux et dynamique locale

Les phases d'érosion locale sont attestées sur la partie nord du Canal System 2 (Huckleberry, 1988) (Fig. 90), mais également dans notre secteur d'étude (Fig. 92). La partie nord du site étudié est caractérisée par une stratigraphie naturelle composée de sables grossiers et d'extrémités digitées de cônes détritiques (Fig. 98). Les structures hydrauliques sont creusées dans ces dépôts grossiers mais sont également recoupées et érodées par ces dynamiques actives. C'est probablement la raison pour laquelle de nombreuses connexions entre canaux principaux et canaux de distribution ont été créées, afin d'alimenter les zones en aval.

L'étude de la tranchée 18 a mis en évidence plusieurs dynamiques de fonctionnement (Fig. 94), fluviales et colluviales après 1150 apr. J.-C. Cette tranchée a également permis de recouper perpendiculairement un canal principal F 3 et un canal de distribution F 22.

Une phase **d'érosion majeure** est attestée entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (Période Classique, dite Soho). Cette phase d'érosion s'exprime par la présence de dépôts graveleux locaux à faible susceptibilité magnétique. Cinq dynamiques ont été enregistrées. 1) La première est caractérisée par la présence d'un chenal composé de limons graveleux et de graviers dont la date de mise en place n'est pas connue (US 1 à 8). 2) Un nouveau chenal (US 9 à 16) se met en place entre 1156-1257 apr. J.-C. Son remplissage est composé de sables fins à grossiers et de graviers. 3) Les chenaux sont enterrés sous des argiles limoneuses brunes, prismatiques et oxydées, dans lesquelles la végétation se développe. Ces argiles ont une origine alluviale et correspondent à des dépôts de débordement. 4) Puis de nouveaux chenaux naturels à remplissage graveleux en provenance des Papago Buttes sont mis en évidence (US 23 à 40).

La date de dépôt (US 34 : 1024-1166 apr. J.-C.) est un peu ancienne. Ces chenaux incisent dans les argiles fluviales et le canal F 3 est directement réemprunté par ces chenaux et colmaté par des graviers.

Ces dynamiques de ravinement ont donc eu un impact sur les canaux à l'embouchure du CS2. Une tranchée a été effectuée dans le canal F3 légèrement en aval de cette zone (Bloc 5, T 11) (Fig. 95). La base du canal (US 1 à 6) est composée de sables et de limons brun clair laminés qui indiquent une sédimentation rythmée. Puis le canal est curé et des argiles rouges prismatiques se déposent entre 1221 et 1283 apr. J.-C. (US 7 à 11). Elles sont riches en charbons et pseudomycéliums. Un épisode de brûlis in situ a été identifié (US 10). Le canal est ensuite colmaté par des limons bruns charbonneux (US 13). Un nouveau canal est construit et rempli par des limons sableux brun clair, riches en coquilles, charbons, racines et pseudomycéliums (US 15 à 25).

Le profil de ce canal est très différent de celui dans le bloc 7, et nous posons l'hypothèse que les chenaux intermittents en provenance des Papago Buttes ont réduit les écoulements dans les canaux en aval des zones érodées. Par ailleurs, nous avons observé que les argiles rouges sont similaires à celles du canal de La Lomita. Il est possible qu'elles proviennent de la décomposition des grès rouges en provenance des Papago Buttes. Leur identification en partie sommitale des chenaux naturels (Fig. 94) peut provenir de curage du canal une fois érodé.

D'autres canaux de la même période ont été étudiés, mais nous présenterons uniquement le canal F 10 (Bloc 4, T 22) (Fig. 92) en utilisation au cours de la période Sédimentaire (entre 993 et 1150 apr. J.-C.). Ce canal est colmaté par des dépôts fluviaux (US 1a, 2, 4, 5), mais les US 1b, 3, 6 et 7 ont clairement une origine locale, comme le suggère la texture graveleuse des dépôts. Leur présence dans ce canal traduit soit 1) des dynamiques érosives qui impactent régulièrement l'ensemble des structures à l'embouchure du CS2 suite à des pluies locales intenses sur les Papago Buttes, peut-être estivales (voire sur les Phoenix Mountains, pour les structures situées plus en aval, comme La Lomita), ou 2) une volonté de canaliser les eaux de ruissellement et d'alimenter les structures hydrauliques si les conditions hydroclimatiques ne permettent pas de dériver l'eau fluviale.

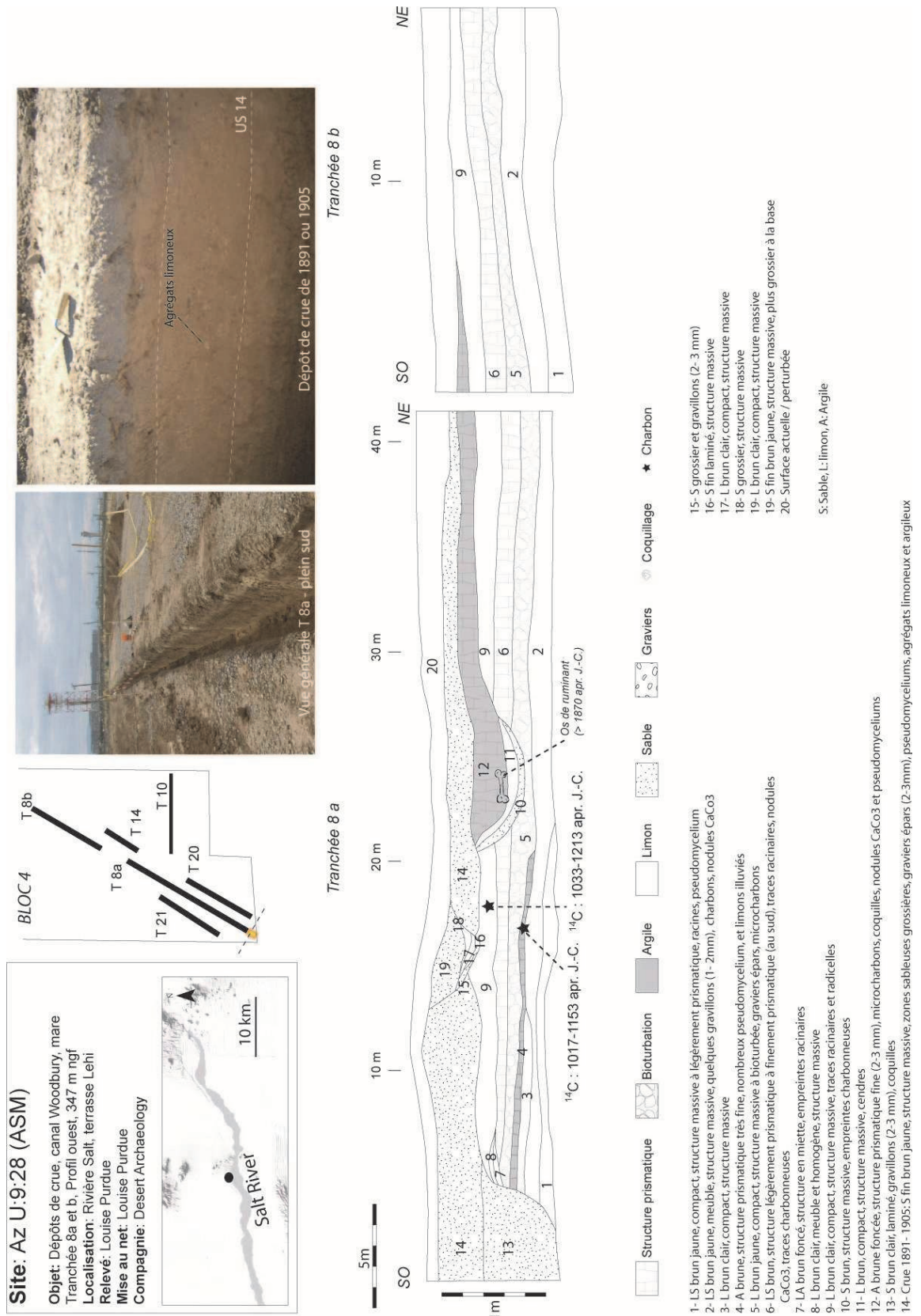


Fig. 93 : Stratigraphie et description de la tranchée 8, Bloc 4, Terrasse Lehi, Canal System 2, Az U : 9 :28 (ASM)

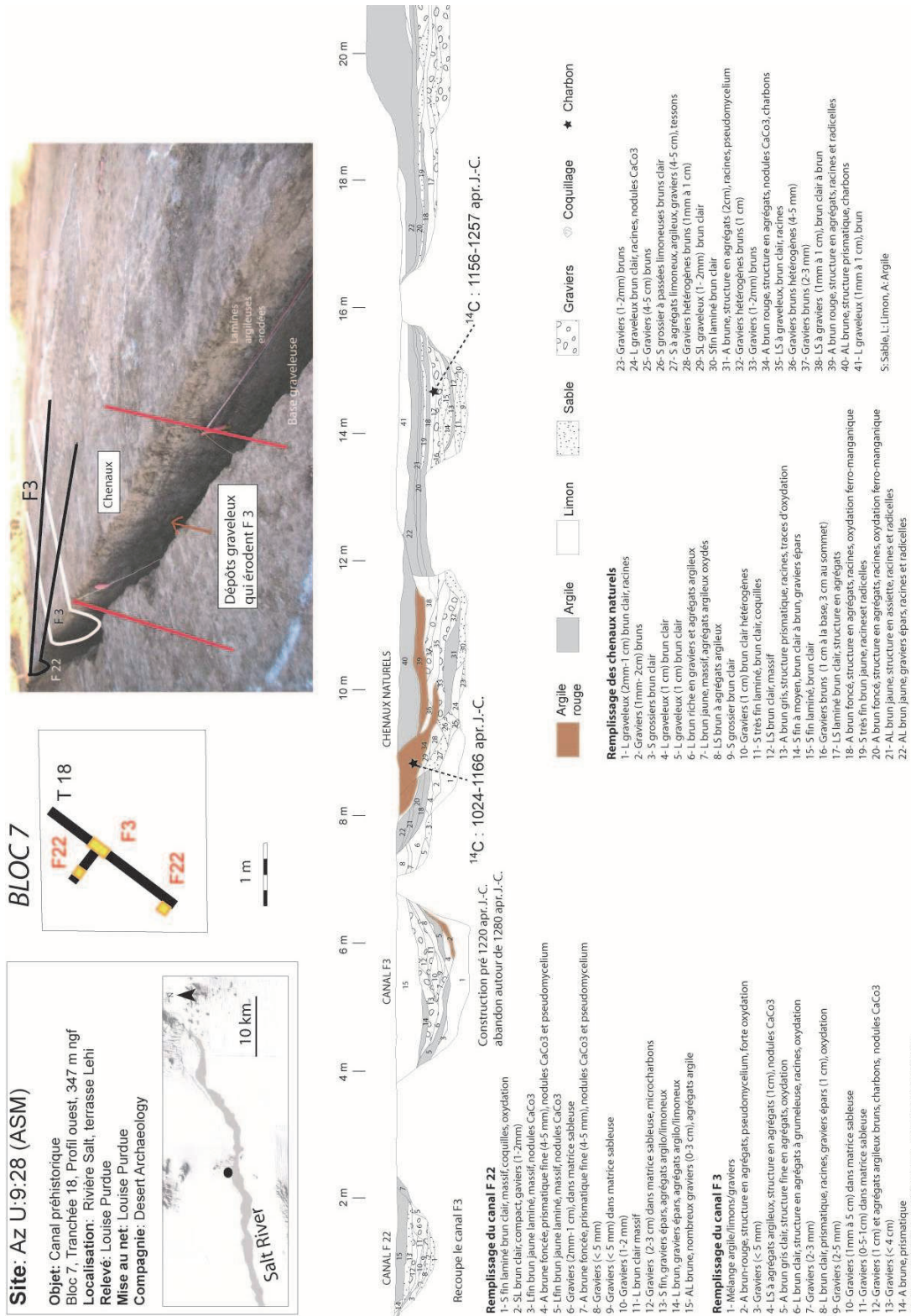


Fig. 94 : Stratigraphie et description de la tranchée 18, Bloc 7, Terrasse Lehi, Canal System 2, Az U :9 :28 (ASM)

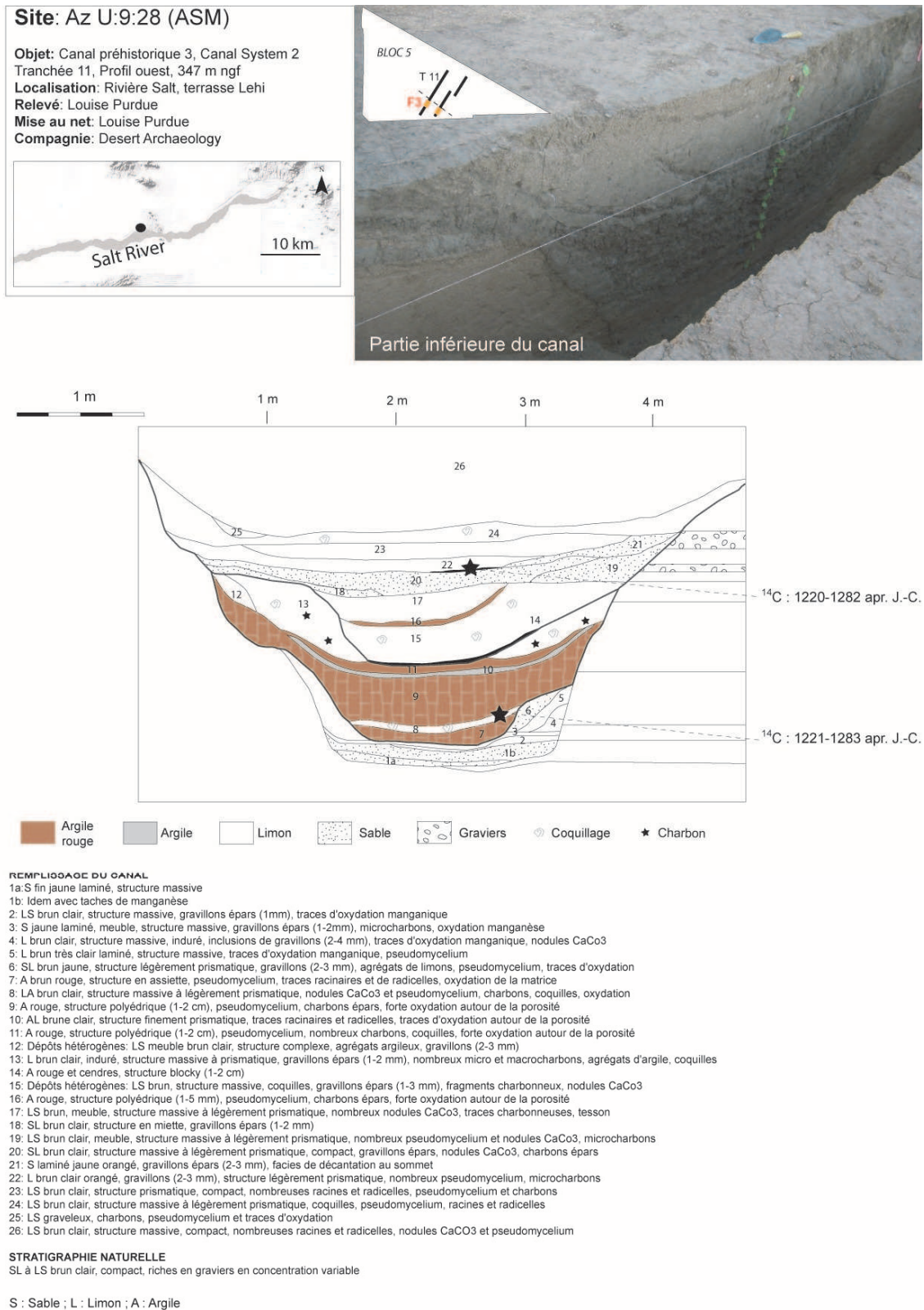


Fig. 95 : Stratigraphie et description du canal F 3, T 11, Canal System 2, Az U : 9 : 28 (ASM)

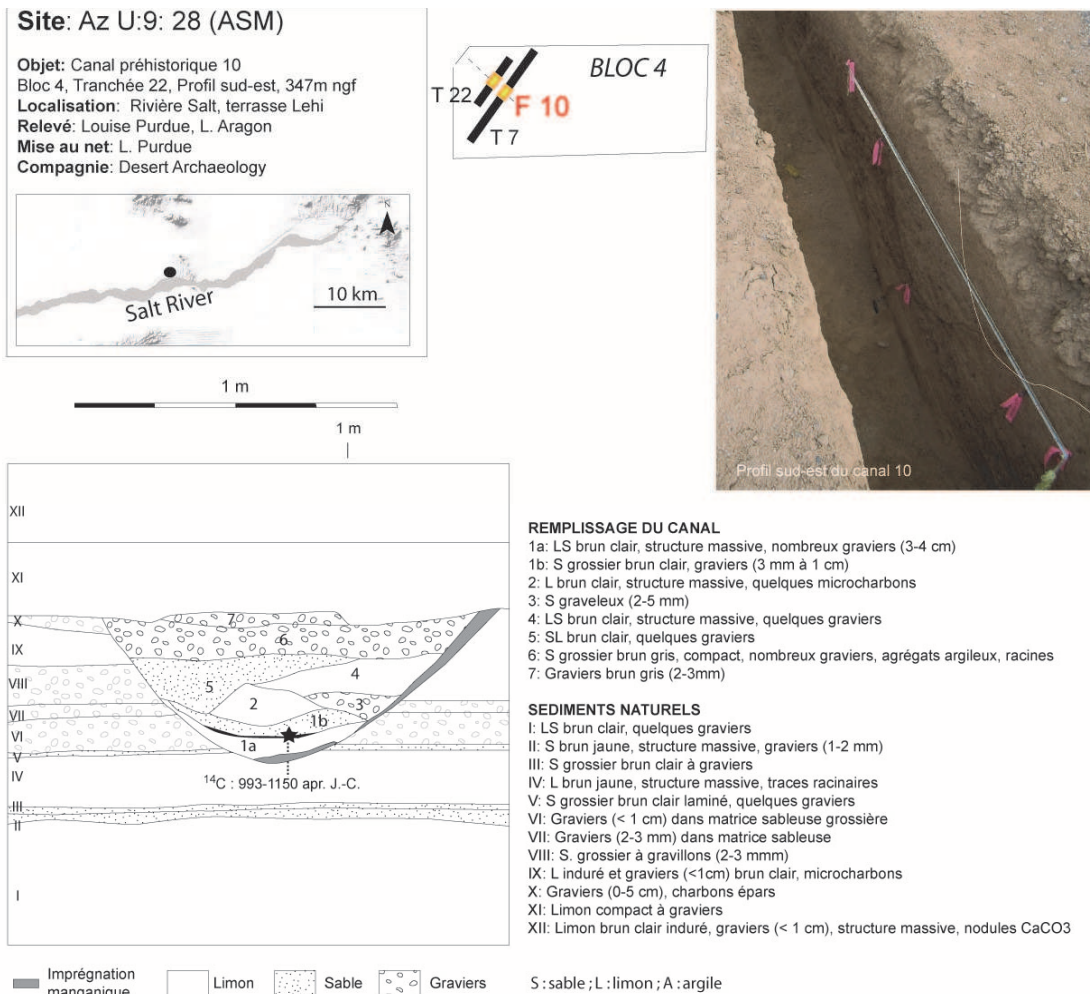


Fig. 96 : Stratigraphie et description du canal F 10, T 22, Canal System 2, Az U :9 :28 (ASM)

1.3.3. Conclusion partielle

L'analyse du remplissage de 24 canaux, et l'ensemble des résultats obtenus dans la plaine alluviale (terrasse Lehi) mettent en relief de fortes contraintes environnementales de la période Coloniale à la période Classique le long du Canal System 2. Cinq phases majeures ont été enregistrées (Fig. 97).

Deux périodes de crues ont été identifiées à proximité de Pueblo Grande, peu avant 1000 apr. J.-C. (période Coloniale/Sédentaire). Les canaux étudiés en utilisation au cours de cette période sont colmatés par des sables fins à grossiers massifs, puis par des dépôts très fins qui traduisent des écoulements réduits, peut être du fait de la destruction des canaux par ces crues, voire l'élargissement du chenal principal.

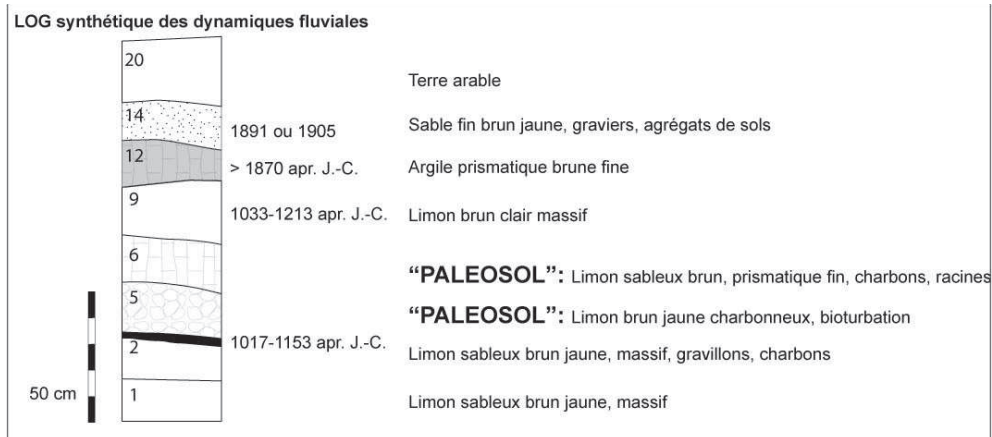
Entre **850 et 1000 apr. J.-C.**, une phase de faible dynamique hydrosédimentaire est enregistrée dans les canaux (argiles à argiles/sableuses) mais la sédimentation est rythmée, peut-être saisonnière, et traduit un bon contrôle de la dérivation et de la distribution des eaux. Cette première dynamique est suivie par une intensification des débits liquides et solides associée au colmatage accéléré des canaux par des sables fins à grossiers massifs.

Quatre périodes de crues majeures ont été identifiées dans la plaine entre 1000 et 1200 apr. J.-C, et sont ponctuées par des épisodes de stabilité temporaires, associés à des fluvisols de couleur brune, légèrement bioturbés (traces racinaires). L'impact direct de cette crise hydrosédimentaire est la destruction des vannes d'entrée des systèmes d'irrigation associée à la perte des terres arables en bordure du cours d'eau.

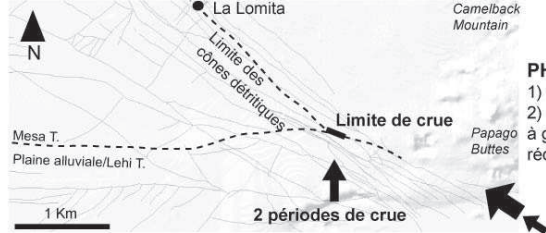
Entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (période Classique Soho) une activité détritique locale intense et une activité fluviale sont enregistrées. Les canaux sont colmatés par des argiles d'origine fluviale qui indiquent des écoulements réduits. Ces argiles sont interstratifiées avec des sables fluviaux massifs, qui rappellent des épisodes de crue éclair. Par ailleurs, de nombreux canaux qui présentent un axe d'écoulement sud-est nord-ouest sont endommagés par l'activité détritique des bajadas. Ces structures sont directement recoupées par des ravines latérales. En aval de ces zones de perturbation, les canaux sont colmatés par des argiles rouges qui semblent alors exploitées à des fins domestiques et architecturales. L'augmentation de ces processus de ravinement se rattache sans doute à un encaissement général des cours d'eau. De ces irrégularités climatiques découlent des problèmes d'alimentation en eau dans les canaux ainsi que des épisodes de crues-éclair qui réduisent l'efficacité du Canal System 2 au cours de cette période. De nombreuses dérivations et connexions entre canaux, rarement observées sur les autres systèmes, ont alors été mises en évidence (Huckleberry, 1990) et témoignent d'un effort probablement communautaire pour lutter contre ces contraintes. En parallèle, aucun épisode de crue n'est observé sur la terrasse Lehi. La présence de dépôts historiques directement superposés aux sédiments de l'époque Sédimentaire marque un fossé sédimentaire au cours de cette période.

La période comprise **entre 1300 et 1450 apr. J.-C.** (fin de la période Classique) est caractérisée par la sédimentation de sables et d'argiles granoclassés dans les canaux. Cette sédimentation rythmée à saisonnière signe la dérivation d'eaux fluviales, avec un niveau de base de la Salt plus élevé. Il est également possible que ces facies résultent d'un contrôle de l'arrivée d'eau. Les canaux sont abandonnés malgré leur efficacité.

Aucun canal n'est en fonctionnement après cette date et aucun dépôt de crue n'a été identifié sur la terrasse Lehi. Leur absence peut être liée à 3 facteurs : 1) Une diminution des rythmes de crues, avec un chenal étroit et encaissé au cours de cette période, 2) la présence d'un canal principal (canal de Woodbury) qui s'écoule au sud de la zone étudiée et la protège des crues, même une fois abandonné, 3) Le nivellement des terres au cours de la période Historique a contribué à la disparition de dépôts antérieurs sous-jacents. Des sédiments de cette période indiquent la présence d'une mare et de pâturage dans le secteur. L'ensemble est colmaté par un épisode de crue majeure (1891 ou 1905).



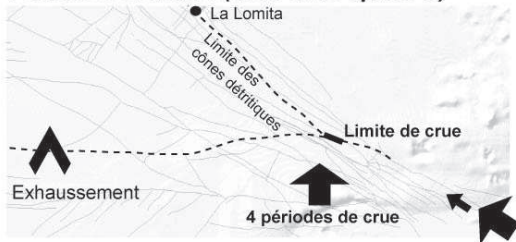
Période Coloniale/Sédentaire (< 1012-1153 apr. J.-C.)



PHASE 1

- 1) Crues composées de sédiments grossiers, feux locaux
- 2) Remplissages des canaux (terrasse Lehi et Mesa) composé de sables fins à grossiers massifs superposés par des argiles qui indiquent des écoulements réduits.

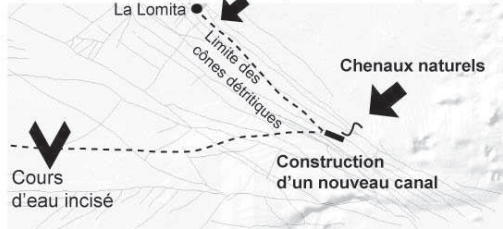
Période Sédentaire (1017-1213 apr. J.-C)



PHASE 2

- 1) Ecoulements réduits avec le remplissage des canaux par des argiles prismatiques à argiles sableuses laminées.
- 2) Colmatage des canaux par des sables grossiers. Crues récurrentes dans la plaine alluviale. Bon entretien des structures hydrauliques.
- 3) Puis sédimentation rythmée de compétence moyenne dans les canaux (argile et/ou limon/argile laminés) et colmatage final par des argiles.

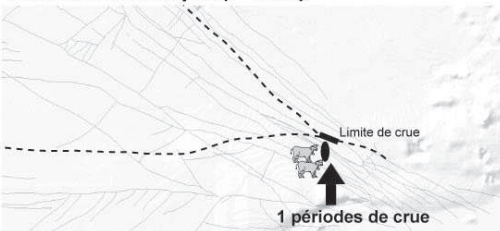
Période Classique Soho (1150-1300 apr. J.-C)



PHASE 3:

- 1) Gap sédimentaire: absence de sédimentation dans la plaine alluviale
- 2) Colmatage des canaux par des sables massifs en alternance avec des argiles prismatiques, puis mise en évidence de phases successives d'érosion locale (12-13ème s. apr. J.-C.)

Période Historique (> 1870)



PHASE 5:

- 1) Zone de pâturage / alimentation en eau
- 2) Une crue majeure (1891-1905)

Fig. 97 : Chronostratigraphie le long du Canal System 2

1.4. Le Canal System 7 (zone avale, rive sud)

1.4.1. *Etude des remplissages de canaux appartenant au CS7*

1.4.1.1. Cadre géographique et environnemental des sites étudiés

Le projet 06-970:77/82 réalisé par la compagnie EcoPlan Associates Inc en 2007 a permis de mettre au jour deux canaux, Az T : 8 : 270 et Az T : 8 : 272 (ASM) (Canal Laveen). Le projet est découpé en deux zones perpendiculaires distinctes qui longent la 35th avenue (8 ha) et la Southern avenue (6 ha) (Fig. 98). Le projet est situé entre 0.8 et 1.5 km au sud de la Salt, et à 1.5 km de ce cours d'eau en suivant l'alignement des canaux. La partie nord du projet recoupe la terrasse Lehi. A 0.5 km au nord de l'intersection avec Southern Avenue, une faible élévation topographique marque la transition avec la terrasse Mesa que longe la partie sud du projet. Les sols appartiennent au groupe Gilman Loam (sols salins à alcalins), de type fluvisol et au Laveen Loam (typic Camborthid) (Calcisol) (Référentiel pédologique, 2008).

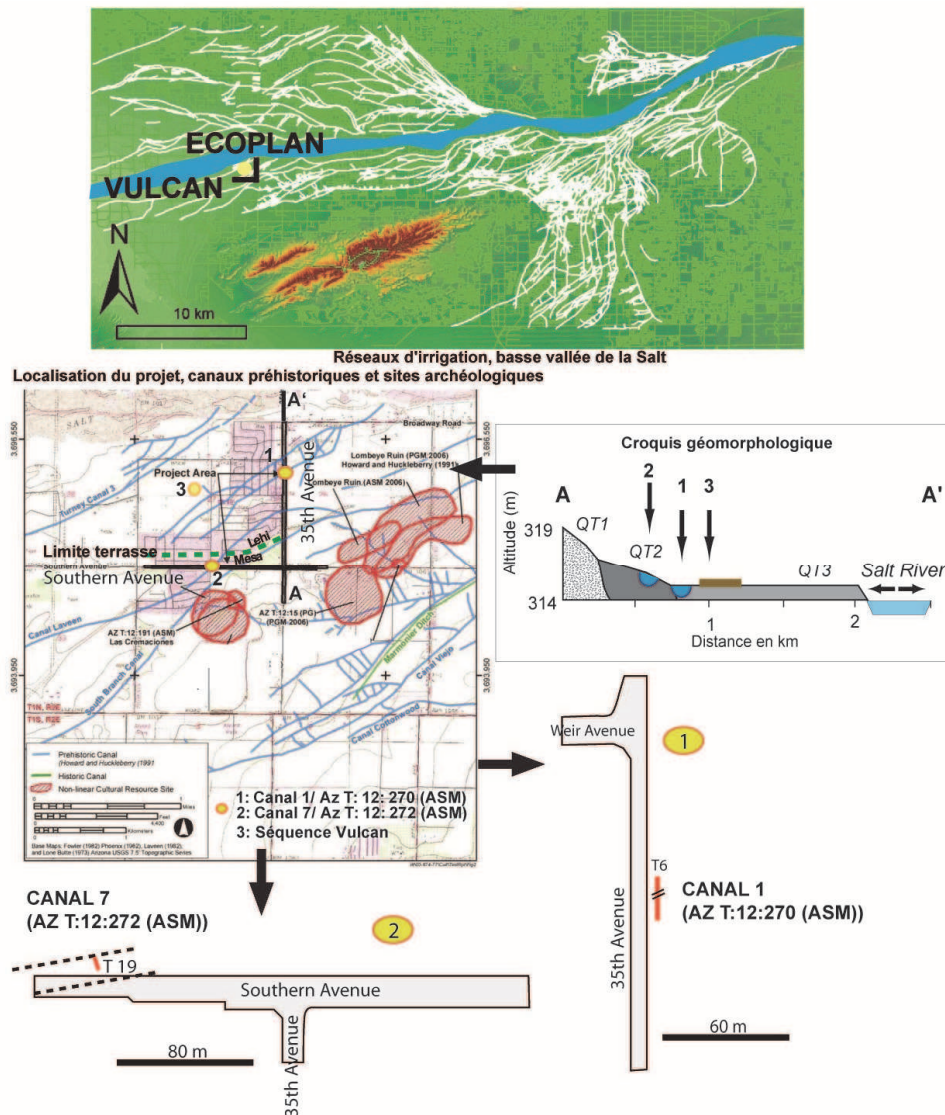


Fig. 98 : Localisation géographique et positionnement des tranchées, projet ECOPLAN

Une coupe a été étudiée à environ 1 km du site dans une carrière de gravier appartenant au groupe Vulcan Materials Company (112°8'34.02" W / 33°24'0.27"N). La séquence est située sur la terrasse Lehi. Le lit de la Salt River est situé environ 800 m au nord du site. La couverture pédologique est caractérisée par l'association Gilman Loam, de très bonne qualité agricole.

1.4.1.2. Contexte archéologique et problématiques

Le projet ECOPLAN a mis au jour une maison en fosse, un foyer et une concentration d'artefacts préhistoriques à proximité des canaux (site Az T :12 :269 (ASM)). Les recherches antérieures (Turney, 1929 ; Howard et Huckleberry, 1991) ont identifié 5 villages qui dépendent des Canal System 7 et 3 (Fig. 99) : le village de *Pueblo Del Monte*, situé au niveau des vannes d'entrée du CS7 ; le village de *Las Canopas* (période Coloniale à Classique) ; *Pueblo Viejo* (période Pionnière à Classique), renommé pour sa palissade brûlée de la période Classique ; *Lombeye Ruin* situé sur la partie terminale du système ; *Las Cremaciones* occupé de façon certaine de la période Coloniale à la transition Sédentaire/Classique (Fig. 99).

Le Canal 7 (Turney, 1929) ou Canal Viejo (Midvale, 1968) est un système d'irrigation indépendant. Des études récentes sur la circulation de céramiques le long de ce système isolé (Abbott et al., 2006) ont mis en évidence un modèle de fonctionnement et de gestion de l'eau qui repose sur une interaction et des échanges constants entre tous les villages du système.

Le Canal System 3, identifié par Turney (1929), s'écoule sur presque 10 km et alimente les villages de *Pueblo Primero* et *Villa Buena* (Midvale, 1968). Entre ces deux systèmes, Midvale identifia le canal Laveen (ou canal 7 de notre étude) (Fig. 99) qui mesure environ 15 km. Aucun village n'est rattaché à ce système. Les autres projets d'archéologie préventive dans ce secteur se sont révélés stériles ou n'ont dégagé que des canaux et une concentration d'artefacts (Clark et Henderson, 2001 ; Garcia et McDermott, 2006 ; Heilman, 2007 ; Langan et Rehar, 2008 ; Mitchell et al., 2004 ; Stahman et Moore, 2006 ; Tate, 2006 ; Davis, 2007).

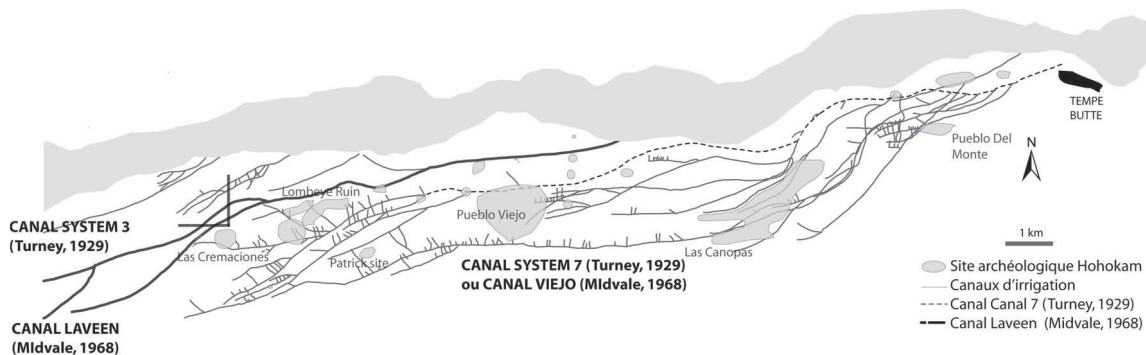


Fig. 99 : Sites archéologiques le long du canal 7 et canaux associés

1.4.1.3. Analyse chronostratigraphique des remplissages de canaux

- *Description, stratigraphie et échantillonnage*

Canal 1 / Az T : 8 :270 (ASM) (Fig. 100)

Le canal 1 mesure 2,5 m de large et 1,16 m de profondeur. Sa partie nord étant tronquée, le canal mesure en réalité 3.2 m de large. Deux canaux distincts ont été mis en évidence ainsi que 3 épisodes de curage. Le premier canal (US 1 à 9) est colmaté majoritairement par des limons sableux et des sables (US 1 à 7), puis d'argiles limoneuses à structure prismatique suite à un curage du canal (US 8 et 9).

Le second canal (US 10-15), de taille inférieure (1,5 m de large, 0,4 m de profondeur), présente le même alignement. Il est colmaté par des limons sableux et argiles en alternance et a été nettoyé entre l'US 11 et 12.

L'approche multiproxy a été adoptée avec le prélèvement de 6 échantillons pour la granulométrie, palynologie et malacologie, 5 échantillons pour la carpologie, 8 échantillons pour la micromorphologie, et deux échantillons radiocarbones (charbon de bois et graminées). L'ensemble des résultats a été publié en 2009 (Phillips et al., 2009).

Canal 7 / Az T : 8 :272 (ASM) (Fig. 101)

Le canal 7 n'a pas été recoupé dans sa totalité car son périmètre dépasse la limite spatiale du secteur d'étude. 19 US ont été distinguées, et des US supplémentaires appartenant à un canal historique creusé dans le canal 7 ont été également observées. Ce canal a été présenté dans la partie référentielle historique (ECO F5/6). La stratigraphie complexe montre 5 épisodes d'entretien.

La première phase de dépôt est composée de sédiments sableux laminés (US 1 à 6), séparés par un épisode de curage. La texture des sédiments s'affine au cours de la seconde phase (US 7-17) et les nodules carbonatés et traits ferrugineux indiquent le développement de processus pédologiques.

Le panel des analyses paléoenvironnementales est diversifié avec 6 échantillons micromorphologiques, 11 échantillons prélevés pour la granulométrie, 6 échantillons pour la palynologie et la malacologie, 1 échantillon pour les diatomées et 1 échantillon OSL à la base du canal.

- *Chronostratigraphie*

Plusieurs méthodes de datations ont été utilisées. Les dates radiocarbones ont été conduites par Beta Analytic, Miami, mais seul le canal 1 a fourni suffisamment de matériel organique pour dater la mise en place de 2 US. La première date (US 1 : charbon de bois) a fourni une date à deux sigmas de 1170-1280 apr. J.-C., ce qui suggère que le canal a été construit au début/milieu de la période Classique. La seconde date a été obtenue sur des fragments de graminée (US 13) et date la fin d'utilisation du canal autour de 1230 à 1300 apr. J.-C. (2-sigmas). Par conséquent, ce canal a pu être utilisé entre quelques décennies et un siècle.

Des dates OSL (University of Reno, Nevada) ont été obtenues au sein des mêmes US du canal 1 (pour comparaison) et à la base du canal 7 (Tab. 14).

Ce dernier a probablement été construit au cours de la période Pionnière-Sweetwater, mais il est fort probable que sa construction soit liée au boom démographique et à la construction massive de canaux au cours de la période Coloniale (Howard et Huckleberry, 1991).

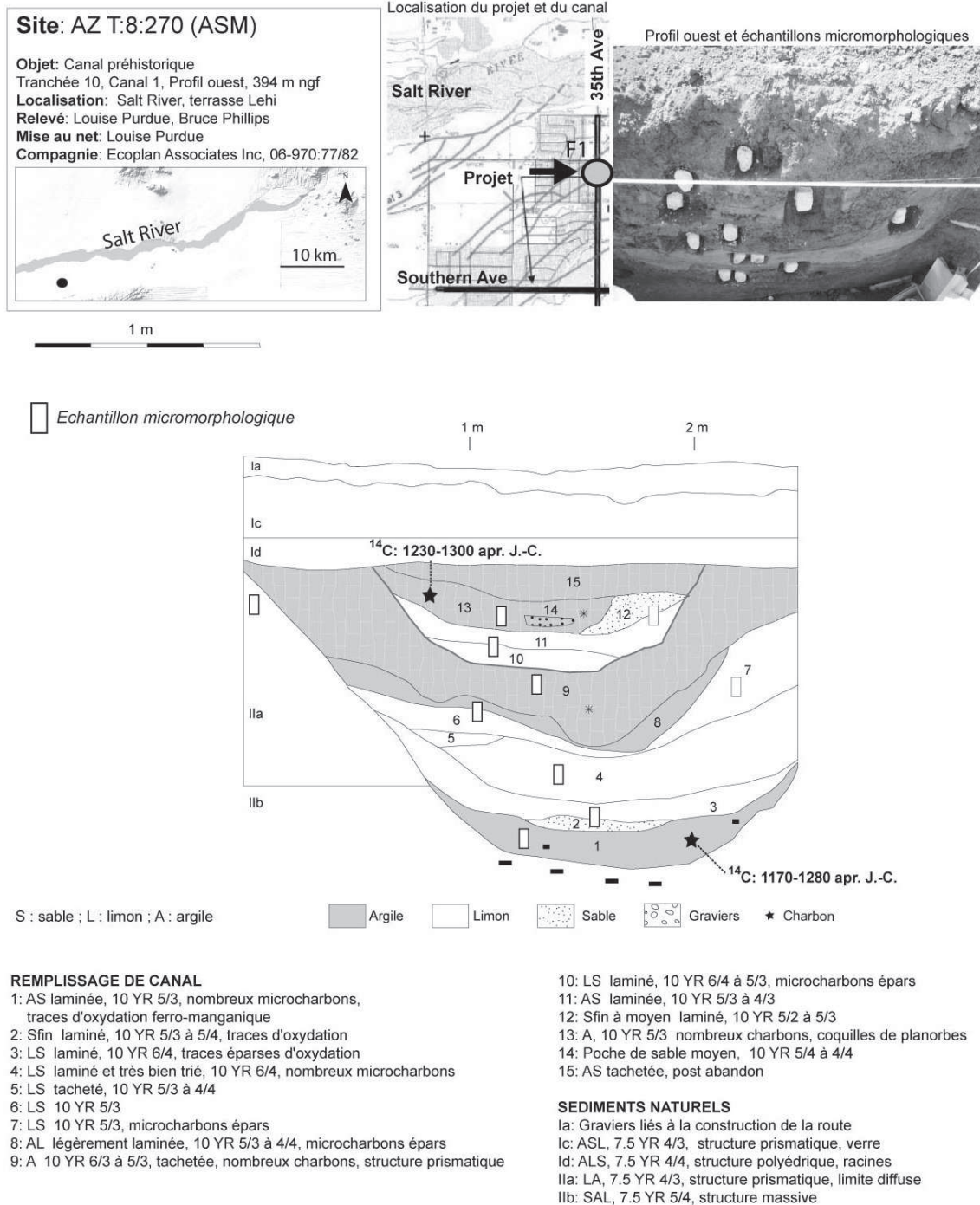


Fig. 100 : Stratigraphie et description du canal Az T : 8 :270 (ASM), projet Ecoplan, Salt River

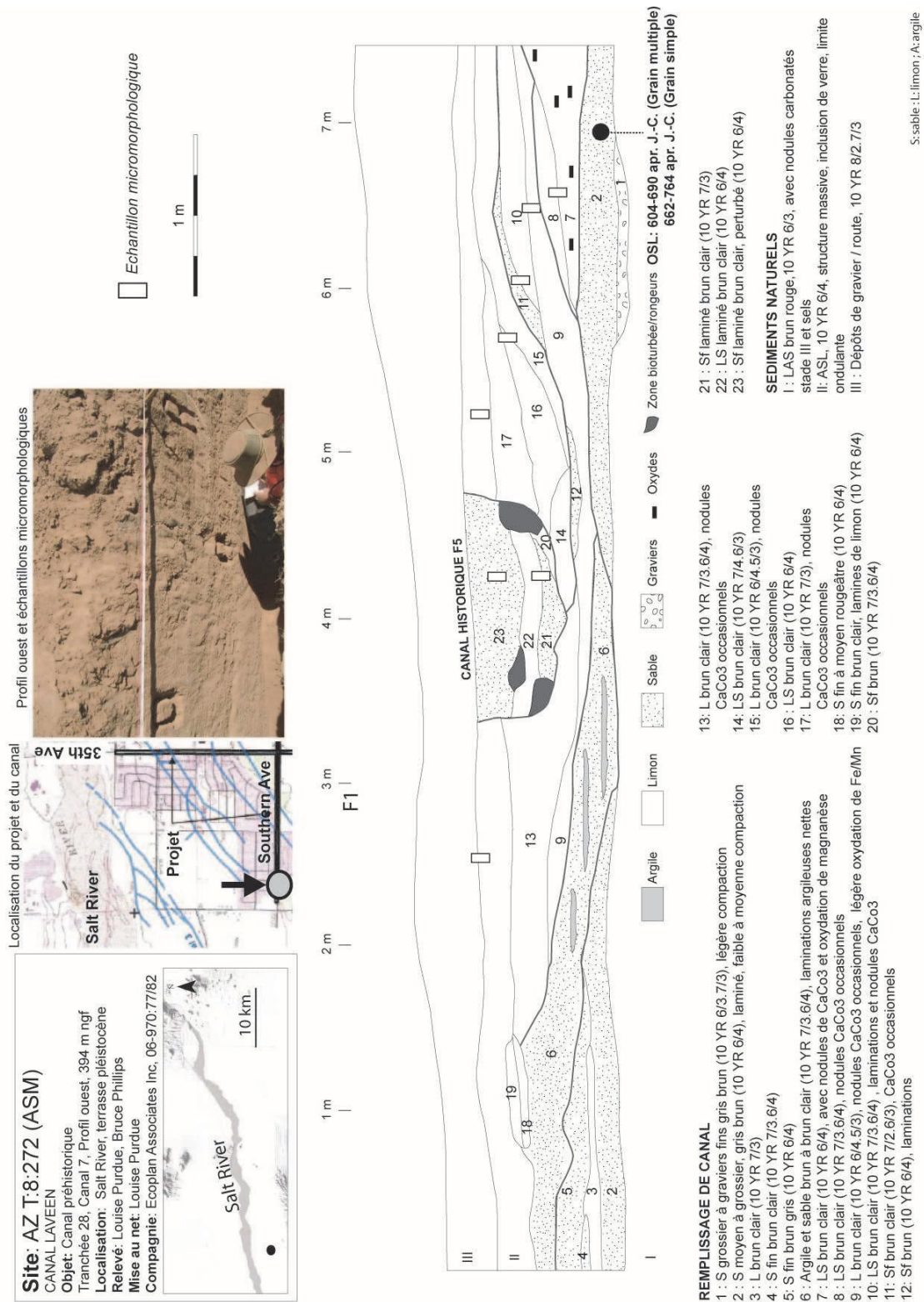


Fig. 101 : Stratigraphie et description du canal Az T :8 :272 (ASM), projet Ecoplan, Salt River

Les dates OSL à grains simples et multiples ont mis en évidence des décalages de presque 100 ans entre elles, et la comparaison entre les datations radiocarbones/OSL grain simple témoigne de décalages d'environ un siècle.

Canal	US	Radiocarbone	OSL
1	13	1230-1300 apr. J.-C.	1306-1354 apr. J.-C
			<i>1468-1514 apr. J.-C</i>
	1	1170-1280 apr. J.-C	1349-1401 apr. J.-C
			<i>1136-1260 apr. J.-C</i>
7	2		604-690 apr. J.-C
			<i>662-764 apr. J.-C</i>

Rq : Les dates photoniques en texte standard sont des dates OSL multigrains, les dates en italiques sont des dates OSL à grain simple

Tab. 14 : Comparaison des dates radiocarbones et OSL

Les variations observées peuvent être liées à l'effet vieux bois des échantillons radiocarbones (Schiffer, 1986) mais aussi à du déstockage sédimentaire et à la remobilisation de charbons. L'application de cette méthode aux canaux d'irrigation étant relativement récente, il est possible que ces erreurs soient inhérentes au protocole expérimental de la méthode OSL, et notamment à l'échantillonnage des échantillons dosimétriques référentiels.

1.4.1.4. La parcelle agricole (site de Vulcan)

La séquence étudiée mesure 2,8 m de hauteur et est composée de 13 unités stratigraphiques. Trois grandes phases ont été distinguées (Fig. 102).

La première (US 1-4) est composée de limons sableux à sables brun clair à structure massive. Ces dépôts contiennent quelques nodules carbonatés secondaires et des traces racinaires, mais la faible proportion de traits pédologiques témoigne d'un recouvrement rapide et de taux de sédimentation importants.

Cette dynamique évolue au cours de la seconde phase (US 5-12). Des limons bruns à structure prismatique et polyédrique ont été observés sur plus d'1m. Certaines US présentent une structure plus fine (US 8, 9, 12), contiennent de nombreux pseudomycéliums, carbonates secondaires et coquilles qui attestent d'une mise en surface plus longue. L'US 8 se distingue des autres par la présence de nombreux tessons en surface, mais également par les empreintes racinaires bien marquées sur les faces des polyèdres. L'échantillon radiocarbone prélevé dans cet US a été égaré au cours de l'analyse. L'échantillon radiocarbone prélevé dans l'US 10 a donné une date calibrée à un sigma comprise entre 650 et 764 apr. J.-C. Cette datation implique une période de stabilité au cours de la période Pionnière dans ce secteur.

La dynamique hydrosédimentaire s'intensifie au cours de la troisième phase (US 13-14) avec le dépôt de limons sableux. Leur microstructure et la présence de racines semble provenir de processus pédologiques actuels.

Douze échantillons ont été prélevés pour la micromorphologie et la susceptibilité magnétique. Deux échantillons palynologiques ont été prélevés dans les US 8 et 9, mais ces derniers se sont révélés stériles (Sébastien Guillon, communication personnelle).

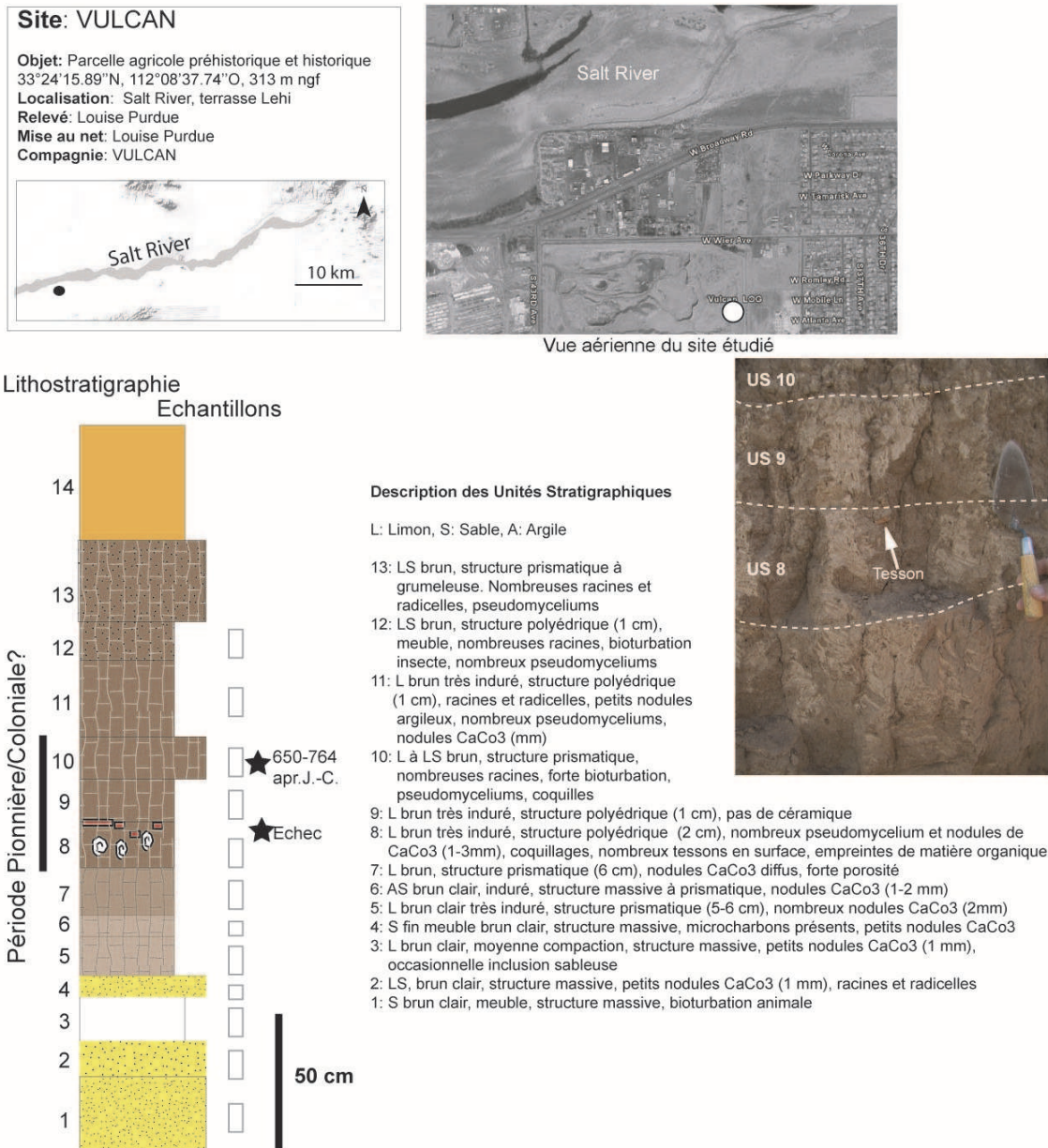


Fig. 102 : Chronostratigraphie de la séquence étudiée sur le site de Vulcan, terrasse Lehi, Salt River

1.4.2. Evolution de la plaine alluviale et rythmes de crues de la période Protohistorique à la période Historique

Afin de compléter l'information obtenue dans les remplissages de canaux, nous avons étudié un transect orienté est-ouest situé dans la ville de Tempe (1st Street), sur la terrasse holocène Lehi/T'1 (Fig. 103). Seule une date a été obtenue dans des sédiments pédogénéisés (US 8), qui datent de 1451 à 1640 apr. J.-C. (période Protohistorique). Le Log 1, situé à l'extrémité ouest de la tranchée, est composé à la base d'argile prismatique qui traduit un milieu humide de type cienega (US 1). Un épisode d'intensification des processus hydrologiques est ensuite observé (US 2) et est scellé par une nappe graveleuse de la Salt (US 3 et 4) qui traduit l'évolution morphologique et d'élargissement du cours d'eau.

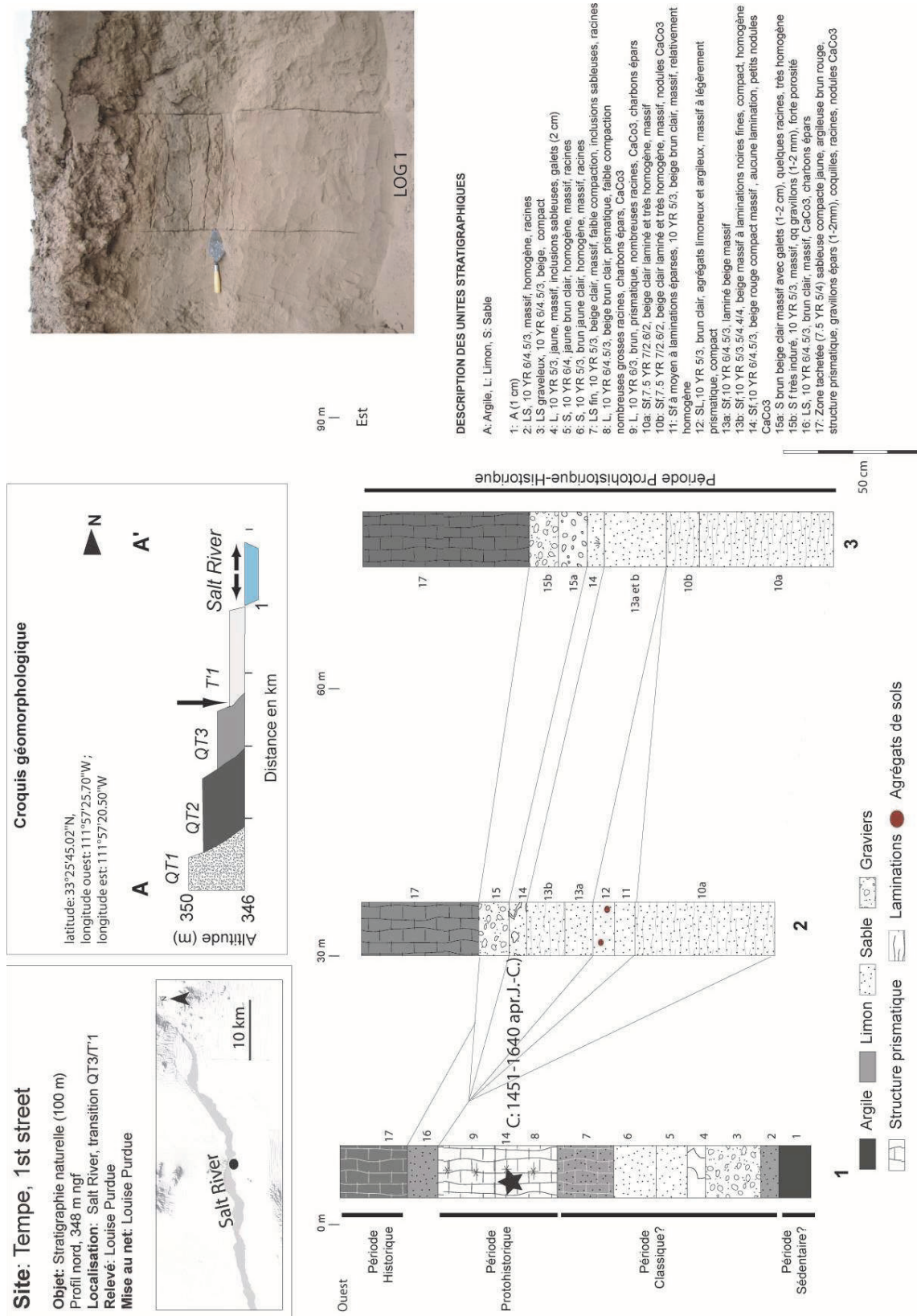


Fig. 103 : Stratigraphie naturelle des sédiments de la terrasse T1/Lehi, Tempe, Arizona

De texture sableuse, les sédiments sus-jacents (US 5, 6 et 7) indiquent une dynamique fluviale toujours intense, mais cette dernière se réduit et la plaine se stabilise enfin entre 1451 et 1640 apr. J.-C. (période Protohistorique). Le paléosol observé, de couleur brune, possède une structure prismatique, des racines et des charbons. Il est érodé par un chenal naturel de la Salt, probablement pris en écharpe, car sa largeur dépasse 40 m (**épisode 5**). Ce chenal, postérieur au milieu du XVII^{ème} s. est colmaté par des sables beiges à bruns souvent laminés et très homogènes, sans matériel datable.

1.4.3. *Conclusion partielle*

L'analyse chronostratigraphique de deux fossés, l'un construit au cours de la période Pionnière/Coloniale, l'autre au cours de la période Classique, ainsi que l'évolution des dépôts de la plaine alluviale (dépôts de débordements+paléosols) mis en place entre le 15^{ème} et le 19^{ème} s. nous a permis de restituer l'évolution de la rive sud de la Salt sur presque 1500 ans.

Le canal étudié et utilisé à partir de **600-750 apr. J.-C.** (période Pionnière/Coloniale) est colmaté par des sédiments grossiers laminés, de couleur brun clair, et à structure massive. Les lamines indiquent une sédimentation rythmée de forte compétence et à capacité érosive. Le canal est bien entretenu et curé. Une période de stabilité temporaire des paysages est observée dans la plaine, comme le suggère la succession de petits paléosols bruns sur le secteur de Vulcan. Ces sédiments superposent des sables éoliens qui traduisent la mise en place de dunes à une époque indéterminée.

Nous n'avons pas étudié de structures hydrauliques utilisées **entre 950 et 1150 apr. J.-C.** Toutefois, en s'appuyant sur la profondeur des dépôts alluviaux de cette période dans d'autres secteurs de la basse vallée de la Salt (environ 1m) sur la terrasse Lehi, ainsi que sur un environnement qui semble similaire, nous posons l'hypothèse que la base de la tranchée effectuée à Tempe 1st Street date de la période Sédentaire. Les dépôts argileux prismatiques témoignent de conditions humides, de type ciénega en bordure du cours d'eau. Ces conditions sont suivies par un élargissement du cours d'eau et une intensification des débits liquides et solides, qui pourraient correspondre à l'évolution morphologique enregistrée dans l'ensemble de la vallée.

Aucun dépôt n'a été identifié sur la terrasse Lehi **après 1150 apr. J.-C.**, ce qui témoigne d'une réduction des rythmes de crues. En revanche, plus à proximité du cours d'eau (terrasse T'1), des sables brun clair et massifs se déposent entre la période Sédentaire et la période Protohistorique. Le canal étudié est colmaté par des limons sableux et des sables laminés qui traduisent une sédimentation rythmée de forte compétence. Puis, des argiles à structure prismatique indiquent des écoulements réduits, et des phases d'assèchements temporaires.

Entre 1451-1640 apr. J.-C. (période Protohistorique) une stabilisation des plaines avec la mise en place d'un paléosol brun est observée. Ce fluviosol est de texture limoneuse, brun à brun clair, à structure prismatique. Il contient des racines, des charbons et des

nodules de carbonates secondaires qui témoignent du développement des processus pédologiques, avec la circulation latérale et verticale d'eau, suivie par son évaporation. Cette dynamique signe une réduction des crues dans le secteur de Tempe.

Après le 18^{ème} s. un exhaussement du lit de la rivière et une nouvelle évolution morphologique vers un probable système tressé recoupe les formations alluviales de la terrasse Lehi. La date exacte de ce changement n'est pas connue mais les premières cartes topographiques (début du 20^{ème} siècle) indiquent un lit majeur large qui érode les alluvions de la terrasse Lehi.

1.5. Le Canal System 12 (zone avale, rive nord)

1.5.1. *Etude des remplissages de canaux appartenant au CS12*

1.5.1.1. Présentation du site : Cashion Ruin AZ T : 11 :49 (ASM)

Le village Hohokam de Cashion (Turney, 1929) situé dans la ville actuelle d'Avondale (intersection 107th Avenue et Roeser Rd) à 30 km en aval de Phoenix a été fouillé par la compagnie Soil System Inc en 2004 puis 2007. Le projet, qui couvre 64 ha, est situé sur la limite de la terrasse pléistocène Sawik, à 5 km à l'est de l'Agua Fria et à moins de 2 km au nord de la Salt (Fig. 104).

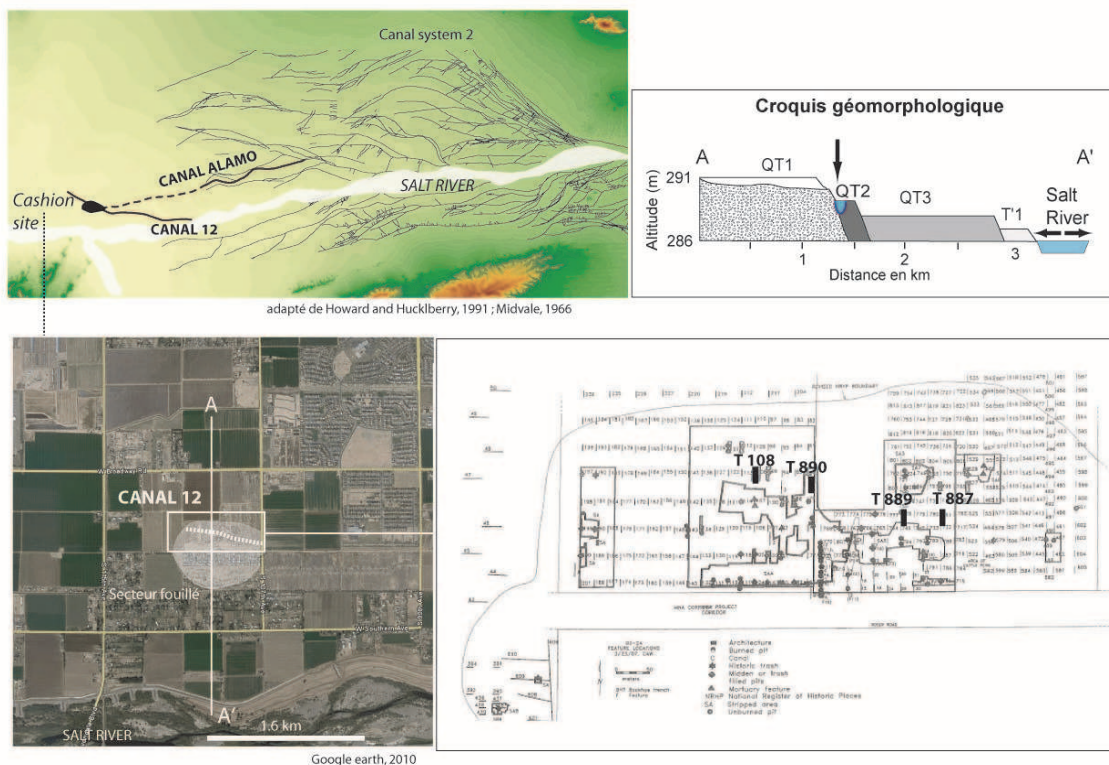


Fig. 104 : Localisation du site de Cashion et du Canal System 12

En surface, des alluvions pédogénéisés argileux et fortement carbonatés appartiennent à la formation Toltec Loam (présence d'un duripan de type silcrète/calcrète à faible profondeur). Des sables et limons graveleux ainsi que quelques chenaux ont également été observés dans la partie centrale du site. Ils résultent de l'activité d'un complexe de cônes détritiques holocènes en provenance du cours d'eau intermittent Cave au nord-est (Nials et Fish, 1988 d'après Huckleberry, communication personnelle), actif sous l'effet des pluies de mousson. Les formations pédologiques résultantes sont des Gilman Loam (Fluviosol) et des Laveen Loam (Calcosol-Calcarisol) (Référentiel pédologique, 2008). Enfin, les terrasses Lehi et Mesa entourent le site au sud et à l'ouest.

1.5.1.2. Contexte archéologique et problématiques

Le village de Cashion est occupé de la période Pionnière à la fin de la période Sédentaire (Chenault, 2006) (Fig. 105a). Lors de la fouille de 2007, un grand nombre de maisons en fosses ont été dégagées, de même que des hornos (fours), des fosses, et quelques tombes isolées (Fig. 105b et c). Des travaux plus anciens ont révélé une forte concentration de restes humains crématisés (McKeown, 2006) associés à presque 800 objets funéraires, 325 poteries et une centaine de bijoux dont certains sont des coquillages (Nelson, 1991). Il semblerait que cette crémation soit de type primaire, ce qui est unique dans la basse vallée de la Salt et témoigne d'une indépendance culturelle entre l'amont et la périphérie ouest (Mitchell et al., 2004).

Le village de Cashion est alimenté par le Canal 12 (Turney, 1929), invisible en photo aérienne, sous l'effet probable du nivelage récent des terres (Fig. 105). Ce canal se situe en aval de tous les autres systèmes d'irrigation de la vallée de la Salt et cette localisation lui donne plusieurs désavantages, notamment au niveau de la quantité d'eau disponible et dérivable. L'étude de son remplissage devrait donc nous permettre d'évaluer la quantité d'eau disponible et d'extrapoler sur les modèles de distribution de l'eau.

1.5.1.3. Description, stratigraphie et échantillonnage

Mis en évidence à une profondeur de 2.5 m, le canal 12 est très bien conservé (Fig. 105e). Son remplissage témoigne d'une succession d'épisodes d'écoulement, d'abandon et de glissements de buttes facilement datables grâce à la richesse en matériel organique carbonisé. Quatre tranchées d'axe nord-sud espacées d'environ 100 m (ont été réalisées et ont mis en évidence un alignement est-ouest pour ce canal. Les trois tranchées les plus à l'ouest ont également révélé la présence d'un canal superposé au canal 12

Fig. 104 d). L'observation de la carte des réseaux d'irrigation de Midvale (1966) révèle (en pointillé) une possible connexion entre le canal Alamo appartenant au Canal System 2 et le site de Cashion (Fig. 104).

La tranchée T 890 contient 3 canaux d'irrigation distincts (Fig. 107). Le premier canal est creusé dans des limons sableux oxydés qui correspondent au remplissage d'un ancien chenal. Les sédiments sont sableux et laminés à la base (US 1 à 8) très riches en charbons, puis colmatés par d'épais sédiments « colluviaux » (US 11-15) observés dans toutes les tranchées. Le second canal (US 16 à 22) est composé de sédiments limono-sableux à sableux très finement laminés, puis colmaté par des sédiments sableux (US 23) qui contiennent quelques artefacts (tessons) et nodules carbonatés.

Ces sables sont ensuite couverts par de nouveaux dépôts « colluviaux » (US 25 à 25) au sommet desquels le troisième canal a été creusé (US 36 à 44). Son remplissage est également composé de sable très finement laminé.

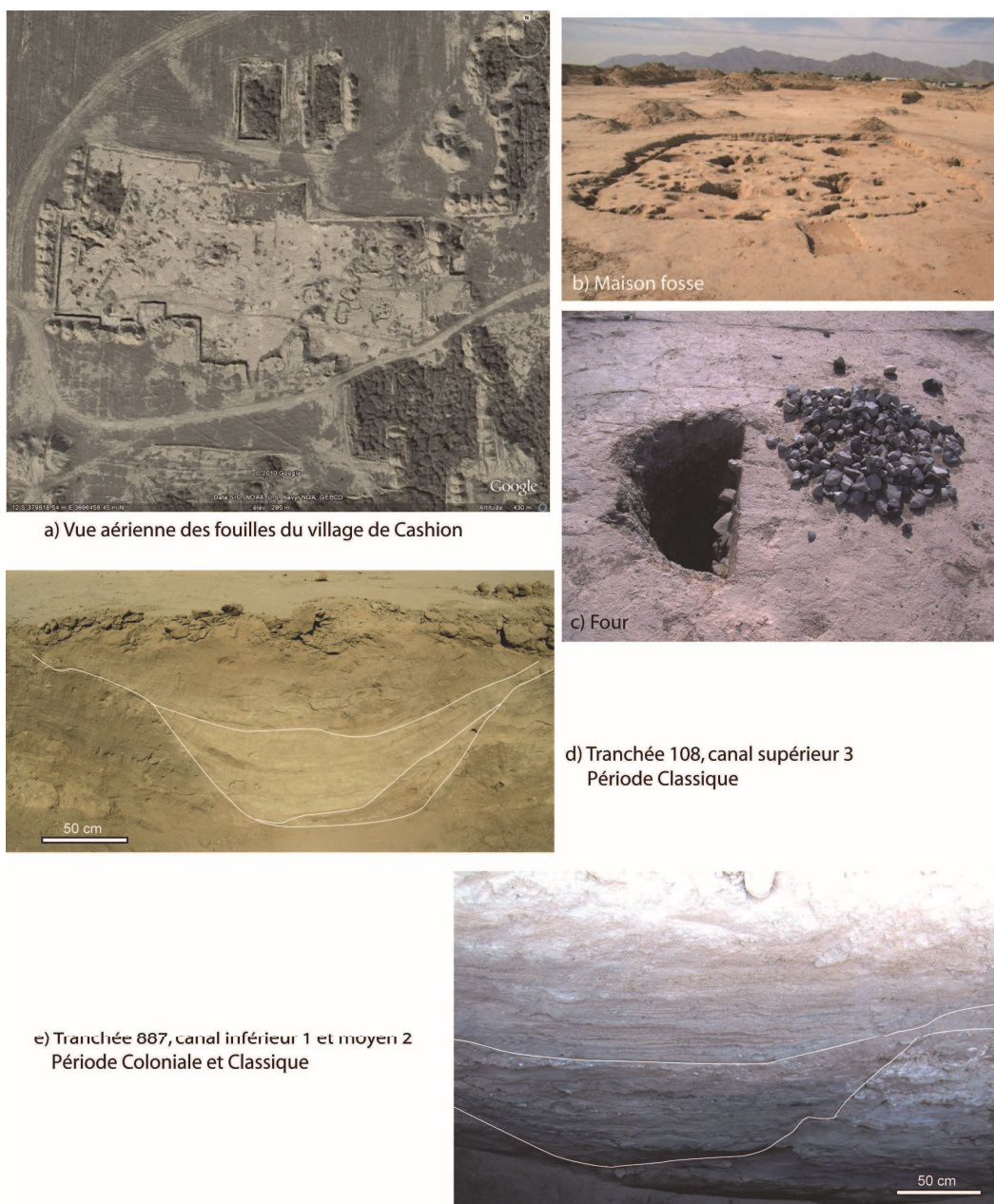


Fig. 105 : Vue aérienne du village de Cashion et photographies de terrain

Dans la tranchée T 887 (Fig. 108) deux canaux ont été mis au jour. Les dynamiques enregistrées sont similaires à celles observées dans la T 890 (dépôts limono-sableux à sableux laminés à la base, US 1-17) mais la séquence est nettement plus dilatée et a mis en évidence deux possibles curages dans le premier canal. Ce dernier est colmaté par des rejets/effondrement de berge (US 23 à 28). Le second canal y est creusé (US 33-35), et est colmaté par des sédiments sableux.

Dans T 890, 13 échantillons micromorphologiques ont été prélevés, dont un a été égaré au cours du transport. En complément, trois échantillons ont été envoyés au Centre de Datation par le Radiocarbonate de l'Université Lyon 1 (US 8, 16 et 38).

Dans la tranchée T 887, 14 échantillons micromorphologiques ont également été échantillonnés, dont un a été égaré. En complément, des échantillons bruts de sédiments ont été prélevés dans les tranchées 887 et 890 pour des analyses magnétiques. De nombreux autres échantillons ont été prélevés pour des analyses complémentaires, mais n'ont pas été analysés à ce jour faute de budget.

1.5.1.4. Cadre chronostratigraphique

Le premier canal est utilisé au cours de la période Coloniale (US 8: 783-984 apr. J.-C.), le second au début de la période Classique (Lyon 5055, US 16 : 1159-1262 apr. J.-C.), et le dernier au cours de la période Classique-Soho (Lyon 5056, US 38 : 1215-1278 apr. J.-C.) (Fig. 106). Deux phases d'abandon sont donc enregistrées : l'une au cours de la période Sédentaire et la seconde, de plus courte durée, au cours de la période Classique.

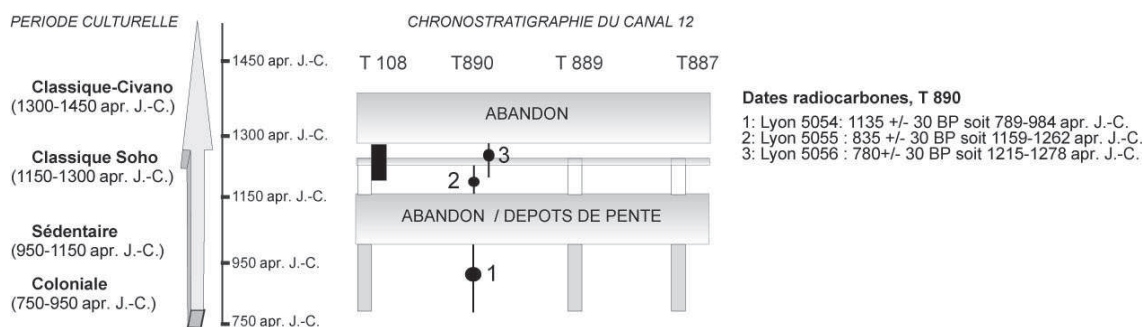


Fig. 106 : Chronostratigraphie des canaux du site de Cashion. Les barres verticales grises, blanches et noires correspondent à l'intervalle d'utilisation des canaux.

1.5.2. Conclusion partielle

Le Canal System 12 est composé d'un canal construit au cours de la période Coloniale (783-984 apr. J.-C.) et colmaté par des limons sableux laminés charbonneux, qui indiquent une sédimentation rythmée. Ce premier canal est abandonné, peut être à la fin de la période Sédentaire, puis creusé à nouveau au cours de la période Classique Soho (1159-1262 apr. J.-C.). Les dépôts qui le colmatent sont limono-sableux et laminés, ce qui témoigne d'une sédimentation toujours rythmée. Ce second canal est abandonné à la fin de cette période et une nouvelle structure est rapidement creusée (1215-1278 apr. J.-C.). Elle correspond au prolongement d'un canal appartenant au Canal System 2. Les facies laminés traduisent un dépôt toujours rythmé.

La sédimentation rythmée observée dans les trois structures hydrauliques traduit un contrôle efficace de l'arrivée d'eau, malgré la position très en aval du Canal System 12. Le canal ne semble pas affecté par les crues, bien qu'il soit abandonné au cours de la période Sédentaire, au cours de laquelle des périodes de crues ont été identifiées. Il est ensuite connecté au Canal System 2 au cours de la période Classique, ce qui pourrait traduire des difficultés dans la dérivation de l'eau en aval.

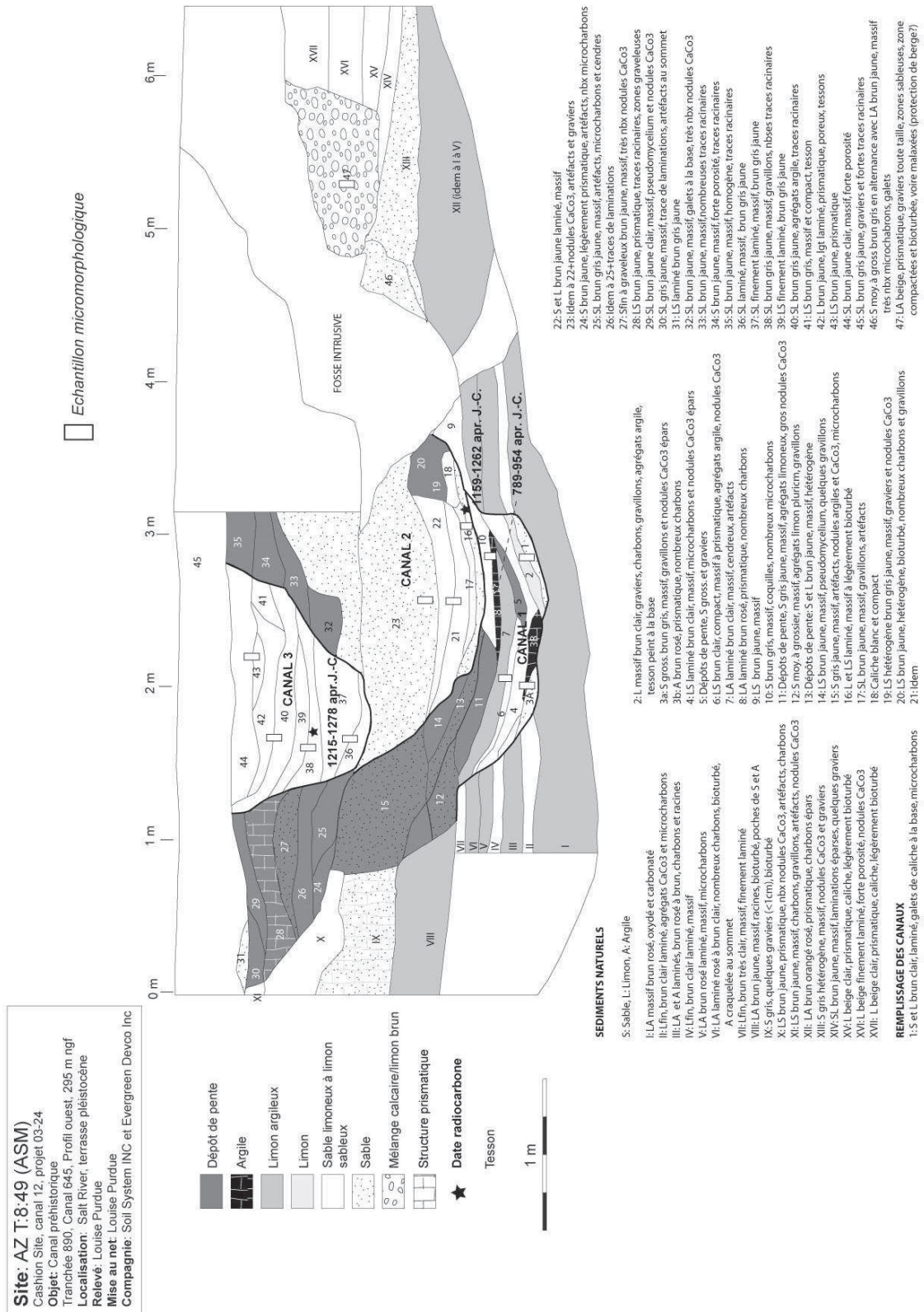


Fig. 107 : Stratigraphie du canal 12, Cashion Site, T 890

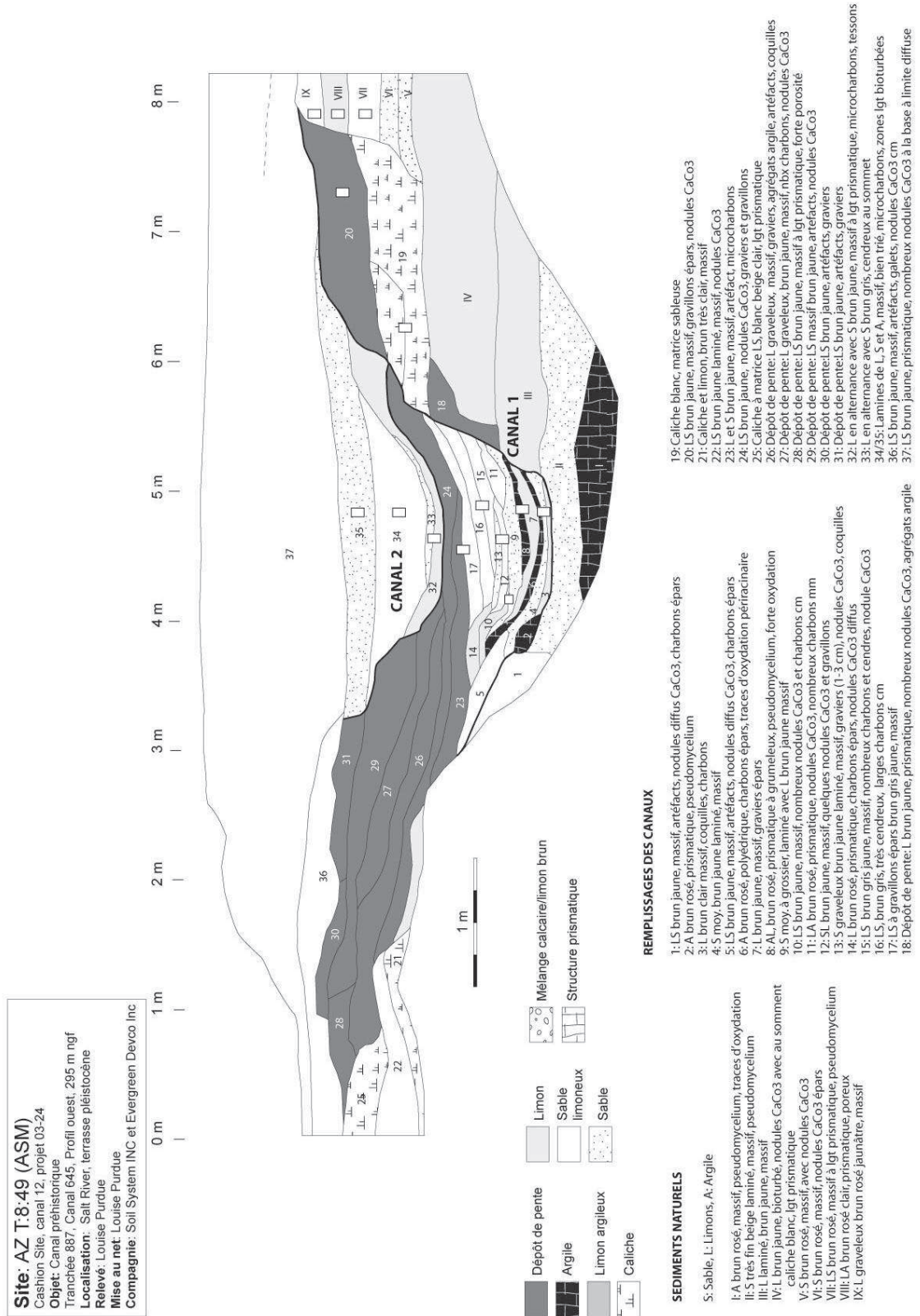


Fig. 108 : Stratigraphie du canal 12, Cashion Site, T 887

1.6. Conclusion et premières interprétations diachroniques sur les dynamiques morphogéniques et le fonctionnement des réseaux hydrauliques

1.6.1. Répartition des datations radiocarbone et construction du phasage pédosédimentaire

La construction du phasage pédosédimentaire final repose sur un corpus de 28 datations ^{14}C AMS et 1 date OSL qui s'échelonnent entre le 6^{ème} et le 20^{ème} siècle de notre ère. Ces dernières sont représentées en dates calibrées dans la Fig. 109. L'intervalle de confiance et les intervalles à 95% et 68% sont représentés. La répartition de ces dates est relativement homogène. Les courbes en gris clair (remplissages de canaux) sont réparties entre 800 et 1400 apr. J.-C., ce qui est cohérent avec l'occupation Hohokam de la vallée. Un hiatus est observé autour de 1000 et 1150 apr. J.-C.. Ceci peut être imputable au nombre réduit de dates.

La répartition chronologique des sédiments du lit majeur de la Salt a une signification morphogénique plus précise. Les hiatus observés entre 800 et 1000 apr. J.-C., 1200 et 1300 apr. J.-C. et autour de 1400-1450 apr. J.-C. résultent d'une réduction de l'accrétion sédimentaire dans la plaine. A l'opposé, entre 1000 et 1050 apr. J.-C., puis de 1300 apr. J.-C. aux périodes historiques, la sédimentation semble très active.

Des limites sont à prendre en compte dans la construction de ce premier phasage. Dans les canaux, la présence de gaps sédimentaires liés au curage ne permet pas une reconstruction continue, mais plutôt par tendance. Par ailleurs, le début du remplissage de certains canaux n'a pu être qu'estimée d'après des corrélations chronostratigraphiques.

Dans les formations alluviales, les variations observées dans les facies sédimentaires peuvent être le résultat de la localisation géographique et géomorphologique des échantillons. Par ailleurs, la base d'aucune séquence stratigraphique sur les terrasses T'1, Lehi et Mesa n'a pu être datée. Afin d'estimer la date de mise en place des dépôts observés dans le lit majeur de la Salt, les taux de sédimentation ont été estimés pour les séquences SRMG log 4, 6 en utilisant le logiciel Oxcal. Des limites liées au développement de paléosols, qui résultent d'une diminution des taux de sédimentation, ont été intégrées dans ces modèles.

Il est difficile de discuter de la répartition spatiale des dates, qui peut nous donner des informations sur le transfert amont-aval des sédiments. Il est intéressant d'observer que la majeure partie des dépôts datés du 15^{ème} au 19^{ème} s. (périodes Protohistorique et Historique) sont situés dans la partie amont du secteur étudié. Il est possible que l'occurrence de ces sédiments dans la partie amont de la basse vallée résulte d'une évacuation limitée des sédiments en aval au cours de cette période.

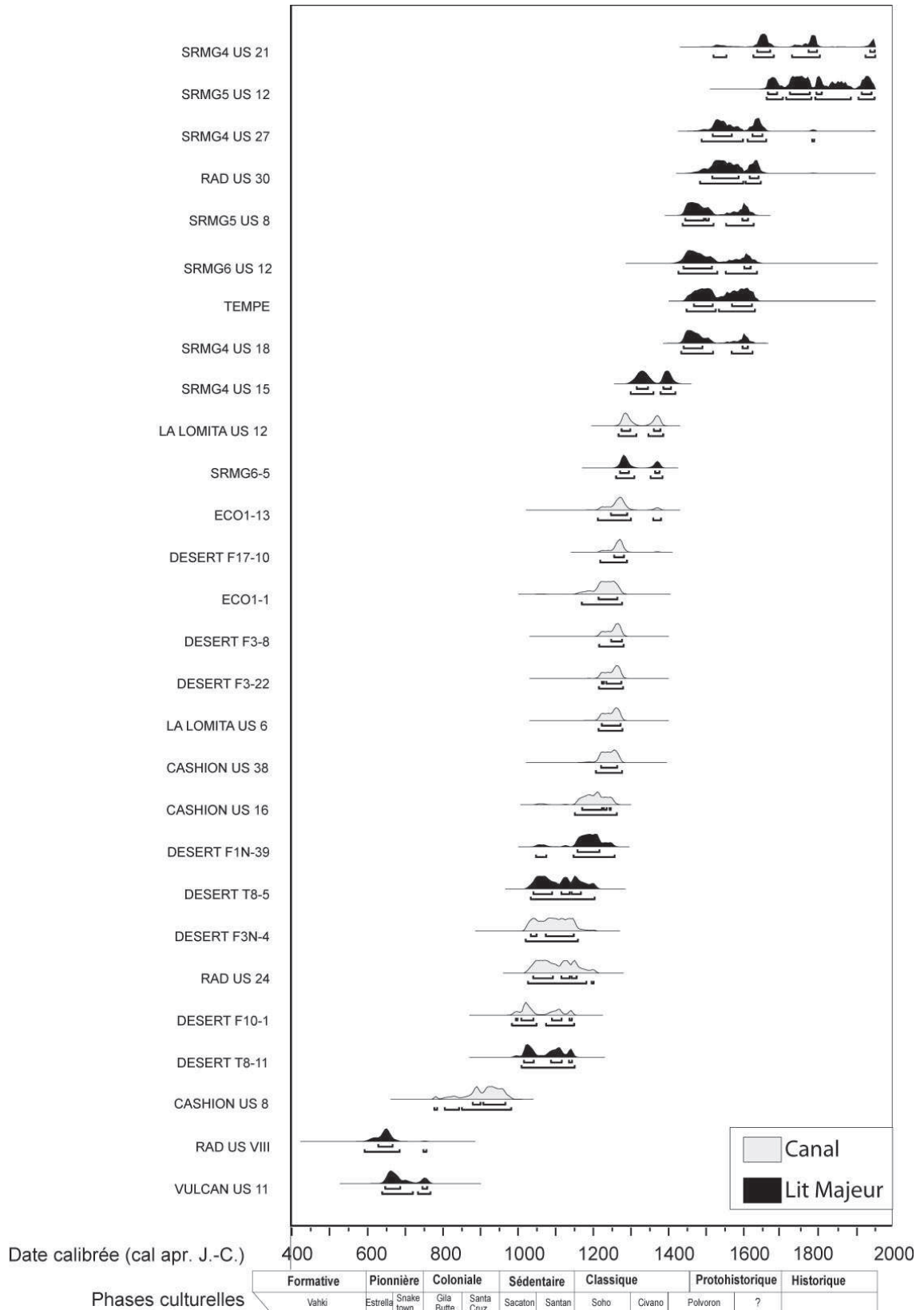


Fig. 109 : Représentation graphique des 28 dates radiocarbones obtenues dans les canaux et les sédiments du lit majeur de la Salt.

1.6.2. *Organisation et formation des unités morphogéniques*

1.6.2.1. **Formations des terrasses alluviales**

Les épisodes d'incision ne sont pas datables directement mais la datation des dépôts sommitaux d'une unité morphologique et de la base des nouveaux dépôts permet de caler chronologiquement ces épisodes. Deux épisodes d'incision sont observés.

Le début de l'accrétion sédimentaire sur la terrasse Lehi n'est pas connu, mais l'exhaussement de la plaine est attesté de la période Pionnière jusqu'à la date la plus probable 1070-1150 apr. J.-C. (Fig. 110).

Une **première incision** est alors observée comme le suggère l'arrêt de la sédimentation sur cette terrasse et ce jusqu'aux périodes historiques. La profondeur de l'incision n'est pas connue, mais sa durée semble courte. En effet, l'accrétion sédimentaire est à nouveau attestée dès le 13^{ème} siècle sur une nouvelle terrasse et se poursuit jusqu'aux périodes historiques.

De nombreuses divergences existent entre les hypothèses géomorphologiques et archéologiques. Les archéologues considèrent un unique ensemble composé de la terrasse Lehi ou T1. Les géomorphologues, à l'opposé, soupçonnent son existence car la Salt est un affluent de la Gila River. La morphogénèse du bassin de la Salt serait donc similaire à celle du bassin de la Gila, la terrasse Lehi regroupant la terrasse T2 et une terrasse holocène plus récente, la terrasse T1. Afin d'éviter toute confusion, nous donnerons le nom de terrasse T'1 à cette formation.

Une **seconde incision** est observée au cours des périodes historiques. En effet, le lit actuel de la Salt est situé à environ 2 m en contrebas de la terrasse T'1. La sédimentation en amont de la basse vallée de la Salt semble s'arrêter à la fin du 17^{ème} siècle mais le plancher alluvial de la Salt s'élève dans la partie centrale de la vallée comme le montre la reprise des inondations sur la terrasse Lehi à cette période. L'hypothèse d'une incision limitée à la partie amont du bassin versant est proposée.

1.6.2.2. **Occurrence des paléosols, évolutions morphologiques**

Un **premier paléosol** cumulique de texture limoneuse se développe au cours de la période Formative Vahki / Pionnière Estrella, entre 611-675 apr. J.-C. sur le site RAD et entre 650-764 apr. J.-C. sur le site de Vulcan. Dans l'ensemble il semble pertinent de proposer l'hypothèse d'une phase de stabilité paysagère temporaire au cours de la période Pionnière associée à une réduction des crues et au développement de l'irrigation dans la partie centrale de la vallée.

Le **second paléosol** se met en place après le 8^{ème} s. apr. J.-C. (fin de la période Coloniale), et se développe jusqu'au 11^{ème} siècle (période Sédentaire) (Fig. 110). Les traits pédologiques sont discrets et l'épaisseur des dépôts pédogénésés est variable selon la position géomorphologique (plaine distale et proximale). La bioturbation efface partiellement un granoclassement syn-sédimentaire.

Une phase d'évolution morphologique (Fig. 110) et de recrudescence des crues est observée au 11^{ème} s. Les dépôts sont composés de limons et de sables faiblement triés. Cette dynamique met fin à la phase de pédogénèse dans la plaine proximale de la Salt. Sur la rive nord, quatre périodes de crues entre 1030 et 1060 apr. J.-C. sont enregistrées, déposant plus de 50 cm de sédiments dans la plaine d'inondation. La puissance sédimentaire pose l'hypothèse de crues centennales récurrentes à forte capacité destructrice, et non plus de crues annuelles. Sur la rive sud (RAD), un chenal érodant les canaux est rapidement colmaté et enterré sous d'épais limons alluviaux au cours du 11^{ème} s. Ces derniers soulignent des variations latérales importantes d'un système à chenaux multiples ainsi qu'une aggradation rapide de la plaine. A Tempe et SRMG Log 6, la présence des limons graveleux et galets qui composent le lit fossile de la Salt confirment l'élargissement du cours d'eau. Ces sédiments grossiers témoignent d'une augmentation du transport par charriage qui traduit alors l'augmentation des apports sédimentaires.

Après l'incision qui fait suite à cette recrudescence des crues, une dynamique à chenaux multiples se poursuit entre le 12/13^{ème} et le 15^{ème} s. (période Classique Soho et Civano). Les chenaux sont colmatés rapidement. Ce processus témoigne d'une reprise de l'exhaussement du plancher alluvial, d'une accrétion toujours active sous forme de crues éclair et d'une variabilité latérale importante des chenaux à la fin du 13^{ème} siècle. Un gap sédimentaire est observé sur la terrasse Lehi.

Un dernier paléosol a été identifié dans l'ensemble de la vallée. De texture argilo-sableuse, son épaisseur fluctue de 15 cm à 30 cm, voire 50 cm en fonction de la localisation du site étudié. Il s'est développé entre 1450 et 1620 apr. J.-C., avec une plus grande probabilité autour du XV^{ème} s., soit à la fin de l'occupation Hohokam. Ce paléosol est de type cumulique, comme celui de la période Sédentaire. Il traduit une stabilité temporaire de la plaine suite à 1) un retour à des conditions hydrologiques plus stables (style à méandres avec des débits liquides supérieurs aux débits solides impliquant un encaissement du lit mineur), 2) une déprise agricole et la reconquête de la ripisylve dans la plaine.

Une reprise de l'exhaussement de la plaine est observée entre 1600/1650 à 1700 apr. J.-C. Presque 1 m de limons sableux se déposent dans le lit majeur de la Salt. Nous posons l'hypothèse que la période de stabilité au cours du XV^{ème} s. a limité le transit amont-aval des sédiments et a indirectement augmenté le stock des sédiments disponibles et érodables. Après 1700 apr. J.-C., le plancher alluvial se stabilise. Puis une phase d'évolution morphologique est observée sur le site de Tempe au cours du 19^{ème} s.

1.6.3. *Paléodynamique fluviale identifiée dans les remplissages de canaux*

Dépendant du fonctionnement et des dynamiques de l'hydrosystème, les Hohokam ont construit des canaux d'irrigation sur l'ensemble des unités morphogéniques de la basse vallée de la Salt. L'analyse géoarchéologique des fossés étudiés a permis d'identifier 5 phases chronostratigraphiques qui peuvent être corrélées à l'intensité de l'exploitation agricole qui s'exprime par la construction de structures hydrauliques (Fig. 111).

Pour cela, nous avons cumulé les dates obtenues dans ce travail avec celles des canaux bien datés qui composent notre catalogue (ex : projets Sky Harbor, Lehi-Mesa, Tempe, La Ciudad, Hohokam Expressway Project), soit un total de 83 dates.

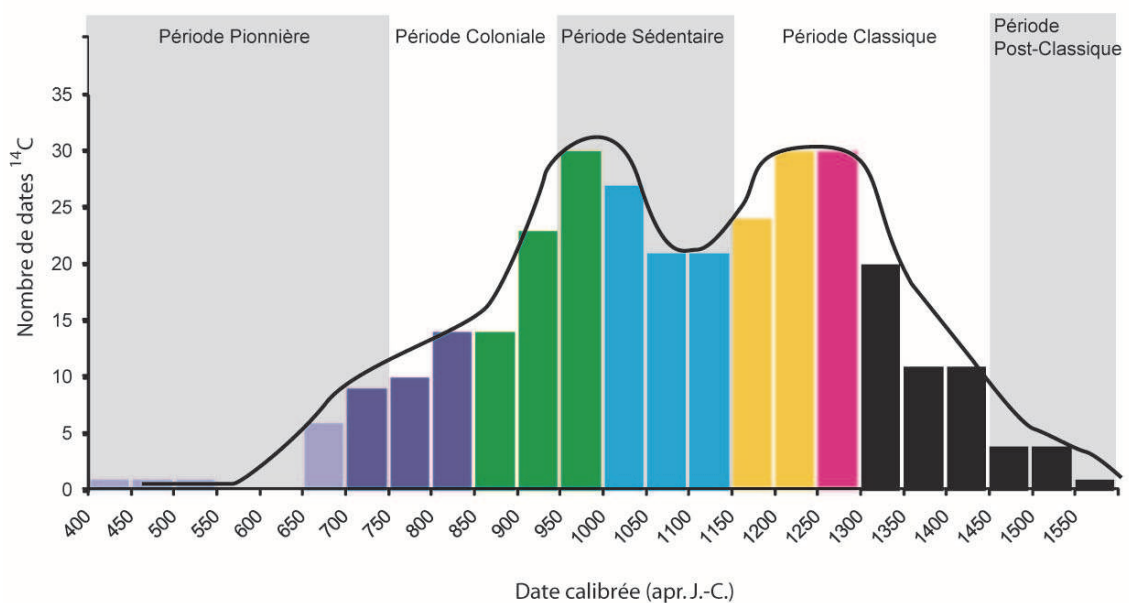


Diagramme cumulé des 83 dates ¹⁴C et typochronologiques obtenues dans les canaux d'irrigation. Les données sont issues des projets de fouille préventive synthétisés dans ce travail et des dates ARTEMIS obtenues entre 2007 et 2010. Le cumul des dates est effectué par demi-siècle. Ex: Une date de 900 et 1000 apr. J.-C. sera affectée de la valeur 1 entre 900 et 950, 1 entre 950 et 1000.

Fig. 111 : Diagramme cumulé de 83 dates obtenues dans le remplissage de 70 structures hydrauliques dans la basse vallée de la Salt.

La première phase identifiée dans les canaux s'étend de 650 à 850 apr. J.-C. et correspond culturellement aux périodes Pionnière et début Coloniale. De nombreux canaux sont construits dans la plaine alluviale et sont colmatés, le long du Canal System 1 et du Scottsdale System, par des limons sableux en alternance avec des sables grossiers à stratifications entrecroisées qui traduisent une dynamique hydrique de très forte compétence. Plus en aval, le long du CS2, des sables à limons sableux massifs ont également été identifiés et colmatent certaines des structures hydrauliques. L'ensemble témoigne de flux longitudinaux importants, d'une dynamique hydrique de forte intensité, avec $Ql > Qs$.

La seconde phase, de 850 à 1030 apr. J.-C., correspond à la période Coloniale et au début de la période Sédentaire. La construction des canaux augmente de façon exponentielle et l'on assiste à une première phase d'anthropisation maximale de la basse vallée (augmentation du nombre de villages, mise en place des réseaux de commerce et d'échange, etc.). Des sédiments laminés grossiers sont observés dans l'ensemble des structures hydrauliques. La dynamique s'homogénéise au début de la période Sédentaire avec la sédimentation de limons sablo-argileux granoclassés puis de limons argileux. Cette dynamique a été identifiée dans l'ensemble des structures hydrauliques de la basse vallée de la Salt.

La troisième phase correspond à une évolution très nette des dynamiques hydrosédimentaires entre 1030 et 1150 apr. J.-C., avec l'abandon de nombreuses structures hydrauliques. Cet épisode correspond à un véritable phénomène de rupture dans la gestion de l'eau et marque la transition vers la période Classique. Des sables colmatent les canaux des systèmes 1, 2 et Scottsdale, qui sont alors abandonnés. De nouveaux canaux de petite taille sont construits dans la plaine (1029-1209 apr. J.-C., site RAD), mais ces derniers sont rapidement colmatés par des sables grossiers. Sur la rive nord de la Salt, une activité locale torrentielle associée à des ravinements en provenance des Papago Buttes et des cônes détritiques du cours d'eau intermittent Cave détruisent et colmatent des canaux. En aval, le Canal System 12 est abandonné et colmaté par des dépôts domestiques et/ou de pente. Un gap sédimentaire est ensuite observé jusqu'à 1150 apr. J.-C.

La quatrième phase, de 1150 apr. J.-C. à environ 1250 apr. J.-C., correspond à la fin de la période Sédentaire/début de la période Classique. De nombreux nouveaux canaux sont construits au cours de cette période et sont colmatés par des limons argileux laminés. Cette dynamique est observée à l'échelle de la basse vallée (Canal System 1, 2, Scottsdale). Les processus de ravinement dominant toujours sur la rive nord et détruisent de nombreuses structures hydrauliques. Or cette phase fait suite à l'évolution morphologique et à l'incision de l'hydrosystème à la fin de la période Sédentaire. Malgré cela, les canaux semblent alimentés de façon régulière, excepté dans certains secteurs où le degré de bioturbation dans les sédiments indique des écoulements réduits. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette dynamique :

- 1) L'incision peu profonde est suivie par un remplissage rapide du chenal principal, puis une reprise de l'exhaussement de la plaine alluviale, associée à une alimentation en eau régulière dans les canaux. Cette hypothèse est difficilement valide sans supposer une remontée des prises d'eau. En effet, l'élargissement et l'incision du chenal principal traduit le besoin de construire de nouvelles vannes d'entrée et de dérivation d'eau en amont des zones exploitées, trop basses topographiquement pour pouvoir dériver de l'eau. Il est possible de suggérer la construction d'une nouvelle prise d'eau pour les systèmes plus en amont afin de modifier le profil en long des canaux. Dans les zones en aval, comme le site de Cashion, l'alignement des canaux évolue avec leur rattachement à des structures existantes et pour lesquelles la prise d'eau se situe plus en amont. Un nouveau système d'irrigation, le Lehi System, est construit en amont sur la terrasse Mesa, protégée des crues.

2) Les facies laminés indiquent des épisodes de crues-décrués bien marqués. En supposant une reconstruction des vannes d'entrée au même endroit au cours de la période Classique, nous posons l'hypothèse d'une alimentation en eau uniquement au cours de crues saisonnières lorsque le niveau de l'eau est assez élevé dans le chenal principal. Pendant les périodes d'hydrologie réduite, le cours d'eau incisé présenterait alors une configuration à méandres dans un système en tresse (système *Channel into Channel* – cf. partie I, Chapitre 1), et seuls quelques secteurs agricoles seraient alors alimentés de façon plus ou moins permanente (très en amont, avec des barrages de dérivations mobiles).

Pour les autres sites, seule une diversification des ressources et des pratiques agraires a pu permettre aux communautés humaines de s'adapter. Il est alors possible de poser l'hypothèse d'une tentative de dérivation volontaire des eaux de ruissellement sur la rive nord de la Salt (cf sites de La Lomita et Desert Archaeology), dont l'efficacité serait réduite et liée au régime des pluies.

La cinquième phase correspond à un intervalle chronologique entre 1250 et 1350 apr. J.-C., soit la fin de la période Classique Soho. La construction de structures hydrauliques semble se poursuivre malgré l'abandon presque exponentiel des canaux. Peut-être entre 1250 et 1300 apr. J.-C., les canaux sont colmatés par des limons sableux laminés en alternance avec des sédiments grossiers faiblement triés. Dans les structures hydrauliques utilisées jusqu'à 1350 apr. J.-C. cette dynamique hydrosédimentaire est suivie par la sédimentation de sables et d'argiles.

En parallèle à cette phase, une dynamique différente a été identifiée dans d'autres canaux contemporains (entre 1220 et 1300 apr. J.-C.). Il s'agit de la phase finale de fonctionnement des canaux, associée à leur eutrophisation progressive. Les argiles à structure prismatique dominant dans les remplissages. Les canaux qui présentent ce facies appartiennent au CS2 et au CS7 (projet La Lomita, Desert Archaeology et Ecoplan) et sont situés dans la plaine et sur les terrasses. Le manque de données ne permet pas de distinguer des zones préférentielles d'abandon. L'eutrophisation des canaux semble toutefois indépendante de la position amont/aval des systèmes dans les unités de paysage. Les structures sont probablement abandonnées de façon aléatoire au sein des différents systèmes agricoles.

Par ailleurs, l'aggradation de la plaine, observée au cours de cette période, indique des conditions humides et la possibilité d'une dérivation d'eau. Par conséquent, l'abandon des canaux ne semble pas être imputable à des conditions hydrologiques, bien que le système en tresse prévalant dans la plaine ait peut-être détruit régulièrement les vannes d'entrée des systèmes.

2. Le Bassin de la Gila River

2.1. Casa Blanca System (zone centrale, rive sud)

2.1.1. Le Casa Blanca to Sacaton Fiber Road Project

2.1.1.1. Cadre géographique et géomorphologique

Ce projet commandité par la Gila River Telecommunications, Inc., dans le but d'installer des câbles de télécommunication à fibres optiques, a été conduit en collaboration avec la Gila River Indian Community en juin 2007. La zone étudiée est située sur la Casa Blanca Road, dans le district 5. Le projet s'étend sur 14,6 km sur la rive sud de la Gila (Fig. 112). Les sites et canaux identifiés au cours de ce projet sont situés sur la terrasse holocène T2 ainsi que sur la partie distale d'un cône détritique holocène en provenance des Sacaton Mountains.

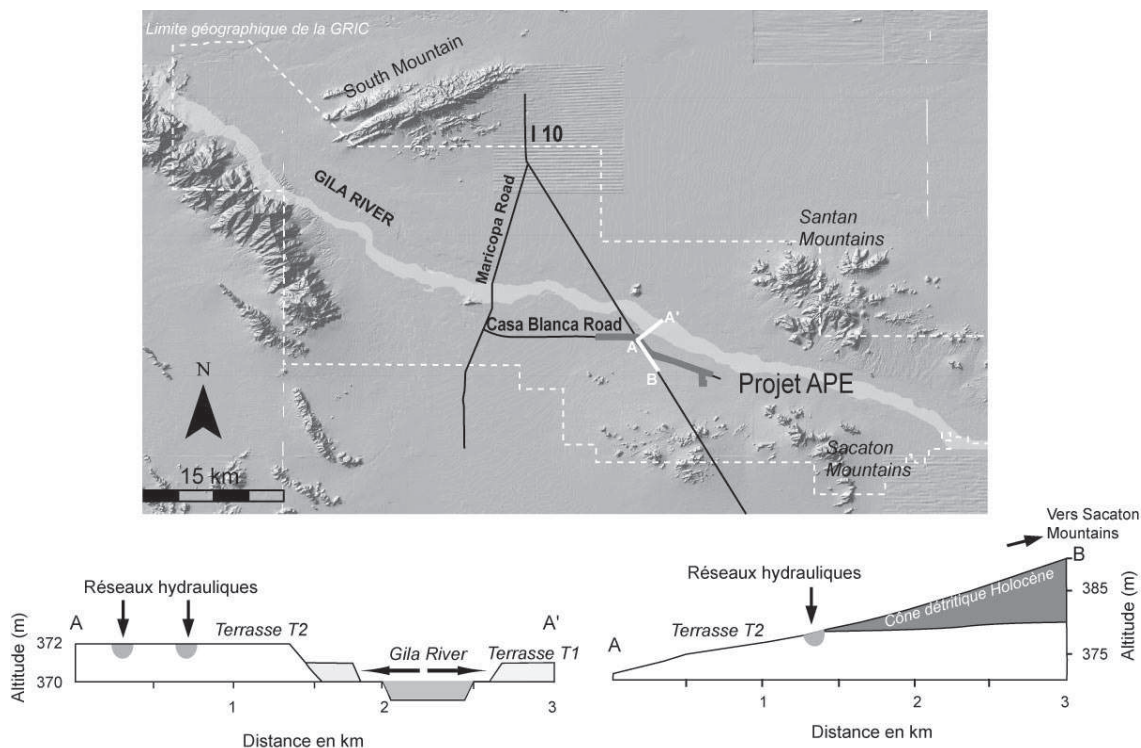


Fig. 112 : Localisation géographique et géomorphologique du Fiber Road Project, Gila River Indian Community

2.1.1.2. Contexte archéologique et remarques sur l'évolution dans l'occupation du territoire

En consultant les bases de données de l'Arizona State Museum, le State Historic Preservation Office (SHPO), l'Arizona State University (ASU), GRIC-CRMP et AZSITE (Miles et Woodson, 2008), 16 « sites » archéologiques ont été identifiés dans le secteur. Ces sites sont présentés dans le tableau et sur la figure ci-dessous (Tab. 15 et Fig. 113).

Le manque de chronologie est évident, mais il apparaît toutefois que cette zone est occupée dès la période Pionnière, avec un développement évident au cours de la période Coloniale, notamment dans la partie sud-est du secteur sur les cônes détritiques des Sacaton Mountains. De nouvelles installations sont établies dans la plaine au cours de la période Classique. La localisation de ces implantations et la pauvreté du matériel retrouvé suggèrent une occupation de type *fieldhouse* ou petites fermes (Cable et Doyel, 1985) qui contribuent fortement à l'évolution du peuplement à proximité des champs irrigués (Cable et Doyel, 1984; Cable et Mitchell, 1988 ; Howard et Wilcox, 1988).

Code Site	Type	Période	Référence
U:13:147	Pictographes et/ou concentration d'artéfacts	?	Eiselt et al., 2002
U:13:16	Pictographes et/ou concentration d'artéfacts	?	Eiselt et al., 2002
U:13:43	Pictographes et/ou concentration d'artéfacts	?	Eiselt et al., 2002
U:13:16	Pictographes et/ou concentration d'artéfacts	?	Eiselt et al., 2002
U:13:29	Village	Pionnière à Classique	Wood, 1972
U:13:89	Canal et concentration d'artéfacts	Pionnière à Classique	Eiselt et al., 2002
U:13:33	Artéfacts, canal, cimetière	?	Eiselt et al., 2002
U:13:100	Artéfacts, canal, cimetière	?	Eiselt et al., 2002
U:13:92	Habitation, canal, artéfacts	?	Eiselt et al., 2002
U:13:94	Habitation, canal, artéfacts	?	Eiselt et al., 2002
U:13:31	Concentration d'artéfacts	Coloniale	Eiselt et al., 2002
U:13:205	Concentration d'artéfacts	Classique	Ayres, 1975
U:13:190	Concentration d'artéfacts	Sédentaire à Classique	Eiselt et al., 2002
U:13:189	Village	Coloniale à Classique	Eiselt et al., 2002
U:13:188	Village avec jeu de balle	Coloniale à Sédentaire	Eiselt et al., 2002; Ayres, 1975
U:13:27	Village avec jeu de balle	Coloniale à Sédentaire	Eiselt et al., 2002; Ayres, 1975

Tab. 15 : Liste des sites archéologiques référencés le long de la Casa Blanca Road, GRIC

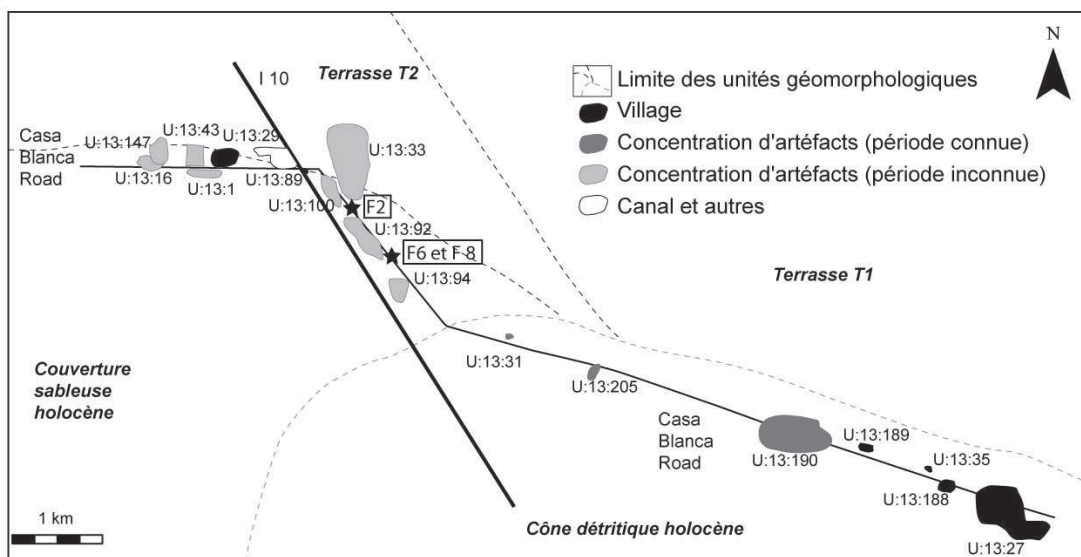


Fig. 113 : Localisation des sites archéologiques le long du Fiber Road Project

2.1.1.3. Description et chronostratigraphie des canaux

Trois canaux ont été étudiés au cours de ce projet : le canal principal F 2 et deux canaux de distribution, F 6 et F 8 (Fig. 113 et Fig. 114).

- Le Casa Blanca canal (F 2)

Le canal principal (F 2) correspond à une surface linéaire orientée est-ouest, déjà observée au cours d'autres projets de fouilles (Barz, 1998 ; Wood, 1972) (Fig. 114). Son alignement coïncide avec une concentration d'artéfacts sur presque 3.2 km. Il correspond au Casa Blanca Canal, utilisé de la période Pionnière à Classique. Contrairement aux autres systèmes identifiés le long de la Gila, celui-ci dérive l'eau de la Little Gila River, qui est un bras de la Gila River.

Il a été recoupé au niveau de son intersection avec la Casa Blanca Road, mais avec un angle d'environ 31° par rapport à la perpendiculaire (Fig. 115). Le canal observé mesure 9.14 à 13.72 m de large, et les bermes de 0.61 à 0.91 m de haut.

La partie supérieure du canal a été fortement érodée par les activités humaines historiques et modernes. Quatre canaux ont été distingués (F 2.01 à 2.04) avec une migration vers le nord sur la longue durée. **Le premier canal F 2.04** (Largeur : 1,88 m, Profondeur : 0,70 m) comprend 7 US composées d'argile limoneuse et d'argile brun clair à brun. Elles possèdent une structure prismatique fine et de nombreuses taches manganiques. Quatre curages sont visibles dans la stratigraphie. **Le second canal F 2.03** (L : 1,77 m ; P : 0,54 m) possède 10 US visibles. Les sédiments de remplissage sont limoneux à argilo-limoneux, initialement laminés puis massifs. 3 épisodes de curage ont été distingués. Une date radiocarbone dans l'US 5 date la mise en place de ces dépôts de la période Formative, phase Vahki: 347-540 apr. J.-C. (Lyon-6306). Le pic de probabilité de fonctionnement est autour de 423 apr. J.-C. Le système est probablement beaucoup plus ancien car presque 6 épisodes de curages ont été identifiés avant la mise en place de ces dépôts datés. La dynamique évolue dans **le troisième canal F 2.02** (L : 2,12 m ; P:0,5m) avec 6 US sableuses à stratifications entrecroisées. Une date OSL prélevée dans l'US 1 est en cours. **Le quatrième canal F 2.01** (L : 2,6 m ; P : 0,18 m) est composé de 6 US sableuses à limoneuses, à stratifications entrecroisées qui rappellent les chenaux naturels.

9 échantillons micromorphologiques ont été prélevés dans ces canaux et deux dans les sédiments naturels laminés avoisinants. 11 sacs de sédiments en vrac ont été prélevés pour des analyses magnétiques.

- Le canal F 8

Le canal F 8 est un canal de distribution relié au canal principal F2 (Fig. 114). Ce canal s'écoule avec un axe NE-SO puis SE-NO et une partie de sa berme a été en partie observée notamment grâce aux photos aériennes de 1944 et à la concentration en tessons qui suit son alignement.

Trois phases de fonctionnement ont été mises en évidence mais sa partie sommitale a été fortement érodée (Fig. 116). Ce canal a été recoupé selon un axe de 57° par rapport à sa perpendiculaire, ce qui explique sa forme très évasée.

Le premier canal F 8.03 (L : 3,80 m ; P : 0,80m, Largeur Corrigée : 2,45 m) présente 23 US. Sa base est grossière (US 1 à 5), sa partie centrale caractérisée par l'alternance de limons et limons sableux (US 6 à 10), puis la dynamique décroît (US 11-12). Enfin sa partie sommitale est composée de petits canaux riches en gravillons et sables grossiers (US 10 à 23). **Le second canal F 8.02** (L : 4.45 m; P : 0.56 m, LC : 2,51 m) est composé de 7 US. Les sédiments de la base sont grossiers (US 1 à 3), mais s'affinent progressivement (US 4 à 7). **Le troisième canal F 8.01** (L : 4,20 m; P : 0.50 m, LC : 2.27 m) contient six US argilo-limoneuses à argileuses. Ces sédiments sont initialement laminés (US 1 à 3), puis finement prismatiques (US 4 et 5). Ils témoignent par leur granularité d'une faible circulation d'eau. Enfin l'US 6 correspond à des limons sableux probablement post abandon.

Aucune date n'est disponible à ce jour dans le canal F 8 car il était initialement prévu que la GRIC-CRMP les prenne en charge. Un échantillon radiocarbone a été prélevé dans les sédiments naturels jouxtant le canal (US 3) et a fourni la date très ancienne de 2930+/-30, soit 1257-1021 av. J.-C. (période Archaique).

Aucun artéfact n'a été retrouvé lors de la fouille des canaux. Cinq échantillons micromorphologiques ont été prélevés et 12 échantillons en vrac pour conduire des analyses magnétiques.

- *Le canal F 6*

Ce canal de taille moyenne (L : 3,36 m, P : 0;65 m) est un canal de distribution qui diverge du canal principal F2 en direction du sud-ouest (Fig. 114). Il a été mis en évidence dans la tranchée 3.1 mais a été recoupé en écharpe avec un angle de 35 ° par rapport à la perpendiculaire ce qui lui donne une largeur réelle de 2,75 m. Sa partie sommitale a été fortement érodée, et la stratigraphie préservée suggère un écoulement d'orientation est-ouest (Fig. 117).

10 US ont été distinguées dans son remplissage. Elles se composent de sables grossiers en alternance avec des gravillons. Un épisode de curage a été observé. Une date radiocarbone conduite dans l'US 8 de colmatage a fourni une date de 414-549 apr. J.-C.. Les dates de probabilité maximale se situent entre 436 et 510 apr. J.-C. Ce canal a donc probablement été utilisé au cours de la phase Formative, Vahki, comme F 2.

En coupe, aucun matériel archéologique n'a été retrouvé. Trois échantillons micromorphologiques ont été échantillonnés dans les US à texture fine et 18 échantillons de sédiments en vrac ont été prélevés afin de conduire des analyses magnétiques.

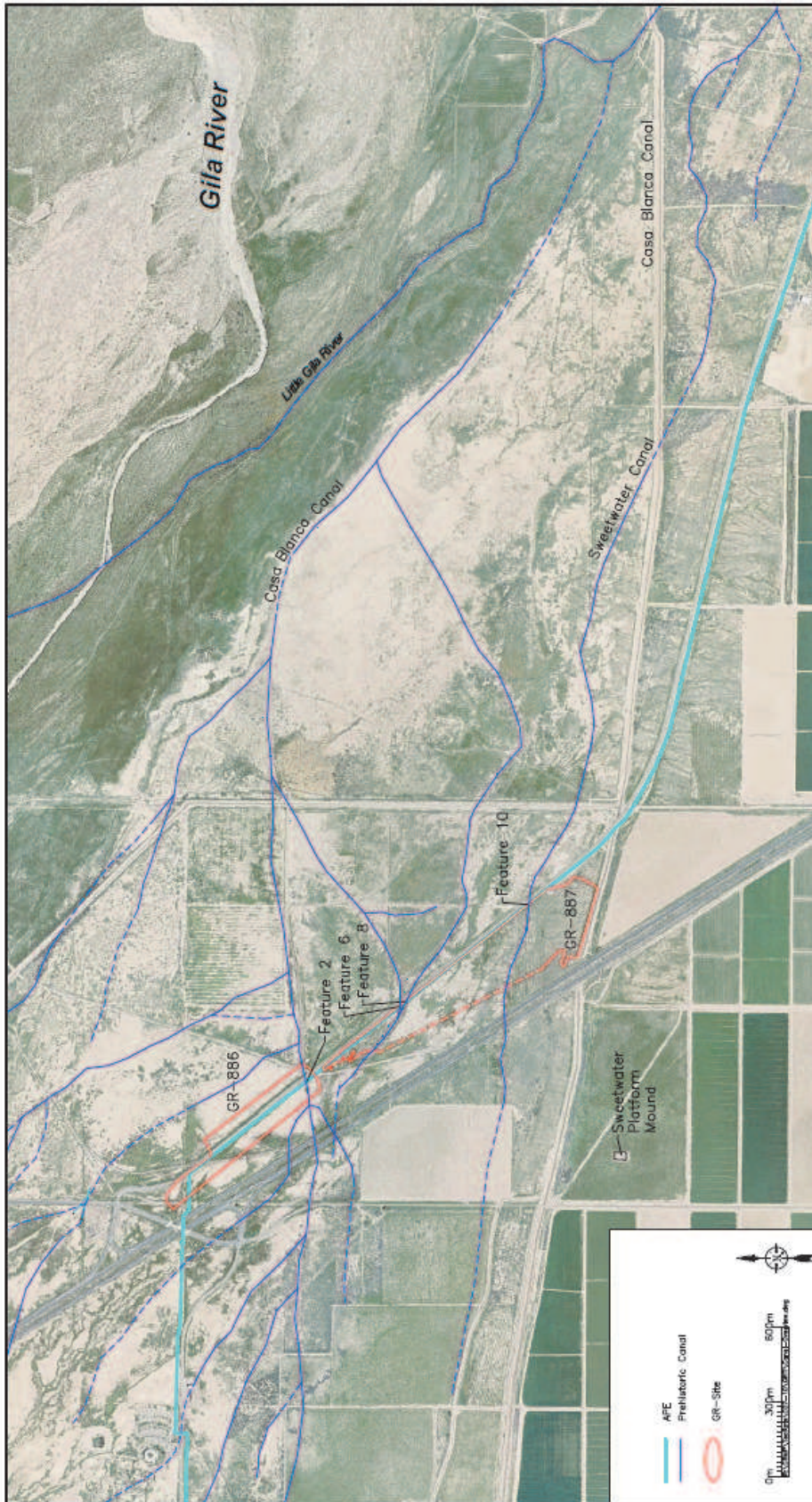


Fig. 114 : Vue aérienne des canaux étudiés appartenant au Casa Blanca System (Miles and Woodson, 2008)

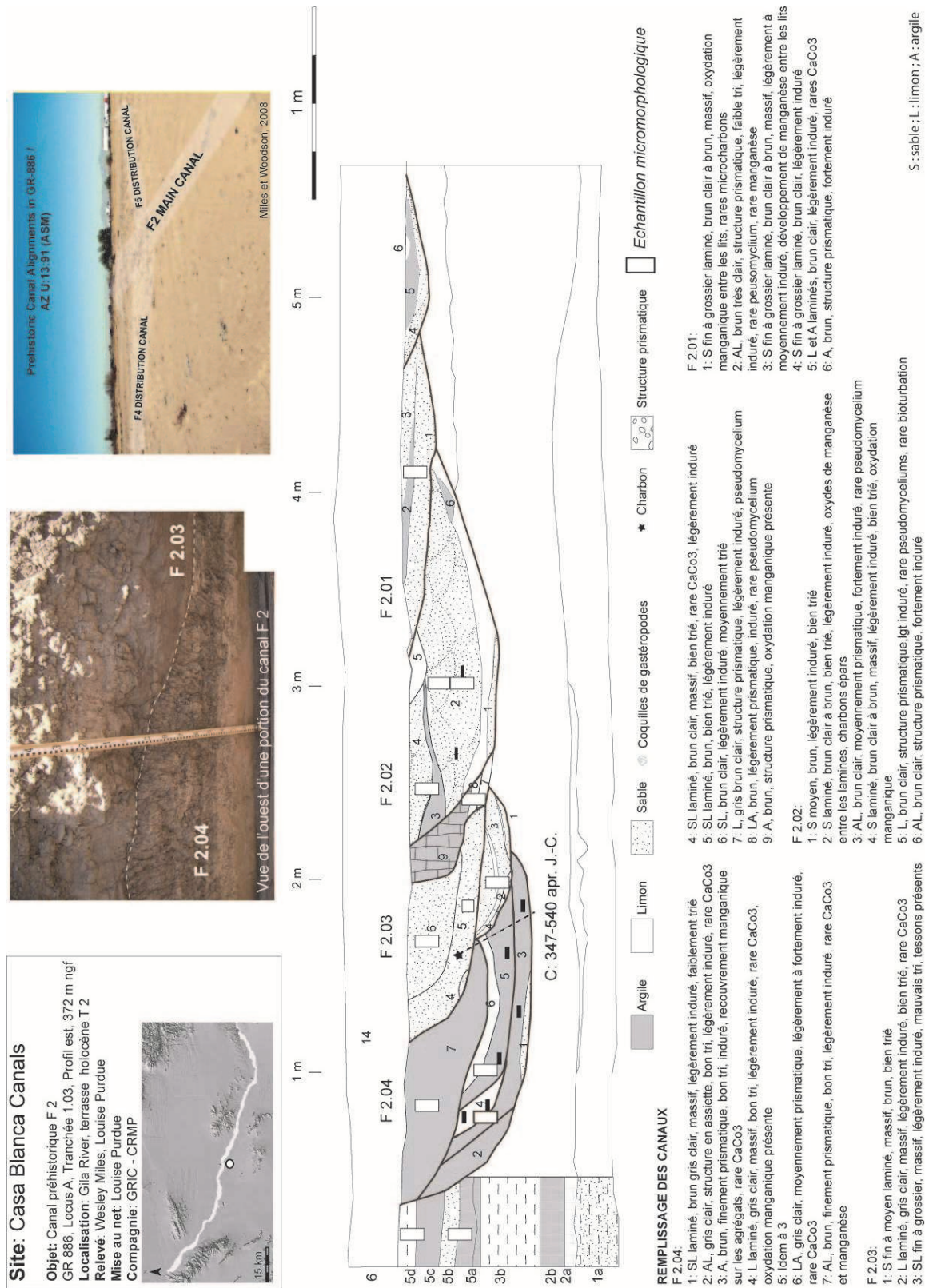


Fig. 115 : Localisation, profil et description du canal F2, projet GR 886, Casa Blanca Canal System

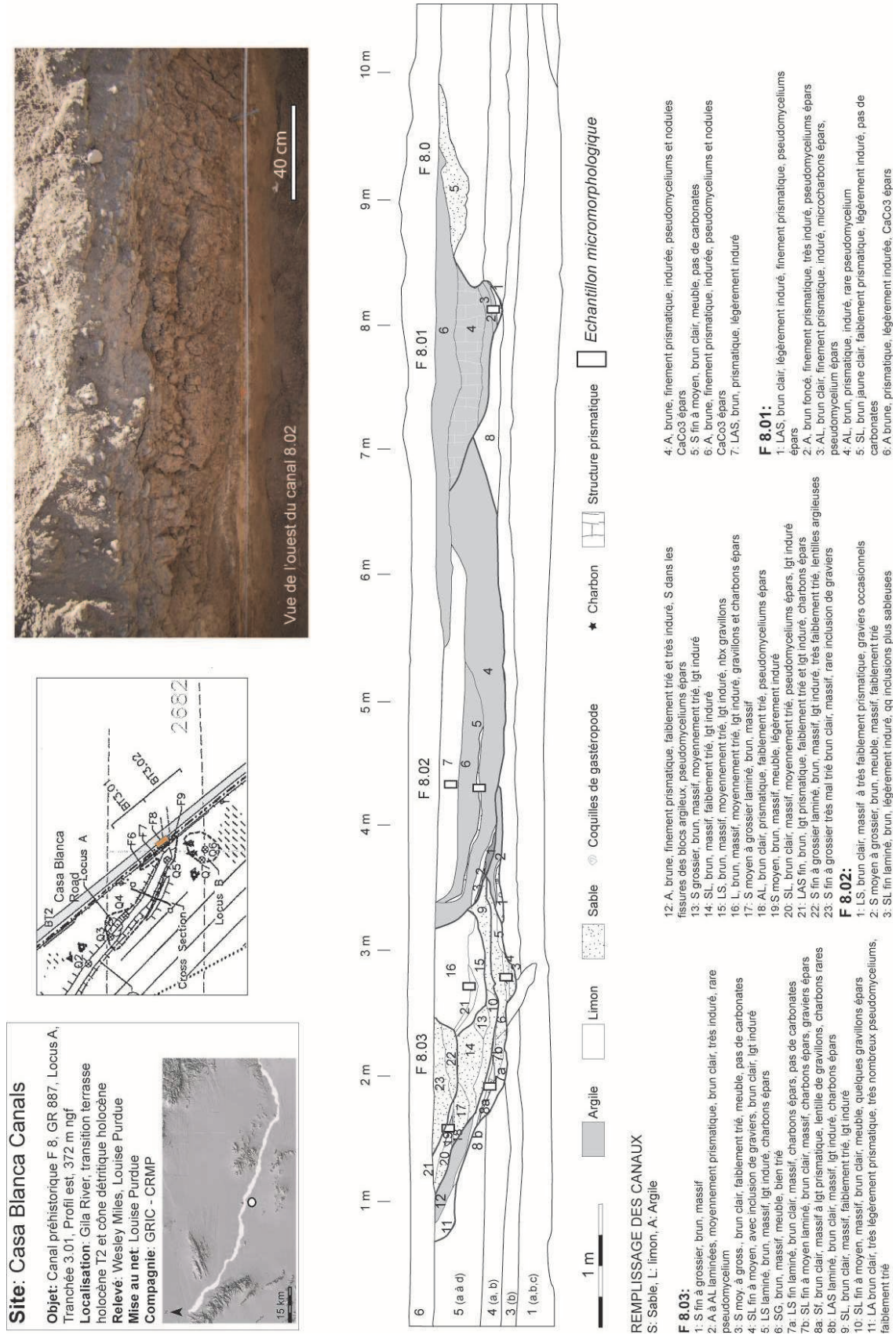


Fig. 116 : Localisation, profil et description du canal F8, projet GR 886, Casa Blanca Canal System

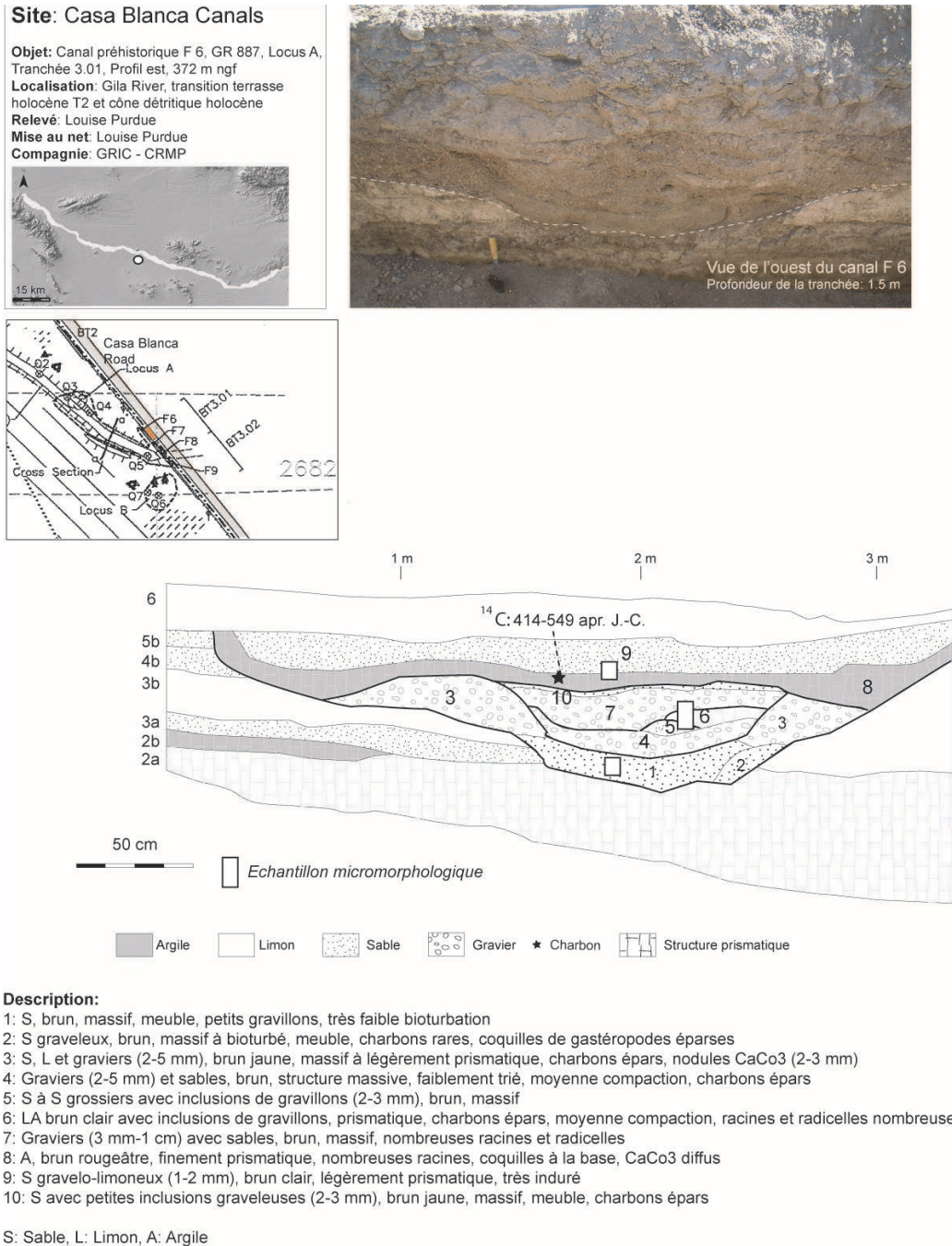


Fig. 117 : Localisation et description du canal F6, projet GR 886, Casa Blanca Canal System

2.1.2. Evolution de la terrasse T2

Les canaux appartenant au système Casa Blanca ont été construits à la transition entre la terrasse holocène T2 et un cône alluvial détritique en provenance des formations granitiques des montagnes Santan. Cinq phases majeures de sédimentation ont été observées dans la tranchée 3.01 (Miles et Woodson, 2008). Elles mettent en évidence trois phases de chenalisation ancienne révélant la présence de larges chenaux évasés de 30/40 m de large et de faible profondeur (Fig. 118).

La première phase (US 1) est composée de sédiments grossiers laminés d'origine fluviale (phase 1a), puis locale (phase 1b).

La seconde phase de dépôt (US 2) est caractérisée par la sédimentation d'argile brune (US 2a et 2b), dans le premier chenal identifié. Les sédiments sont riches en nodules carbonatés qui témoignent d'une forte ETP et de conditions chaudes et humides.

Un second chenal le recoupe. Il est colmaté par des limons argileux laminés (2-4 cm) qui contiennent toujours de nombreux carbonates secondaires, ainsi que des charbons (US 3). Un échantillon radiocarbone (charbon) prélevé dans cette US a révélé une mise en place très ancienne : 2930+/- 30 BC, soit un âge calibré de 1257-1021 av. J.-C. (Centre de datation par le radiocarbone, Lyon-6305). Le chenal est colmaté par des sables moyens riches en gravillons qui témoignent d'une intensification de la dynamique fluviale (US 4). Enfin, un troisième chenal a été identifié (US 5). Il est colmaté par des argiles et des limons laminés à structure prismatique. Quelques zones plus sableuses ont été identifiées.

2.1.3. Conclusion partielle

Ces premiers résultats mettent quelques points en relief. Au cours de la période Archaïque, la Gila est composée de larges chenaux colmatés par des sédiments très fins laminés qui indiquent une paléodynamique fluviale de faible intensité.

Les données archéologiques mettent en évidence une occupation du secteur dès la période Pionnière (ie 600 apr. J.-C.), notamment sur les piémonts des Sacaton Mountains, à l'abri des crues et à proximité des ressources naturelles exploitables sur les *bajadas*. La découverte de canaux utilisés au cours de la période Formative dans le secteur de Casa Blanca suggère une occupation plus ancienne, dès le 2^{ème} s. apr. J.-C. (Waters et Ravesloot, 2000). Nos résultats attestent d'une exploitation du territoire avant le 4^{ème} s., et une utilisation maximale des structures hydrauliques, qui dérivent l'eau de la Little Gila au cours de la période Pionnière. Le remplissage sédimentaire de ces structures est composé de dépôts très fins et de graviers d'origine locale au cours de la période Formative, qui indiquent une arrivée de l'eau de la Gila réduite, soit en réponse à des dynamiques fluviales de faible intensité ou de problèmes dans l'ingénierie des canaux. La Little Gila reprend l'alignement de ces canaux et contribue à leur colmatage final par des sables grossiers à stratifications entrecroisées. L'objectif de l'approche micromorphologique sera d'affiner ce phasage et de proposer une corrélation pédo-sédimentaire plus précise entre ces structures.

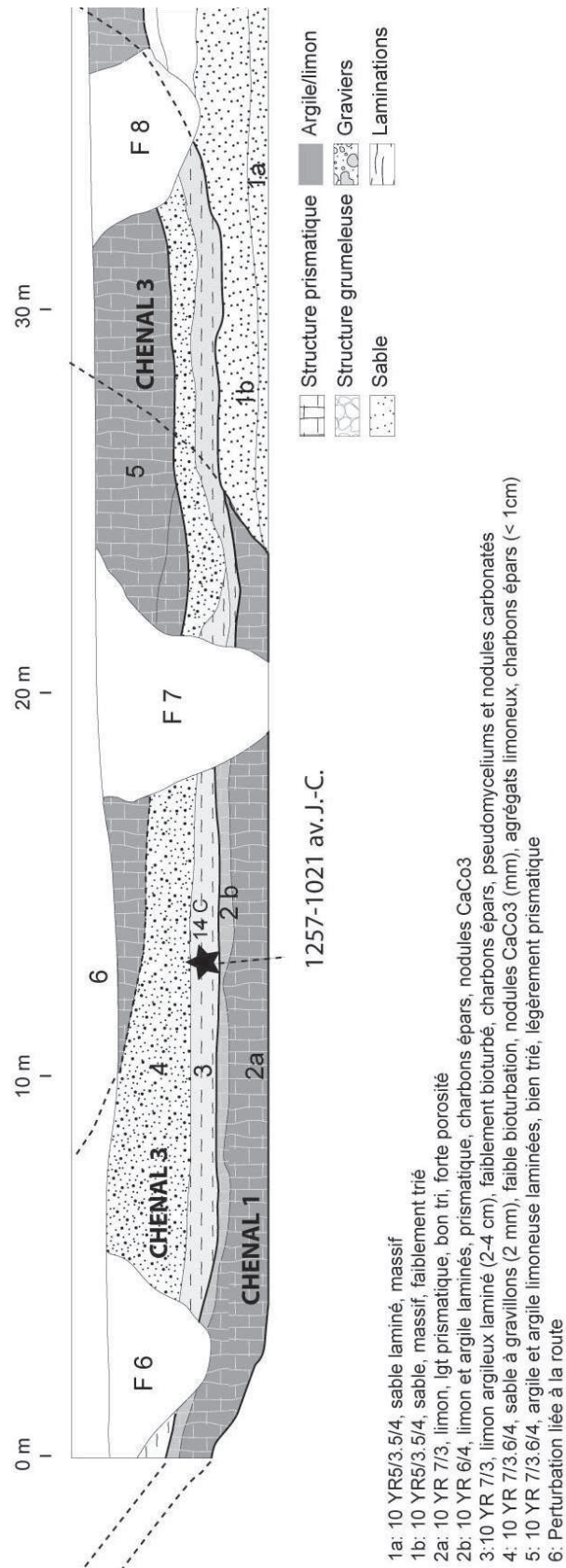


Fig. 118 : Stratigraphie de la Terrasse T2 sur le long du Casa Blanca System

2.2. Santan Canal System (zone centrale, rive nord)

2.2.1. *Le projet GR 441 (période Coloniale à Classique)*

2.2.1.1. Cadre géographique et géomorphologique du projet

Le projet GR 441, situé au pied des montagnes Santan a été conduit en collaboration avec la Gila River Indian Community en décembre 2007. Le projet est situé sur la rive nord de la Gila River, dans le district 4 de la réserve. Il traverse la highway 87, de même que Indian, Crown et Plateau Road. Le site étudié est situé sur la terrasse holocène T2 ainsi que sur la partie distale de cônes détritiques holocènes en provenance des Santan Mountains (Fig. 119).

Les résultats de l'opération de terrain et des analyses micromorphologiques ont été récemment publiés en 2010 dans *Quaternary international* sous le titre : **Micromorphological study of irrigation canal sediments: landscape evolution and hydraulic management in the middle Gila River Valley (Phoenix Basin, Arizona) during the Hohokam occupation.**

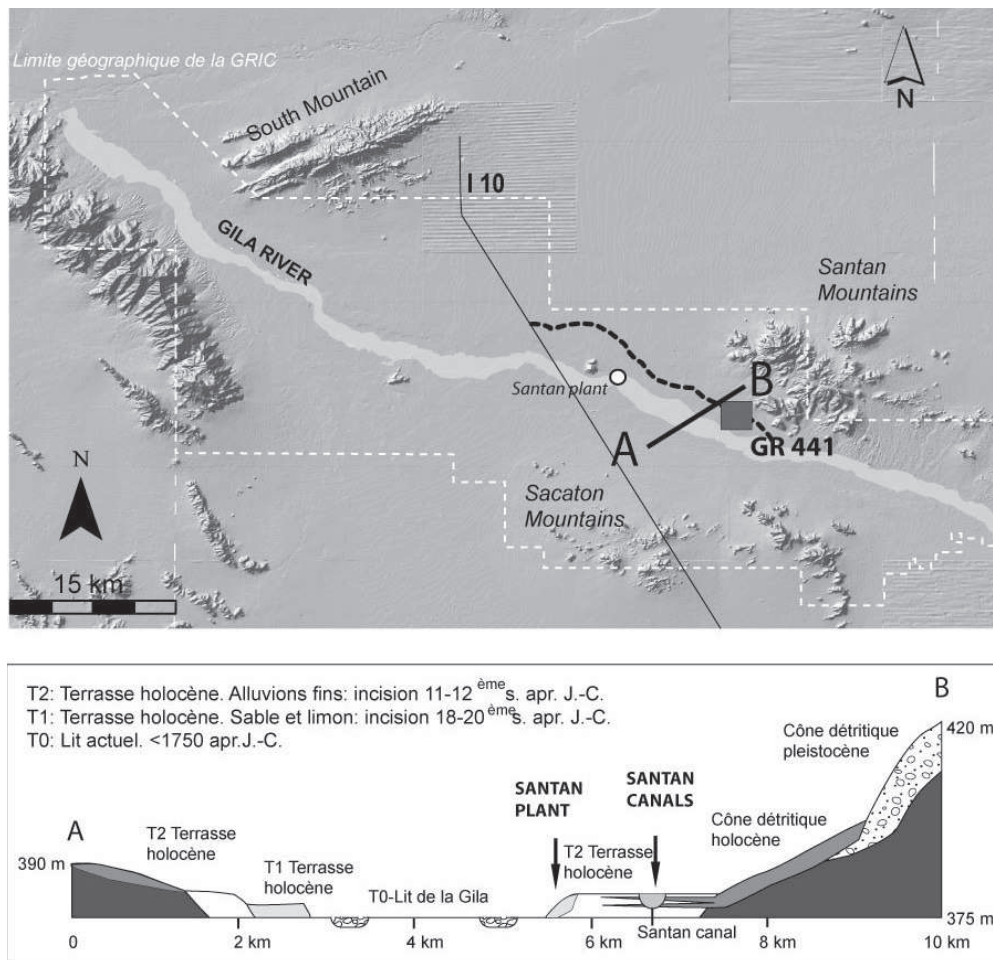


Fig. 119 : Localisation géographique et géomorphologique du site de Santan

5 structures hydrauliques ont été mises au jour dans 3 loci (Fig. 120).

La première zone (Locus G, T 471) comprend un canal principal et un canal latéral dont l'écoulement suit la pente naturelle. Ces canaux sont situés sur la partie distale d'un cône alluvial holocène à 2,5 km au nord de la Gila River. 5 parcelles agricoles ont également été identifiées entre des canaux latéraux, de même que des aménagements hydrauliques type galets et jonctions. Du fait de leur localisation, ces canaux ont été sensibles à un fort ruissellement en provenance des Santan Mountains, mais la canalisation de ces eaux de ruissellement aurait également pu augmenter temporairement le niveau de l'eau dans ces structures (Fig. 120).

La seconde zone d'intérêt est un réservoir d'eau (Locus B, T 518) situé sur la terrasse holocène T2, dans le village d'Upper Santan. Au moins 7 petits réservoirs successifs ont été identifiés mais la structure principale, qui correspond au réservoir supérieur, mesure 95 m de longueur et probablement 83 m de largeur, avec une profondeur qui dépasse 6,3 m. Sa présence immédiatement au-dessus de l'alignement du canal principal suggère une alimentation par les eaux de ruissellement, mais également la protection des structures hydrauliques contre le ruissellement estival intense et destructeur. Une jonction entre le réservoir et le canal principal a été mise au jour, ce qui indique une alimentation par des eaux d'irrigation également.

Enfin, la troisième zone d'intérêt (Locus A, T 488/T 499) consiste en deux petits canaux latéraux construits sur un cône alluvial holocène et connectés au canal principal. Leur pente, qui suit celle du cône et s'oppose au gradient du canal principal, suggère des structures de canalisation des eaux de ruissellement. Ceci aurait facilité l'irrigation de parcelles agricoles en amont du canal principal, ce dernier récoltant l'excédent d'eau.



Fig. 120 : Dynamiques hydrosédimentaires dans le secteur de Santan

2.2.1.2. Contexte archéologique : la communauté Santan

La communauté Santan s'est implantée dans le secteur au cours de la période Pionnière tardive (Ciolek-Torrello et al., 1999) dans les villages du Lower et Upper Santan.

L'Upper Santan village comprend un *platform mound* et un *ball court* (Fig. 121) et est alimenté par le canal principal Santan. Des travaux de fouille conduit dans l'Upper

Santan village et dans d'autres villages à proximité suggèrent une évolution dans l'organisation de l'habitat à l'échelle locale à la fin de la période Sédentaire (Gregory et Huckleberry, 1994 ; Loendorf et Woodson, 2008). Les larges implantations disparaissent pour laisser place à un habitat dispersé de petite taille. Les villages de l'Upper et Lower Santan restent toutefois des villages majeurs de la période PréClassique à Classique.

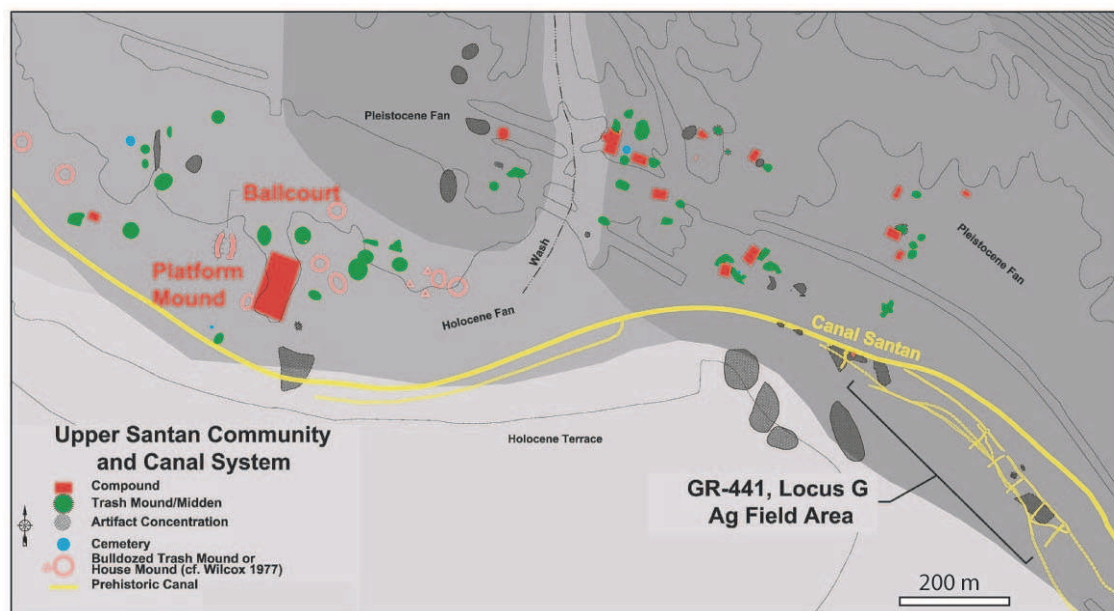


Fig. 121 : Sites archéologiques identifiés dans le secteur de Santan

2.2.1.3. Stratigraphie et chronologie des structures étudiées

L'ensemble des structures étudiées et leur chronologie de mise en place sont synthétisées Fig. 122.

- Canal principal et canaux latéraux associés

La stratigraphie du canal principal a permis de mettre en évidence 4 grandes phases de sédimentation, avec au moins 6 épisodes de curages. Le canal est probablement construit au cours de la période Sédentaire (≥ 950 apr. J.-C.), comme le suggère la détermination de céramiques diagnostiques à la base du canal dans une autre tranchée. Les dépôts sont initialement argileux à limono-argileux de couleur brune (US 3 à 8), riches en manganèse, et recouverts par des lamines limono-argileuses (US 9 à 11). Après un épisode de curage, des limons bruns laminés se déposent (US 12 à 16), puis sont recouverts par des argiles limoneuses brunes qui colmatent le canal.

Le canal est ensuite nettoyé et des dépôts graveleux se mettent en place au cours de la troisième phase de dépôt (US 17 à 22). Après un dernier épisode de curage, des limons laminés et bien triés brun gris clair se déposent dans le canal jusqu'à son abandon (US 23 à 29).

Des tessons de *Gila Polychrome*, diagnostics de la première moitié de la période Classique tardive (1300-1375 apr. J.-C.), ont été mis en évidence dans les US 24 et 28b/c et d. Il semble donc que ce canal ait été utilisé pendant presque 500 ans.

Dans le canal latéral étudié, F 366, des limons brun gris clair alternent avec des argiles limoneuses bien triées et laminées. Des fragments de céramiques *Casa Grande Red on Buff* ont été mis au jour dans l'US 4, et datent ainsi la construction de ce canal de la période Classique tardive (1300-1450 apr. J.-C.).

- *Le réservoir d'eau et les fossés associés, Locus B*

Le réservoir a été construit dans des limons hétérogènes brun gris clair, riches en graviers, fragments de charbons et tessons altérés non datés (US 1 à 14). Les premiers dépôts sont composés de limons plus ou moins graveleux qui présentent une structure prismatique (US 15 à 20) et dans lesquels deux petites fosses ont été creusées. La première (US 21 à 25) est colmatée par des limons bruns laminés puis des argiles à gravillons (US 36). La seconde fosse est également remplie de limons bruns laminés. Enfin, les sédiments qui colmatent le réservoir sont des limons bruns organiques (US 30 à 31). Des charbons échantillonnés dans l'US 28 datent cette structure hydraulique de la période Sédentaire/Classique, soit 1040-1210 apr. J.-C. Des tessons prélevés dans l'US 15 appartiennent au groupe *Casa Grande Red on Buff* et datent l'utilisation du réservoir de la première partie de la période Classique (1150-1300 apr. J.-C.).

- *Structures de canalisation d'eau, Locus A*

Les sédiments du canal F 779 sont composés de limons brun clair (US 1 à 5) puis de limons brun gris riches en graviers (US 6 à 9). Un échantillon radiocarbone prélevé dans l'US 3 date cette construction de la période Classique tardive (1328-1445 apr. J.-C.). Le second canal, F 786, est riche en gravillons (US 1-4), curé, puis colmaté par des limons brun jaune laminés (US 5-8) et des limons graveleux (US 9-11). Ces deux petites structures ont été construites au sommet de la même US 1c. Elles recourent une inhumation et une maison en fosse du début de la période Classique (1150-1300 apr. J.-C.) et sont elles-mêmes recouvertes par des dépôts historiques labourés. En se fondant sur les datations radiocarbones et la chronostratigraphie du site, il semble donc cohérent de supposer une utilisation de ces canaux au cours de la période Classique tardive (1300-1450 apr. J.-C.).

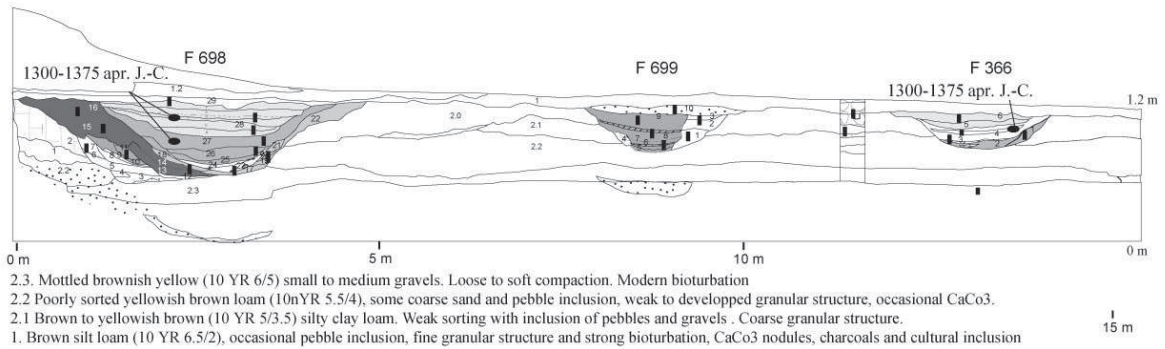
2.2.1.4. Echantillonnage

40 lames minces ont été fabriquées au laboratoire GEOPHEN, Université de Caen Basse Normandie. Elles ont permis la description complète de 87 dépôts d'irrigation (Tab. 16). L'étude micromorphologique va nous permettre d'établir des corrélations pédo-sédimentaires entre les remplissages de ces structures hydrauliques.

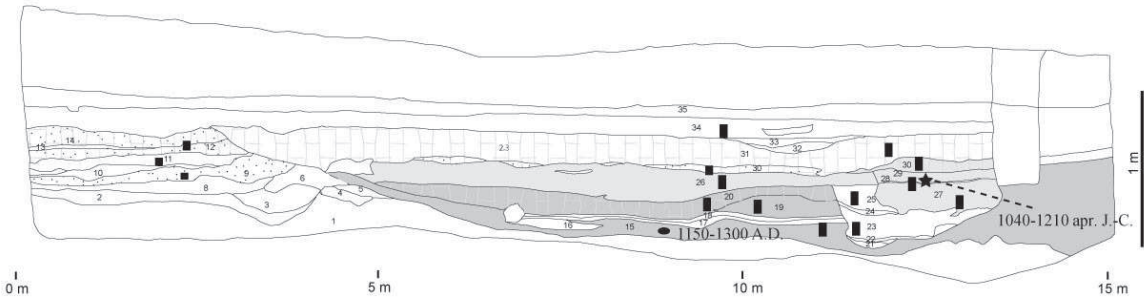
Structure	Locus	Canal	Echantillons	Micro US décrites
Canal Principal	G	F 698	12	29
Canal latéral	G	F 366	5	16
Réservoir	B		15	24
Canal latéral	A	F 779	4	8
Canal latéral	A	F 786	4	10

Tab. 16 : Nombre de structures hydrauliques étudiées, d'échantillons prélevés et d'US décrites

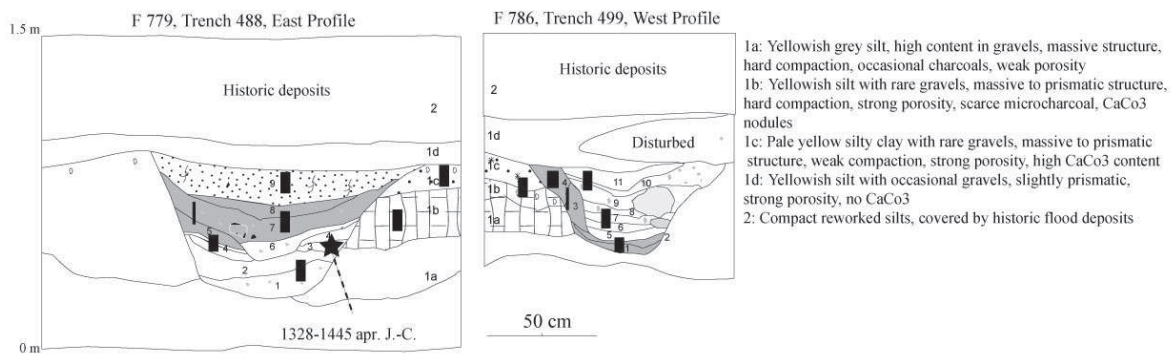
a) GR 441, Locus G, T 471, F 366, 698, 699, East Profile - Transition Pleistocene fan and T2 Holocene terrace
Sedentary to Classic Period (950-1450 apr. J.-C.) - One main irrigation and two lateral canals



b) Gila River 441, Locus B, T 518, East Profile -T2 Holocene terrace
Early Classic Period (1150-1300 apr. J.-C.?) - Water reservoir and lateral trash pit



c) Gila River 441, Locus A - Holocene fan
Late Classic Period (1300-1450 apr. J.-C.) - Two lateral canals



d) Estimated chronology of the hydraulic structures based on ^{14}C (●), typo-chronology (□), stratigraphy (S)

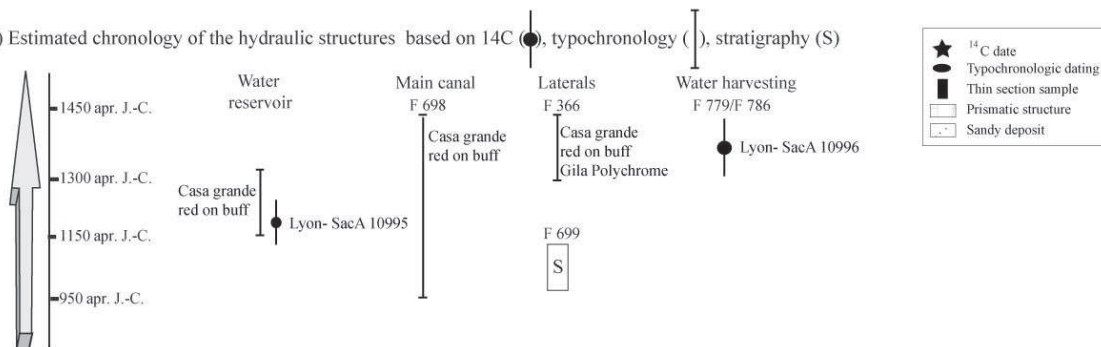


Fig. 122 : Profil synthétique des 5 structures hydrauliques étudiées et chronologie associée

2.2.2. *Espèces cultivées et organisation des champs Hohokam*

Cinq champs agricoles, qui mesurent de 49 à 63 m de longueur, ont été identifiées dans le locus G (Fig. 123 a). Ces champs, facilement reconnaissables par leur couleur brune et leur structure polyédrique, contrastent avec les dépôts sous et sus-jacents. Ils sont irrigués par de petits canaux latéraux alimentés par un canal de distribution F 696, qui dérive lui-même l'eau du canal principal Santan. 18 échantillons micromorphologiques ont été prélevés dans ces champs et dans les canaux latéraux, et sont en cours d'étude (Fig. 123 b). Les premiers résultats de l'analyse micromorphologique des champs seront présentés dans la partie IV. Ils mettent en évidence des critères de reconnaissance des pratiques de l'irrigation et de l'exploitation des sols.



Fig. 123 : a) Structuration des champs préhistoriques dans le secteur de Santan, b) Champ préhistorique Hohokam identifié entre deux canaux latéraux. Des prélèvements micromorphologiques en cours d'étude ont été prélevés.

2.2.3. Evolution de la plaine alluviale et des cônes détritiques de la période Hohokam à Protohistorique

2.2.3.1. Sur la terrasse T1

- Synthèse des travaux antérieurs

Les travaux conduits par Huckleberry (1992) sur la terrasse T1, sur la rive sud de la Gila ont mis en évidence une phase de sédimentation très active et d'aggradation de la plaine entre 1500 et 1650 apr. J.-C. (Fig. 124). La tranchée 4b, la plus au sud, est caractérisée par des sables à sables grossiers, qui correspondent au lit de la rivière pour l'US 4 (1515-1651 apr. J.-C.), recouverts par des sédiments de plaine d'inondation assez grossiers (US 3 à 1). La tranchée 5b contient des dépôts de débordement (US 5, 4, 2, 1) et l'enregistrement d'une période de crue entre 1445 et 1635 apr. J.-C. (US 3) sur plus de 25 cm d'épaisseur, qui fait suite à une période d'aggradation de faible énergie antérieure au milieu du XV^{ème} s (US 4/5).

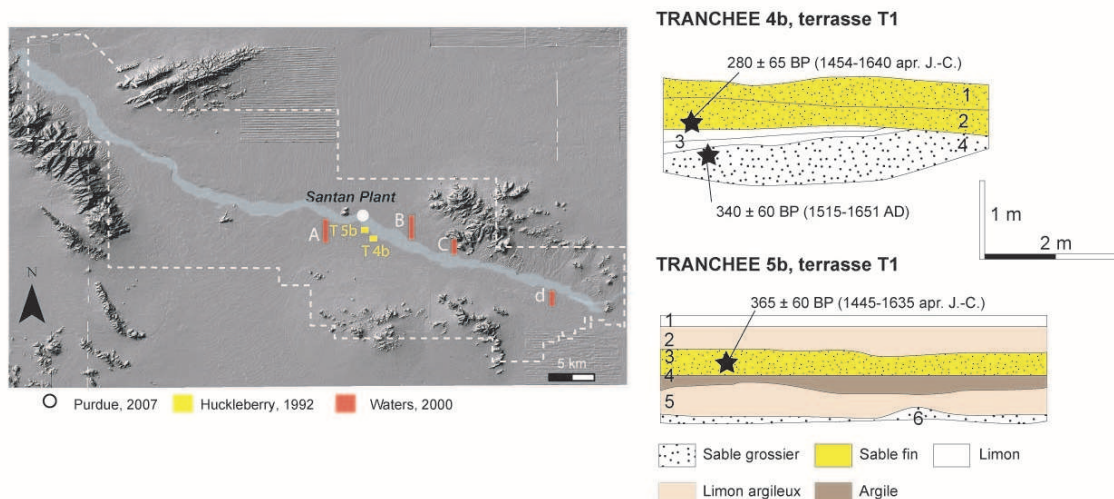
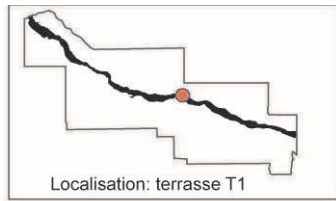


Fig. 124 : Localisation des prospections géomorphologiques conduites le long de la Gila River (Huckleberry, 1992)

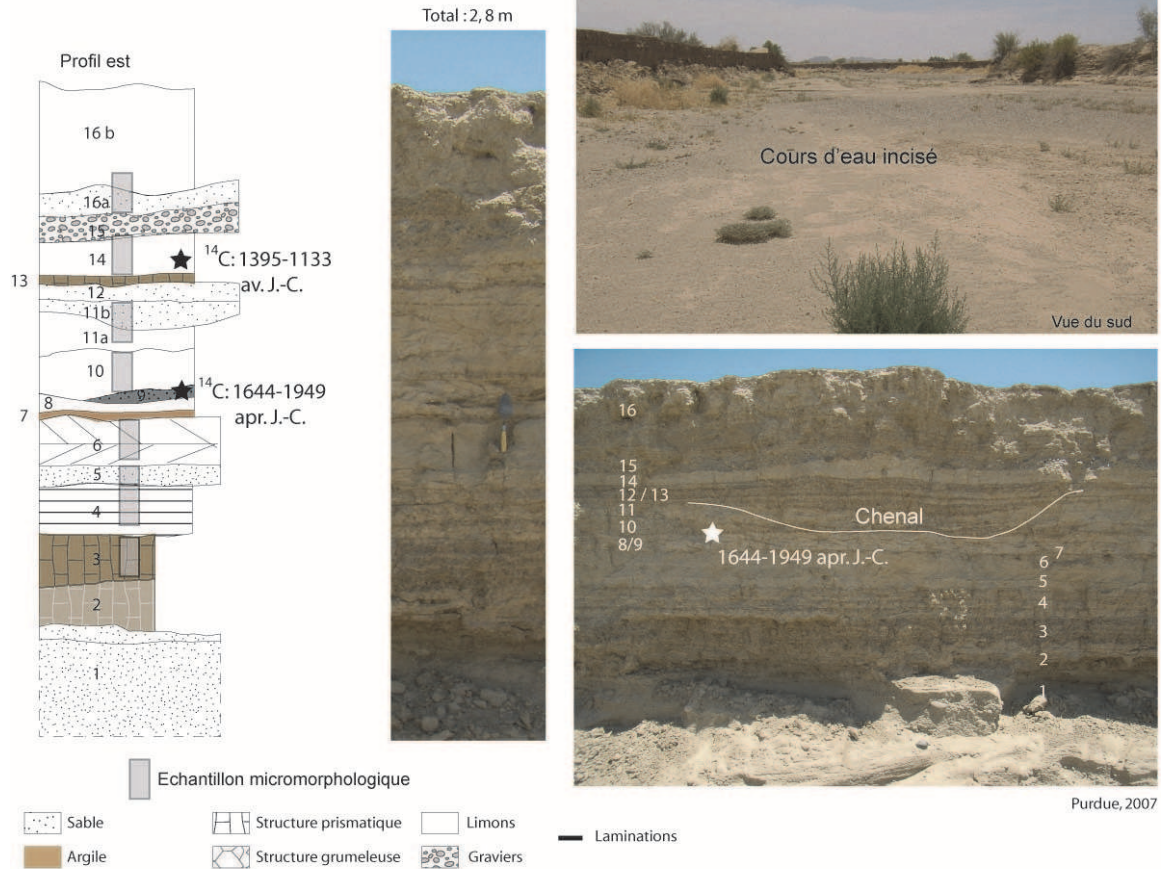
- Gila Sand and Gravel Corporation : Santan Plant

Ces résultats préliminaires ont été complétés par l'étude d'une séquence stratigraphique dans la carrière de graviers appartenant à la Gila Sand and Gravel Corporation. Une seconde séquence a également été étudiée (Gila Sand and Gravel, Maricopa Plant) mais le profil stratigraphique est entièrement identique et ne sera pas présenté ici. La séquence Santan Plant est accessible grâce à l'incision du cours d'eau en voie de colmatage aujourd'hui (Tony Enos, communication personnelle). Seize US ont été identifiées (Fig. 125) et sont caractérisées par des :

- 1) sables grossiers (US 1)
- 2) argiles à structure prismatique (US 2-3) qui indiquent des écoulements réduits
- 3) limons laminés (US 4 à 6) à stratification oblique planaire (fond de chenal)
- 4) limons (US 7 à 14),
- 5) graviers et sables (US 15-16) qui correspondent au lit mineur de la Gila
- 6) un épisode d'incision.



Gila Sand and Gravel Corporation, Santan Plant



DESCRIPTION DES UNITES STRATIGRAPHIQUES

S: Sable, L: Limon, A: Argile

- US 16 b : Terre arable. S et L, brun pale, laminés, nombreuses racines. Inaccessible
- US 16 a : Alternance SL laminés brun pale avec A brunes prismatiques fines, bioturbé
- US 15 : S grossiers, graviers et galets non triés avec matrice sableuse. Lit de rivière
- US 14 : L, brun clair, massif, pseudomycéliums
- US 13 : A, brun, prismatique, racines et radicelles
- US 12 : SL, brun clair, laminé, massif
- US 11b : L, brun clair, massif
- US 11a : S moyen, brun clair, meuble, microcharbons
- US 10 : SL, brun clair, laminé, quelques racines
- US 9 : S moyen, brun foncé, laminations, charbons nombreux als
- US 8 : L grossier en alternance avec S. brun clair
- US 7 : A brune, prismatique, racines
- US 6 : S, brun très clair, massif, limite ondulante
- US 5 : S, brun clair, laminé, massif
- US 4 : S, beige, meuble, massif, lamines argileuses
- US 3 : A, brun, polyédrique, lamines de sables et charbons
- US 2 : A, brun clair, polyédrique, induré, nodules CaCO₃, pseudomycéliums
- US 1 : S, gris clair, laminé, massif

Fig. 125 : Lithostratigraphie et photographies de la carrière de gravier de Santan

Deux épisodes d'évolution morphologique ont été identifiés. Le premier a été observé en association avec l'US 13. De nombreux chenaux de la Gila, de taille comprise entre 2 et 4 m, colmatés par des argiles et des limons fins, ont été observés en coupe dans l'ensemble des formations alluviales révélées par l'épisode d'incision. C'est également le cas de l'US 15, qui correspond à un épisode d'élargissement du cours d'eau.

Deux échantillons radiocarbone ont été prélevés dans les US 9 et 14. Faute de matériel organique datable, la base de la séquence n'a pu être datée. Dans l'US 14, la date obtenue est 1644-1949 av. J.-C. Cette date trop ancienne n'a pas été prise en considération, étant donné la localisation de l'échantillon sur la terrasse T1. Il est possible que les charbons datés aient été remaniés suite à un déstockage sédimentaire.

La seconde date (US 9) est 1644-1949 apr. J.-C. avec un pic de probabilité dans la décennie 1664-1674 apr. J.-C.

Du fait de la position géomorphologique de la séquence et le fort taux de sédimentation, cette date semble cohérente. L'ensemble des dépôts s'est donc mis en place au cours de la période **Proto- et Historique**, et peut-être dès la période Classique à la base.

Huit échantillons micromorphologiques ont été échantillonnés et ont permis la description de 48 micro-unités stratigraphiques. Les résultats sont présentés dans la partie IV.

2.2.4. *Conclusion partielle*

L'étude de cinq structures hydrauliques utilisées de 950 à 1450 apr. J.-C. (période Sédentaire à Classique), dont un canal principal, un canal latéral, un réservoir d'eau et deux structures de canalisation des eaux de ruissellement, appartenant à un même système d'irrigation, permet de proposer un premier phasage chronostratigraphique. L'étude d'une séquence stratigraphique naturelle sur la terrasse T1, dont les dépôts se mettent en place dès la période Classique et peut-être jusqu'à 1870 apr. J.-C., complète cette information.

Les sédiments qui colmatent les canaux entre **950 et 1150 apr. J.-C. (période Sédentaire)** sont de texture fine. Certains de ces dépôts présentent des laminations indiquant une sédimentation rythmée, bien que de faible compétence. Une période de crue est enregistrée sur la terrasse T2 (plaine alluviale Hohokam), entre la période Sédentaire et Classique (i.e. 1050-1150 apr. J.-C.). **Entre 1150 et 1300 apr. J.-C.**, les dynamiques hydrosédimentaires enregistrées dans le réservoir témoignent d'une sédimentation grossière, peut-être locale, suivie par la construction de deux fosses colmatées par des sédiments grossiers laminés d'origine fluviale. Les canaux d'irrigation utilisés entre **1300 et 1375 apr. J.-C.** sont également colmatés par des sédiments limoneux laminés qui signent une sédimentation rythmée. Le remplissage sédimentaire des structures de canalisation d'eau, en fonctionnement entre **1328 et 1445 apr. J.-C.**, indique une alimentation en eau locale, mais des limons laminés indiquent également un apport fluvial. Une nouvelle terrasse se forme après l'incision enregistrée entre 1050-1150 apr. J.-C. (Waters et Ravesloot, 2001). Les sédiments à la base de la séquence étudiée (terrasse T1) indiquent une forte paléodynamique fluviale.

Ces dépôts sont couverts par un paléosol cumulique daté peut-être de la **fin de la période Classique/début de la période Protohistorique**. Une période d'aggradation rapide est observée à partir du **17^{ème} siècle**. Elle est associée à la mise en place d'un système à chenaux multiples ou d'un chenal principal très mobile. Une nouvelle phase d'incision historique favorise le développement pédologique en surface de la terrasse T1.

2.3. Systèmes Poston/Casa Grande (zone amont, rive nord et sud)

2.3.1. Présentation des systèmes d'irrigation

Des prospections archéologiques conduites au cours des 30 dernières années ont permis de couvrir toute la zone située dans le secteur de Florence, Casa Grande et Poston (Crown, 1984 ; Dart, 1983 ; Debowski et al., 1976 ; Dittert et al., 1969 ; Doelle, 1975, 1976 ; Doyel, 1974 ; Grady, 1973 ; Kayser et Fiero, 1969 ; Stein, 1979 ; Teague et Crown, 1982, 1983). Cette zone comprend deux systèmes d'irrigation sur la rive nord et sud de la Gila (Fig. 126). Le système Casa Grande, construit en premier, est nettement plus complexe que le système Poston. Il est utilisé de la période Coloniale la fin de la période Classique, autour de 1450 apr. J.-C. (Eighmy et Doyel, 1987 ; Foster et al., 1996). Aucun canal n'a été étudié dans ce secteur. Toutefois, une séquence stratigraphique a été analysée dans la plaine alluviale Hohokam (Gila Florence) (ie T2) et a permis de restituer la dynamique des crues dans ce secteur. Les travaux de Huckleberry (1993, 1995) permettent de compléter notre recherche (T1b, 8, 6, 10) (Fig. 126).

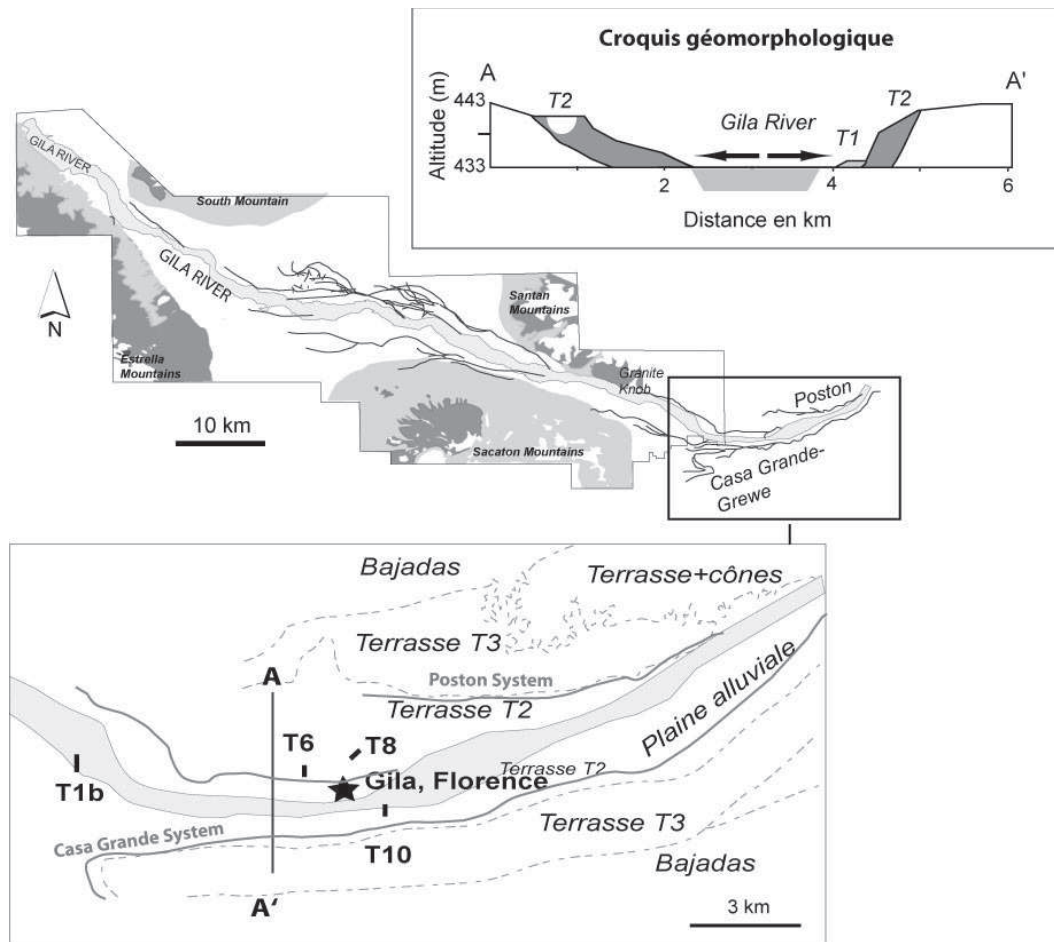


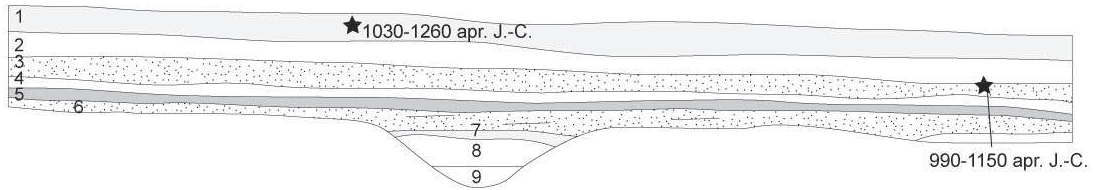
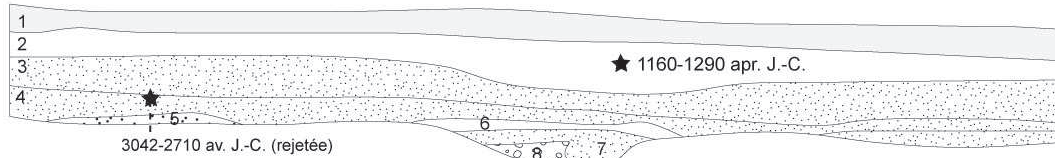
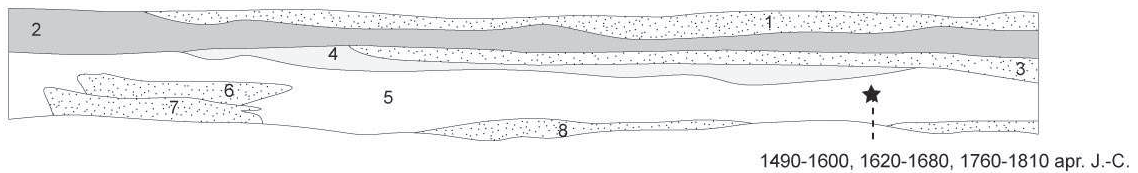
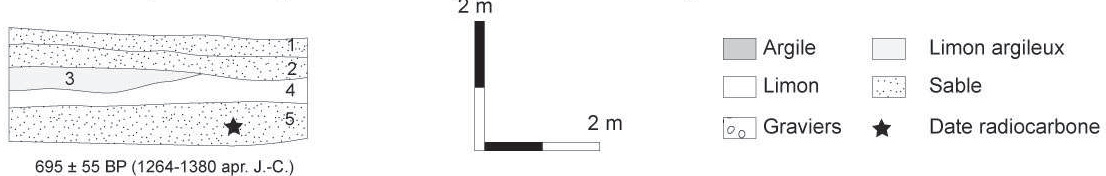
Fig. 126 : Localisation des systèmes d'irrigation et des travaux antérieurs géomorphologiques et de la séquence Gila Florence

2.3.2. *Evolution de la plaine alluviale de la Période Formative à Historique*

2.3.2.1. Les travaux antérieurs

Les premiers travaux conduits dans la moyenne vallée de la Gila sont ceux de Huckleberry, 1993, 1995. Ses résultats (Fig. 127) obtenus après l'analyse de 4 tranchées, ont montré que :

- 1) Les sédiments situés sur la terrasse T2 en partie sommitale des tranchées 6 et 8 se sont mis en place entre 1030 et 1160 apr. J.-C. Leur texture limono-argileuse témoigne d'un milieu humide de type ciénega au cours de la période Sédentaire. L'absence de sédiments postérieurs indique un gap sédimentaire après cette date.
- 2) A l'opposé, sur la rive sud (T 1b et 10), une sédimentation nettement plus récente est observée, postérieure à 1250 apr. J.-C., et qui semble se poursuivre jusqu'aux périodes historiques. Il semble donc que dans le secteur de Casa Grande et de Poston, la rive nord ait été protégée des crues depuis la fin de la période Sédentaire, à l'opposé de la rive sud qui a subi leur impact de façon continue.

TRANCHEE 6, terrasse T2, rive nord

TRANCHEE 8, terrasse T2, rive nord

TRANCHEE 10, terrasse T2 (selon Huckleberry- probable terrasse T1), rive sud

TRANCHEE 1b, terrasse T2 (selon Huckleberry- probable terrasse T1), rive sud


Adapté de Huckleberry, 1993, 1995

Fig. 127 : Profil des tranchées réalisées dans le secteur de Florence par Huckleberry, 1993, 1995
2.3.2.2. La séquence Gila Florence

La séquence Gila, située sur la rive nord de la terrasse T2 de la Gila, mesure environ 4,5 m de hauteur. 29 unités stratigraphiques ont été observées (Fig. 128).

Six dynamiques distinctes ont été enregistrées :

- 1) La base de la séquence (US 1-6a) est composée de sables grossiers. La date de leur mise en place n'est pas connue.
- 2) Des sables très fins et des limons sableux, laminés, de couleur beige jaune et à structure massive les couvrent (US 6b-13). Ces dépôts indiquent une diminution de la dynamique fluviale et traduisent une sédimentation rythmée.
- 3) Des limons argileux et des argiles sableuses à structure massive à prismatique (US 14-17) contenant des fragments de caliche et des horizons carbonatés ont ensuite été observés. La présence de fragments de caliche, de nodules carbonatés centimétriques et de rhizoconcrétions entre les US 1 et 17 pourrait indiquer une mise en place très ancienne.
- 4) Des argiles sableuses microlaminées couvrent ces dépôts (US 18a-21). Elles attestent d'une faible dynamique fluviale mais d'une sédimentation rythmée. Les traits d'oxydation, ainsi que la couleur verdâtre de certaines US, indiquent des conditions réductrices en réponse à des épisodes d'hydromorphie.

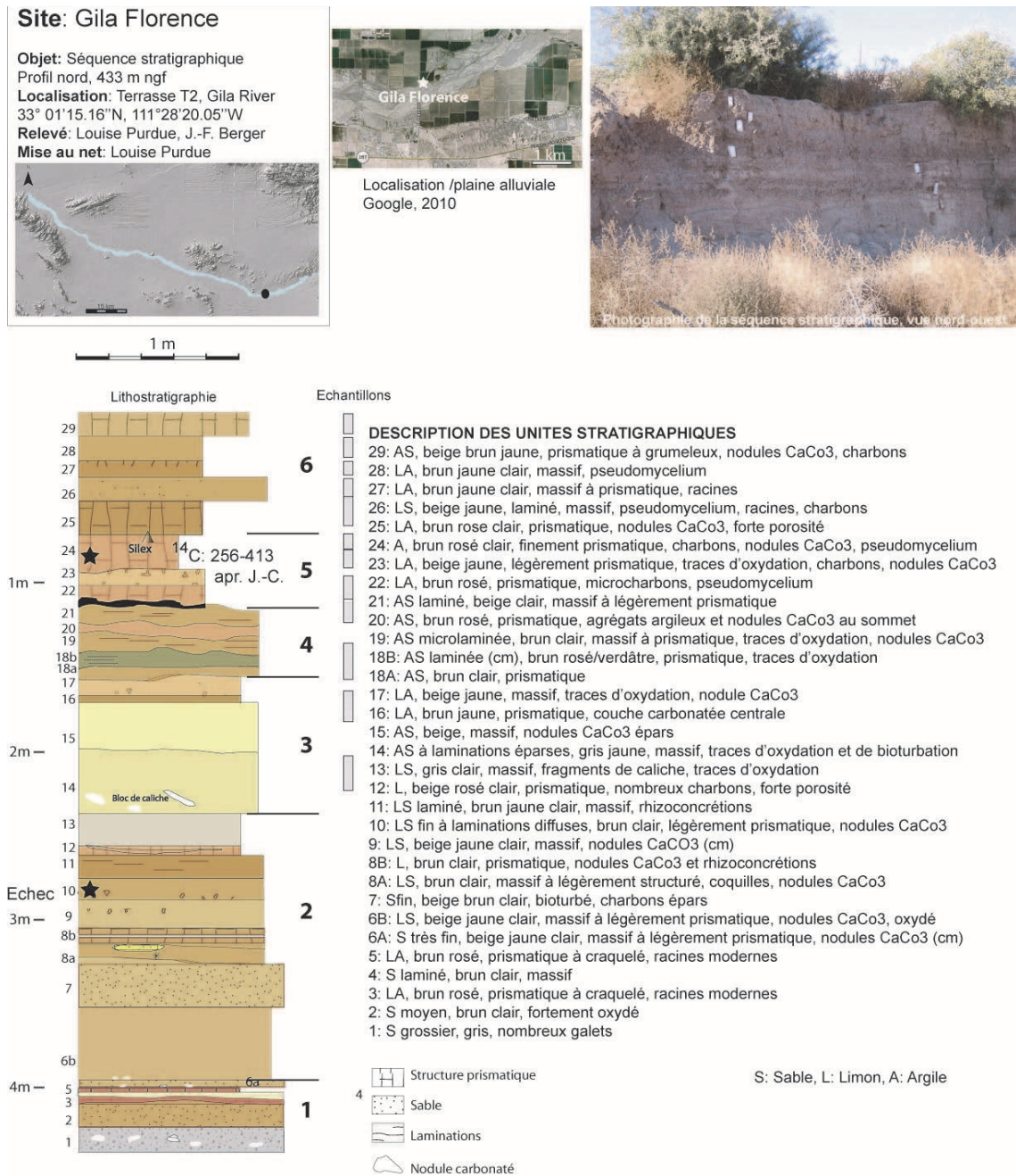


Fig. 128 : Localisation, lithostratigraphie et résultats micromorphologiques sur le site de Gila Florence

5) Des limons argileux se déposent ensuite (US 22 à 25). Seule l'US 24 a fourni suffisamment de matériel datable après tamisage et tri. La date ARTEMIS obtenue est 1700 ± 30 BP soit 255-413 apr. J.-C. (période Formative Vahki). Ces dépôts sont caractérisés par leur couleur brun rose clair, leur structure prismatique et la présence de nodules de carbonates secondaires ainsi que des pseudomycéliums. Ces traits indiquent le développement de processus pédologiques et une stabilité des paysages au cours de cette période.

6) La partie sommitale de la séquence (US 26-29) est caractérisée par le dépôt de limon-argileux à sableux, de couleur brun jaune clair, à structure massive, excepté pour les sédiments de surface. Des racines ont été observées dans l'ensemble de ces US, mais

elles proviennent du couvert végétal en surface. La structure et la couleur de ces dépôts indique une sédimentation rapide et des durées de mise en surface réduites. La date exacte de leur mise en place n'est pas connue.

7) Seuls les 2,5 m supérieurs de cette séquence ont été échantillonnés. 12 échantillons micromorphologiques ont été prélevés ainsi que 15 échantillons de sol en vrac pour les analyses magnétiques.

2.3.3. Conclusion partielle

Les résultats obtenus, ainsi que la synthèse des travaux de Huckleberry (1993, 1995), mettent en évidence 3 points :

- 1) Une période de stabilité des paysages est observée entre 256-413 apr. J.-C. (période Formative Vahki) sur la rive nord de la Gila (plaine alluviale Hohokam/terrasse T2).
- 2) Un mètre de sédiments de texture fine se déposent jusqu'à 1030 apr. J.-C. Après cette date, et jusqu'à 1160 apr. J.-C., une intensification des dynamiques hydrosédimentaires est observée avec des périodes de crues. Puis, un gap sédimentaire est identifié après cette date, suite à l'épisode d'incision enregistré par Waters et Ravesloot (2000, 2001).
- 3) Sur la rive sud, la séquence se poursuit par le colmatage du cours d'eau puis une reprise de l'aggradation de la plaine après 1250 apr. J.-C. (terrasse T1).

Une conséquence directe de ces événements est la stabilité de la rive nord au cours de la période Classique à l'opposé de la rive sud. Moyennant la construction de vannes d'entrées en amont, la rive nord devait être un endroit protégé des crues et facilement irrigable. Ceci pourrait expliquer l'exploitation privilégiée de ce secteur au cours de la période Classique.

2.4. Conclusion et premières interprétations chronostratigraphiques

L'étude géoarchéologique conduite dans la moyenne vallée de la Gila nous a permis d'étudier 8 structures hydrauliques et des formations alluviales sur un transect de 40 km. Le calage chronologique n'est malheureusement pas aussi fin que dans la basse vallée de la Salt.

2.4.1. *Construction du phasage pédosédimentaire*

Dans la moyenne vallée de la Gila, 10 datations AMS ont été effectuées, et trois d'entre elles ont donné des dates inversées ou trop anciennes. La construction du premier phasage pédo-sédimentaire repose donc sur des corrélations stratigraphiques et des datations typochronologiques (6 dates).

La chronologie des sites étudiés s'échelonne entre 250 et 1870 apr. J.-C. Les canaux Casa Blanca sont exploités au cours de la période Pionnière, ceux de Santan au cours de la période Sédentaire et Classique. Les formations alluviales étudiées se mettent en place au cours des périodes Formative, Protohistoriques et Historiques, excepté pour les paléosols adjacents aux canaux d'irrigation. Tout comme pour l'analyse conduite dans le bassin de la Salt, des limites sont à prendre en compte. Ces dernières concernent l'absence de datations à la base des séquences stratigraphiques et de certains canaux, faute de matériel datable ou de budget.

2.4.2. *Organisation et formation des unités morphogéniques*

Malgré le peu de données de terrain, qui rend difficile la reconstruction des dynamiques morphogéniques dans la moyenne vallée de la Gila, les résultats obtenus viennent préciser une reconstruction des dynamiques dans ce secteur jusqu'ici très générale (Waters et Ravesloot, 2000, 2001).

2.4.2.1. **Formations des terrasses alluviales**

La partie supérieure de la séquence stratigraphique Gila Florence (terrasse T2) s'est déposée entre le 3^{ème} et le 5^{ème} s. (phase Formative Vahki). Etant donné le fort taux de sédimentation observé dans le bassin de Phoenix, il est peu probable que le mètre de sédiment sus-jacent à ce paléosol se soit déposé en plus d'1 millénaire, et il paraît pertinent de supposer une **première phase de discordance** et d'incision qui remonte très probablement à la période Sédentaire, comme cela a été observé dans la vallée de la Salt.

La séquence Santan, située dans le lit majeur actuel de la Gila correspond à la terrasse T1 et n'a pu être calée chronologiquement qu'avec une seule date entre le 17^{ème} -18^{ème} s. (échec de la datation de la base des séquences). La base des séquences rappelle le paléosol prismatique de la fin de la période Classique/début de la période Protohistorique observé dans la basse vallée de la Salt.

Une **seconde phase d'incision** a lieu au cours de la période Historique. Les chenaux incisés, bien visibles sur le terrain, sont aujourd'hui en voie de colmatage.

2.4.2.2. Evolutions morphologiques, stabilité

Les premiers dépôts datés de la période Préhistorique correspondent à la mise en place d'une zone humide au cours de la période Formative en amont de la GRIC. Le niveau des nappes est élevé et l'on assiste à une stabilisation temporaire de la plaine, associée à la paludification des zones basses et la formation de sols bruns alluviaux vertiques.

L'irrigation semble attestée dans ce secteur au début de la période Pionnière, sur ces sols lourds et faiblement drainés. En parallèle, sur la terrasse T2, mais dans la zone centrale de la moyenne vallée (Casa Blanca), l'irrigation se développe également avec la construction de plusieurs canaux.

Le second paléosol identifié dans le secteur de Santan s'est développé entre 950 et 1150 apr. J.-C., mais la durée de son évolution n'est pas connue. Composé de limons argileux brun à structure prismatique à bioturbée, l'épaisseur de ce paléosol ne dépasse pas 20 cm. Son faible développement dans ce secteur fait suite à l'activité alluviale intense enregistrée au cours de la période Classique, ou à des épisodes de ruissellement à forte capacité érosive en provenance des Santan Mountains. Il correspond probablement à l'« Orchard Soil » identifié par Waters (2000) et Onken et al. (2004).

Une intensification des crues, qui pourrait correspondre à la « crise hydrosédimentaire » de la période Sédentaire est ensuite observée dans la plaine alluviale. Des limons sableux scellent le paléosol. Cette dynamique conduit directement au colmatage et au recouvrement des canaux dans la plaine alluviale, de même qu'à la destruction des vannes d'entrée. Un **gap sédimentaire** est ensuite identifié sur la terrasse T2.

Un **second paléosol** a été identifié sur un transect de 15 km. Il s'agit d'un paléosol cumulique composé de limons argileux, dont l'épaisseur fluctue de 30 à 50 cm, selon la position de l'échantillonnage. La date de début de la pédogénèse n'est pas connue, mais de par sa position sur la nouvelle terrasse alluviale T1, elle ne peut être que postérieure à la période Classique. Une date obtenue 70 cm au-dessus de ce paléosol a donné une date protohistorique tardive à historique. Ainsi nous posons l'hypothèse que ces dépôts se sont mis en place entre 1400/1450 et 1600 apr. J.-C. Ce paléosol traduit une stabilité de la plaine suite à :

- 1) Un retour temporaire à des conditions hydrologiques stables suite à la dégradation des écoulements associés au style en tresse,
- 2) Une déprise agricole et la reconquête de la ripisylve dans le lit mineur.
- 3) Il est possible que cette phase corresponde à un retour à un style à méandres, associé à l'enfoncement du lit mineur et donc à des débits liquides supérieurs aux débits solides.

Une période d'**intensification des dynamiques hydrosédimentaires**, associée à l'élargissement, l'aggradation de la plaine et à des variations de position des chenaux est observée entre le 16^{ème} et le 19^{ème} s. apr. J.-C., avec un pic de probabilité entre 1650 et 1680 apr. J.-C. La reprise de l'accrétion sédimentaire dans la plaine alluviale est mise

en évidence par le dépôt d'1m à 1.50 m de limons laminés, massifs, dans le lit majeur de la Gila. Les taux de sédimentation sont élevés et les phases d'exondation réduites.

Trois phases d'évolution morphologique sont enregistrées. La première évolution morphologique (17^{ème}-18^{ème} s. apr. J.-C.) est visible par l'observation de rides de courant qui signent des courants contrastés, sans doute dans **un système à chenaux multiples**. L'orientation et le remplissage de ces chenaux évolue pour passer à un **style anastomosé** avec des chenaux colmatés par du matériel argileux et limoneux.

La mise en place de ces formes fluviales est favorisée par une plaine alluviale en voie d'aggradation. L'anastomose se développe sur les marges de l'axe de la vallée et permet la défluviation et le dépôt de plusieurs mètres de particules fines (Bravard et Petit, 2000), fixées par une végétation abondante. Enfin la dernière phase d'évolution est caractérisée par un **élargissement du cours d'eau** comme le mettent en évidence les galets du lit mineur, observés en partie sommitale de la séquence Santan. Ces derniers ont été observés de façon généralisée dans le cours d'eau incisé étudié. La dynamique dominante reste $Q_{s+} > Q_{l+}$.

La dernière phase de fonctionnement enregistrée sur la terrasse T1 est composée de lamines argilo-sableuses. La compétence est réduite, mais la sédimentation rythmée. Cette augmentation des débits liquides par rapport aux débits solides, associée à un haut niveau des nappes alluviales, favorise la dégradation du style en tresse, la stabilité temporaire de la plaine et l'enfoncement du lit mineur. Une phase d'**incision** à la fin du 19^{ème} s. conduit à la formation de la terrasse T1. De nombreux facteurs ont contribué au creusement de la Gila :

- 1) La déforestation régionale en réponse à l'activité minière et commerciale, et l'introduction de nouvelles espèces végétales (Bahre, 1991 ; Hackenberg, 1983) contribue à l'érosion des sols et augmente la charge solide.
- 2) La surexploitation agricole associée à l'arrivée massive des pionniers, favorise également cette érosion accélérée.
- 3) Des conditions temporaires fraîches et humides (Salzer et Kipfmueller, 2005) favorisent l'augmentation du ruissellement, du creusement et la mise en place *d'arroyos*.

2.4.3. Premier phasage pédosédimentaire dans les structures hydrauliques

- 1) La première phase identifiée correspond au début de l'irrigation dans la plaine avec la construction de canaux **entre le 3^{ème} et le 5^{ème} s.** (période Formative Vahki), voire antérieurement. Des argiles de décantation à structure prismatique colmatent les canaux et indiquent des taux de sédimentation réduits.

Etant donné l'ancienneté de cette structure, il est possible de suggérer, pour expliquer les signatures observées dans les canaux: 1) Des techniques de construction et d'ingénierie limitées ne permettant pas de dériver de grandes quantités d'eau, 2) Un chenal étroit de la Gila et/ou encaissé difficile à dériver, 3) Une faible compétence du cours d'eau.

2) Ces conditions évoluent très nettement au cours de la seconde phase, avec un colmatage des canaux par des sables et des graviers (peut-être d'origine locale), puis des limons grossiers à sableux, **entre 347-540 apr. J.-C. et 414-549 apr. J.-C.**, et enfin des argiles et limons argileux.

Cette faible compétence peut s'expliquer par l'éloignement du chenal, par des précipitations de faible intensité à l'échelle du bassin versant ou des problèmes dans l'ingénierie. Cette dynamique évolue très nettement avec la sédimentation de limons sableux à stratifications entrecroisées. On observe ici un retour à des conditions naturelles qui résulte probablement d'une variation latérale du chenal de la Little Gila suite à une augmentation des débits solides et liquides dans le bassin versant. La chenalisation des canaux est responsable de l'abandon des structures secondaires. Ainsi l'apport d'eau dans les secteurs irrigables alimentés par les canaux de distribution se réduit. Les canaux sont ensuite colmatés par des limons argileux et argiles de décantation, et abandonnés à une date qui n'est pas connue.

3) Des limons argileux bioturbés se déposent entre **950 et 1150 apr. J.-C.** (période Sédentaire) et signent des écoulements très réduits dans les canaux et des phases d'exondations marquées et prolongées. Le niveau des nappes alluviales est bas, probablement en réponse à un lit mineur encaissé, associé à un style à méandres. Cette dynamique implique une alimentation en eau très limitée en aval du secteur étudié, et potentiellement des conflits entre agriculteurs.

La seule structure hydraulique en fonctionnement au cours de cette phase est le canal principal Santan. Ce dernier est alors colmaté par des limons grossiers issus de l'effondrement des berges du canal. Il est nettoyé après cette phase, ce qui atteste d'une bonne gestion de l'hydraulique au cours de cette période, car presque 30 cm de sédiments doivent être évacués. Cette dynamique est observée en parallèle à l'accrétion de la plaine alluviale et du lit mineur en voie de colmatage.

4) Entre **1040 et 1210 apr. J.-C. (14C) ou entre 1150 et 1300 apr. J.-C.** (typochronologie), les canaux sont colmatés par des limons grossiers colluviaux et alluviaux dans le réservoir d'eau Santan.

5) Les sédiments qui se déposent dans les canaux entre **1150 et 1300 apr. J.-C.** (période Classique Soho) sont majoritairement de texture argileuse. De façon ponctuelle, des limons grossiers ont été observés.

Plusieurs hypothèses peuvent être proposées : 1) Un enfouissement du chenal principal avec une diminution des nappes suite au déficit en charge solide, 2) Des variations latérales importantes des chenaux et l'impossibilité de canaliser les eaux fluviales, 3) La fréquente destruction des vannes d'entrées des canaux qui empêche la dérivation d'eau. Une des premières conséquences de cette dynamique est la faible alimentation en eau des secteurs en aval associée à des superficies irriguées plus faibles.

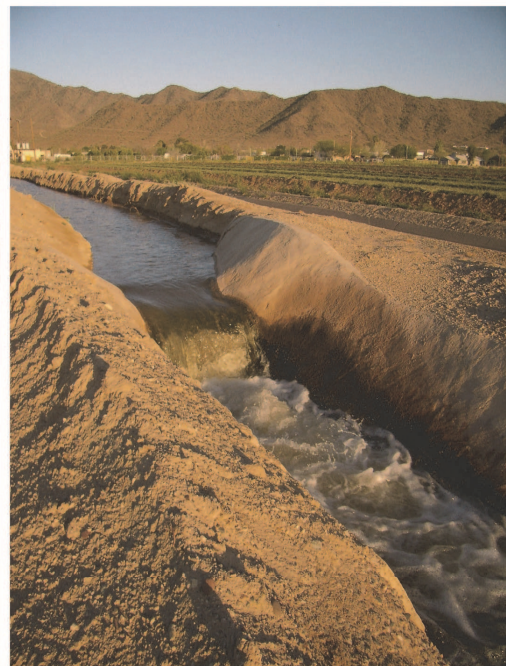
6) Entre **1300 et 1375 apr. J.-C.**, les canaux sont rapidement colmatés par des limons grossiers laminés. Ils témoignent d'une augmentation des débits liquides, des phases de crue/décru saisonnière bien marquées et de taux de sédimentation élevés.

Cette dynamique est associée à un exhaussement de la plaine, un débit et un niveau de l'eau élevés, et un probable lit mineur élargi par érosion latérale. Ces canaux sont progressivement abandonnés. La date exacte de cette déprise n'est pas connue, mais s'échelonne probablement entre la fin de la période Soho et le début de la période Civano (entre 1300-1400 apr. J.-C.). Le faciès d'abandon observé dans le secteur de Santan est composé de limons alluviaux et colluviaux, et ce dans l'ensemble des structures étudiées. Les canaux ne sont alors plus en fonctionnement.

7) La dernière phase de fonctionnement des canaux correspond aux dynamiques hydrosédimentaires enregistrées entre **1328 et 1445 apr. J.-C.**, soit au cours de la période Classique Civano/Polvoron. Elles sont caractérisées par la sédimentation de limons grossiers et de sables. Un unique canal collecteur des eaux de ruissellement a été observé dans le secteur de Santan. Son fonctionnement tardif peut être lié à l'exploitation localisée des piémonts ou à un remplissage, une fois le canal abandonné. A la fin de cette période, plus aucune structure n'est en fonctionnement dans la moyenne vallée de la Gila.

Partie III

Description fonctionnelle et typologie des paléomilieux et des pratiques agraires



CONTENU DE LA PARTIE III

CHAPITRE 1

Méthodes de laboratoire

L'approche de terrain est affinée par des analyses de laboratoires : micromorphologiques, géophysiques et paléoenvironnementales. Ces dernières ont pour objectif de caractériser les formations alluviales, les fonctionnements hydrosédimentaires et les dynamiques paysagères. Des référentiels actuels et/ou historiques sont construits afin de pallier au manque de données dans ces disciplines.

CHAPITRE 2

Caractérisation et classification des dynamiques hydrosédimentaires

Ce chapitre propose une typologie des remplissages de canaux et des formations alluviales de la basse vallée de la Salt et la moyenne vallée de la Gila. Cette typologie est construite grâce à des analyses statistiques sur la dynamique hydrique, les milieux de sédimentation et les sources sédimentaires qui intègrent des référentiels modernes sédimentologiques, micromorphologiques et magnétiques. L'interprétation des dynamiques hydrosédimentaires est favorisée par la corrélation entre les archives sédimentaires et les archives historiques écrites.

CHAPITRE 3

Caractérisation et classification des processus pédologiques, écologiques et agraires

Ce chapitre présente une typologie des traits pédologiques et écologiques observés dans les remplissages de canaux et les formations alluviales. L'échantillonnage des couvertures pédologiques actuelles (sols cultivés/non cultivés, avec ou sans couvert végétal) a permis de mettre en avant certains traits de fonctionnement qui ont facilité l'interprétation des faciès paléopédologiques et écologiques créés.

CHAPITRE 4

Caractérisation et signature pédoclimatique des sédiments

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents traits cristallins et crypto-cristallins observés et d'en comprendre l'origine et l'évolution. En complément, une section a été consacrée à l'étude des microcharbons et à leur signification climatique et/ou anthropique. En synthèse, une classification des faciès observés et leur interprétation sont proposées.

CHAPITRE 1

Méthodes de laboratoire

1. Sédimentologie magnétique	262
1.1. Principe	262
1.2. Etat des connaissances et limites	263
1.3. Objectifs de l'étude	265
1.4. Echantillonnage et mesures	265
1.5. Application à l'identification de sources sédimentaires et des milieux de sédimentation dans les bassins de la Salt, Verde et Gila	266
2. Analyses paléoenvironnementales	271
2.1. Importance de l'interdisciplinarité	271
2.2. Limites liées aux problématiques de recherches et à la conservation des artefacts	272
2.3. Evolution progressive vers une systématisation de la recherche paléoenvironnementale	273
3. Micromorphologie des sols	274
3.1. Principe, intérêts et limites pour la recherche paléopédologique et la restitution des paysages agraires en contexte semi-aride	274
3.2. Etapes analytiques	277
4. Les besoins en référentiels et les données exploitables	284

Les méthodes géophysiques (susceptibilité magnétique) et micromorphologiques ont été choisies afin de 1) mieux appréhender le rôle des processus sédimentaires et pédologiques sur l'évolution des paysages physiques (Courty, 1990) 2) créer une typologie des faciès paléoenvironnementaux et 3) raisonner sur l'origine des sources sédimentaires.

1. Sédimentologie magnétique

1.1. Principe

La structure interne d'un minéral est définie par l'agencement tridimensionnel de ses atomes, également appelé réseau moléculaire. Le comportement magnétique d'un minéral dépend fortement de cette configuration ainsi que des composants ferrimagnétiques dans son réseau moléculaire. Les plus communs regroupent les oxydes de fer, la magnétite, la maghémite, la titanomagnetite et la titanomaghémite.

Lorsqu'un minéral est soumis à un champ magnétique B, une aimantation M apparaît. Il existe une relation (Mullins, 1977):

$$M = K * B \quad \text{Avec}$$

M = aimantation induite (A/m),

B = intensité du champ magnétique,

K = susceptibilité magnétique, sans dimension (mesurée en Système International, ou en $\mu\text{m}^3/\text{kg}$) et fortement dépendante de la température.

Les minéraux peuvent être classifiés en trois groupes en fonction de la valeur de K (Tab. 17) (Dearing, 1994). Si K est positive (ie > 1), le minéral peut être qualifié de :

- *Paramagnétique* : susceptibilité magnétique faible. Par ex : biotite, olivine, amphibole, pyroxène, sels, etc..

- *Antiferromagnétique* : susceptibilité magnétique moyenne. Par ex : certains oxydes de fer, l'hématite, la goethite.

- *Ferrimagnétique* : susceptibilité magnétique forte. Par ex : oxydes de fer, magnetite, maghémite, pyrrhotite, greigite. Les minéraux ferrimagnétiques sont considérés comme primaires lorsqu'ils proviennent de l'érosion de formations magmatiques. En revanche, ceux issus de processus comme la combustion, les bactéries, les processus pédogénétiques et la diagénèse sont considérés comme secondaires.

- *Ferromagnétique* : susceptibilité magnétique positive très forte. Par ex : fer pur, nickel, chrome. Les sédiments qui ne sont pas contaminés directement par du métal ne contiennent généralement pas de minéraux ferromagnétiques.

Les sédiments sont le plus souvent un mélange de deux ou trois types de minéraux magnétiques. Par conséquent, connaître les valeurs de chaque peut aider à l'interprétation (Tab. 17). Ce tableau montre bien la contribution des minéraux ferro- et ferrimagnétiques dans la valeur finale de la susceptibilité, avec un magnétisme presque 1000 fois supérieur à la valeur maximale des minéraux para et antiferromagnétiques.

Au contraire, si la susceptibilité magnétique K est négative, avec une aimantation opposée au champ appliqué, le minéral est dit diamagnétique. C'est le cas des minéraux sédimentaires (ex : calcite, quartz et feldspaths) et des matières organiques dont la susceptibilité magnétique dépasse rarement $0.1 \mu\text{m}^3/\text{kg}$, mais qui peuvent contenir des microfractions de minéraux ferri et paramagnétiques.

Minéraux	χ ($\mu\text{m}^3/\text{kg}$)
Ferromagnétiques	
fer	276 000
Ferrimagnétiques	
magnétite	500-1000
maghémite	410-440
Antiferromagnétiques	
hématite	1.19-1.69
goethite	<1.26
Paramagnétiques	
olivine	0.01-1.3
biotite	0.05-0.95
pyroxène	0.04-0.94
amphibole	0.16-0.69
epidote	0.25-0.3
Diamagnétiques	
calcite	-0.0048
feldspath	-0.005
quartz	-0.0058
matière organique	-0.009

adapté de Dearing, 1994

Tab. 17 : Susceptibilité magnétique des minéraux communs

1.2. Etat des connaissances et limites

De nombreuses hypothèses ont été développées au cours des 20 dernières années pour expliquer la présence de minéraux ferrimagnétiques dans les sols. Prise seule, la susceptibilité magnétique ne peut trancher pour l'une ou l'autre de ces hypothèses. Deux théories d'interprétation prévalent à ce jour et peuvent être définies comme la théorie « détritique » et la théorie « biomagnétique » (Oldfield, 1992).

La théorie détritique propose trois origines possibles de la concentration en minéraux magnétiques.

1) La première est liée au régime des feux (Leborgne, 1960 ; Rummery et al., 1979). La corrélation entre les incendies et la susceptibilité magnétique est acceptée et confirmée par des expérimentations de terrain (Oldfield et al., 1981 ; Peters et al., 2001). Au cours d'un incendie, les oxydes de fer et hydroxydes peu magnétiques sont transformés en magnétite et maghémite, très magnétiques (Kletetschka et Banerjee, 1995).

2) La seconde hypothèse est liée au transport de grains ferrimagnétiques suite à l'exploitation des sols et leur érosion (Sadiki et al., 2007 ; Sroubek et al., 2007 ; Stage, 2001).

L'étude de l'évolution du couvert végétal au lac d'Annecy (Higgitt et al., 1991) a montré une forte corrélation entre un éclaircissement de la végétation et les pics de susceptibilité magnétique, ce qui suggère que le détritisme serait en partie responsable des valeurs obtenues (Arnaud et al., 2005).

3) Enfin, la circulation des particules poussiéreuses et éoliennes riches en grains ferrimagnétiques de taille variable contribue également aux valeurs de susceptibilité magnétique (Thompson et Oldfield, 1986).

La théorie biomagnétique, quant à elle, suggère que la concentration en minéraux magnétiques est liée à l'activité de bactéries magnétostatiques (Vali et al., 1987 ; Petersen et al., 1986 ; Mann, 1985) ou de bactéries qui produisent différents minéraux magnétiques comme la magnétite (Fe_3O_4) (Lovely et al., 1987) ou la greigite (Fe_3S_4) par réduction bactérienne (Stanjek et al., 1994). Ces bactéries ont une activité d'autant plus intense que la pédogénèse est élevée. Dans ce contexte, les valeurs de susceptibilité magnétique sont dues à un degré d'évolution des sols et permettent de mettre à jour ou confirmer des phases de stabilité paysagère quand la mesure est effectuée in situ dans le paléosol. Ceci a été particulièrement observé dans les séquences de lœss (Heller et Liu, 1984 ; Maher et al., 1994 ; Liu et al., 1995 ; Dearing et al., 1996) ou il a été possible de lier les phénomènes de pédogénèse aux changements climatiques.

Le choix préférentiel d'une théorie par rapport à l'autre est propre à chaque secteur géographique d'étude. Une clé d'interprétation (Fig. 129) peut faciliter l'interprétation des valeurs de susceptibilité magnétique, associée à une bonne lecture des contextes stratigraphiques et des caractéristiques des faciès pédosédimentaires sur le terrain.

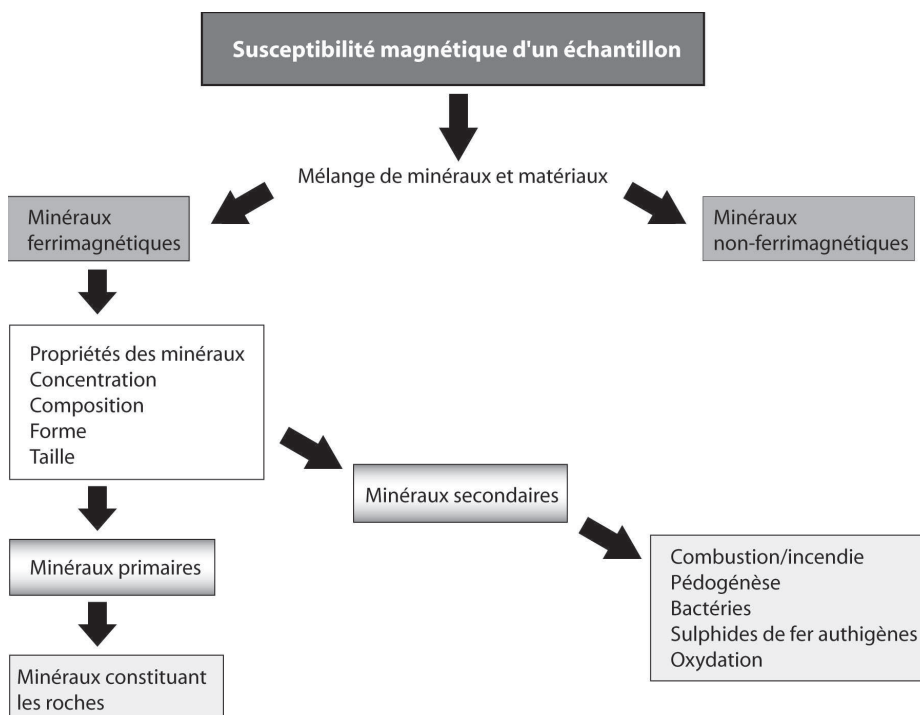


Fig. 129 : Clé d'interprétation des valeurs de susceptibilité magnétique (Dearing, 1994)

Il existe certaines limites à l'utilisation de cette méthode. Des études ont montré l'importance des facteurs locaux dans les valeurs de susceptibilité magnétique, et notamment l'influence de la roche-mère (Sadiki et al., 2007). D'autres ont insisté sur l'impact des processus post-dépositionnels.

C'est le cas par exemple des contextes d'eutrophisation des lacs ou plans d'eau, où l'on observe la dissolution diagenétique de la magnétite en réponse à des changements de conditions redox (Karlin, 1990 ; Karlin et Levi, 1983).

Une autre limite est l'absence de référentiels qui pourraient valider ou non la théorie détritique. Ceci implique la construction d'un référentiel des sources érodables dans chaque zone d'étude afin de lier les processus érosifs aux fluctuations climatiques ou aux activités anthropiques. Cette approche a été effectuée par des géologues spécialistes (Nielsen et Rasmussen, 2002 ; Kimbrough et al., 1997) et des géomorphologues (Devillers, 2005) dans certains secteurs géographiques mais l'approche est loin d'être standardisée.

Par conséquent, il apparaît nécessaire de coupler cette méthode avec d'autres analyses paléoenvironnementales afin de mieux déterminer l'origine des valeurs obtenues.

1.3. Objectifs de l'étude

Mesurer la susceptibilité magnétique dans notre contexte d'étude a deux objectifs principaux.

1) Le premier vise à comprendre l'origine géographique des sédiments détritiques selon une démarche « *source to sink* ». Dans le cas de la Salt River, trois sources potentielles sont envisageables: les formations montagneuses locales, les bassins de la moyenne et Haute Salt et le bassin de la Verde River. Des débits solides en provenance de la Verde River, de la Salt River, et/ou des formations locales impliquent une dynamique fluviale, colluviale et donc climatique spécifique. La Verde River traverse de nombreuses formations métamorphiques et volcaniques à l'opposé de la Salt River qui parcourt principalement des formations sédimentaires Permienne et quelques formations basaltiques. Cette approche a été couplée à des analyses de pétrographie optique. Dans le bassin de la Gila et ses affluents, les formations géologiques sont peu variées et la discrimination des sources sédimentaires est nettement plus complexe.

2) Le second objectif est de tester si la susceptibilité magnétique est un possible marqueur de l'activité pédologique en contexte semi-aride. Le faible développement pédologique des sédiments observés tend toutefois à prouver le contraire.

1.4. Echantillonnage et mesures

La susceptibilité magnétique a été mesurée grâce au MS2 Magnetic Susceptibility System, Bartington Instruments. Il est possible de procéder à deux types de mesures, l'une massique et l'autre volumétrique. C'est la mesure massique qui a été adoptée ici, exprimée en SI, car la densité des échantillons est très variable. Cette susceptibilité normalisée à la masse χ , s'exprime en m^3/kg .

L'usage de l'appareil est simple : tout type de matériel peut être étudié et la mesure non destructive peut être effectuée à la fois sur le terrain et en laboratoire. Une sonde est appliquée directement sur l'échantillon éloigné de toute source magnétique.

La susceptibilité magnétique a été mesurée systématiquement. Du fait de l'absence de l'appareil sur le terrain, des échantillons bruts d'environ 25 g ont été échantillonnés, avec un pas de 5 à 15 cm, en fonction de la stratigraphie observée.

Un échantillonnage plus fin n'a pas paru nécessaire étant donné la résolution chronologique disponible et le poids des échantillons à ramener en France. Selon l'homogénéité des valeurs, 3 à 5 mesures par échantillon ont été effectuées et une moyenne entre toutes ces valeurs a été choisie comme valeur finale.

Par ailleurs, afin de mettre en place un référentiel de susceptibilité magnétique, 22 formations géologiques ont été échantillonnées (Tab. 18). Nous n'avons pas pu bénéficier d'un susceptibilimètre sur le terrain, ce qui nous a obligés à rapatrier les échantillons au CEPAM pour effectuer les mesures, et qui a limité, pour des questions pratiques et financières, l'ampleur de l'échantillonnage. Les fragments prélevés sont dénués de traces d'oxydation surfacique, ont une surface plane et sont relativement profonds afin de saturer la sonde de l'appareil. Trois mesures par échantillons ont été effectuées et moyennées.

1.5. Application à l'identification de sources sédimentaires et des milieux de sédimentation dans les bassins de la Salt, Verde et Gila

1.5.1. *Cartographique de la susceptibilité magnétique*

1.5.1.1. Identification des formations érodables

Un référentiel magnétique actuel a été réalisé à l'échelle des bassins de la Salt, Verde et de la Gila. Il n'existe aucune collection minéralogique et géologique disponible à *Arizona State University* et aucune prospection de susceptibilité magnétique n'a préalablement été réalisée dans ces bassins versants (Arrowsmith, communication personnelle). La première étape de ce travail a donc reposé sur l'acquisition de données géologiques en se fondant sur la carte géologique existante (Reynolds, 1988).

Une première observation met en évidence le lien entre les valeurs de susceptibilité magnétique et les formations volcaniques, et notamment basaltiques (Tab. 18). Seule la formation sédimentaire Tsy a fourni des valeurs de susceptibilité magnétique très élevées. La présence de microparticules volcaniques dans cette formation pourrait expliquer ces valeurs.

	Formation	Valeurs	Période géologique	Type de roches
Formations Sédimentaires				
Paléozoïque et Protérozoïque	P	-1	Permien	Calcaires et grès du plateau du Colorado
	Pz	11		Roches indifférenciées
	PP	2	Permien et Pennsylvanien	Schistes, grès et calcaires
	MC	-3	Mississippien et Cambrien	Calcaires, schistes, quartzite
	Xq	-3	Protérozoïque ancien	Quartzite
	Ys	2	Protérozoïque moyen	Quartzite, Grand Canyon Supergroup, Apache

				Group
Mésozoïque	Ks	6	Crétacé	Grès et schistes
Cénozoïque	Tsy	2471	Pliocène à Miocène	Bouse et Bidahochi formation
	Ts0	15	Oligocène/Eocène	Graviers, gravillons et grès du plateau du Colorado
Formations plutoniques				
Protérozoïque	Yg	8	Protérozoïque moyen/ancien	Roche de type granitique
	Yxg	9		Roche de type granitique
	Xg	25		Granite, granodiorite, gabbro
Mésozoïque	Tkg	3	Fin Crétacé/début tertiaire	Roche de type granitique
	TRm	1	Début triassique	Formation Moenkopi
Formations magmatiques				
Protérozoïque	Xmv	4208	Protérozoïque moyen	Roches métavolcaniques
	Yd	1431		Diabase
Mésozoïque	Kv	699	Fin Crétacé/ début tertiaire	Rhyolite, andésite et formations intrusives associées
Cénozoïque	Qtb	561	Holocène à Pliocène	Basalte
	Tb	701	Miocène	Basalte
	Tv	900	Miocène à Oligocène	Roches pyroclastiques
Formations alluviales				
Cénozoïque	Q	/	Holocène à mi-Pléistocène	Alluvions dans vallées et piémonts, dépôts éoliens et glaciaires
	Qo	1518	Pléistocène à Pliocène	Dépôts de surface (mesuré dans bassin Verde)

Tab. 18 : Liste des formations géologiques identifiées dans les bassins versants de la Salt, Gila et Verde, et valeurs de susceptibilité magnétique indicatives associées

1.5.1.2. Cartographie régionale des résultats

La majeure partie du **bassin de la Salt** est composée de dépôts peu magnétiques dont la susceptibilité ne dépasse pas 30 S.I. (Fig. 130). Dans cet intervalle de valeurs, les valeurs les plus faibles sont associées aux formations carbonatées (PP), tandis que les plus élevées sont liées aux formations gréseuses (TSO) (Tab. 18). Dans le bassin amont, au niveau des Black et White Rivers, les formations basaltiques Cénozoïque Qtb et Tv présentent un signal magnétique élevé (respectivement 560 et 900 S.I.). Les formations éparses de dolérite Protérozoïque (Yd) observées légèrement en amont de la confluence avec Tonto Creek présentent une susceptibilité magnétique très élevée de 1431 S.I. Nous posons l'hypothèse que des valeurs de susceptibilité magnétique élevées dans les alluvions de la basse vallée de la Salt, traduisent un signal magnétique amont prédominant, qui implique des précipitations en zone montagneuse ou des épisodes de fonte des neiges.

A l'opposé du bassin versant de la Salt, l'ensemble des formations géologiques le long de la **Verde River** sont très magnétiques. L'amont du bassin versant, à très forte pente, alimente la Verde River en dépôts basaltiques Cénozoïques (formation Tby non échantillonnée et Qtb, 560 S.I.). Les formations géologiques de la partie centrale du bassin versant possèdent les valeurs de susceptibilité magnétique maximales enregistrées : les formations basaltiques de la période Protérozoïque (Xmv) atteignent 4208 S.I., tandis que les formations sédimentaires de la période Cénozoïque présentent des valeurs de 700 SI (Tb) à 2470 (Tsy).

Les formations géologiques dans le **bassin de la Gila** sont plus homogènes car principalement composées des formations Cénozoïques basaltiques Tsy (2470 SI) et Tv (900 SI) le long de la rivière San Pedro et de la moyenne à haute vallée de la Gila, de même que des formations granitiques de la même période (Tg) (340 SI). Le long de la Santa Cruz River, les données sont manquantes, mais une grande partie des formations observées sont alluviales et présentent un signal magnétique composite.

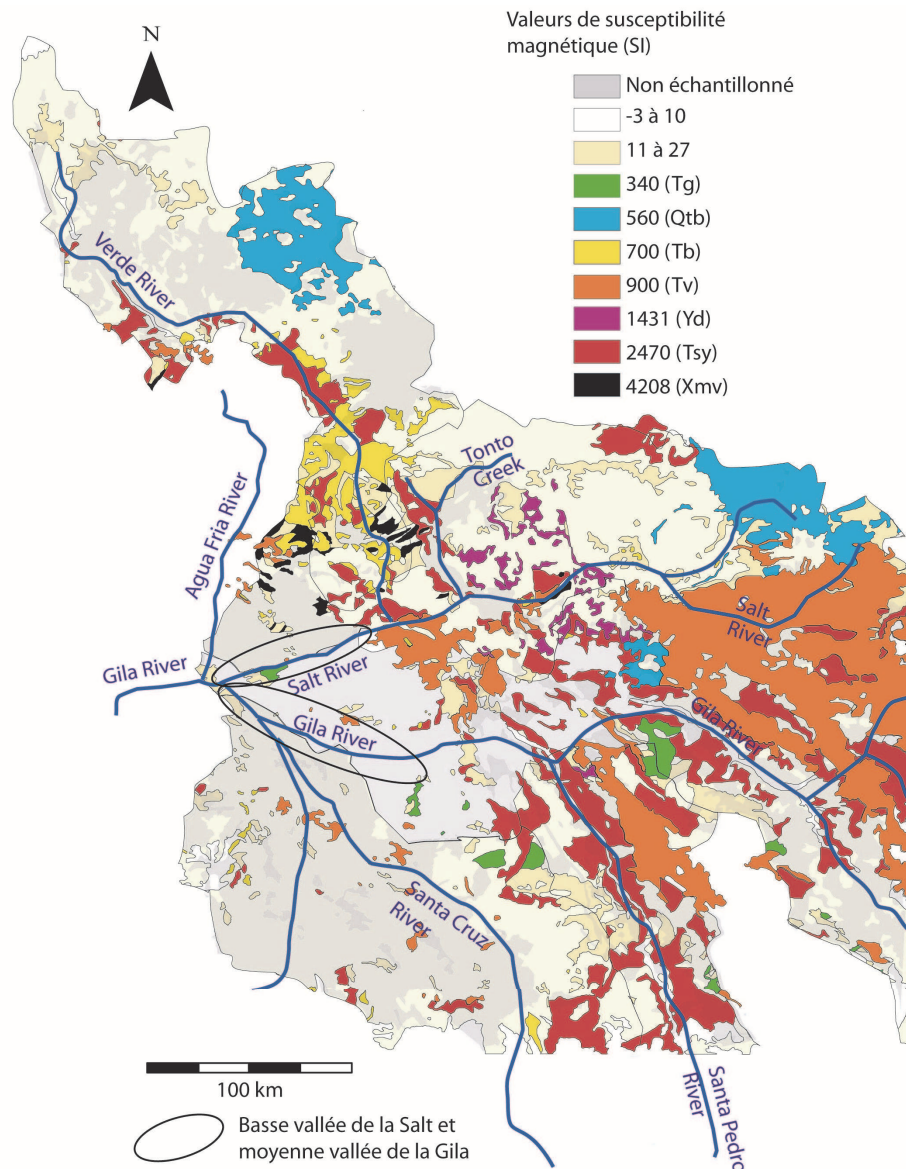


Fig. 130 : Carte des valeurs de susceptibilité magnétique dans les bassins de la Salt, Verde et Gila. L'unité standard est en SI (Système International)

1.5.1.3. Apports de la susceptibilité magnétique à l'identification des apports sédimentaires d'origine locale

Etant donné l'importance des apports sédimentaires d'origine locale dans notre secteur, suite à la dérivation volontaire d'eau ou à des impacts latéraux associés aux processus alluvio-colluviaux (ravinement), nous avons souhaité compléter l'information

magnétique régionale obtenue et tester la valeur de la susceptibilité magnétique comme marqueur d'apports latéraux.

Dans la basse vallée de la Salt, les zones à plus fort pendage, sujette à l'érosion (diffuse ou concentrée) et à partir desquelles l'eau peut être canalisée, sont spatialement étendues sur presque l'ensemble de la rive nord et de la rive sud. Sur la rive nord de la Salt River, l'érosion des Papago Buttes, formées de roches sédimentaires tertiaires gréseuses rouges très friables et de roches granitiques, va directement affecter l'embouchure des canaux principaux du Canal System 2 (Partie II, Fig. 66, et Fig. 131a et b) (formation Tsm : Susceptibilité Magnétique <100 Système International ; Xg : SM < 25 SI).

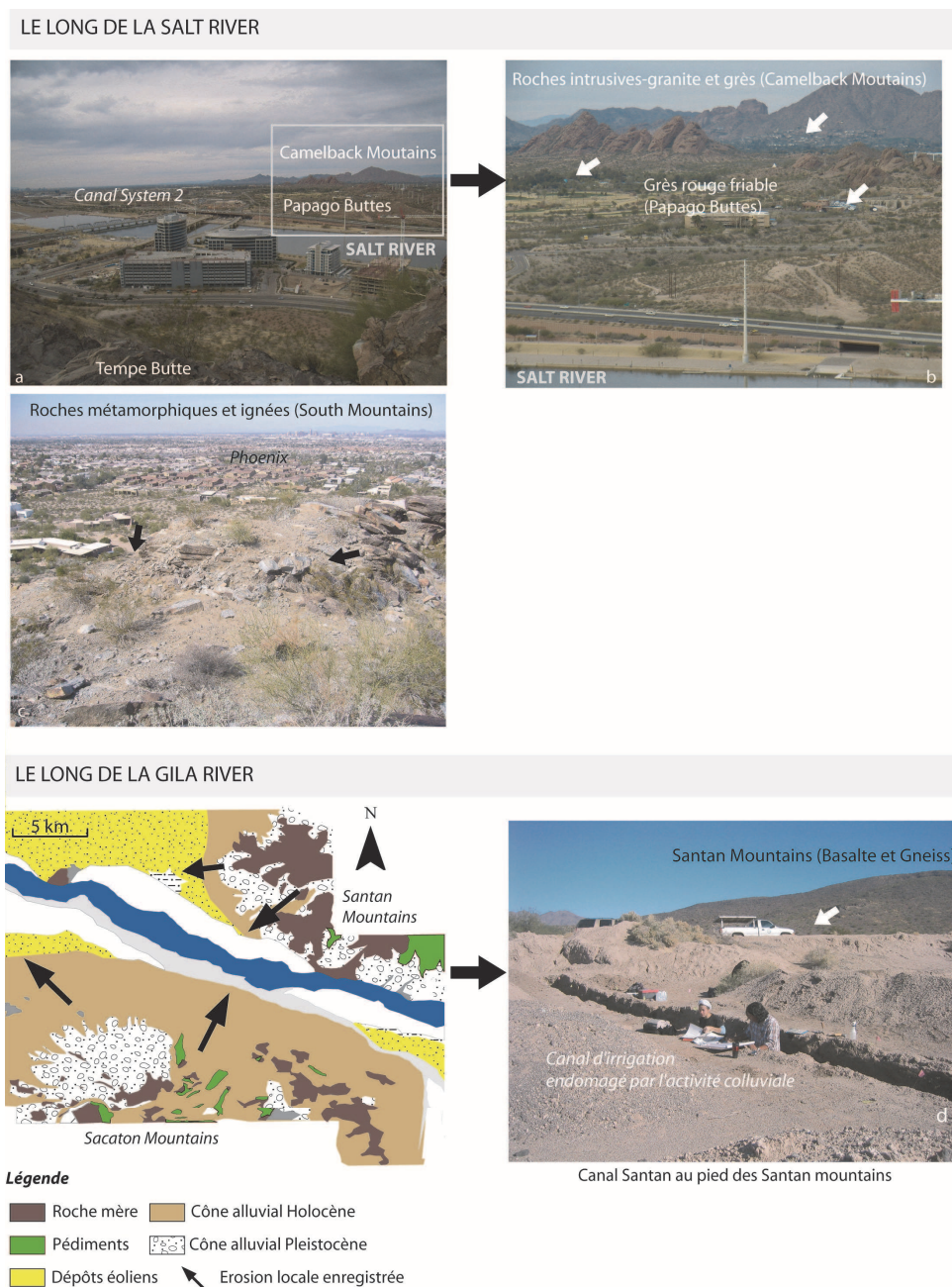


Fig. 131 : Photographies des zones d'érosion dans le bassin de Phoenix

Plus au nord, les Phoenix Mountains composées de roches volcaniques et métamorphiques protérozoïques, peuvent à la fois éroder et alimenter de façon distale les canaux situés au nord du Canal System 2 (Xmv : SM < 14 SI). A l'aval de ce système, la présence de cônes Holocènes associés au cours d'eau intermittent Cave peut conduire à des crues détritiques soudaines qui endommagent les canaux, mais la restitution de leur origine exacte est délicate.

Sur la rive sud de la Salt, en amont, les principales formations géologiques sont les Goldfield Mountains composées de roches granitiques protérozoïques qui, suite à leur érosion, peuvent avoir un impact local sur l'embouchure des canaux construits dans ce secteur (Yg : SM = 8 SI). L'hypothèse de la canalisation des eaux de ruissellement pour alimenter les canaux principaux peut-être posée, mais semble peu cohérente étant donné la proximité des prises d'eau fluviales. Plus en aval, les South Mountains sont composées de roches granitiques (SM = 340 SI) et métamorphiques (SM=14 SI). Les canaux semblent relativement éloignés de ce massif, mais l'activité torrentielle intense qui y a été observée (Fig. 131c), suggère des dommages fréquents sur les structures hydrauliques construites à la fois le long de la Salt et de la Gila, qui modifient les valeurs magnétiques des remplissages.

Le long de la moyenne vallée de la Gila, la zone géographique située entre les Santan et Sacaton Mountains est particulièrement affectée par l'activité torrentielle et le colluvionnement suite à l'activité des nombreux cônes détritiques Pléistocènes et Holocènes (Partie II, Fig. 66 et Fig. 131). La canalisation des eaux de ruissellement est attestée dans ce secteur. Les dépôts sont alors composés d'apports importants en particules basaltiques pour les Santan Mountains (Tv : SM = 900 SI) et granitiques pour les Sacaton (Tkg : SM= 3 SI) (Fig. 131 d).

1.5.1.4. Limites de l'approche et conclusions

La principale limite à cette approche réside dans le protocole d'échantillonnage.

Par ailleurs, bien que précise, la carte géologique ne reflète pas avec exactitude la diversité des formations reconnues sur le terrain. Nous avons alors privilégié l'échantillonnage sur les roches dominantes au sein de chaque formation géologique. Les valeurs de susceptibilité magnétique peuvent également résulter de processus pédologiques. Ces derniers sont très faiblement exprimés dans le bassin de Phoenix et les fortes valeurs de SM ne sont pas liées au degré de pédogénèse. Elles sont donc héritées des sources géologiques.

Cette carte nous permet alors de caractériser les flux sédimentaires en provenance de l'amont des bassins versants. Les valeurs les plus élevées de susceptibilité peuvent être reliées aux formations basaltiques, notamment celles du bassin de la Verde, le bassin de la Salt étant moins riche en composants magnétiques, excepté pour les zones amont. Dans le bassin de la Gila, la susceptibilité ne permet pas de discriminer les origines sédimentaires. La dominance des facies volcaniques Tv et sédimentaires Tsy rend la restitution de leur origine, de locale à régionale, très difficile.

Plus localement, la susceptibilité magnétique nous informe que les apports latéraux dans la basse vallée de la Salt, issus de la dérivation volontaire de l'eau ou d'épisodes d'érosion, présentent des valeurs très faibles, inférieures à celles des alluvions stricto sensu. C'est le cas également des Sacaton Mountains dans la moyenne vallée de la Gila, mais pas des Santan Mountains, qui sont caractérisées par un signal magnétique très fort.

2. Analyses paléoenvironnementales

2.1. Importance de l'interdisciplinarité

Les études pluridisciplinaires favorisent une reconstruction précise et complète du paléoenvironnement (Fig. 132). Leur couplage peut permettre d'approcher les rythmes et modes agraires, les phases de déprises humaines, l'impact des pratiques humaines sur le fonctionnement des sols, la végétation et des hydrosystèmes (Berger, 1999).

Les études botaniques reconstruisent le couvert végétal, local à micro-régional, mais enregistrent également les activités agraires.

- L'*anthracologie* et la *carpologie* restituent la végétation ligneuse brûlée (ou non) sur les berges et dans les fossés et permettent d'établir une chronologie d'utilisation.

- La *palynologie* enregistre les processus de défrichements, la saisonnalité de l'utilisation de l'hydraulique (Peck, 1973 ; Crowder et Cuddy, 1973 ; Bonny, 1976), les dynamiques de circulation de l'eau (McLaughlin, 1976) et l'anthropisation progressive de l'environnement. Les petits canaux latéraux sont étudiés de façon préférentielle car ils renseignent bien mieux sur les cultures locales. Les principaux assemblages arboréens locaux et le type de couverture herbacée sont estimés grâce à l'*analyse des phytolithes*.

- Les *analyses malacologiques* et *ostracologiques* (coquillages et ostracodes) restituent la chimie de l'eau (salinité), sa qualité, les rythmes de sédimentation et les conditions de saturation en eau. L'étude des coquillages permet également d'estimer la structure de la végétation, souvent à l'échelle stationnelle (canal ou berge). Les ostracodes sont de très bons marqueurs du milieu et ont été rapidement adoptés comme marqueurs paléoécologiques (Delorme, 1968, 1971, 1989 ; Turpen et Angell, 1971 ; Cadot et Kaesler, 1977 ; Bodergat, 1983 ; Bodergat et al., 1993) car ils sont sensibles aux évolutions chimiques de l'eau.

- L'*étude des microfossiles non polliniques* comme les algues unicellulaires microscopiques (diatomées) peut également être très utile. Les diatomées sont de bons bioindicateurs qui peuplent les cours d'eau toute l'année et dont l'adaptation aux fluctuations chimiques de l'eau est bien connue.

L'information mise au jour, comme le degré d'hygrométrie et la température de l'eau, est d'ordre local, à corrélérer avec d'autres études.

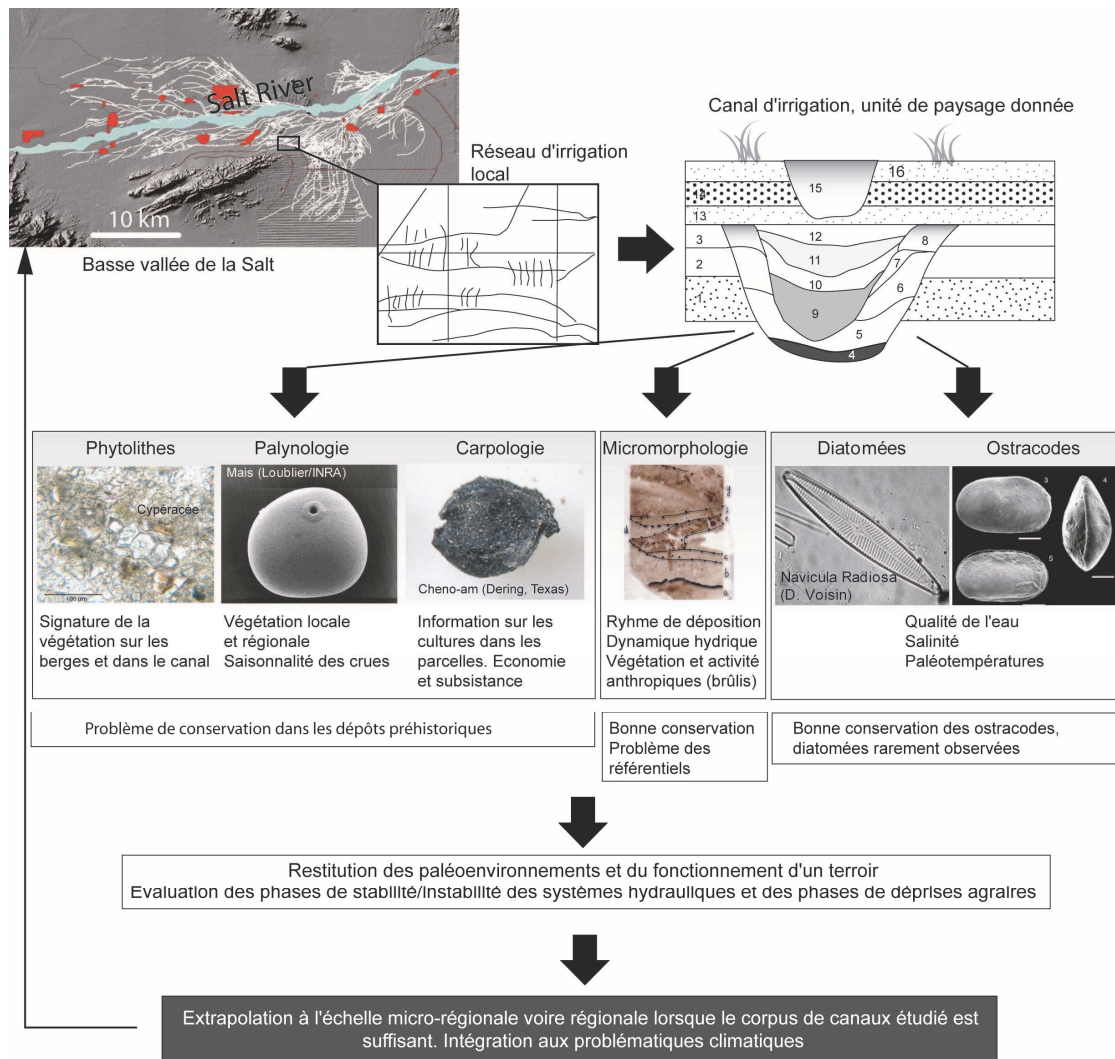


Fig. 132 : Echelles de perception et apports d'une recherche interdisciplinaire multi-proxy intégrée

2.2. Limites liées aux problématiques de recherches et à la conservation des artefacts

Comme indiqué précédemment, la recherche en Arizona est entre les mains d'entreprises privées qui proposent des tarifs très avantageux étant donné la forte concurrence sur le marché de l'archéologie. Rares sont celles qui peuvent poursuivre des études interdisciplinaires, et parfois même établir une chronologie d'utilisation des réseaux d'irrigation et structures archéologiques.

Par ailleurs, le contexte semi-désertique nuit fortement à la préservation des écofactes.

- Les pollens sont très rarement conservés (excepté ceux de chénopodiacées) et n'apparaissent que de façon sporadique dans les canaux du fait des variations fréquentes du niveau de l'eau et des processus d'oxydo-réduction qui détruisent l'exine.

Dans les sols, agricoles ou non, des études ponctuelles réalisées par S. Guillon (2008, 2010, CEPAM-CNRS) ont montré la quasi disparition des pollen, peut-être en relation avec des phases de percolation d'eau qui entraînent les pollen en profondeur ou conduisent à leur altération.

- Les charbons sont relativement rares et présents le plus souvent sous forme de microcharbons indéterminables du fait de leur petite taille.

L'anthracologie n'est pas une discipline répandue en Arizona. Malgré un référentiel mis en place (Purdue et Henry, 2009), les charbons n'ont pu être déterminés, faute de temps. Ils sont présents toutefois dans certains canaux peu bioturbés et relativement profonds.

- Les graines et phytolithes sont également rarement observés dans les remplissages de canaux préhistoriques. Les céréales d'époque historique sont par contre fréquemment identifiées après tamisage. En revanche, presque aucun phytolithe n'a été observé en lame mince pour les périodes préhistoriques.

- L'étude des diatomées reste très localisée. Les sédiments préhistoriques n'ont jamais mis au jour des proportions significatives de diatomées (Phillips, communication personnelle) et leur analyse n'est donc pas conduite de façon systématique.¹²

In fine, les analyses les plus pertinentes en contexte semi-désertique sont les études ostracologiques, car les ostracodes sont systématiquement repérés dans les canaux. Ces analyses, généralement conduites par M. Palacios-Fest sont régulièrement publiées (ex : 1989, 1994a et b, 1997 a et b, 2002), mais couteuses, donc non systématisées.

Par conséquent, les études micromorphologiques conduites ont été rarement associées à des analyses paléoenvironnementales. L'échantillonnage multi-proxy, en revanche, a été systématiquement effectué dans toutes les US observées, au cours de chaque projet de fouille préventive. Les échantillons prélevés ont été confiés aux laboratoires des compagnies privées pour être étudiés en fonction des budgets disponibles.

2.3. Evolution progressive vers une systématisation de la recherche paléoenvironnementale

Les études paléoenvironnementales effectuées depuis les années 80 se sont surtout focalisées sur l'environnement immédiat du site archéologique de même que les stratégies de subsistance qui ne reflètent qu'une image géographiquement limitée et biaisée du paléoenvironnement. Les rapports de fouilles sont la synthèse d'accumulation de données et de travaux de recherche très poussés sur un site archéologique donné. Il existe plus de 400 rapports complets pour le bassin de Phoenix, sans compter les Technical Reports, ainsi que les rapports diagnostics.

De nombreux chercheurs prennent progressivement conscience de l'importance des études multiproxi. Initialement peu prise en compte, la chronologie est devenue aujourd'hui une des priorités de certaines entreprises privées (Desert Archaeology, Ecoplan, Mesa Southwest Museum). La collaboration avec certains chercheurs spécialisés dans les techniques de datation par OSL, comme ceux de l'Université de Reno, Nevada (Glenn Berger) et les demandes de financement se mettent en place (Howard et Abbott, National Science Foundation, en attente). Certains programmes se tournent maintenant vers de véritables études géoarchéologiques, auparavant très rares, qui intègrent les études dendrohydrologiques, dendroclimatiques et géomorphologiques (Powell et al., 2004 ; Hendersen et Clark, 2004).

¹² Les diatomées et les phytolithes sont rarement préservés dans les contextes préhistoriques, mais la raison de leur absence n'est pas connue. L'hypothèse des conditions chimiques de l'eau est posée, de même que le protocole d'extraction.

Il est du ressort de l'archéologue de la ville de Phoenix de créer une table de systématisation des pratiques archéologiques afin qu'elles soient adoptées par toutes les compagnies privées. C'est le cas des pratiques de terrain concernant la stratégie de recouplement des canaux (plusieurs tranchées par canal).

3. Micromorphologie des sols

3.1. Principe, intérêts et limites pour la recherche paléopédologique et la restitution des paysages agraires en contexte semi-aride

3.1.1. Histoire et objectifs généraux de la discipline

La micromorphologie des sols se fonde sur les concepts interprétatifs de la pétrographie et de la pédologie aux échelles microscopiques afin de déterminer les constituants du sol (simple, complexe, minéral et organique) et leurs relations (Bullock, 1985). Son objectif est l'étude de la dynamique des milieux de sédimentation ainsi que la formation et l'évolution des sols dans leur globalité ou plus spécifiquement de certains traits spécifiques d'origine naturelle ou anthropique (Cammass et Watzel, 1999). L'observation en lame mince est la continuité d'un travail de terrain effectué en amont, où une première classification basée sur l'unité stratigraphique est élaborée. Les variabilités locales propres à chaque secteur poussent le chercheur à établir ses propres référentiels à partir de données actuelles. En effet, seuls des référentiels de minéralogie et pétrographie sont disponibles pour la description des constituants (Fedoroff et Courty, 1994).

C'est le chercheur australien W.L. Kubiëna qui le premier expose la méthode de la micropédologie en 1938. Il propose les premières clés de description et met en place une terminologie spécifique tout en s'intéressant dans un deuxième temps à l'aspect morphogénétique des sols. Brewer et Sleeman (1960) systématisent la description micromorphologique, complétée par Bal en 1973. La discipline se popularise et des centres de recherches ainsi que des formations universitaires et des groupes de travail se mettent en place en Grande Bretagne, France et Espagne. C'est en 1985, grâce aux travaux de Bullock et al. que s'établissent une classification et terminologie internationale. En parallèle, des clés d'interprétation se mettent en place et les premières sont publiées dans l'ouvrage de Fitzpatrick en 1980 : *Micromorphology of soils*.

Contrairement à l'Europe où la micromorphologie est considérée comme une discipline, elle apparaît plus comme un outil en Amérique du Nord (Wilding, 1997 ; Wilding et Flach, 1985 d'après Stoops, 2003) où elle se focalise sur les processus descriptifs (Douglas et Thompson, 1985 ; Douglas, 1990).

3.1.2. Rôle dans la recherche paléopédologique et la dynamique des paysages

3.1.2.1. **Etat de la recherche**

L'approche micromorphologique en contexte agraire est récente et bien que d'anciennes traces d'activité agricoles aient été mises en évidence dans le nord de l'Europe, les approches géoarchéologiques et micromorphologiques menées ne sont pas transposables à d'autres contextes environnementaux (Courty et Nornberg, 1985 ; McPhail 1986, 1990, 1992 ; McPhail et al., 1987 ; McPhail et al., 1990 ; Gebhardt, 1993, d'après Berger, 1996).

Dans les milieux semi-arides à arides, des études micromorphologiques récentes se sont penchées principalement sur les contextes agraires et les milieux fluviaux. En contexte agraire, les micromorphologues et pédologues s'attachent à comprendre les propriétés physiques des sols irrigués actuels (ex : Hallaire et al., 1998 ; Courty, 1990 ; Courty et Fedoroff, 1985 ; Mathieu et Ruellan, 1987 ; Verba et al., 1995, Lebedeva-Verba et Gerasimova, 2009). Ces travaux servent de référentiels à l'étude des sols cultivés anciens (ex : Presley, 2004 ; Verba et al., 2002 ; Courty, 1990) où l'objectif est de reconnaître des pratiques culturelles et estimer l'impact d'une exploitation agricole passée sur les propriétés actuelles des sols (ex : Wilson et al., 2002 ; Sandor et al., 2007 ; Goodman-Elgar, 2007, 2008). Pour cela, les micromorphologues étudient la structure des sols, leur porosité, la matière organique, les traits illuviaux (revêtements, ex : Pal et al., 2003) et les croûtes de surface (ex : Bresson et Valentin, 1994), et les traits cristallins (fer, carbonates, gypse) (ex : Alonso et al., 2004), qui renseignent sur l'évolution pédologique des sols, leur sensibilité à l'érosion, leur aération, la densité de la végétation, et le type de pratique culturelle.

En milieu fluvial, la recherche s'est penchée sur des problématiques paléoenvironnementales et climatiques (ex : Courty et Fedoroff, 1999 ; Courty, 1990 ; Fedoroff et Courty, 1989, 1999 ; Singhvi et Derbyshire, 1999). Les marqueurs sélectionnés sont structuraux, cristallins (carbonates secondaires, ex : Sehgal et Stoops, 1972 ; Courty, 1994 ; Monger et al., 1991), illuviaux (ex : Courty et Fedoroff, 1985) et écologiques (ex : Wattez et Courty, 1987).

L'analyse micromorphologique des remplissages de structures hydrauliques est limitée (Gebhardt, 1988, 1993 ; Leroyer et Krier, 1991 ; Courty, 1990, Berger, 2000) voire inexistante en contexte désertique et requiert donc la création de référentiels.

3.1.2.2. **Objectifs**

Afin de comprendre les dynamiques paléoenvironnementales qui régissent l'évolution des paysages et discriminer l'origine anthropique ou naturelle des traits pédologiques et sédimentaires (Gebhardt, 2000), il est possible d'étudier les remplissages de fossés et les dépôts d'inondation à l'échelle microscopique. Notre approche micromorphologique cherche à répondre à deux objectifs principaux. Le premier objectif vise à identifier et analyser les dynamiques en jeu et leurs interactions. Il s'agit des :

1) **Processus sédimentaires** (milieu de sédimentation, source des sédiments, dynamique hydrique), avec un focus sur les traits diagnostiques de crue, l'érosion des

sols, le type de sédimentation (rythmique, brutale et soudaine) et son implication sur le fonctionnement de l'hydrosystème des canaux associés.

2) **Dynamiques pédologiques et écologiques** (présence de végétation susceptible de ralentir la vitesse de circulation de l'eau dans les canaux et de limiter la répartition spatiale des crues dans la plaine en piégeant les sédiments fins ; fréquence de mise en eau et rythme de sédimentation : le canal s'est-il asséché ? de l'eau a-t-elle stagné ?)

3) **Activités humaines** (irrigation et exploitation des sols, brûlis, aménagements potentiels étudiables en lame mince)

4) **Dynamiques pédoclimatiques** (épisodes de stagnation ou d'évaporation de l'eau, humidité du sol).

Le second objectif de notre approche micromorphologique est de constituer une typologie des faciès de comblement des canaux et des formations alluviales. Ces caractérisations pédo-sédimentaires permettent de comparer et regrouper des séquences de colmatage synchrone, puis de formuler des modèles de fonctionnement et des ambiances paléoenvironnementales à l'échelle du réseau d'irrigation puis à l'ensemble de la vallée (Berger, 2001).

3.1.3. *Limites dans l'interprétation micromorphologique*

Comme disait Brewer en 1972, "micromorphology is not a magical means of solving pedological problems". De l'échantillonnage à l'interprétation, un certain nombre de limites sont à évoquer :

1) Notre étude requiert un échantillonnage systématique mais stratégique du fait du coût élevé des lames minces.

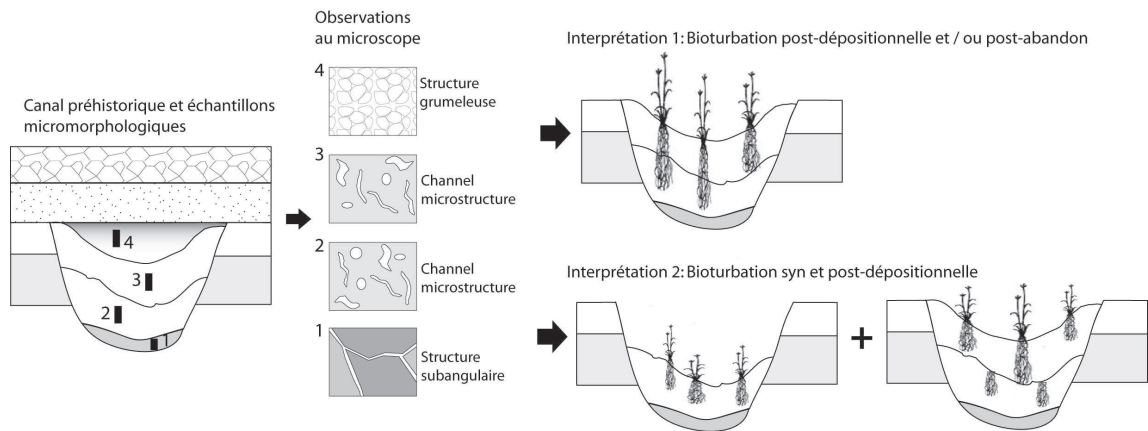
2) La description des constituants du sol repose sur la terminologie internationale de Bullock (1985) et il existe une interprétation implicite associée à chacun de ses termes (Murphy et al., 1985).

4) On observe une tendance générale à limiter les processus descriptifs dans les publications, ce qui freine la présentation détaillée de cas de figures et donne l'impression d'interprétations parfois erronées.

5) Brewer (1972) insiste sur le besoin de comprendre tous les processus pédologiques contemporains et modernes. Les interprétations oublient souvent le principe d'équifinalité (Valentine et Dalrymple, 1976 ; Pawluk, 1978 ; Kemp et al., 1993) qui implique qu'une même signature pédo-sédimentaire peut être obtenue avec des conditions initiales très différentes. Une des principales difficultés repose sur la discrimination entre les processus syn- et post dépositionnels mais également post-abandon (Valentine et Dalrymple, 1976 ; Pawluk, 1978 ; Kemp et al., 1993) (Fig. 133). Les signatures syn- et post-dépositionnelles sont conservées lorsque les sédiments alternent régulièrement et ne sont pas perturbés. En revanche, l'observation de traits similaires sur une séquence de remplissage complète implique l'existence de

perturbations post-abandon qui devront être prises en compte dans l'interprétation des dynamiques fluviales.

Homogénéité de la microstructure et de la porosité



Homogénéité des traits micro-cristallins

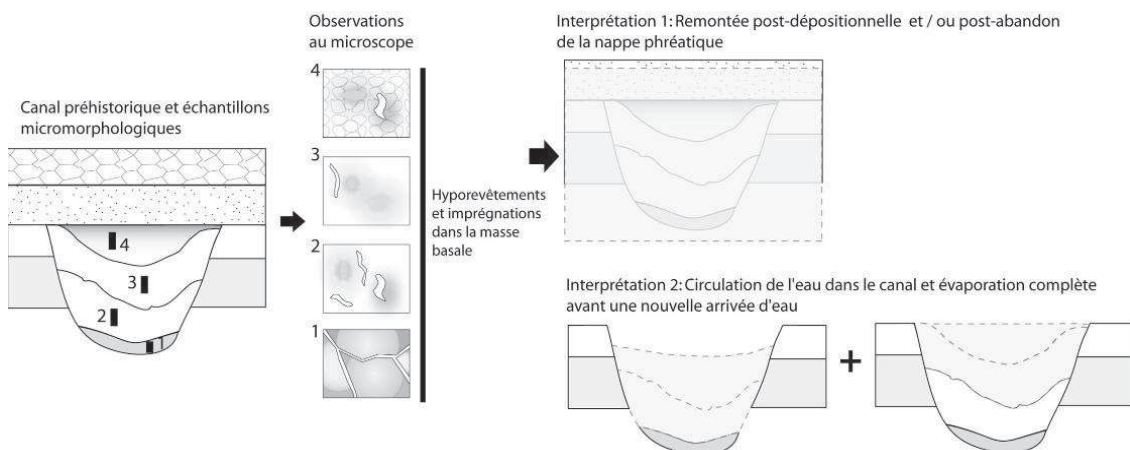


Fig. 133 : Equifinalité des processus pédo-sédimentaires

3.2. Etapes analytiques

3.2.1. *Les niveaux d'observations en micromorphologie*

Il existe un emboîtement et une hiérarchisation des échelles d'observation du terrain à l'analyse microscopique (Fedoroff et Courty, 1994). Il faut maîtriser le passage de l'échelle du paysage (du km au m) en 3D à celle du profil (m au cm) en 2 et 3D, puis à l'étude des lames sous la binoculaire (cm au mm) en 2D et enfin à l'étude microscopique (mm au μm) en 2D (Fig. 134). C'est en fonction de cette hiérarchisation que les stratégies d'échantillonnage sont définies et les marqueurs micromorphologiques choisis.

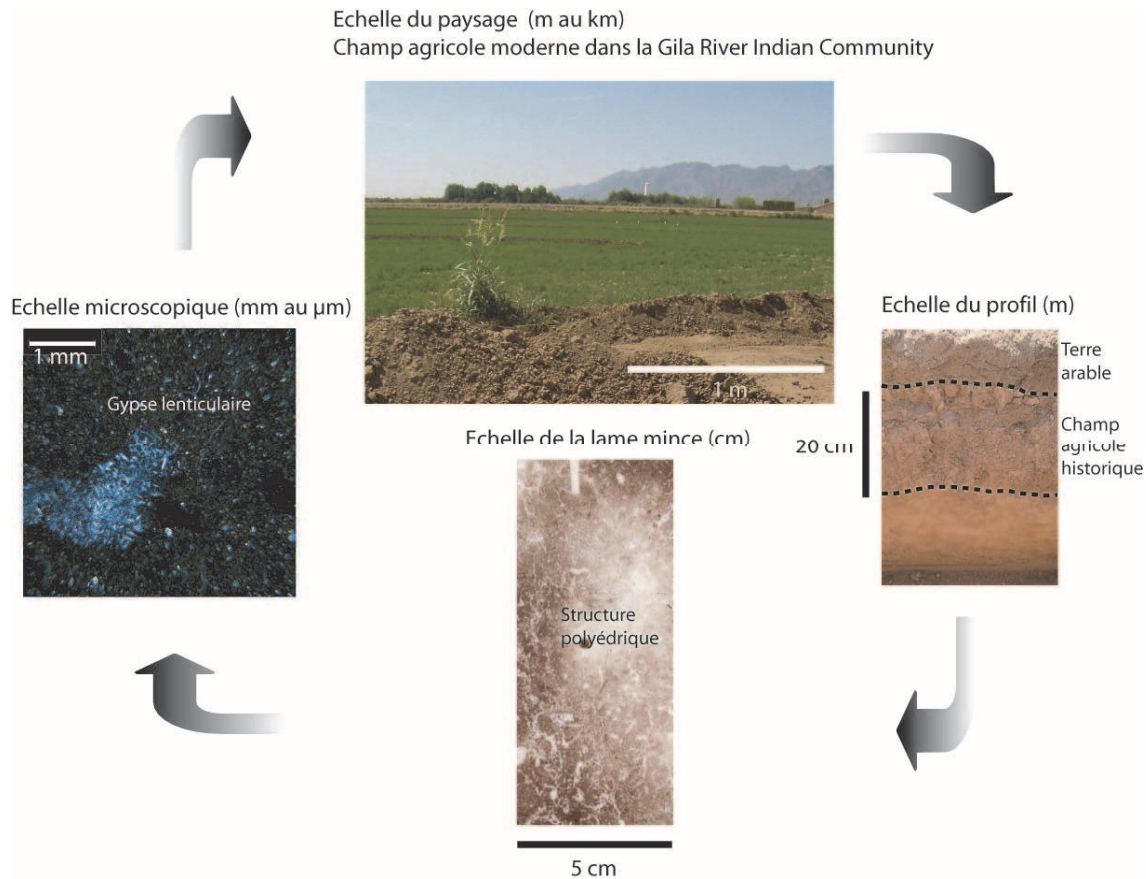


Fig. 134 : Les 4 échelles d'observation, du terrain à la lame mince (ex : champ agricole historique, Gila River Indian Community)

3.2.2. *Echantillonnage et préparation*

3.2.2.1. Stratégie d'échantillonnage

Deux types d'échantillonnages sont possibles en fonction de la problématique de recherche (Courty et al., 1989) (Fig. 135). L'échantillonnage systématique consiste à prélever des échantillons dans toutes les unités stratigraphiques décrites et identifiées sur le terrain. L'échantillonnage spécifique sera choisi lorsqu'une question particulière est posée. Quel que soit le type de prélèvement, les zones bioturbées sont à éviter.

Dans la mesure du possible, et en fonction des moyens impartis (financier notamment), un échantillonnage systématique a été adopté en contexte naturel et anthropique.

Malgré ce choix, certains facies dans les canaux n'ont pas été échantillonnés du fait de la variation latérale du remplissage et du nombre très important d'unités stratigraphiques observées (parfois plus de 40 par structure hydraulique).

Du fait de la fréquente induration des dépôts, les échantillons de forme rectangulaire sont "sculptés" au sein du profil avec des dimensions d'environ 17 cm de hauteur, 10 cm de largeur et 7 cm de profondeur. Afin qu'ils ne soient pas détruits, ils sont couverts par des bandes plâtrées et leur référence et orientation indiquées.

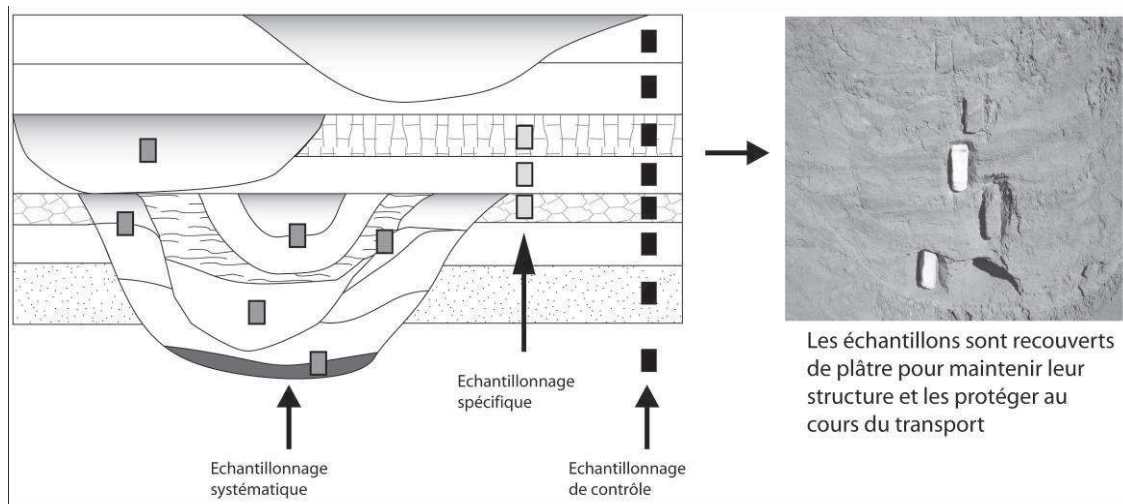


Fig. 135 : Stratégie d'échantillonnage micromorphologique

3.2.2.2. Technique de préparation des lames minces

En laboratoire la procédure de fabrication des lames minces repose sur la technique de Guilloché (1983) ainsi que sur des adaptations au matériel local (L. Lespez, communication personnelle) (Fig. 136).

Les blocs sont imprégnés de résine synthétique et placés dans un caisson sous vide (0.9 Pa) afin que la résine pénètre dans toute la porosité du sol. De la résine est ensuite versée régulièrement, toujours sous vide, jusqu'à recouvrir complètement l'échantillon, qui est ensuite mis sous hotte jusqu'à induration complète. Une fois la résine séchée, les blocs sont coupés en lames de 1 cm d'épaisseur, qui sont alors collées sur une lame de verre provisoire. La première face est rectifiée et aplanie à l'aide d'une meule à diamant, puis mise à sécher.

Cette face est ensuite collée définitivement sur une lame de verre propre, elle même rectifiée et aplanie. La dernière étape de fabrication consiste à réduire progressivement l'épaisseur de la lame à l'aide d'une meule à diamant jusqu'à obtenir une épaisseur standard de 25 à 30 μm . Cette dernière est vérifiée grâce à la couleur des quartz en lumière polarisée qui passe progressivement d'un jaune orangé blanc à une extinction roulante blanc/gris/noir lorsque l'épaisseur voulue est atteinte.

Afin de comprendre de façon plus précise les processus pédologiques, des lames de 14 cm sur 7 cm ont été fabriquées. 204 lames ont été préparées au laboratoire GEOPHEN-Université de Caen Basse Normandie.

Le reste du corpus d'échantillons a été envoyé au laboratoire privé de Quality Thin Section à Tucson en Arizona (58 lames), car la quantité totale d'échantillons ne pouvait être rapportée en France. Ces lames sont de taille inférieure (7.5x5 cm). Certaines lames ont également été fabriquées par Michel Dubar au CEPAM-CNRS afin de compléter le corpus référentiel.

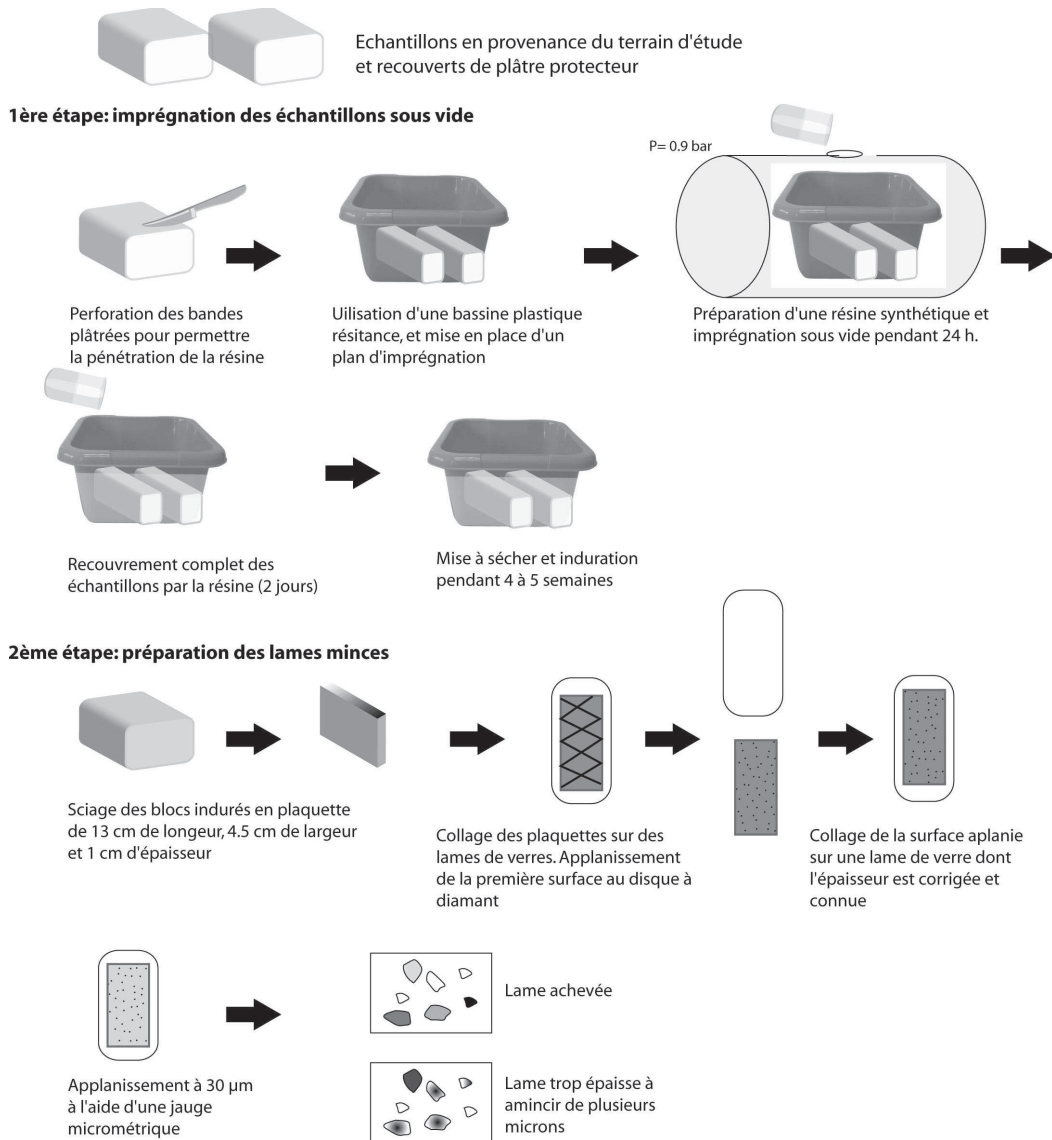


Fig. 136 : Technique de fabrication des lames minces

3.2.3. Protocole d'étude d'une lame mince

Comme dit précédemment, les processus pédo-sédimentaires actifs dans le secteur géographique étudié doivent être maîtrisés selon l'objet d'étude (remplissages de canaux, dépôts de débordement de crue, etc.). Ensuite, il s'agit de déterminer les facteurs qui contrôlent ces processus pédologiques en caractérisant leurs conditions de formation (Courty, 1990) et la durée de leur mise en place. Par exemple, la dissolution/précipitation des carbonates, l'activité biologique, l'érosion locale sont des événements contrôlés par le régime hydrique, l'intensité de l'évaporation, la pluviométrie, la couverture végétale, etc. (Berger, 1999b).

Concrètement, il s'agit d'observer la lame mince initialement à l'œil nu ou à la binoculaire afin de relier les observations de terrain et les prélèvements. Ensuite, une analyse rapide au premier grossissement est effectuée et suivie par une troisième étape qui consiste à étudier plus précisément et décrire sans interpréter les microfabriques et les microfacies (Goldberg et McPhail, 2006).

Le protocole d'étude des lames minces a été identique tout au long de l'étude. Nous avons caractérisé :

➤ *La microstructure*

Elle correspond à la taille, la forme et l'arrangement des constituants que sont les agrégats et les grains par rapport au vide. Elle est fonction des facteurs climatiques et biologiques locaux. Sa description est complétée par l'étude de la macroporosité du sol, qui caractérise les vides du sol, d'origine biologique (flore, faune) ou mécanique (fentes de dessiccation, cavités ouvertes, fermées).

➤ *Les constituants*

Ce sont les composés minéraux (quartz, biotite, etc..) et organiques qui délimitent les assemblages du sol, c'est-à-dire son organisation. Ils peuvent être plus ou moins bien orientés, diversifiés et liés à la fraction fine.

➤ *Masse basale*

Terme utilisé pour regrouper le matériel fin et grossier qui forme la base d'un sol. Sa description permet d'identifier l'origine et le mode de mise en place des dépôts.

➤ *Traits pédologiques*

Les unités différenciées mises en place par les processus pédologiques correspondent aux traits pédologiques (Courty, 1994). Pour distinguer ces phénomènes et comprendre la chronologie événementielle des processus pédologiques, quatre types de traits sont étudiés.

- *Les traits texturaux* visent à comprendre les processus de transport et d'accumulation des particules selon les redistributions latérales ou verticales dans le sol, dans la porosité ou à l'état boueux. On distingue : 1) Les intercalations qui sont des traits pédologiques non cristallins, allongés et de forme ondulée, indépendantes des vides et de la surface des grains (Bullock et al., 1985), 2) Les revêtements qui sont des traits pédologiques couvrant la surface des vides, des grains et des agrégats (Brewer, 1964). 3) Les croûtes structurales et les croûtes de sédimentation. Les premières se distinguent des secondes par l'absence d'orientation des particules, le faible tri et l'absence de laminations (Bresson et Valentin, 1994 ; Evans et Buol, 1968; Chen et al., 1980).

- *Les traits cristallins* rassemblent les appauvrissements et accumulations calcitiques de taille variable (micrite, microsparite, sparite).

- *Les traits amorphes et crypto-cristallins* regroupent les accumulations ferrugineuses (hypo/revêtements, imprégnations, nodules exogène ou non) et organiques.

- *Les traits d'assemblages et excrémentaux* caractérisent la pédoturbation animale ou végétale.

3.2.4. Systeme de comptage

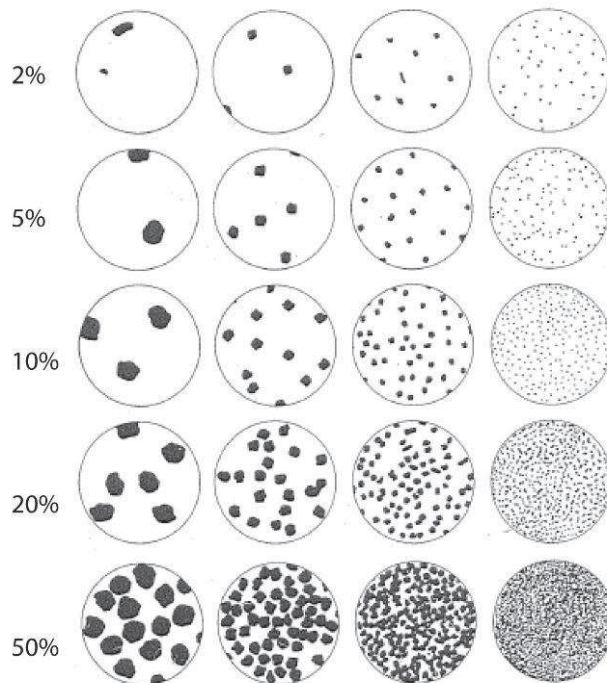
Les lames minces ont été observées à l'aide d'un microscope optique polarisant avec une platine Weiss reliée à une caméra couleur permettant de visualiser les lames sur écran par le biais du logiciel d'image « Image Pro Plus ».

Dans le but de discriminer les différents composants du sol, trois types de lumières ont été utilisées : la lumière naturelle, polarisée (pour déterminer les composés minéraux) et incidente (pour les particules organiques ainsi que les traits crypto-cristallins).

3.2.4.1. Méthode d'évaluation semi-quantitative, description qualitative et mesures

Les données ont été décrites de cinq façons distinctes en fonction des marqueurs.

- Faute de temps et étant donné le nombre élevé de lames minces étudiées, la charte de quantification proposé par Fitzpatrick en 1980 a été utilisée (Fig. 137) pour un certain nombre de marqueurs dont la présence était suffisante pour pouvoir être estimée de cette façon. C'est le cas notamment pour l'étude des *constituants* (% de carbonates exogènes, de la biotite, des charbons et de la matière organique). Il ne s'agit donc pas d'une mesure directe mais plutôt d'une tendance qui est relativement subjective.



Pourcentage d'objets noirs pour des particules de tailles différentes (d'après Fitzpatrick, 1980)

Fig. 137 : Charte de quantification

- C'est la raison pour laquelle un autre système de semi-quantification a été adopté en se basant sur les travaux de Harden (1982) et Dorronsoro (1994). Leur système de classification affecte une valeur de 1 à 100 (en multiples de 10) à chaque intervalle de pourcentage et de taille. Cette codification a été utilisée pour le % d'argile et les traits pédologiques (proportion en traits texturaux, en carbonates secondaires et en traits ferrugineux). Des valeurs numériques ont également été appliquées à des critères qualitatifs que sont le type de matière organique et la forme des charbons, le type de carbonates et de fer, le degré de bioturbation et la microstructure (Annexe 1). Cette codification a facilité les analyses statistiques.

- Afin de décrire les composés minéraux du sol, un autre système de description a été adopté. Huit minéraux représentatifs et reconnaissables ont été choisis et systématiquement classifiés comme présents (1) ou absents (0). Ce sont les feldspaths et plagioclases, calcitisés ou non, la quartzite, le microcline, le grès, le pyroxène, la chlorite et le basalte.

- Enfin, pour certaines données ponctuelles (coupes transversales de characées, oogones, phytolithes, forme des charbons et de la matière organique), une description uniquement qualitative a été choisie.
- Grâce à l’option mesure des tailles du logiciel Image Pro Plus, la taille de certains marqueurs a été mesurée.

3.2.4.2. Analyse d’image : Estimation des proportions de quartz

Etant donné la subjectivité des approches semi-quantitatives, il est apparu judicieux d’obtenir des % de sable, des valeurs de grain moyen, de grain maximal, et de grain médian par l’intermédiaire d’analyses d’images. Au sein de chaque faciès, 3 photographies ont été prises et transférées sous le logiciel Image J (Fig. 138).

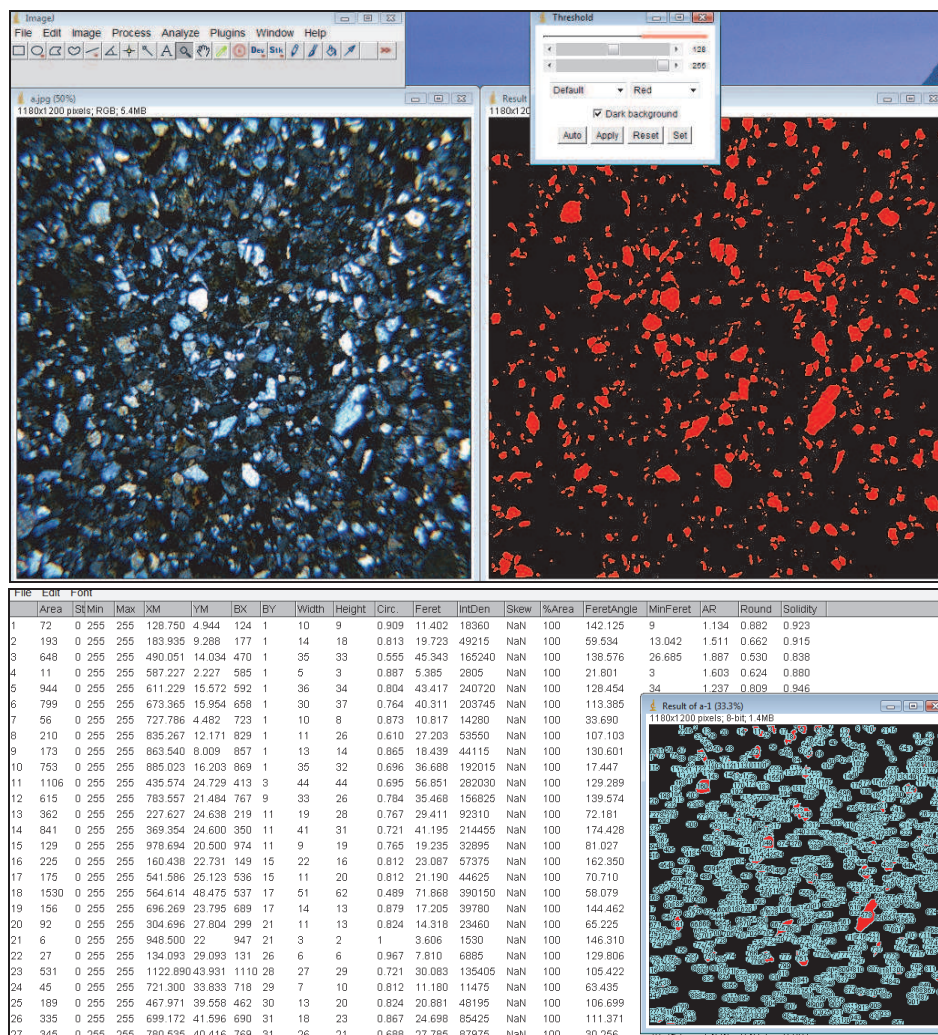


Fig. 138 : Transfert d’image sous Image J et sélection des particules siliceuses et mesures

Une macro a été créée, permettant d’estimer la superficie totale en pixel des particules grossières > 50µm au sein de chaque photographie. Une moyenne a été réalisée à partir des 3 photographies (Annexe 2).

Les limites de cette approche sont au nombre de deux. Tout d’abord, la macro ne prend en considération que les minéraux éclairés par leur angle de polarisation gris et blanc, et non pas les minéraux présents en position d’extinction.

Il faudrait donc adapter l'approche pour pouvoir prendre en considération l'ensemble des grains. Le % final en sable sera donc sous-estimé, mais homogène au sein du corpus étudié et donc représentatif au niveau de l'estimation de la granulométrie des particules présentes.

Par ailleurs, la comparaison des résultats obtenus avec la mesure moyennée de 30 grains sélectionnés de façon aléatoire (comme cela a été effectué initialement) a mis en évidence des variations élevées dans la mesure du grain moyen, qui fluctuent entre 0 et 50 μm par échantillons. L'écart type est compris dans un intervalle de 0 à 170%, avec une moyenne autour de 40%. Les valeurs du grain maximal obtenues sont similaires, quelle que soit l'approche. Malgré ces limites et l'ajustement nécessaire, cette approche nous a permis de systématiser, d'homogénéiser et de limiter la subjectivité lors de la mesure des proportions et tailles des grains.

3.2.5. Classification et traitement statistique des données

Afin de classifier les observations, les données ont été rentrées sous une base de données Access. 5 tables ont été créées: microstructure, traits biologiques et écologiques, composés minéraux, traits d'illuviation, trait carbonatés, traits ferrugineux. Des courbes semi-quantitatives peuvent alors être obtenues pour montrer l'évolution diachronique de certains marqueurs au sein d'une séquence stratigraphique.

Mais pour classifier les tendances de l'échelle locale à régionale, nous avons réalisé une classification et une typologie générale des faciès en ayant recours à des analyses statistiques multivariées. Les analyses en composantes principales ont été réalisées pour les données quantitatives, et les analyses multifactorielles des correspondances choisies pour les données qualitatives, en association avec les données de la susceptibilité magnétique.

4. Les besoins en référentiels et les données exploitables

L'utilisation de la micromorphologie et de la susceptibilité magnétique dans un secteur qui n'a pas encore développé ces disciplines requiert la construction de référentiels. Dans notre contexte d'étude, il s'agira plus précisément de :

- Etablir les sources sédimentaires et les relier à des dynamiques climatiques et hydrologiques
- Caractériser les milieux de sédimentation (fluvial, éolien, colluvial)
- Estimer la relation entre décharge, source sédimentaire, répartition géographique des crues et morphologie fluviale en confrontant les données écrites et sédimentaires
- Comprendre les relations entre climat, activité humaine et colmatages de fossés
- Référencer les processus pédologiques et écologiques de surface
- Comprendre le fonctionnement de l'agrosystème (signature des processus d'irrigation, abandon des canaux, distinction des paléosols et champs agricoles, aménagements protectifs dans les canaux).

4.1.1. Les données actuelles

4.1.1.1. **Données hydrosédimentaires et géologiques**

Les données actuelles permettent d'estimer les sources érodables dans les bassins versants de la Salt et la Gila par le biais de prospections géologiques et magnétiques en amont des zones asséchées. Les milieux de sédimentation peuvent être également reconstruits grâce à l'échantillonnage de formations actuelles.

4.1.1.2. **Données pédologiques et agronomiques**

Les sols agricoles modernes (Gila River Indian Reservation), bien que travaillés mécaniquement, peuvent servir de référentiel structural et botanique (phytolithe) et portent la signature micromorphologique de traits d'exploitation des sols (irrigation). Des échantillons prélevés dans les couches superficielles et dans des zones non-perturbées (carrières de graviers), permettent d'appréhender les processus de surface et de transferts de particules dans les sols. Nous nous sommes principalement penchés sur les traits relatifs à la bioturbation, la présence de matière organique ainsi que les traits crypto-cristallins (fer et carbonates) en relation avec le climat et la végétation existante.

4.1.2. Des données quantitatives historiques (Salt River) et qualitatives ethnographiques (Gila River)

Les données utilisables en tant que référentiel sont donc limitées à la période historique entre 1870 et 1911. Une grande partie des données environnementales ont été accumulées par des agences gouvernementales :

Les rapports de l'U.S. Department of the Army, Corps of Engineers contiennent des informations sur l'hydrologie de la Salt et Gila River, l'impact des crues via les Flood Damage Reports, et également sur l'évolution morphologique des cours d'eau.

La cartographie et la planification des besoins en eau ont été établies par l'US Bureau of Reclamation (U.S. Reclamation Service).

L'U.S. Geological Survey propose des rapports clairs et succincts sur la disponibilité en eau de surface et souterraine, le long de la Salt et la Gila River. Les informations relatives aux décharges annuelles et mensuelles dès 1870 sont incluses dans ces rapports (Davis, 1897 ; 1902 ; Lee, 1904 ; 1905).

L'United States Hospital Service ainsi que le Weather Bureau accumulent et restituent les températures mensuelles et annuelles dans leurs rapports dès 1866.

Les données relatives à l'utilisation des canaux historiques le long de la Salt et Gila River reposent sur deux sources principales officielles. Les archives du Salt River Project (Historic American Engineering Record) répertorient les données liées à la construction de canaux et leur décharge.

Il est possible de se procurer les mêmes informations sur la rivière Gila dans l'ouvrage de Southworth publié en 1915, *History of irrigation on the Gila River*.

Malheureusement les informations reliant dynamique hydro-sédimentaire et remplissages de canaux sont très limitées, et ce d'autant plus lorsque les canaux sont petits et rarement référencés dans les bases de données existantes. Par conséquent, seules les données historiques locales, accessibles via des journaux (Arizona Gazette, Arizona Republic, Phoenix daily Herald, Tempe News, etc...) sont exploitables. Zarkin (1984, 1986, 1997) dans ses trois ouvrages synthétise une grande quantité d'information issue de ces journaux, rapports, et récits historiques pre 1911.

Le long de la Gila River, les données sont principalement qualitatives et liées au fonctionnement de l'agrosystème Pima. Les données pré-1911, très ponctuelles, sont extraites de récits d'explorateurs et missionnaires. Les travaux de Castetter et Bell publiés en 1942 fournissent des informations très détaillées sur les activités agricoles des Akimel O'Odham, mais peu sur les dynamiques de l'hydrosystème. Elles ne peuvent que partiellement être exploitées, notamment lors de la mise en place de référentiels.

CHAPITRE 2

Caractérisation et classification des dynamiques hydrosédimentaires

1. Introduction : objectifs, démarche et corpus analysable	288
1.1. Objectifs et critères diagnostiques	288
1.2. Démarche	288
1.3. Le corpus de données	289
2. Mesure de la dynamique hydrique, reconnaissance des milieux de sédimentation et des sources sédimentaires	291
2.1. Signature micromorphologique des milieux de sédimentation (Fms)	291
2.2. Signature micromorphologique de la dynamique hydrique (facies granulométriques Fg)	300
2.3. Signature micromorphologique de l'origine des sédiments (facies source sédimentaire Fss)	306
3. Typologie des dynamiques hydrosédimentaires	318
3.1. Dans le bassin de la Salt	318
3.2. Dans le bassin de la Gila	322
4. Interprétation des facies hydrosédimentaires: confrontation des archives sédimentaires et historiques	327
4.1. Les hydrosystèmes : impacts géographique et humain des crues majeures historiques	327
4.2. L'hydro-agro-système : interprétation climatique, géomorphologique et anthropique des remplissages de canaux	339
5. Conclusion	349

1. Introduction : objectifs, démarche et corpus analysable

1.1. Objectifs et critères diagnostiques

Une des principales problématiques de notre recherche vise à estimer l'impact de l'activité agricole Hohokam sur l'environnement et l'adaptation de ces communautés aux changements hydroclimatiques comme les crises hydrosédimentaires localisées, les phases de sécheresses, d'aggradation de la plaine, d'incision, etc. Ces événements s'observent indirectement par la durée d'utilisation des canaux, leur entretien, l'eutrophisation progressive du réseau, le contrôle et le maintien des structures hydrauliques au cours des phases de forte décharge et d'érosion locale. A l'échelle microscopique, il est possible d'identifier des processus différents : des phases de faible circulation d'eau, des dépôts de crue, des traces de sédimentation saisonnière, des signatures d'apports latéraux, voire des épisodes de sapements de berge.

Dans un souci de rigueur, les critères diagnostiques de ces processus et les marqueurs micromorphologiques ont été sélectionnés grâce à des référentiels modernes. Lorsque ces référentiels n'étaient pas disponibles, nous nous sommes reposés sur les références bibliographiques existantes dans des contextes environnementaux similaires aux nôtres. La combinaison de ces critères spécifiques permet de construire une typologie des facies paléoenvironnementaux et facilite les corrélations pédo-sédimentaires d'une séquence à l'autre.

1.2. Démarche

Afin de créer une typologie hydrosédimentaire des remplissages de canaux et des formations alluviales des bassins de la Salt et de la Gila, une démarche en 5 étapes a été adoptée (Tab. 19). Cette démarche prend un compte des emboîtements d'échelle, de l'information microscopique propre à chaque échantillon à sa classification puis son interprétation microrégionale à régionale grâce à l'intégration d'archives sédimentaires et historiques/actuelles. Ainsi, chaque échantillon qui correspond à une unité microstratigraphique est défini par 5 critères:

- 1) un milieu de sédimentation (alluvial, éolien, colluvial),
- 2) une origine sédimentaire (locale à régionale),
- 3) une dynamique d'écoulement liée à la granulométrie des dépôts,
- 4) un type d'écoulement (gradué à uniforme) et
- 5) une microstructure (locale).

Ces critères ont été reconnus grâce à des référentiels actuels (Tab. 19). La microstructure et le type d'écoulement sont des marqueurs directement identifiables en lame mince, mais pour restituer la granulométrie des sédiments, les milieux de sédimentation, et les sources sédimentaires, il faut analyser simultanément plusieurs marqueurs.

Etant donné le nombre de marqueurs pris en compte et le nombre d'échantillons traités, nous avons analysé statistiquement l'ensemble des données et avons affecté à chaque échantillon un facies granulométrique (Fg), un facies de milieu de sédimentation (Fms), et un facies de source sédimentaire (Fss).

En fonction de la description des données (numérique, présence/absence, qualitative), des ACP et ACM ont été conduites (Xlstat), puis les CAH, réalisées sur les résultats des ACP/ACM ont permis la création de facies. La prise en considération simultanée de ces 5 critères permet de créer une typologie numérotée des facies hydrosédimentaires en fonction des milieux fluviaux et du secteur géographique. La fréquence d'observation de ces facies dans les dépôts étudiés est fonction d'un contexte climatique et humain spécifique. Des référentiels historiques et modernes bien datés (micromorphologie de dépôts de crues et de remplissage de canaux) pour lesquels le cadre hydroclimatique et humain est connu ont donc été intégrés aux analyses. Cette approche permet alors de proposer des premières interprétations climatiques, géomorphologiques et humaines des facies créées.

1.3. Le corpus de données

33 sites (canal : contexte semi-anthropique / lit majeur : contexte naturel) ont été analysés, soit un total de 607 unités micromorphologiques (Tab. 20).

1) Dans le bassin de la Salt, l'étude micromorphologique de 10 canaux préhistoriques a permis de discriminer 233 unités microstratigraphiques. 26 de ces US appartiennent à deux structures hydrauliques historiques dont l'analyse servira à interpréter la typologie hydrosédimentaire (Tab. 19, étape 5). D'autres structures ont également été étudiées, mais faute de temps n'ont pas été analysées à l'échelle microscopique.

L'étude micromorphologique de 9 séquences stratigraphiques sur les terrasses T1, Lehi et Mesa (quelques échantillons) a conduit à l'analyse de 98 US. Cinq de ces US correspondent à des référentiels actuels composés d'alluvions des rivières Salt et Verde qui ont permis de construire le facies Fss (facies de source sédimentaire) (Tab. 19, étape 2) ; deux US correspondent aux dépôts des crues historiques de 1891 et 1993, et ont contribué à l'interprétation de la typologie créée (Tab. 19, étape 5).

2) Dans le bassin de la Gila, l'étude micromorphologique de 9 structures hydrauliques appartenant à deux systèmes exclusivement préhistoriques (Casa Blanca et Santan) ont conduit à l'analyse statistique de 157 unités stratigraphiques.

L'étude de 4 coupes stratigraphiques sur la terrasse T1, T2 et les piémonts des montagnes Santan et Sacaton (quelques échantillons) a permis d'analyser 119 unités microstratigraphiques. Un échantillon de référence des sédiments éoliens nous a permis de construire le facies Fms (facies de milieu de sédimentation) (Tab. 19, étape 2), et un échantillon prélevé dans un champ agricole moderne nous a permis d'identifier les traits pédo-sédimentaires liés à l'irrigation (Partie III, Chapitre 3, section 5).

III.2 : Caractérisation et classification des dynamiques hydrosédimentaires

ETAPES	1: PROBLEMATIQUE		2: OBSERVATIONS				3: TRAITEMENT STATISTIQUE						4: CLASSIFICATION	5: INTERPRETATION
	Critères de description des dynamiques hydrosédimentaires	Con- texte	Env. fluviale	Identification des critères grâce à :	Marqueur microscopique	Format des données	Traitement statistique	Facies	Marqueurs	Format des données	Autre traitement statistique	FACIES	Typologie	Interprétation climatique, géomorphologique et humaine de la typologie
ECHANTILLON	Origine sédimentaire	Bassin de la Salt ou bassin de la Gila	Canal d'irrigation ou dépôt de lit majeur	Référentiel alluvions actuels	Feldspaths, plagioclases, quartzite, microcline, grès, pyroxènes, chlorite	Présence/absence	ACM, CAH	"Minéraux rares"	"Minéraux rares", "Minéraux communs", Milieu de sédimentation,	Codification	ACM, CAH	FSS (facies de source sédimentaire)		
					% biotite, carbonate exogène, amphibole	Numérique	ACP, CAH	" Minéraux communs"	Nombre et type de basalte					
	Milieu de sédimentation		Carte de susceptibilité magnétique, dépôts éoliens actuels	Tri des sédiments, pétrographie, microstructure, susceptibilité magnétique, revêtements sur grains	Qualitatif et quantitatif	/	/	/	/	/		Fms (facies milieu de sédimentation)	Dépôts de crue modernes et historique, remplissages de canaux historiques dont les caractéristiques hydrosédimentaires et leur contrôle sont connus	
	Dynamique de l'écoulement		/	Grain moyen, % de sable, % argile	Numérique	ACP, CAH	/	/	/	/		Fg (facies granulométrique)		
	Rythme de sédimentation		/	Particulaire à bioturbée		/	/	/	/	/	/			Microstructure
Type d'écoulement		/	Gradué, litage parallèle, uniforme		/	/	/	/	/	/		Type d'écoulement		

Tab. 19 : Démarche en cinq étapes adoptée lors de la classification des facies hydrosédimentaires définis par un Fss (facies de source sédimentaire), un Fms (facies de milieu de sédimentation), un Fg (facies granulométrique), une microstructure et un type d'écoulement.

Environnement		Nombre de sites	Nombre d'échantillons (microUS)			
Bassin versant	Milieu fluvial		Préhistoriques	Référentiels actuels	Référentiels Historiques	Total analysé
Salt	Canal	10	207	0	26	233
	Lit majeur/terrasse	9	91	5	2	98
Gila	Canal	9	157	0	0	157
	Lit majeur/terrasse/cônes	4	117	1	1	119
TOTAL		33	568	6	29	607

Tab. 20 : Nombre de sites et d'échantillons analysés à l'échelle microscopique et intégrés dans des analyses statistiques, en fonction du bassin versant étudié et de l'environnement fluvial

2. Mesure de la dynamique hydrique, reconnaissance des milieux de sédimentation et des sources sédimentaires

2.1. Signature micromorphologique des milieux de sédimentation (Fms)

Caractériser les milieux de sédimentation revient à restituer le mode de transport des sédiments. Ce dernier peut-être alluvial, colluvial à éolien, ou une combinaison des précédents (c'est-à-dire la remobilisation par l'eau des particules éoliennes, éolisation des alluvions, ruissellement en nappe avec mélange d'alluvions et de colluvions). Le long de la Salt River, cette dynamique est nettement plus difficile à appréhender que le long de la Gila où les canaux et formations alluviales étudiés sont très proches de formations géologiques érodables et de formations dunaires. Nous avons toutefois tenté de restituer l'origine de ces sédiments grâce à des référentiels magnétiques et micromorphologiques qui reposent sur l'identification : 1) des types d'assemblages minéralogiques via la pétrographie optique, 2) du tri des sédiments, 3) de la forme des sédiments (arrondis à angulaires), 4) de la présence d'agrégats de sol et de caliche issus de l'érosion de sols Holocènes et/ou Pléistocènes, ou des berges du canal, 4) de la présence de traits texturaux périphériques, 6) des valeurs de susceptibilité magnétique.

2.1.1. Caractérisation micromorphologique des dépôts colluviaux

2.1.1.1. Dynamiques observées

Plusieurs dynamiques prévalent dans notre secteur en fonction de l'objet d'étude. La première correspond à des processus alluvio-colluviaux locaux (torrentialité, ravinements en provenance des cônes latéraux), dont l'impact peut être double. L'eau de ruissellement peut être canalisée et dérivée dans les canaux d'irrigation. L'absence de gestion de l'eau peut à l'opposé conduire à l'érosion latérale des canaux qui sont directement percutés par ces cours d'eau temporaires, principalement au cours des périodes estivales. Cette dynamique n'a pas été directement observée, mais elle est identifiable en aval des zones touchées grâce la morphologie et composition des dépôts. Enfin, des crues intenses peuvent favoriser l'érosion latérale des canaux par sapement des berges.

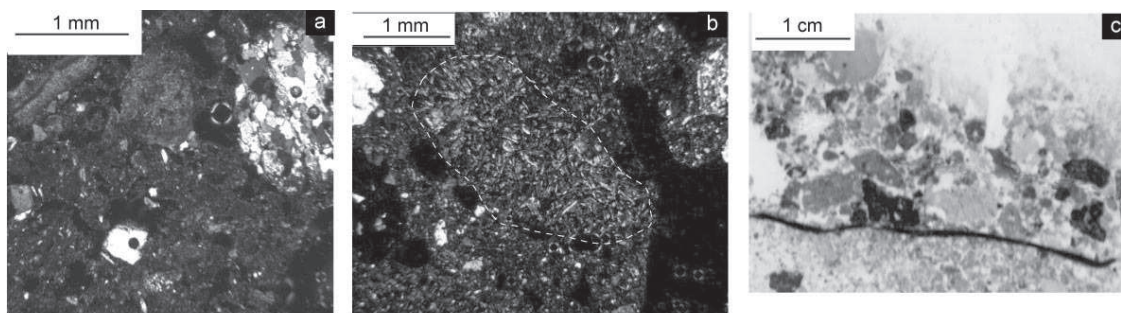
Dans les formations alluviales, des facies grossiers hétérogènes correspondant à des épisodes de ruissellement en nappe ont été identifiés ponctuellement.

2.1.1.2. Reconnaissance micromorphologique de l'érosion locale

Pour discriminer ces dynamiques entre elles à l'échelle microscopique, il s'agit de combiner des critères morphologiques, pétrographiques, sédimentologiques et magnétiques en les rattachant aux données stratigraphiques de terrain (Tab. 21). Dans notre contexte, les facies issus d'épisodes de ravinements sur les cônes latéraux qui percent les canaux sont généralement identifiables à l'échelle microscopique par leur faible tri, l'absence de figures de sédimentation, les nombreux agrégats de sols et/ou de caliche érodés des formations pléistocènes, et la composition pétrographique des dépôts (mélange de sédiments d'origine locale et régionale) (Fig. 139 a et b). Ils se distinguent des facies de canalisation volontaire des eaux de ruissellement dans lesquels la morphologie et la composition pétrographique des sédiments est plus homogène (Fig. 139 c) (impact plus réduit sur les canaux). Enfin, les épisodes de sapements de berges se distinguent par un assemblage pétrographique d'origine régionale et par la présence d'agrégats de sols ou de zones plus hétérogènes issus de l'érosion de sédiments de remplissages du fossé ou de son encaissant.

Evènement	Données de terrain	Critère de reconnaissance				
		Type de particules	Morphologie des particules	Tri des dépôts	Transport des sédiments	Magnétisme
FORMATIONS ALLUVIALES : ruissellement en nappe	Dépôts grossiers hétérogènes / Proximité avec des cônes détritiques ou affleurements géologiques	Dominance des minéraux d'origine locale, agrégats de sols et/ou caliche, macrocharbons	Dépôts de taille contrastée et de forme arrondie à anguleuse	Faible	Absence de figures de sédimentation, écoulement uniforme	Variable selon le contexte sur site: faible dans la Salt, fort/faible dans la Gila
CANAL : Ravinement / érosion latérale	Effondrement des berges et glissement/ Dépôts grossiers hétérogènes / Proximité avec des cônes détritiques ou affleurements géologiques	Mélange entre des minéraux d'origine locale et régionale, agrégats de sols et/ou caliche, macrocharbons	Dépôts de taille contrastée et de forme arrondie à anguleuse	Faible	Absence de figures de sédimentation, écoulement uniforme	Variable selon le contexte sur site: faible dans la Salt, fort/faible dans la Gila
CANAL : Canalisation des eaux de ruissellement	Proximité avec des cônes détritiques ou affleurements géologiques/Dépôts grossiers	Dominance des minéraux d'origine locale, agrégats de sols et/ou caliche, macrocharbons	Particules de taille homogène, et de forme arrondie à anguleuse	Moyen		
CANAL : Sapement des berges des canaux (crues)	Elargissement des canaux	Sédiments d'origine lointaine, agrégats de sol/sédiments remaniés locaux	Forme anguleuse	Faible à moyen selon le degré d'érosion	Sédimentation graduée à uniforme	Moyen à élevé

Tab. 21 : Reconnaissance des processus d'érosion locale



Microphotographies des principaux marqueurs d'écoulements latéraux. a) Facies à faible tri, présence de matériel local érodé (grès) et de dépôts fluviaux-canal de La Lomita, rive nord, zone centrale, Salt River (LP); b) Particules basaltiques subarrondies- Canal Santan, rive nord, zone centrale, Gila River (LP). c) Particules basaltiques subarrondies, nodules de caliche et agrégats de sols. Canalisation des eaux de ruissellement -Canal Santan, rive nord, zone centrale, Gila River (LN). LP: lumière polarisée, LN: lumière naturelle

Fig. 139 : Marqueurs micromorphologiques de l'érosion locale

2.1.1.3. Répartition géographique de l'érosion locale dans les canaux au cours des périodes préhistoriques et historiques

- *Le long de la Salt River*

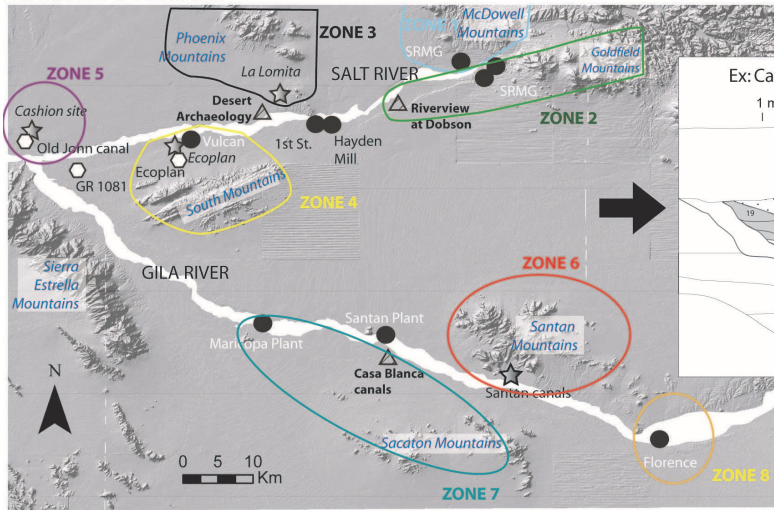
Nous avons découpé la basse vallée de la Salt en 5 zones géographiques au sein desquelles des cônes détritiques interagissent avec les réseaux hydrauliques (Fig. 140) et nous avons estimé le % d'US touchées par les dynamiques présentées dans le Tab. 21. Sur un ensemble de 331 US étudiées, 11% d'entre elles présentent des traces d'érosion (canalisation / ravinement / sapement des berges).

Les sédiments étudiés dans les zones 1, 4 et 5 présentent peu de traces de cette érosion, du fait de l'éloignement des formations affleurantes érodables pour les zones 5 et 4 (les canaux étudiés semblent proche des South Mountain, mais de nombreux canaux intermédiaires ont probablement enregistré de façon plus marquée des épisodes d'érosion locale) et de l'absence de canaux étudiés dans la zone 1 (identification d'un épisode de ruissellement en nappe uniquement).

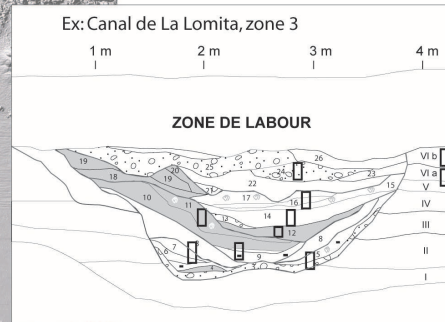
Les sédiments échantillonnés dans la zone 2 ont une double signature. Ceux sur la séquence stratigraphique de SRMG présentent des traces de ruissellement en nappe probablement en provenance des Goldfield Mountains. Le site de RAD est trop éloigné de ces formations pour avoir été endommagé par des épisodes de ravinements latéraux. Par conséquent, l'érosion identifiée correspond à des sapements de berges répétés, ce qui est cohérent avec l'emplacement des structures hydrauliques à proximité des vannes d'entrée.

Ce sont les sédiments échantillonnés dans la zone 3 qui présentent des traces récurrentes d'érosion des Phoenix Mountains et des Papago Buttes (55 % des US étudiées), entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (début de la période Classique). 35 % de ces US résultent d'épisodes de ravinement, mais le bon tri des sédiments de certaines d'entre elles (20%) permet de poser l'hypothèse d'épisodes de canalisation volontaire d'eau.

ECHELLE DU PAYSAGE



ECHELLE DU PROFIL

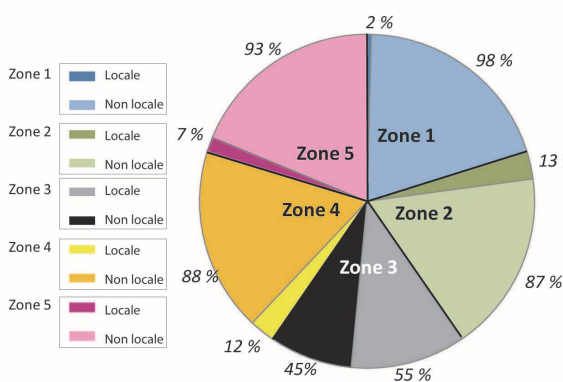


Ex: Canal de La Lomita, zone 3
Profil d'un canal qui présente sur le terrain des signatures de dépôts colluviaux (graviers plus ou moins bien triés)

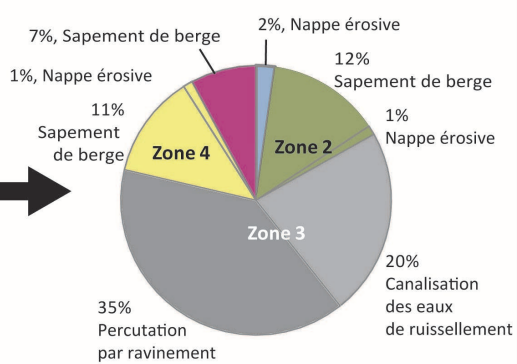
Identification de 8 zones distinctes en fonction des sites étudiés et de l'interaction entre réseaux hydrauliques/cônes détritiques

ECHELLE MICROSCOPIQUE

Origine des sédiments dans la basse vallée de la Salt

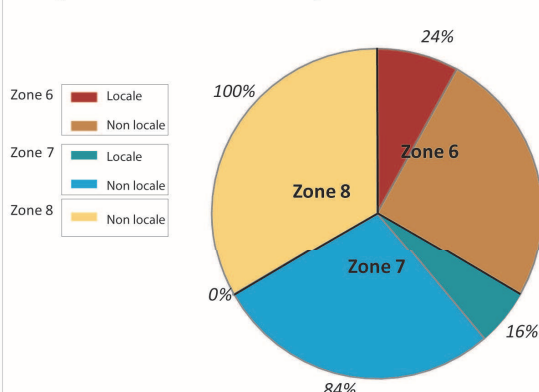


Origine des sédiments d'origine locale

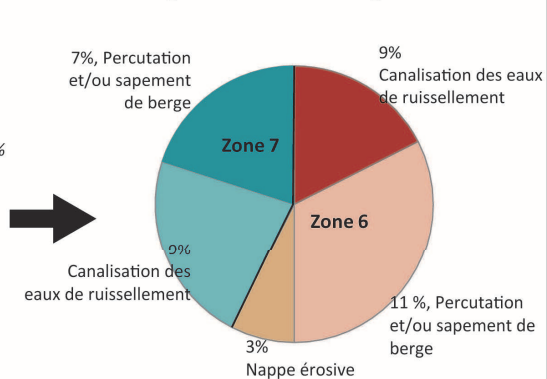


Rq: les % indiqués font référence au % d'US par zone géographique (de 1 à 5)
Les zones 1, 2 et 4 comprennent des sédiments de remplissages de canaux et de séquences stratigraphiques naturelles.
Les zones 3 et 5 comprennent exclusivement des sédiments issus de remplissages de canaux

Origine des sédiments dans la moyenne vallée de la Gila



Origine des sédiments d'origine locale



Rq: les % indiqués font référence au % d'US par zone géographique (de 6 à 8)

Fig. 140 : Répartition géographique de l'érosion locale le long de la basse vallée de la Salt/moyenne vallée de la Gila et dynamiques identifiées à l'échelle microscopique (sapement de berge, canalisation de l'eau, ravinement, nappe érosive)

- Le long de la Gila River

De la même façon, l'analyse de la répartition géographique de l'érosion locale dans les zones 6, 7 et 8 confirme les phases de ruissellement et d'apport latéraux intermittents en provenance des formations basaltiques Santan et dans une moindre mesure du pluton granitique de Sacaton (Fig. 140). La canalisation des eaux a été distinguée ici grâce au tri des dépôts (moyen à bon) mais également à leur valeur magnétique (> 340 SI pour les Santan Mountains, < 180 SI pour les Sacaton Mountains. Ces valeurs ont été choisies car elles correspondent à une transition nette entre un signal nettement plus fort ou plus faible selon le secteur).

Dans la zone 6, les canaux sont construits dans des sédiments issus d'épisodes de ruissellement en nappe. Ils sont fréquemment percutés latéralement lors de la réactivation des cônes détritiques des Santan Mountains (11% des US). Cette dynamique a été principalement observée entre 1150 et 1450 apr. J.-C. (période Classique).

L'érosion dans la zone 7 est caractérisée par des épisodes de canalisation des eaux (9% des US) et des épisodes de ravinement ou de sapements de berges (7% des US) qui endommagent les canaux entre 350 et 550 apr. J.-C. (période Formative/Pionnière). Les deux processus ont été difficilement discriminés et sont regroupés ici.

A l'amont de la Gila River (zone 8), aucune trace d'érosion locale n'a été identifiée.

2.1.2. Caractérisation micromorphologique des dépôts éoliens

2.1.2.1. **Micromorphologie des dépôts éoliens actuels**

Un unique échantillon a été prélevé dans la Gila River Indian Community sur l'unité géomorphologique correspondant à la couverture sableuse éolienne Holocène (Fig. 141) non-identifiée le long de la Salt. L'accès à la réserve étant restreint et les formations éoliennes mal identifiées dans la basse vallée de la Salt, il n'a pas été possible d'échantillonner d'autres dépôts éoliens. La représentativité de l'échantillon prélevé reste limitée notamment en ce qui concerne l'assemblage pétrographique.

Les caractéristiques micromorphologiques de ce dépôt sont présentées ci-dessous (Tab. 22). Les dépôts sont sableux fins à limono-sableux ($50 \mu\text{m}$), faiblement triés (Fig. 142), et présentent un assemblage minéralogique diversifié à forte contribution locale. Les traits biologiques et pédologiques observés sont le résultat de conditions environnementales et de dynamiques actuelles (incendies, agriculture) qui ne peuvent servir de référence.

Le principal critère de reconnaissance des dépôts éoliens reposera donc la forme des minéraux et leur distribution chitonique, avec la présence de traits texturaux périphériques (recouvrements pelliculaires orangés). En effet, plus de 60% des grains de sables observés sont couverts par une fine couche de particules argileuses orangées à brun orangées, non orientées et de faible biréfringence, typique des dépôts éoliens (Fig. 142)(Courty, 1991).

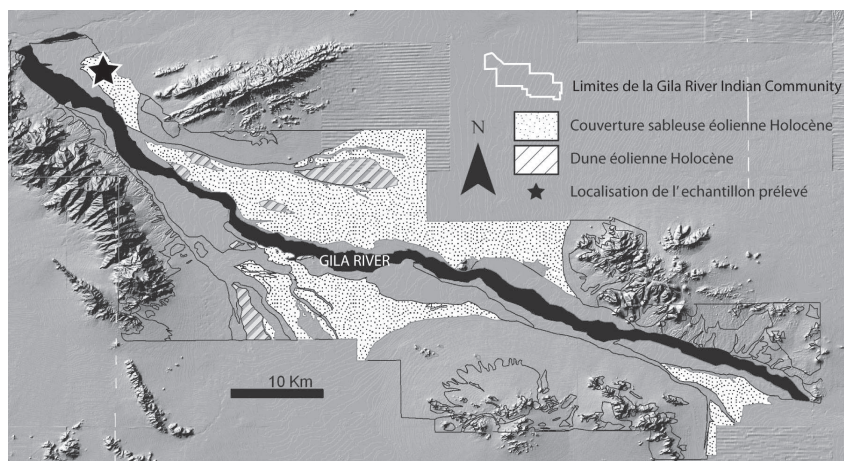
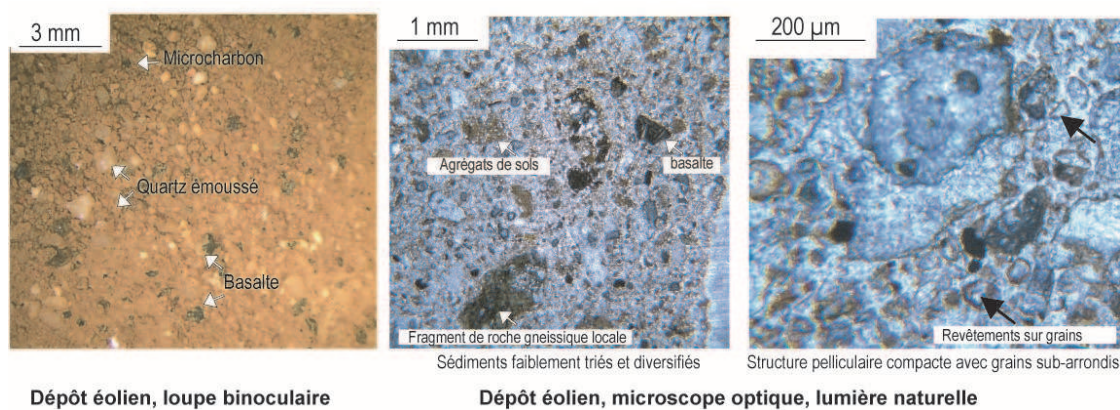


Fig. 141 : Localisation de l'échantillon éolien moderne (Gila River Indian Community)

	Marqueurs	Mesures microscopiques
Granulométrie	% sable (analyse d'image) % estimé d'argile Tri (%) Taille grain moy (μm) Taille grain maximal (μm) Médiane (μm)	11 (sous estimé par l'analyse d'image) 20 20 (présence de grains de sables locaux peu roulés, ex : gneiss) 50 1190 32
Caractéristiques des grains	Forme Orientation Distribution Microstructure % revêtements sur grain	subarrondie désordonnée chitonique Entassement de grains revêtus >60 %, bruns orangés / orange
Assemblage minéralogique	% carbonates exogènes % biotite Autres	0 2 amphibole, feldspaths calcitisés ou non, épidote, quartzite, microcline, grès, caliche, agrégats de sol, basalte, plagioclases calcitisés ou non, chlorite, roche de type granitique
Susceptibilité magnétique	SM	300
Traits organiques	% charbons Forme des charbons Taille des charbons (μm)	3 arrondis 53

Tab. 22 : Caractérisation micromorphologique des sables éoliens modernes



Dépôt éolien, loupe binoculaire

Dépôt éolien, microscope optique, lumière naturelle

Fig. 142 : Caractéristiques des dépôts éoliens actuels à faible grossissement (binoculaire) et fort grossissement (microscope optique avec lumière naturelle)

2.1.2.2. Reconnaissance des dépôts éoliens préhistoriques et historiques

En se reposant sur le référentiel actuel, lorsque la proportion en grains revêtus sera supérieure à 60%, les sédiments seront classés comme « éoliens ». Nous posons l'hypothèse que les sédiments qui présentent entre 40 et 60% de grains revêtus ont une origine alluvio-éolienne, bien qu'aucun échantillon en provenance de ce type de formation n'ait été prélevé. Ils correspondent soit à 1) des sédiments éoliens remobilisés partiellement par l'eau, 2) à l'éolisation des particules alluviales, ou 3) au mélange de particules éoliennes et alluviales. Ces deux derniers contextes peuvent expliquer la présence de sédiments alluviaux-éoliens dans d'autres classes granulométriques.

Dans la moyenne vallée de la Gila, sur les 276 US étudiées, 9 US contiennent plus de 40% de grains revêtus et seule 1 plus de 60%. 7 de ces US ont été observées dans le secteur de Santan, proche des dunes actuelles et 6 d'entre elles se sont mises en place entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (début de la période Classique). L'analyse des assemblages pétrographiques (voir section 2.3) ne montre pas une origine locale des sédiments, mais plutôt un transport sur longue distance et une forte remobilisation par l'eau, ce qui pourrait expliquer la très faible proportion de sédiments éoliens identifiés.

Dans la basse vallée de la Salt, sur les 331 unités microstratigraphiques étudiées (sédiments dans les canaux et séquences stratigraphiques), 17 présentent des traces d'éolisations antérieures. Neuf de ces US ont été observées à l'amont de la basse vallée de la Salt, sur sa rive sud et se sont mises en place pour la plupart entre 950 et 1150 apr. J.-C. (période Sédentaire). Les huit autres US ont été identifiées à l'aval de la basse vallée de la Gila, proche de la GRIC, sur la rive nord et sud. Elles se sont déposées entre la période Formative et Coloniale (?-800 apr. J.-C.), mais aucune tendance n'a été précisément distinguée.

La faible proportion de sédiments éoliens identifiés nous pousse à poser le problème de leur identification et il est possible que le pourcentage et la couleur des revêtements périgranulaires ne soient pas un critère de reconnaissance suffisant. D'autres échantillons de référence devraient être prélevés afin d'affiner cette approche.

2.1.3. *Caractérisation micromorphologique des dépôts alluviaux*

2.1.3.1. Reconnaissance micromorphologique des alluvions

Les sédiments alluviaux dominent dans notre corpus. Ils sont reconnus sur le terrain par leur composition et leur morphologie (cf. partie II). A l'échelle microscopique, ils peuvent être distingués par leur assemblage pétrographique (voir section 2.3), leur morphologie, le mode de transport, leur tri et le signal magnétique (Tab. 23).

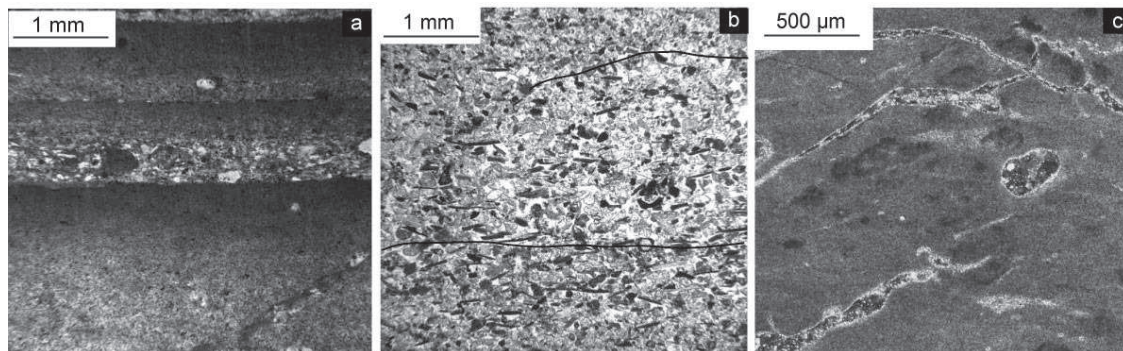
Evènement	Données de terrain	Critère de reconnaissance				
		Type de particules	Morphologie des particules	Tri des dépôts	Transport des sédiments	Magnétisme
Alluvions	Dépôts argileux à sableux homogènes à hétérogènes	Minéraux d'origine régionale (quelques agrégats de sols / caliche arrondis), charbons	Particules de forme variable (arrondies à sub-arrondie dominante)	Moyen à excellent	Suspension graduée, entre graduée et uniforme, décantation	Variable

Tab. 23 : Reconnaissance micromorphologique des alluvions

Les alluvions sont moyennement à bien triés, les particules sont de forme arrondie à sub-arrondie, plus ou moins orientées selon la dynamique de l'écoulement. Cinq facies, qui nous renseignent sur les rythmes, les contextes de déposition et le fonctionnement hydrologique, ont été identifiés.

1) Les sédiments granoclassés positivement (Fig. 143 a) traduisent une sédimentation rythmée de compétence variable. Les particules sont orientées de façon subhorizontale. Si des traces de bioturbation sont identifiées en partie sommitale, ces dépôts peuvent résulter d'une sédimentation saisonnière (Courty, 1990). **2)** Les sédiments à suspension uniforme sont caractérisés par l'absence de structure sédimentaire, un tri moyen, un écoulement turbulent (particules désorganisées) et résultent d'épisodes de sédimentation rapide et brutale. **3)** Les sédiments à litage parallèle (Fig. 143 b) sont grossiers, moyennement à bien ordonnés et correspondent à un intermédiaire entre les fonctionnements hydrologiques que sont la suspension uniforme et graduée (Devillers, 2005). Leur condition de mise en place est mal comprise, mais pourrait résulter d'une sédimentation continue (Huckleberry, communication personnelle). **4)** Les sédiments de décantation (Fig. 143 c) sont de texture fine, argileuse à limono-argileuse, et caractérisent des écoulements réduits, voire des épisodes de stagnation d'eau, associés à des cycles d'humectation-dessiccation (Soil Survey Staff, 1975). **5)** Bien que cela puisse être attribué à des processus post-sédimentaires, nous avons intégrés les sédiments bioturbés à notre description des alluvions. En effet, l'activité biologique a effacé les figures sédimentaires et il n'est donc pas possible de restituer le fonctionnement hydrologique des dépôts.

Enfin, les valeurs de susceptibilité magnétique des alluvions sont comprises entre 100 et 400 SI en moyenne, ce qui est strictement inférieur aux formations affleurantes locales basaltiques et métamorphiques et strictement supérieur aux formations locales sédimentaires.



Microphotographies des principaux faciès de suspension. a) Microlaminations avec granoclassement positif (LN); b) Sable fin homogène et bien trié à paillettes micacées horizontales, faciès à litage parallèle (LN), c) Dépôts argileux de décantation (LN)
LN: lumière naturelle, LP: lumière polarisée.

Fig. 143 : Reconnaissance micromorphologique des alluvions par la dynamique d'écoulement

2.1.3.2. Variabilité des signatures sédimentaires selon l'environnement fluvial et le secteur géographique

Dans le bassin de la Salt, les dépôts fluviaux sont de texture argileuse à sableuse, avec un grain maximum compris entre 100 et 300 µm (formations alluviales) et entre 100 et 1300 µm (dans les canaux). La médiane est comprise entre 15 et 35 µm dans les canaux

et entre 20 et 35 μm dans les formations alluviales. Parmi les dynamiques identifiées dans ces dernières (Fig. 144), les facies bioturbés (27%) et à litage parallèle (36%) dominant, respectivement entre 800 et 1000 apr. J.-C et entre 1150 et 1300 apr. J.-C. Cette première observation permet de poser l'hypothèse d'une stabilisation des berges de la Salt entre la période Coloniale et Sédentaire, qui se poursuit par une reprise de l'accrétion sédimentaire au début de la période Classique. Dans les canaux, ces sont les facies à suspension graduée et uniforme qui dominent (respectivement 35 et 25% des US). Les sédiments granoclassés sont observés entre 950 et 1300 apr. J.-C principalement (période Sédentaire et Classique), et les sédiments à facies uniforme entre 750 et 950 apr. J.-C. (période Coloniale) et entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (début de la période Classique).

Le long de la Gila, les dépôts sont de texture argileuse à sableuse, avec un grain maximum compris entre 50 et 300 μm (formations alluviales) et entre 100 et 1500 μm (dans les canaux). La médiane est comprise entre 20 et 35 μm . Dans les formations alluviales (Fig. 144), les sédiments granoclassés dominant (65% des US). Ils se mettent en place au cours de la période Classique, Protohistorique et Historique. Ils témoignent d'une sédimentation rythmée, associée à l'accrétion de la plaine. Dans les canaux, les dépôts de décantation sont bien marqués (20%), de même que les facies à litage parallèle (43%) (entre 350-550 et 1150-1300 apr. J.-C. principalement) et les dépôts à suspension uniforme (22%) (entre 1150-1300 apr. J.-C.). Ces observations mettent en évidence des écoulements contrastés (stagnation d'eau/crue éclair) au cours de la période Pionnière, et au début de la période Classique.

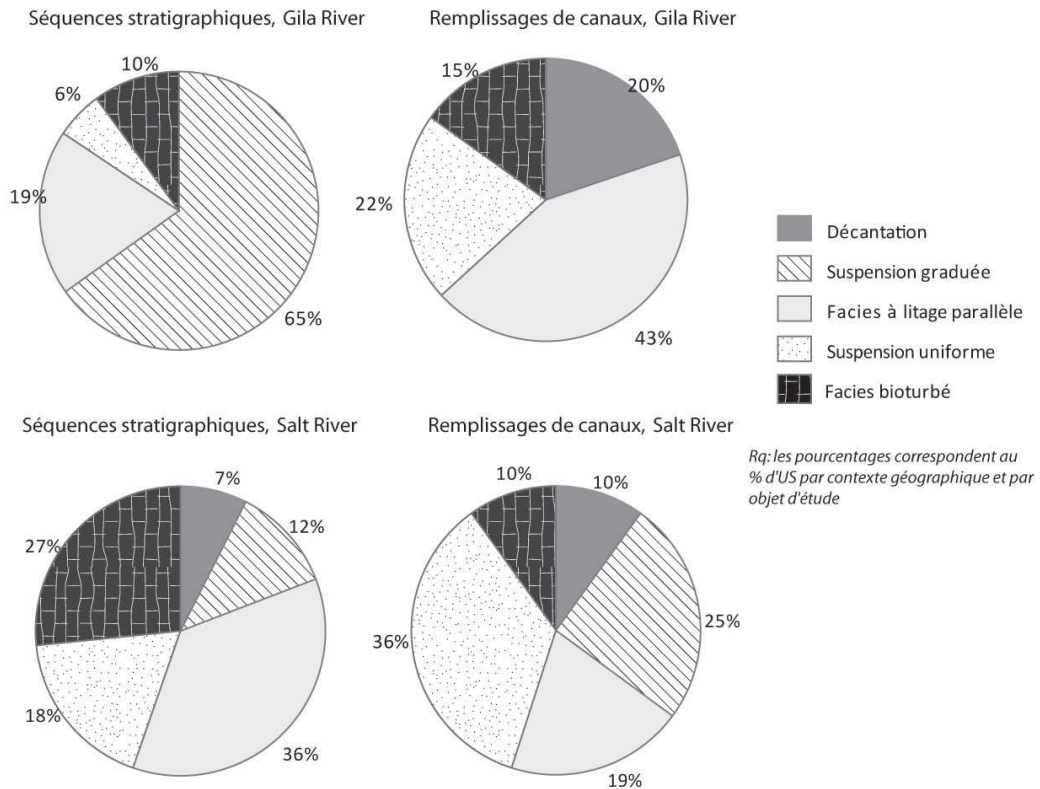


Fig. 144 : Evénements hydrosédimentaires par objet d'étude (canal/formation alluviale) et par secteur géographique (La chronologie n'est pas intégrée ici)

2.1.4. *Conclusion*

Pour créer le Facies Milieu de Sédimentation, il a fallu définir des critères de reconnaissance des processus d'érosion locale, des sédiments éoliens et alluviaux. Le tableau final de données ci-dessous (Tab. 24) présente en fonction du secteur géographique et des milieux fluviatiles, la reconstruction des milieux de sédimentation. Ce sont les sédiments qui composent les remplissages de canaux qui présentent les traces d'érosion locale les plus marquées.

Environnement		Facies milieu de sédimentation (nombre de microUS)			Total analysé
Bassin versant	Milieu fluviatile	Alluvial	Eolien (alluvio-éolien)	Colluvial à alluvio-colluvial	
Salt	Canal	178	17	38	233
	Lit majeur/terrasse/cônes	94	1	3	98
Gila	Canal	106	5	46	157
	Lit majeur/terrasse/cônes	110	4	5	119

Tab. 24 : Affectation d'un milieu de sédimentation (alluvial, colluvial, éolien) aux microUS en fonction de l'environnement géographique et fluviatile

2.2. Signature micromorphologique de la dynamique hydrique (facies granulométriques Fg)

Pour mesurer la texture des sédiments de colmatage des structures hydrauliques et les dépôts de plaine alluviale avec une plus grande résolution stratigraphique (échelle de la lamine) et autrement que par des analyses granulométriques traditionnelles, nous avons intégré trois proxy: le % de sable mesuré par analyse d'image, le % estimé d'argile et le grain moyen mesuré en μm . L'acquisition des données est décrite dans le Chapitre 1 de cette partie. L'analyse statistique par ACP puis CAH a permis de définir objectivement des groupes de texture en fonction du contexte géographique et du milieu fluviatile.

Un biais doit être signalé. Les pourcentages de sables obtenus sont très faibles comparativement à une approche granulométrique standard. Nous raisonnerons directement à partir du pourcentage de matière minérale, mais la microphotographie analysée comprend des particules organiques, des vides (porosité du sol), et d'autres traits pédo-sédimentaires qui réduisent relativement la superficie totale occupée par les particules sableuses.

2.2.1. *Dans le bassin de la Gila*

2.2.1.1. Remplissages de canaux

Les résultats de l'ACP (9 remplissages de canaux, soit 157 US) montrent que les axes F1 et F2 fournissent 94,77% de l'information (Fig. 145). Le grain moyen et le % de sable sont très liés et en opposition avec le pourcentage estimé d'argile. Six classes granulométriques ont été identifiées après avoir conduit la Classification Ascendante Hiérarchique. La classe 1, qui regroupe les limons grossiers, est la plus représentée. Elle correspond à une dynamique sédimentaire de moyenne intensité.

La classe 2, dominée par les limons argileux, est associée à une dynamique de sédimentation de plus faible énergie, comme c'est le cas également de la classe 4 qui rassemble les argiles. L'ensemble sableux, qui signe une dynamique d'écoulement plus importante, est caractérisé par la classe 3 (sables limoneux), la classe 5 (sables fins) et la classe 6 (sables très fins).

La répartition de ces faciès selon les systèmes d'irrigation étudiés montre que le système Santan sur la rive nord est composé à 58 % de dépôts limoneux grossiers, et de 22 % de dépôts limono-argileux (Fig. 146). Le système Casa Blanca sur la rive sud présente des dépôts de remplissage répartis de façon homogène dans toutes les classes granulométriques, avec la présence de dépôts plus grossiers non observés dans les autres structures hydrauliques. Cette disparité peut être d'ordre géographique ou chronologique, mais peut également résulter d'une plus ou moins grande proximité aux vannes d'entrée du système.

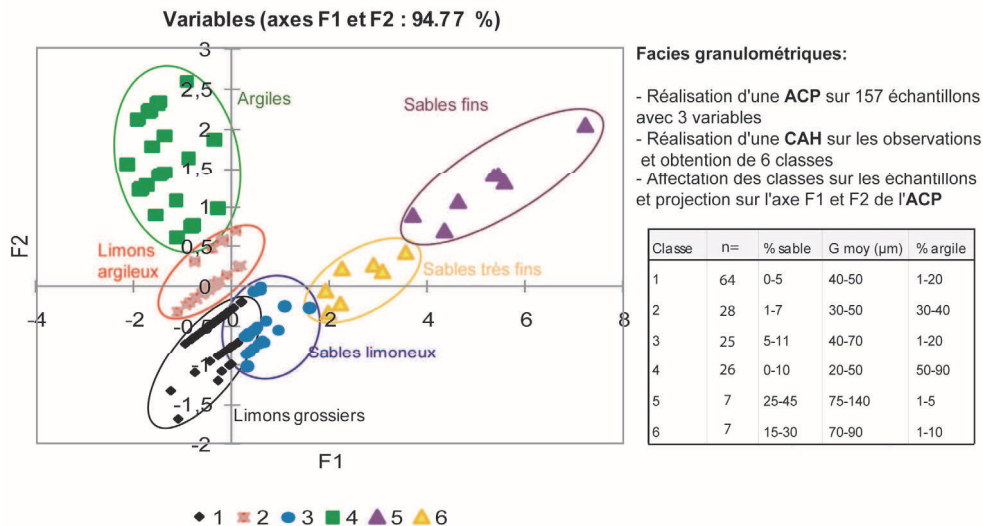


Fig. 145 : Identification des faciès granulométriques dans les remplissages de canaux, Gila River. Chaque point représente une unité microstratigraphique. L'axe F2 est défini par le % d'argile et l'axe F1 par le % de sable et le grain moyen. Les 6 faciès obtenus sont dominés par des sables (n=39), des argiles (n=26), des limons argileux (n=28) et des limons grossiers (n=64).

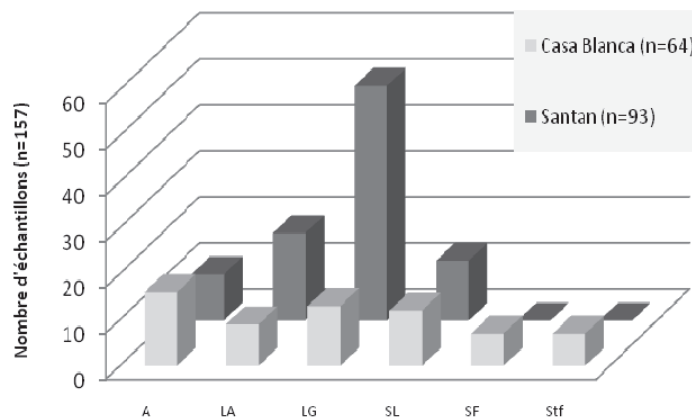


Fig. 146 : Répartition géographique des classes granulométriques identifiées dans les deux systèmes d'irrigation étudiés (Casa Blanca et Santan), Gila River Indian Community

2.2.1.2. Séquences stratigraphiques naturelles

Quatre classes granulométriques ont été obtenues sur les dépôts de plaine d’inondation/basses terrasses/cônes détritiques (5 séquences stratigraphiques, 119 US) en suivant la même approche statistique (ACP sur données centrées réduites puis CAH) (Fig. 147). La composition et les proportions par classes caractérisent une dynamique sédimentaire moins intense que dans les canaux, en réponse à des milieux de sédimentation différents, ces derniers se rapprochant plus des chenaux. Les 4 classes obtenues sont dominées par les argiles sableuses, les limons-argileux, les limons-sableux et les argiles, ces dernières étant les plus représentées.

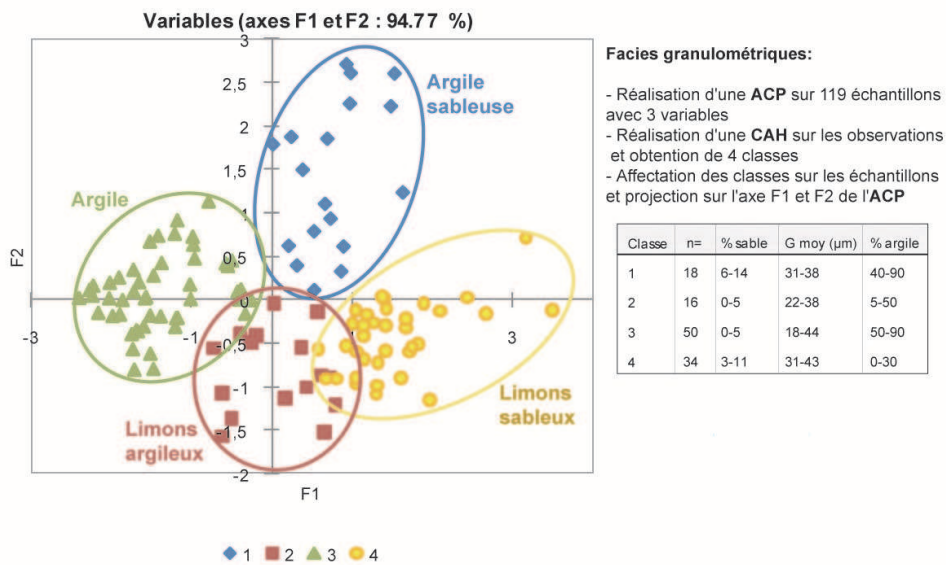


Fig. 147 : Identification des faciès granulométriques dans les séquences stratigraphiques, Gila River. Chaque point représente une unité microstratigraphique. L’axe F1 est défini par le grain moyen et l’axe F2 par le % de sable et le % d’argile.

Les formations identifiées sur la basse terrasse Holocène T2 (Florence, Santan Canal System et Casa Blanca System) sont composées principalement de dépôts fins (Fig. 148).

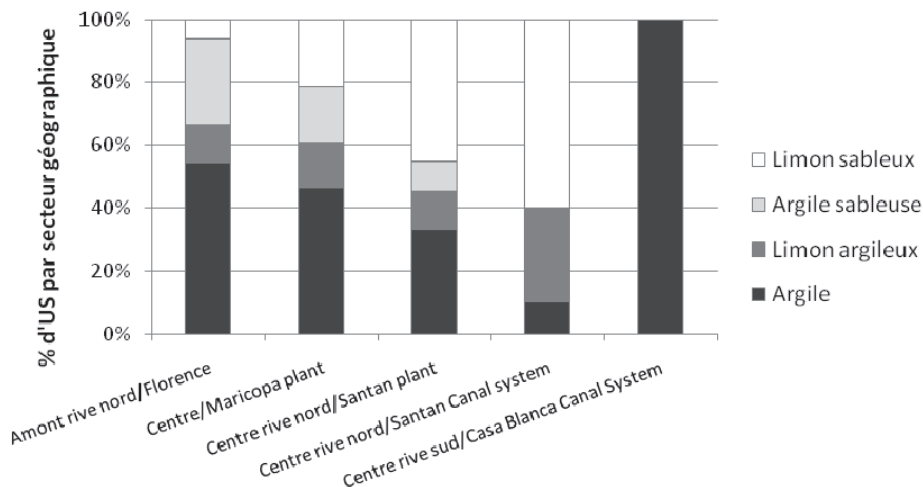


Fig. 148 : Répartition géographique des classes granulométriques dans les cinq séquences stratigraphiques étudiées dans la moyenne vallée de la Gila

Sur le site de Florence et de Casa Blanca, les argiles et argiles sableuses dominent. Dans le secteur de Santan, les limons sableux identifiés correspondent à des épisodes de ruissellement en provenance des formations Pléistocènes de type cône détritique, qui alternent avec des sédiments fluviaux de texture limono-argileuse à argileuse. Sur la terrasse T1 (Maricopa et Santan plant), des sédiments de texture variable ont été observés, avec des dépôts fins dominant sur le site de Maricopa et plus grossiers sur le site de Santan.

2.2.2. *Dans le bassin de la Salt*

2.2.2.1. Remplissages de canaux

De la même façon, une ACP suivie par une CAH sur observations ont permis de mettre en évidence 5 classes granulométriques dans les remplissages de canaux dans le bassin de la Salt. La représentativité de ces échantillons sur les axes F 1 et F2 atteint 91,33 % (Fig. 149).

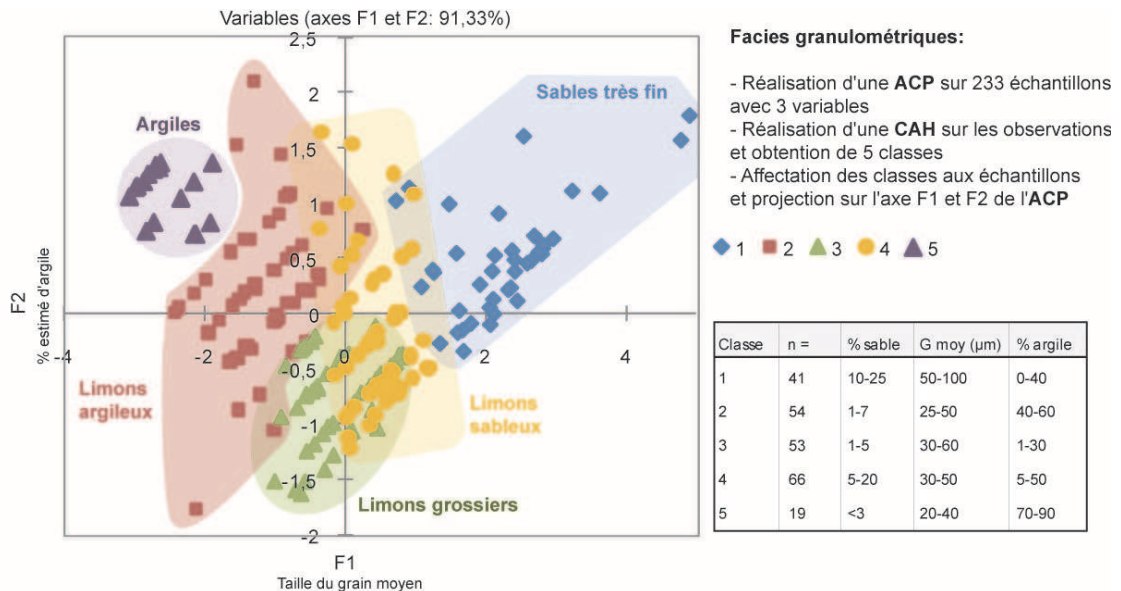


Fig. 149 : Identification des faciès granulométriques dans les remplissages de canaux, Salt River. Chaque point représente une unité microstratigraphique. Les trois variables contribuent à 30% chacune à la représentativité de l'axe F1, et l'axe F2 est défini par le % estimé d'argile

Les faciès dominés par les argiles, les limons grossiers et les sables sont bien individualisés. Le faciès limoneux domine et la discrimination des sous-faciès s'est donc basée sur la composante sableuse et argileuse de ces limons. La dispersion verticale des points est expliquée par la représentativité de l'ensemble des variables par l'axe F1. Les limons argileux ont un grain moyen variable, ce qui explique la dispersion verticale des points. De même, le faciès limono-sableux contient des proportions en argiles variables : les points situés sur $F1 > 0$ contiennent plus d'argile que les points situés sur $F1 < 0$ (passage d'un faciès limono-sableux stricto sensu à un faciès limono-argilo-sableux). L'homogénéité texturale des sédiments est nette dans la basse vallée de la Salt.

Elle explique la dispersion des classes et leur recouplement. Cette classification est la plus optimale obtenue et elle sera conservée dans le reste de l'analyse.

Les argiles, limons argileux et limons grossiers sont observés quel que soit le secteur géographique, la position des canaux et la période chronologique. Enfin, les limons sableux dominent dans les sédiments mis en place entre 750 et 950 apr. J.-C. (période Coloniale) (66% des US), quelle que soit le secteur géographique et la position des canaux.

2.2.2.2. Séquences stratigraphiques naturelles

La même approche statistique a permis d'établir 3 classes granulométriques relativement bien individualisées mais hétérogènes dans leur composition : les facies dominés par les limons, les limons sableux à sables, et les argiles à argiles sableuses (Fig. 150). La représentativité du plan F1 et F2 est de 83,89 %.

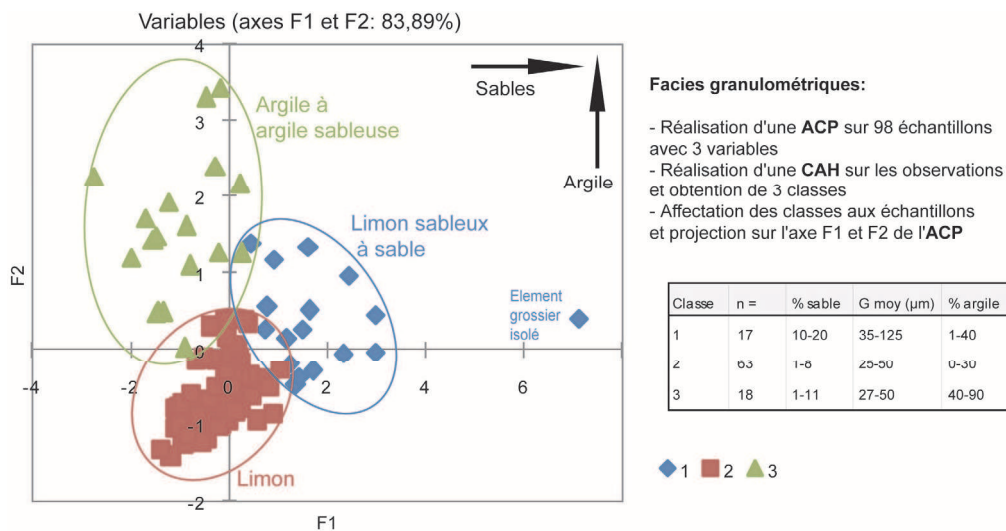


Fig. 150 : Identification des faciès granulométriques dans la plaine alluviale et les basses terrasses de la Salt River. Chaque point représente une unité microstratigraphique. L'axe F1 est défini par le % d'argile et l'axe F2 par le pourcentage de sable.

L'analyse de la répartition géographique des classes granulométrique montre que les limons sont les plus représentés quel que soit le secteur géographique (Fig. 151).

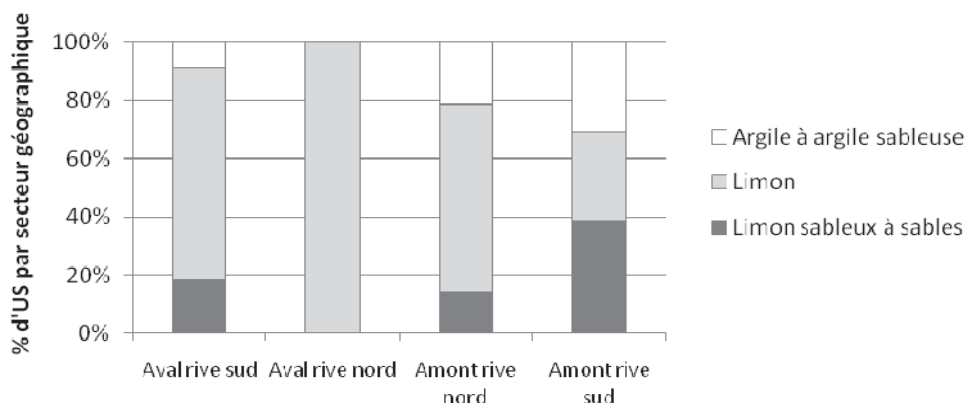


Fig. 151 : Répartition géographique des classes granulométriques dans les cinq séquences stratigraphiques étudiées dans la basse vallée de la Salt

Les sédiments argileux à argilo-sableux ont été mis en évidence sur la partie proximale et distale de la terrasse Holocène Lehi (plaine alluviale Hohokam : amont rive sud/site RAD, aval rive sud/Vulcan, amont rive nord/SRMG log 4 et log 5), entre 800 et 1000 apr. J.-C. (période Sédentaire) et après 1350 apr. J.-C. (période Classique à Protohistorique). 76% des sédiments de texture limono-sableuse à sableuse ont été identifiés dans le secteur amont, rive nord et sud (site RAD et SRMG), principalement sur la terrasse T1 et se sont déposés entre 1000 et 1400 apr. J.-C (période Sédentaire à Classique).

2.2.3. *Conclusion*

La comparaison entre les dynamiques hydriques des deux bassins versants met en évidence des charges solides plus grossières mais plus homogènes dans le bassin de la Salt que dans le bassin de la Gila où les facies à texture plus fine dominant. Dans le bassin de la Gila, les variabilités texturales sont liées à des dynamiques hydriques plus irrégulières, associées à une charge solide transportée 9 fois supérieure à celle de la Salt, ce qui a pour conséquence des taux de sédimentation d'environ 30 à 60 cm par siècle (Forbes, 1911). Dans les deux bassins versants, les sédiments étudiés sur la terrasse Holocène Lehi (Salt River) et T2 (Gila River) sont composées de sédiments de texture fine (entre 400 et 1000 apr. J.-C.), exceptés dans les secteurs sujets à des dynamiques d'érosion locale. Les dépôts qui composent les terrasses T1 (mise en place postérieure à 1100 apr. J.-C) ont une texture limono-sableuse à sableuse. Cette texture grossière a été principalement identifiée à l'amont de la basse vallée de la Salt, et dans l'ensemble de la vallée de la Gila.

Dans le bassin de la Gila, la granulométrie des remplissages de canaux est diversifiée. L'étude de plusieurs structures hydrauliques appartenant à un même système permet de discuter de cette variabilité granulométrique.

Dans les canaux du système Santan, étudié à 1 km des vannes d'entrée, les sédiments qui colmatent le canal principal et les canaux collecteurs d'eau sont de texture limoneuse grossière à l'opposé des canaux latéraux dont le remplissage est de texture limono-argileuse à argileuse, malgré la proximité avec le canal principal. Ceci confirme l'hypothèse de vannes d'entrée qui filtrent l'eau entre les différentes connections du réseau hydraulique, afin de limiter l'érosion et favoriser la sédimentation de particules fines dans les champs.

Dans le secteur de Sacaton, les canaux du Casa Blanca System ont été étudiés à 7km des barrages de dérivation construits dans la Little Gila River. Malgré cette distance, le canal principal se colmate par des dépôts fins, puis des sables qui rappellent les chenaux naturels. Le remplissage sédimentaire des structures secondaires est très différent, de texture argileuse pour l'une, à graveleuse pour l'autre. Ceci d'affirmer que malgré la distance aux vannes d'entrée, les dynamiques hydriques de forte intensité sont enregistrées dans les canaux principaux. Le colmatage ou l'abandon des structures secondaires 1) par des particules fines ne résulte pas automatiquement de phases de faible niveau de l'eau dans le chenal principal.

Ici, les écoulements réduits font suite à la rechannelisation du chenal principal et la destruction de la jonction avec le canal de distribution ; 2) par des particules grossières peut être lié à la pratique de canalisation des eaux de ruissellement.

Dans le bassin de la Salt, les canaux étudiés sont géographiquement plus isolés et leur remplissage plus homogène. 70% des sédiments de texture sableuse ont été observés à proximité de vannes d'entrée des systèmes (site RAD, amont, rive sud). Sur les sites plus en aval et relativement éloignés des vannes d'entrée (ex : Cashion Ruin, Ecoplan), les sédiments sont de texture limono-sableuse à limoneuse grossière, ce qui pourrait donc résulter d'un tri granulométrique. Les sédiments de texture fine ont été identifiés quelle que soit la distance aux prises d'eau (sites RAD, Cashion, Saint Johns Canal, Ecoplan, La Lomita) et la position amont-aval. A proximité des vannes d'entrée, leur occurrence traduit soit des écoulements réduits suite à une migration latérale du chenal principal, soit d'un cours d'eau étroit et profond. Sur les sites sujets à des dynamiques érosives locales, l'identification de particules fines peut être la conséquence d'épisodes de destruction latérale des canaux par des cours d'eau intermittents (ex : canaux à Desert Archaeology), suivie par des écoulements réduits. Dans les secteurs plus en aval, comme les sites d'Ecoplan et de Cashion Ruin, la présence de particules fine peut soit résulter d'un tri granulométrique, mais également d'épisodes de migration du chenal principal ou son rétrécissement/enfoncement. Seules les corrélations pédo-sédimentaires synchrones pourront permettre de valider l'une ou l'autre de ces hypothèses.

2.3. Signature micromorphologique de l'origine des sédiments (facies source sédimentaire Fss)

L'identification des sources sédimentaires repose sur l'étude des assemblages minéralogiques via la pétrographie optique.

2.3.1. Dans le bassin de la Salt

2.3.1.1. Comparaison des spectres minéralogiques d'alluvions actuels des bassins de la Salt et de la Verde

En complément de l'approche magnétique, qui nous a permis de révéler que le bassin de la Verde était plus magnétique que celui de la Salt, nous avons échantillonné des alluvions actuels dans les bassins de la Salt et de la Verde afin :

- 1) d'identifier les minéraux qui marquent l'érosion d'un bassin versant et donc de sélectionner avec le plus de pertinence les marqueurs pétrographiques,
- 2) de créer statistiquement le Fss grâce à l'intégration de ces échantillons référentiels dans les analyses statistiques.

- *Echantillonnage et choix des marqueurs*

Six échantillons ont été prélevés sur les berges de la Salt et de la Verde. Deux échantillons, éloignés d'environ 16 km, ont été prélevés sur des bancs de convexité de la Verde. Ils sont composés de sables grossiers, plus fins en partie sommitale.

Quatre échantillons ont été prélevés sur une levée de berge, en rive concave de la Salt River sur une même séquence stratigraphique (Fig. 152). Ils sont de texture fine et sont très homogènes. Sur ces échantillons ont été mesurés de façon systématique : le grain moyen (μm), le grain maximum (μm), la forme des grains et la présence de revêtements sur ces grains. Le % relatif de biotite et de carbonates exogènes a été estimé, de même que la présence/absence d'un certain nombre de minéraux : amphibole, épidote, feldspaths, grès, pyroxènes, plagioclase, chlorite, quartzite et microcline. En complément, les différents types de basalte et le nombre total de grains ont été comptabilisés et décrits au sein de chaque lame mince.

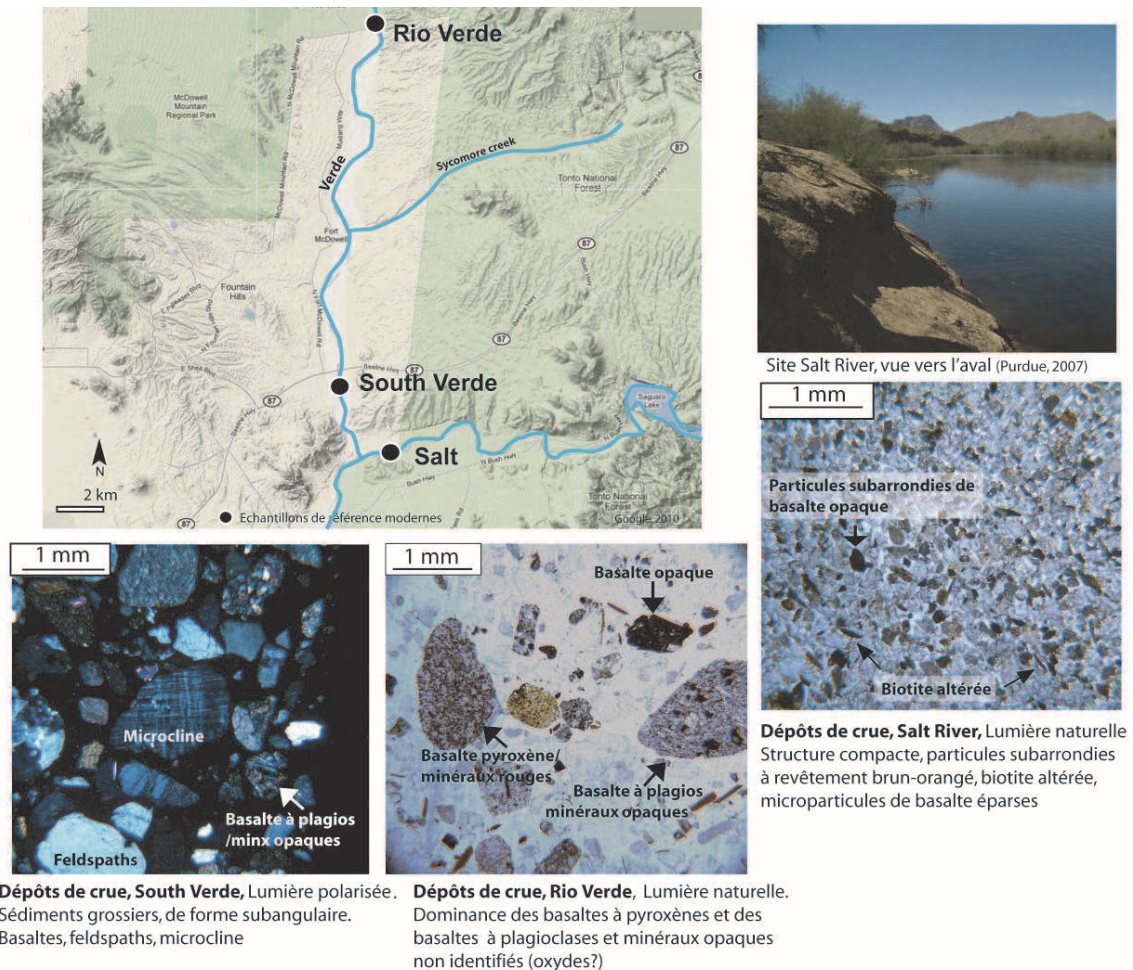


Fig. 152 : Localisation des deux échantillons actuels prélevés le long de la Verde (Rio Verde et South Verde), et des 4 dépôts de débordement de la Salt prélevés sur un même site. Photographies au microscope optique des dépôts échantillonnés.

- Caractérisation des facies minéralogiques

La mesure du grain moyen et du grain maximum a mis en évidence des grains nettement plus fins dans le bassin de la Salt mais cette variation de taille de grain est liée à la position géomorphologique de l'échantillonnage. Les minéraux ont une forme arrondie et sont recouverts par une pellicule argileuse (Fig. 153a). Ils sont composés de biotite, de carbonates exogènes (Fig. 153b), d'épidote, de feldspaths, de quelques grès, de plagioclases et de chlorite, ainsi que de l'amphibole (type métamorphique).

Dans le bassin de la Verde (Fig. 153c), des grès, quartzites, microclines, feldspaths et plagioclases calcitisés ont été identifiés. Les sédiments sont riches en particules basaltiques à phénocristaux de pyroxènes avec ou sans minéraux orangés (non déterminés) (Fig. 152, Fig. 153d). Ceci permet de les distinguer facilement des sédiments en provenance du bassin de la Salt qui ne contiennent que quelques fragments de basalte opaque à semi-opaque à plagioclases, ou microlité de couleur marron.

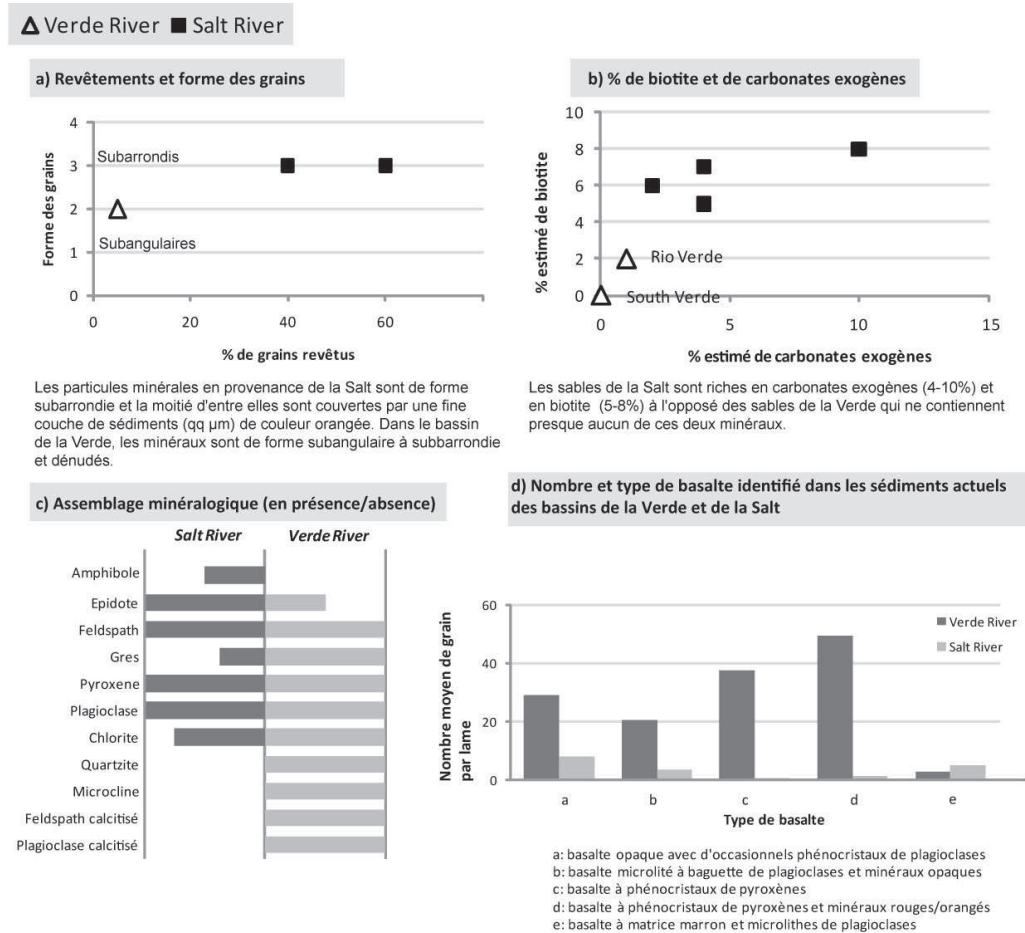


Fig. 153 : Caractéristiques pétrographiques des dépôts en provenance des bassins de la Salt et de la Verde

2.3.1.2. Typologie des assemblages pétrographiques dans le bassin de la Salt

La classification des dépôts repose sur trois analyses statistiques successives (Tab. 19) :

- 1) Une ACM/CAH (distance euclidienne, agrégats de Ward) pour l'analyse des « minéraux rares » quantifiés en présence/absence,
- 2) une ACP sur données centrées réduites/CAH pour la biotite, l'amphibole, et les carbonates exogènes semi-quantifiés,
- 3) une ACM/CAH qui regroupe les faciès créés ci-dessus, les milieux de sédimentation et le type/quantité de particules basaltiques recodifiés et qui nous ont permis d'identifier 4 sources sédimentaires dans le bassin de la Salt et 3 dans le bassin de la Gila.

Des référentiels magnétiques, géologiques et micromorphologiques ont servi de support à cette classification. Cette section présente les trois analyses statistiques conduites afin de construire les sous-facies de minéraux rares, communs, puis le Fss.

• L'assemblage des minéraux « rares » (Salt)

Les minéraux sélectionnés dans cette analyse sont similaires à ceux déterminés dans les référentiels actuels.

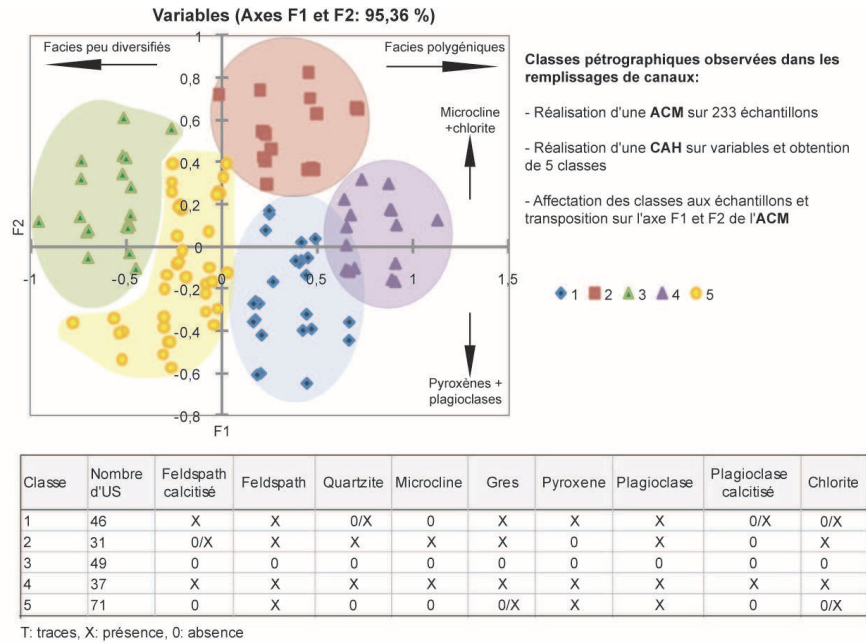
- Feldspaths et plagioclases
- Feldspaths et plagioclases calcitisés qui correspondent à l'épigénie calcaire des silicates, c'est-à-dire au remplacement à volume constant (Boulet, 1964 ; Nahon et Ruellan, 1975) des silicates par des carbonates (Degens et Rutte, 1960; Gile et al., 1966; Multer et Hoffmeister, 1968; Reeves, 1970; Millot et al., 1977; Ruellan et al., 1978; Millot, 1979; Bech et al., 1980; Ruellan, 1980; Watts, 1980; Paquet et Ruellan, 1997 d'après Alonso et al., 2004). Ce processus de remplacement a été principalement observé dans des sols et formations anciennes pléistocènes (Alonso et al., 2004). Cette dissolution des silicates ne peut avoir lieu qu'en milieu très acide ou alcalin (Millot et al., 1977). Le calcium peut être fourni par la roche mère ou par les particules superficielles (terrasses, cônes détritiques, formations éoliennes). D'autres travaux de recherche suggèrent qu'une ambiance physico-chimique saturée en calcium et régie par l'alternance de périodes sèches et humides est nécessaire à cette épigénie (Blancaneux, 1990).
- Quartzite d'origine sédimentaire ou métamorphique. En lame mince, les grains sont collés les uns aux autres, présentent une structure dentelée et quelques grains de feldspaths accompagnent les quartz. Il ne reste plus d'espace vide entre eux. Cette organisation est typique des quartzites métamorphiques (Jung, 1969).
- Microcline
- Grès à grain fin
- Pyroxènes
- Chlorites

L'ensemble des 331 US (remplissage de canaux/séquence stratigraphique) a été intégré initialement dans une unique Analyse des Correspondances Multiples, mais les résultats ne permettaient pas de distinguer avec pertinence les facies minéralogiques. C'est la raison pour laquelle deux ACM ont été conduites d'une part à partir des prélèvements effectués dans les remplissages de canaux et d'autre part sur des échantillons issus des formations alluviales de la Salt. Cette analyse a été suivie par une Classification Ascendante Hiérarchique sur variables et observations qui a mis en évidence 5 classes pétrographiques dans les remplissages de canaux et 4 dans les séquences stratigraphiques naturelles (Fig. 154a et b).

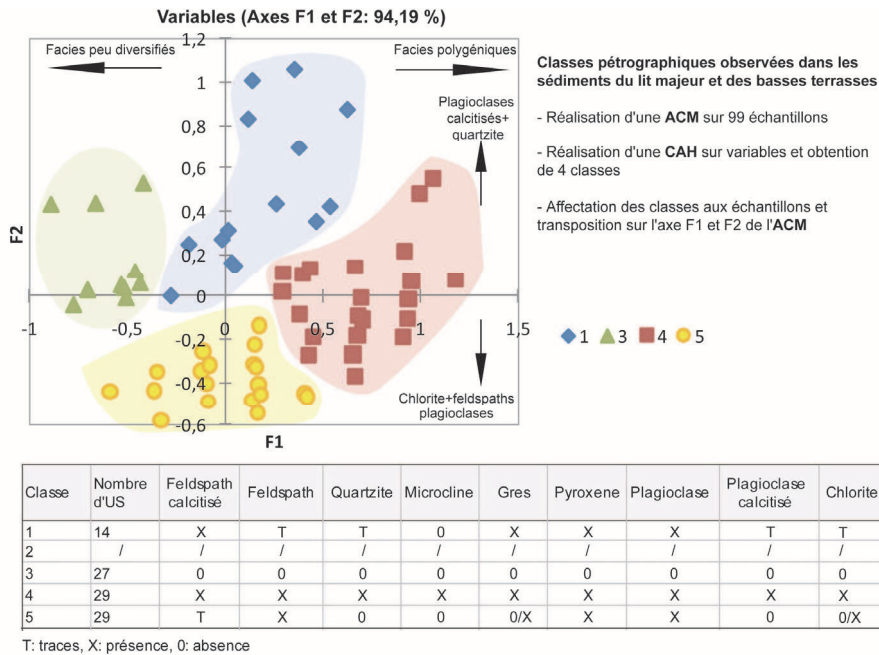
Deux groupes ont été mis en évidence: les facies polygéniques et les facies homogènes. Les facies polygéniques correspondent aux classes 1, 2 et 4. La classe 1 ($x > 0$ et $y < 0$) contient principalement des feldspaths plus ou moins altérés, des grès, pyroxènes et plagioclases.

La classe 2 ($x > 0$, $y > 0$ ou < 0) est définie par la présence de quartzite, de microcline et de chlorite. Enfin, la classe pétrographique 4, la plus diversifiée, est composée de tous les minéraux décrits. Les facies peu diversifiés correspondent aux classes 3 et 5 ($x < 0$, $y > 0$)

ou <0) et comprennent respectivement des pyroxènes/plagioclases, des traces de grès, de chlorite et des feldspaths. Les autres minéraux sont observés en trace.



a) Assemblages minéralogiques de « minéraux rares » dans les remplissages de canaux (Salt)



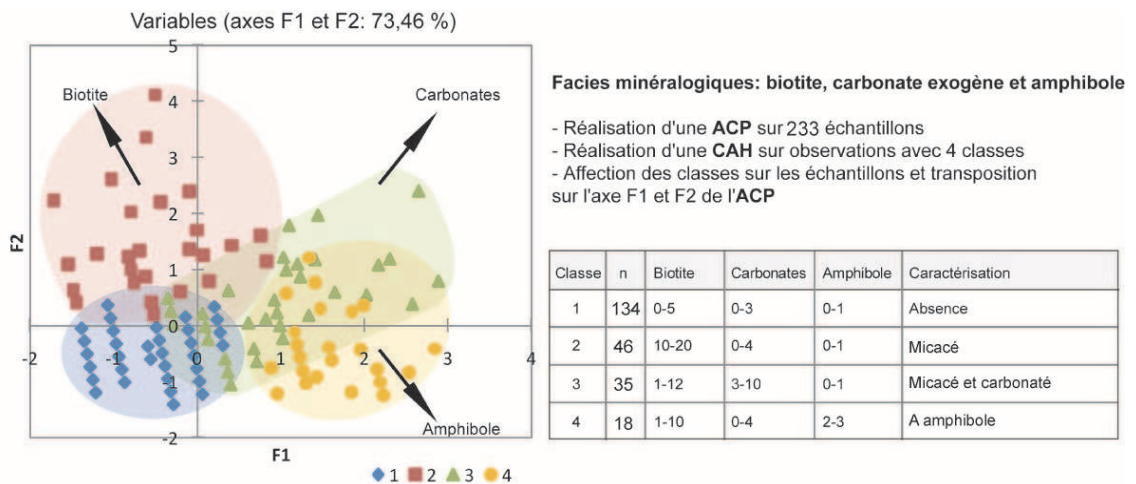
b) Assemblages minéralogiques de « minéraux rares » dans les séquences stratigraphiques naturelles (Salt)

Fig. 154 : Résultats de l'ACM « minéraux rares » conduite sur les 233 US identifiées dans les remplissages de canaux, et les 98 étudiées dans les milieux naturels (avec l'échantillon référentiel).

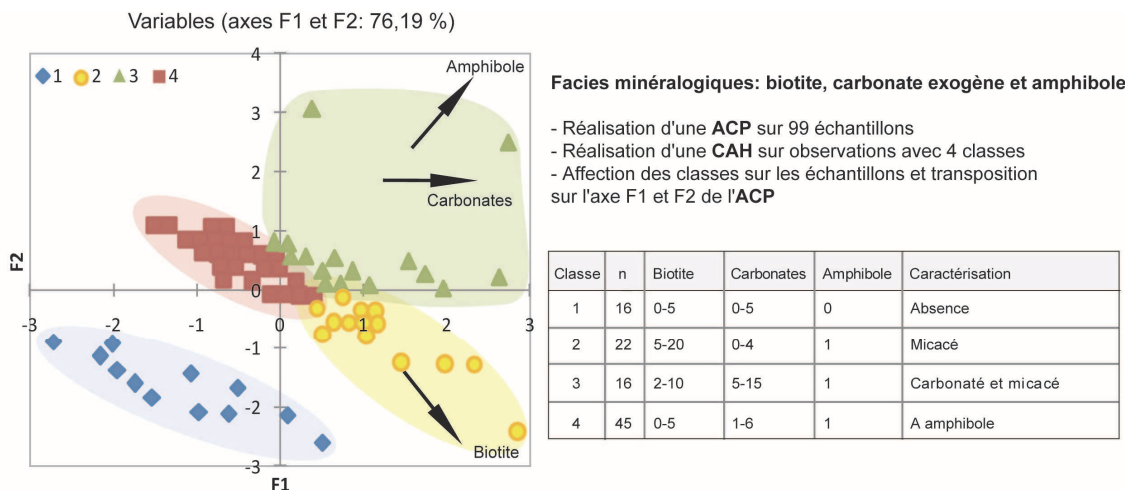
Chaque point représente une unité microstratigraphique visible sur les axes F1 et F2. La codification des faciès obtenus des figures a et b est identique. La classe pétrographique 2 distinguée dans les remplissages de canaux est absente des faciès enregistrés en contexte naturel.

• L'assemblage de « minéraux communs » (Salt)

Les minéraux communs regroupent la biotite, les carbonates exogènes et l'amphibole (verte et de type métamorphique). L'ACP puis la CAH sur observations ont permis de distinguer 4 classes pétrographiques similaires dans les remplissages de canaux et les séquences stratigraphiques (Fig. 155 a et b). Les dépôts de la classe 1 (aucuns minéraux communs) sont bien individualisés. Le faciès micacé 2 est dispersé, et ce en rapport avec la forte variabilité dans les concentrations en biotite. Le faciès 3 (micacé et carbonaté) n'est pas clairement individualisé et recoupe notamment le faciès 4 (à amphibole) du fait de la variabilité dans la concentration en carbonates exogènes et en biotite.



a) Assemblage minéralogique de « minéraux communs » dans les remplissages de canaux (Salt)



b) Assemblage minéralogique de « minéraux communs » dans les séquences stratigraphiques naturelles (Salt)

Fig. 155 : Résultats de l'ACM « minéraux communs » conduite sur les 233 US identifiées dans les remplissages de canaux, et les 98 US étudiées dans les milieux naturels (inclus les référentiels actuels). Chaque point représente une unité microstratigraphique visible sur les axes F1 et F2. La codification des faciès obtenus des figures a et b est identique.

• Construction statistique du Facies de Source Sédimentaire (Fss) dans le bassin de la Salt

Pour cette dernière étape, nous avons choisi de corrélérer les classes préalablement obtenues (minéraux « rares » et « minéraux communs »), les milieux de sédimentation et la présence de basalte. Le tableau ci-dessous présente les 5 variables, leur codification et leur signification (Tab. 25). Les classes créées à partir de la teneur en particules basaltiques reposent sur la classification des « seuils naturels » fondée sur l’algorithme de Jenks (Jenks et Caspall, 1971). Le découpage des classes est déterminé de façon à maximiser la variance inter-classe et minimiser la variance intra-classe. Ainsi, des zones de faibles densités de valeurs ont été identifiées à 8 et 28 particules de basalte. Elles séparent relativement bien le nombre de particules identifiées dans les sédiments du bassin de la Salt, de celles du bassin de la Verde (> 30).

Facies	1	2	3	4	5
Milieu de sédimentation	Alluvial	Alluvio-éolien	Eolien	Alluvio-colluvial	
Minéraux rares	Feldspaths+pyroxènes+ fragments de grès+ plagioclases	Polygénique sauf pyroxènes et plagioclases calcitisés	Absence	Polygénique	Feldspaths+ pyroxènes+ plagioclases
Minéraux communs	Absence	Micacé	Carbonaté et micacé	Amphibole	
Nombre de grains de Basalte	0-8	9-28	> 28		
Type de grain de basalte	A pyroxène (Verde river)	Sans pyroxène ou autre source			

Tab. 25 : Codification des marqueurs des sources sédimentaires, Salt River

Les données étant quantitatives, nous avons réalisé une ACM/CAH sur l’ensemble des US, soit n=331 (i.e. les 233 US des canaux + les 98 US des séquences stratigraphiques + l’échantillon référentiel Verde). Les facies auxquels les échantillons référentiels actuels appartiennent sont présentés dans le Tab. 26.

	Facies « minéraux rares »	Facies « minéraux communs »	Basalte (quantifié/type)	Milieu
Salt River 1	5 (feldspaths+pyroxènes+plagioclases)	3 (carbonaté et micacé)	1 (opaque)	Alluvial
Salt River 2	5 (feldspaths+pyroxènes+plagioclases)	2 (micacé)	1 (opaque)	Alluvial
Salt River 3	5 (feldspaths+pyroxènes+plagioclases)	4 (amphibole)	2 (opaque)	Alluvial
Salt River 4	5 (feldspaths+pyroxènes+plagioclases)	4 (amphibole)	3 (opaque)	Alluvial
Verde River	4 (polygénique)	1 (absence)	3 (tous types)	Alluvial

Tab. 26 : Classification des échantillons référentiels de la Salt et de la Verde

Nous avons choisi une troncature en 5 classes pour la CAH (Fig. 156) dans lesquelles les dépôts référentiels sont bien individualisés. Un tri manuel a été effectué sur certains échantillons, déplacés de la classe 2 (origine bassin amont de la Salt) à la classe 3 (origine bassin de la Verde) à cause de la teneur et du type de particules basaltiques.

Trois facies en provenance du bassin de la Salt ont été individualisés : bassin amont et bassin central à texture fine ou grossière. Dans le reste de l’étude, les facies fins et grossiers seront considérés comme un ensemble.

Un faciès regroupe les sédiments en provenance du bassin de la Verde et un dernier faciès caractérise les sédiments dont l'assemblage pétrographique trop homogène n'a pas de correspondance parmi les échantillons de référence.

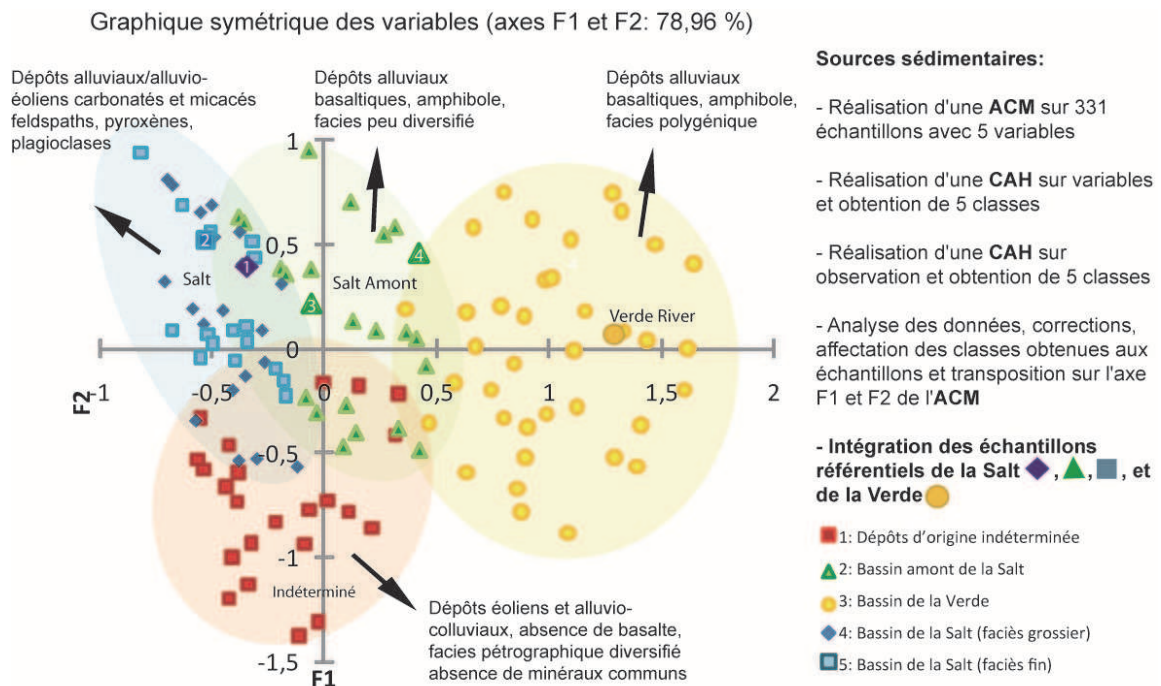


Fig. 156 : Identification finale du Faciès de Source Sédimentaire dans le bassin de la Salt. Résultats de l'ACM conduits sur 331 US. L'échantillon référentiel de la Verde (Rio Verde+South Verde) a été intégré à l'analyse. Chaque point représente une unité microstratigraphique visible sur les axes F1 et F2. Le % de variabilité expliquée par les axes F1 et F2 atteint 78,96 %. 62 US ont une origine indéterminée, 30 US proviennent de l'amont de la Salt, 85 US du bassin de la Verde et 154 US du bassin de la Salt.

• Conclusion

La confrontation des résultats obtenus ci-dessus avec le faciès granulométrique et les milieux de sédimentation identifiés dans les sections 2.1 et 2.2 permet de dégager 4 sources sédimentaires :

Fss 1 : Sédiments colluviaux et éoliens

L'origine sédimentaire des sédiments éoliens et de ceux classifiés en tant que dépôts alluvio-colluviaux n'a pu être déterminée. Ces dépôts sont de texture limoneuse à sableuse et sont faiblement à moyennement/bien triés. Ils ne possèdent pas de particules basaltiques, sont pauvres en biotite, carbonate exogène et amphibole. Ils sont principalement composés du faciès pétrographique « minéraux rares » 1, mais l'ensemble des autres faciès pétrographiques a également été observé. La représentation graphique de ces US pourrait indiquer une origine sédimentaire dans le bassin de la Salt (Fig. 156).

Fss 2 : Sédiments alluviaux en provenance du bassin amont de la Salt

Les sédiments en provenance de l'amont de la Salt sont limoneux à sableux très fins, bien à très bien triés. La principale caractéristique de ce faciès est la teneur en particules basaltiques magnétisés de petite taille, ainsi qu'en minéraux sédimentaires (grès, feldspaths et pyroxènes) (faciès « minéraux rares » 5 et 1).

Fss 3 : Sédiments alluviaux en provenance du bassin de la Verde

Les sédiments alluviaux en provenance du bassin de la Verde sont faiblement à moyennement triés et traduisent une dynamique hydrique forte (sables à limons). Ils sont polygéniques (faciès « minéraux rares » 4) et contiennent de nombreuses particules basaltiques (en provenance de l'extrême amont du bassin versant ou des montagnes MacDowell en aval) qui expliquent les fortes valeurs de susceptibilité magnétique. Ils contiennent également des microclines, feldspaths et plagioclases calcitisés. Les flux solides en provenance de la Verde impliquent également une dynamique hydrosédimentaire élevée à l'échelle du bassin de la Salt et nous posons l'hypothèse que l'observation de ce faciès témoigne d'une érosion à l'échelle régionale.

Fss 4 : Sédiments alluviaux en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt

Les dépôts en provenance du bassin de la Salt sont des sédiments alluviaux à alluvio-éoliens, de texture limoneuse à sableuse, bien à très bien triés (excepté pour les faciès à bioturbation totale). Ils sont micacés et carbonatés, ne possèdent aucune particule basaltique et contiennent quelques particules d'amphibole (faciès « minéraux rares 3 et 5). L'érosion du bassin de la Salt entraîne également des sédiments contenant des microparticules de biotite et d'amphibole. L'origine de ces dépôts a été établie grâce à un échantillon référentiel de la Salt.

2.3.2. Dans le bassin de la Gila

Nous avons appliqué une méthode similaire à la restitution des sources sédimentaires dans le bassin de la Gila, mais nous n'avons pas échantillonné d'alluvions actuels faute de temps et d'accès au terrain. Nous nous fonderons sur les valeurs de susceptibilité magnétique et la carte géologique pour distinguer les sources locales des sources régionales. Dans notre démarche, nous avons identifié 1) par ACM/CAH les faciès de minéraux « rares », 2) par ACP/CAH les faciès de minéraux « communs », 3) par la carte géologique et les caractéristiques magnétiques les 3 classes du Fss.

2.3.2.1. Sources érodables dans le bassin de la Gila

Trois zones géologiques ont été délimitées en fonction de leurs caractéristiques lithologiques dans le bassin versant de la Gila River (Fig. 157).

La première, en amont, regroupe les bassins versants des rivières Gila (vallée de la Safford), San Pedro et San Simon composés de sédiments alluvio-éoliens et alluvions de surface pléistocènes (formation Qo) ainsi que de sédiments pliocènes faiblement triés, de type limons/argile/sable et grès fins, évaporite et microparticules volcaniques éruptives (Reynolds, 1988) (formation Tsy). Les valeurs référentielles de susceptibilité magnétique sont particulièrement élevées et s'élèvent à 2470 SI.

Cette zone intègre également des affleurements géologiques volcaniques tertiaires appartenant à la formation Tv (SM= 900 SI). Les microparticules volcaniques présentes dans ces dépôts peuvent expliquer ces valeurs de susceptibilité magnétique.

La seconde formation se situe dans la zone centrale du bassin versant, entre Florence à l'ouest et San Carlos Reservoir à l'est. Elle regroupe les Mescal et les Santa Teresa Mountains, composées de formations volcaniques Tv (SI : 900 SI), métamorphiques Xm, métasédimentaires Xms et sédimentaire Tsm, et caractérisées par une altitude moyenne de 1000 m et de fortes pentes. La Gila River y est très encaissée.

Le dernier segment localisé dans la moyenne vallée de la Gila (Gila river Indian Community) est caractérisé par un adoucissement des pentes, excepté dans la partie centrale de cette zone (Sacaton et Santan Mountains) et par l'assèchement progressif de la Gila. Cette zone regroupe les facies éoliens, volcaniques (Tv), métamorphiques (Xm) (Santan Mountains) et granitiques locaux (Yg et Tkg) (Sacaton mountains) définis en lame mince comme les facies alluvio-colluviaux. Ces dépôts présentent les valeurs de susceptibilité magnétique les plus fortes, notamment ceux qui proviennent de l'érosion des formations basaltiques des Santan Mountains.

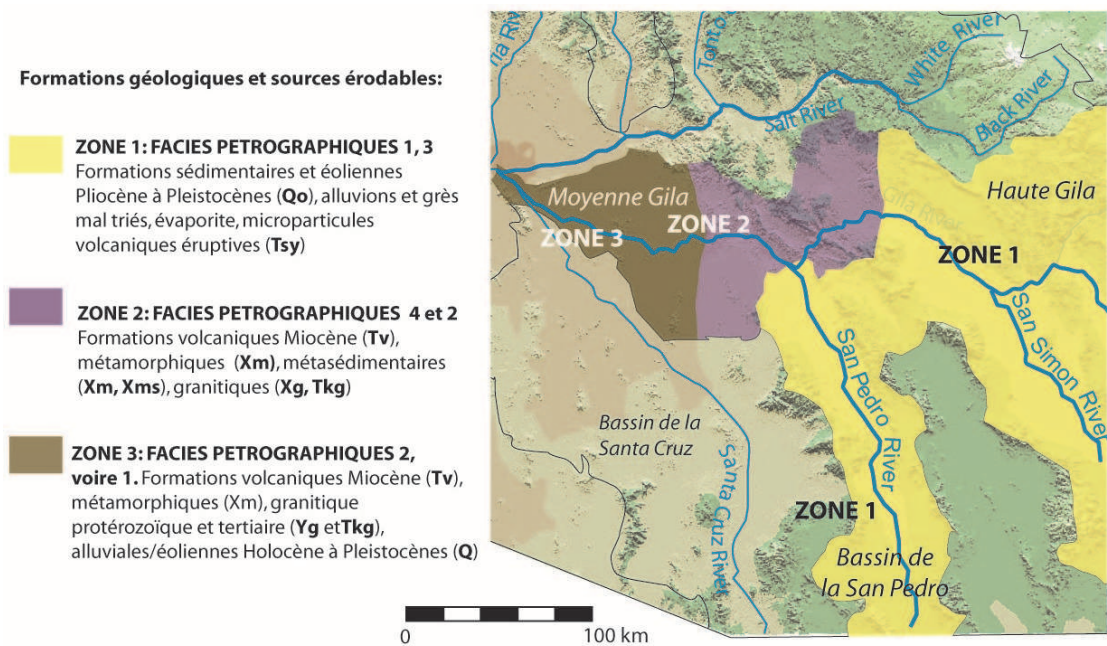


Fig. 157 : Segmentation géologique/péetrographique du bassin de la Gila, Arizona

2.3.2.2. Typologie des assemblages péetrographiques dans le bassin de la Gila

- *Assemblage des minéraux « rares »*

Les cortèges de minéraux sélectionnés dans cette analyse sont similaires à ceux identifiés et quantifiés en présence/absence dans les sédiments du bassin de la Salt (section 2.3.1.2) (9 minéraux) mais nous y avons intégré le basalte quantifié de 1 à 4 (faible à dominant) du fait de sa forte concentration dans les alluvions. Nous avons analysé ici l'ensemble des US étudiées dans le bassin de la Gila, soit 276 échantillons.

Une ACM/CAH sur observations et variables a permis de distinguer quatre classes pétrographiques (Fig. 158). Les faciès se distinguent les uns des autres notamment par leur teneur en particules basaltiques, la présence/absence des plagioclases (calcitisés ou non) et des pyroxènes, et l'identification de particules de chlorite.

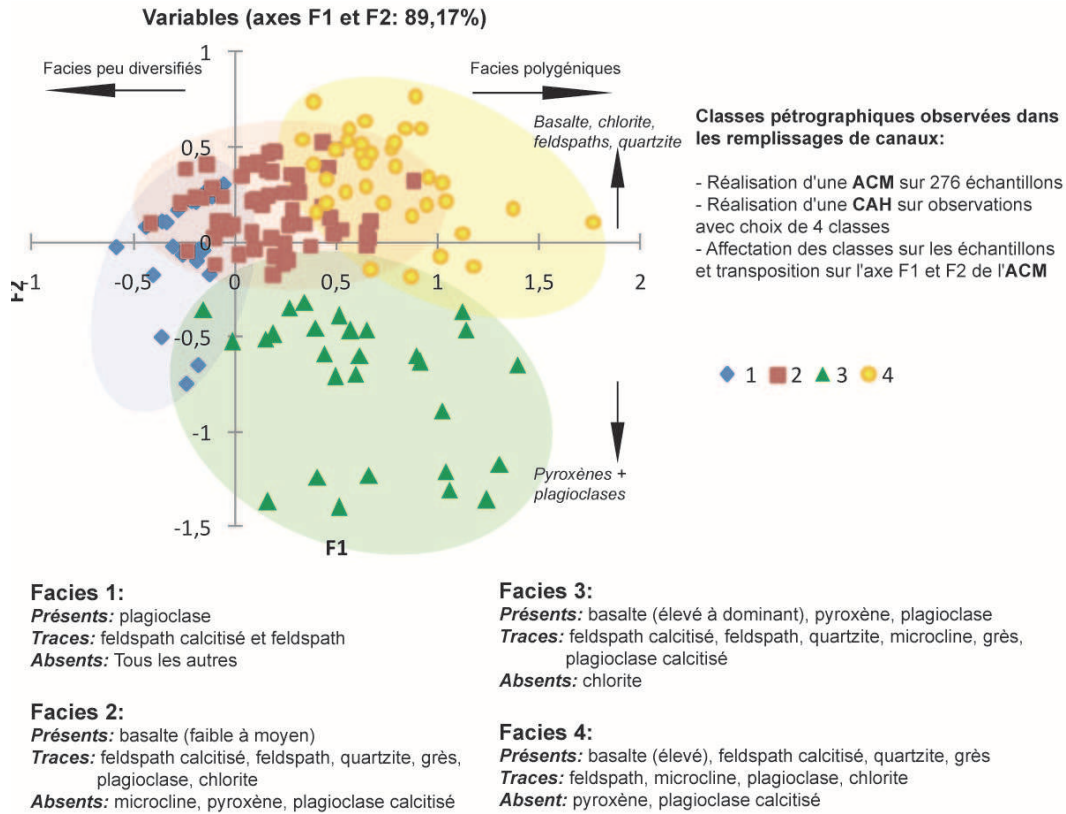


Fig. 158 : Résultats de l'ACM « minéraux rares » conduite sur les 276 US identifiées dans les remplissages de canaux et les formations alluviales (Gila River). Le % de variabilité expliqué par les axes F1 et F2 atteint 89,17 % et chaque point représente une US visible sur ces axes. Le faciès 1 comprend 131 US, le faciès 3 regroupe 30 US ; le faciès 2 est composé de 75 US et le faciès 4 de 40 US.

• Assemblage des minéraux communs

Il s'agit de la biotite, des carbonates et de l'amphibole qui ont été semi-quantifiés. Une ACP sur données centrées-réduites puis une CAH sur observations ont été conduites sur le corpus total des échantillons, soit n= 276 US. Trois groupes ont été individualisés et le tableau ci-dessous présente leurs caractéristiques (Tab. 27).

Classe	n	Biotite	Carbonates	Amphibole	Caractérisation
1	136	1-15	0-5	1-4	Amphibole
2	49	5-25	0-10	0-1	Micacé et carbonaté
3	91	0-10	0	0	Micacé

Tab. 27 : Classification des minéraux communs (biotite, carbonate, amphibole), moyenne vallée de la Gila

- Identification des sources sédimentaires

La corrélation entre les facies obtenus et la carte de segmentation géologique du bassin nous a permis d'identifier 3 sources sédimentaires :

Fss 1 : Les sédiments alluviaux en provenance de l'amont du BV (zone 1)

Deux groupes ont été distingués. Le premier groupe est composé de sédiments bien triés riches en micas, quelques plagioclases et du quartz (facies « minéraux rares » 1). L'absence de toute particule volcanique ou métamorphique semble indiquer une origine sédimentaire dans le bassin amont de la rivière Gila ou de la rivière San Pedro. Les faibles valeurs de SM s'échelonnent entre 40 et 450 SI et peuvent indiquer l'érosion de la formation Qo. A l'opposé, les fortes valeurs de SM peuvent être expliquées par les microparticules volcaniques magnétisées (érosion de Tsy). Cet assemblage minéralogique est généralement associé à des sédiments de texture fine.

Le second groupe est caractérisé par des sédiments bien triés, avec des particules de forme subarrondie à arrondie. Ils sont caractérisés par le facies pétrographique 3 composé de pyroxènes, plagioclases, un faible % de biotite et carbonates exogènes et de nombreuses particules volcaniques. Il est possible de suggérer pour ce facies, une érosion combinée des formations alluviales pléistocènes Qo en amont et de la formation volcanique Tv (zone 1). Les dépôts appartenant à ce second groupe ont une texture plus grossière.

Fss 2 : Les sédiments alluviaux polygéniques régionaux (zone 1 et 2)

Deux sous-groupes ont été distingués. Le 1^{er} ensemble est composé de basalte, quartzite et amphibole métamorphique, feldspath calcitisé et grès (facies « minéraux rares » 4) et de quelques particules micacées. Cet assemblage provient de l'érosion de formations métamorphiques (Xm) de la zone 2, de la remobilisation de formations basaltiques Tv et de sédiments alluviaux superficiels à traces éoliennes apparentes aux grès (Tsy) dans la zone 1. Ce facies présente une susceptibilité magnétique forte qui fluctue entre 150 et 400 SI.

Un second ensemble, composé du facies « minéraux rares » 2, riche en particules micacées, carbonatées, basaltiques et métamorphiques, possède une SM entre 100 et 300 SI. Il est possible de suggérer une érosion des formations volcaniques Tv en amont (zone 1), ainsi que d'anciennes formations éoliennes (zone 1, bassin de la Gila ou de la San Pedro). La dominance du facies à amphibole et la présence occasionnelle de minéraux métamorphiques peut également indiquer l'érosion de la zone 2. Les dépôts sont généralement de texture plus grossière.

Fss 3 : Les sédiments à empreinte colluviale (zone 3 prédominante, zone 1 et 2 ?)

Cet ensemble est composé de particules faiblement triées, avec une susceptibilité magnétique forte fluctuant entre 100 et 700 SI. Les sédiments sont composés de basalte (opaque à semi-opaque, de couleur noire à orangée), de quartzite et d'amphibole métamorphique, de chlorite, de feldspath calcitisé et de grès (facies « minéraux rares 2 » dominant puis 1, 3 et 4). Quelques particules micacées ont été identifiées.

Ces dépôts présentent également des particules d'origine locale (zone 3) composées de basaltes à pyroxènes et minéraux rouges indéterminés (dominants) dans le secteur de Santan et de feldspaths très altérés, de quartz polycristallins et de fragments de granite dans le secteur de Sacaton. La texture est généralement grossière, avec des sables et des limons grossiers.

3. Typologie des dynamiques hydrosédimentaires

L'ensemble des analyses statistiques conduites indépendamment a permis de caractériser trois composants majeurs de la dynamique hydrosédimentaire : la dynamique hydrique, les milieux de sédimentation et les sources sédimentaires érodables. La seconde étape de notre approche intègre les données microstructurales ainsi que celles relatives à l'hydrodynamique (écoulement et type de transport des sédiments): suspension uniforme (sédiments hétérogènes et faiblement triés), graduée (sédiments granoclassés) ou facies à litage parallèle (sédiments homogènes et bien triés). Les facies présentés sont classifiés par milieu de sédimentation (Fms) puis origine géographique (Fss) et classe granulométrique (Fg). La numérotation associée à chaque facies sera celle utilisée lors de la présentation des résultats. Les variations d'ordre pétrographiques et structurales ont permis de créer des facies distincts au sein d'une classe granulométrique (sous-facies a et b).

3.1. Dans le bassin de la Salt

3.1.1. En contexte naturel

La typologie présentée ci-dessous concerne les dépôts des formations alluviales étudiées sur les terrasses T'1, Lehi (T1), et Mesa (T2) (quelques échantillons). Dix facies ont été obtenus, dont 8 qui traduisent des dynamiques sédimentaires fluviales, 1 des dynamiques éoliennes, et 1 des dynamiques alluvio-colluviales (Tab. 28) (Rq : le tableau de classification est également présenté en Annexe 4A).

3.1.1.1. Facies alluviaux

Huit facies alluviaux ont été distingués, dont 6 proviennent du bassin de la Salt et deux du bassin de la Verde (et de la Salt probablement). Ils caractérisent 4 dynamiques hydrosédimentaires:

- 1) **Les argiles à argiles sableuses granoclassées** positivement (laminés de quelques mm à 1-2 cm) avec d'occasionnelles poussières éoliennes basaltiques (facies 1 et 3) suggèrent une sédimentation rythmée. Les sédiments proviennent principalement du bassin de la Salt et ont une susceptibilité magnétique comprise entre 100 et 400 SI.
- 2) **Les argiles à argiles sableuses, limons sableux et sables bioturbés** en provenance du bassin de la Salt (facies 2, 5) et du bassin de la Verde (facies 7) traduisent des compétences variables, mais la bioturbation a effacé l'information relative à la dynamique d'écoulement. La microstructure développée informe indirectement sur la rythmicité de la sédimentation, et traduit ici une phase de

stabilisation temporaire des plaines qui favorise le développement de l'activité biologique. La susceptibilité magnétique est comprise entre 100 et 300 SI.

3) **Les limons, limons sableux et sables homogènes bien triés**, micacés, carbonatés et basaltiques, en provenance de l'amont de la Salt ou de la Verde River (facies 4, 6a et 8a) caractérisent une dynamique hydrique importante et rythmée. Le granoclassement est difficile à distinguer du litage parallèle. L'orientation horizontale d'un certain nombre de particules indique un écoulement laminaire. La susceptibilité magnétique est comprise entre 200 et 540 SI.

4) **Les limons sableux à sables basaltiques faiblement triés** en provenance de la Verde River (8b) et de l'amont de la Salt (6b) soulignent des phases de sédimentation brutale et de courte durée, de type crue-éclair. La susceptibilité magnétique est comprise entre 100 et 1200 SI.

3.1.1.2. Facies éoliens

Un unique facies éolien composé de limons sableux a été reconnu. Il est composé de particules moyennement triées de feldspaths calcitisé, grès, pyroxènes, basalte et amphibole (facies 9), de forme subarrondie et à revêtement pelliculaire brun orangé, mais dont l'origine est indéterminée (amont de la Salt ou bassin de la Verde ?). Ces dépôts ont un signal magnétique qui atteint 416 SI. Seule une US étudiée sur la séquence stratigraphique de Vulcan (terrasse Lehi) présente ces caractéristiques.

3.1.1.3. Facies à empreinte colluviale

Les épisodes d'érosion locale sont enregistrés dans le facies 10. Ils correspondent, dans notre contexte, à des épisodes de ruissellement en nappe en provenance des formations géologiques affleurantes dans la basse vallée de la Salt : les McDowell Mountains, South Mountain et les Goldfield Mountains. Ces dépôts sont de texture sableuse, faiblement triés et leur déposition résulte d'épisodes de pluies locales intenses et de courte durée. Les particules identifiées sont basaltiques, de forme subangulaire et à forte susceptibilité magnétique pour les sédiments en provenance des McDowell mountains (site SRMG). Elles ont un signal magnétique plus faible, sont de forme subarrondie, et ont une origine indéterminée sur la rive amont sud (site RAD) (Goldfield Mountains ?). Elles sont de composition mixte (sédiments fluviaux et locaux avec un assemblage pétrographique diversifié) plus en aval, à proximité de South Mountain. Le signal magnétique est faible et les particules de forme subarrondie.

Milieu de sédimentation	Origine sédimentaire	Texture	Facies	Médiane (µm)	Grain max. (µm)	Tri des sédiments	Suspension et écoulement	SM (SI)
ALLUVIAL	BASSIN DE LA SALT	Argile sableuse	1	20-30	100-145	Excellent	Graduée, turbulent	150-400
			2	27-30	300-400	Faible à moyen	Non identifié / bioturbation	100-340
	BASSIN DE LA SALT ET VERDE		3	25-30	100-600	Faible à moyen	Poussière éolienne sur stagnation d'eau	130-340
	BASSIN DE LA SALT	Limon	4a	22-37	100-350	Excellent	Litage parallèle, laminaire	200-370

			4b	23-43	100-600	Excellent	Litage parallèle, laminaire à turbulent	270-400
			5	30-36	250-800	Faible	Non identifié / bioturbation	100-300
	BASSIN AMONT DE LA SALT	<i>Limons sableux à sable</i>	6a	30-45	100-300	Excellent	Litage parallèle, laminaire	270-540
			6b	30-35	130-500	Faible	Uniforme, turbulent	100-400
	BASSIN DE LA VERDE	<i>Limons, limons sableux à sable</i>	7	30-43	200-800	Faible	Non identifié / bioturbation	100-270
			8a	25-32	150-500	Moyen à excellent	Litage parallèle, laminaire à turbulent	200-450
8b			30-60	200-1000	Faible	Uniforme, turbulent	130-1200	
EOLIEN	INDETERMINÉ	<i>Limons sableux</i>	9	35	265	Moyen	/	416
ALLUVIO-COLLUVIAL/EOLIEN	VERDE	<i>Limons sableux à sable</i>	10	30-35	500-700	Faible	Uniforme, turbulent	100-430

Tab. 28 : Classification des faciès sédimentaires alluviaux, éoliens et colluviaux identifiés dans les formations alluviales (dépôts des terrasses T'1, Lehi et Mesa), Salt River

3.1.2. *En contexte semi-anthropique*

Cette seconde typologie correspond à la classification des dépôts étudiés dans les remplissages de canaux. 14 faciès ont été distingués et sont présentés Tab. 29 (le tableau de classification est également présenté en Annexe 4A). Dix faciès sédimentaires décrivent des dynamiques fluviales, 3 faciès des dynamiques éoliennes, et 1 faciès des dynamiques colluviales.

3.1.2.1. **Faciès alluviaux**

10 faciès alluviaux ont été identifiés, dont 8 en provenance du bassin de la Salt et 2 en provenance de la Verde River. Cinq ambiances fluviales prévalent :

1) **Les argiles de décantation** (faciès 1) sont composées de microparticules micacées. Ces sédiments semblent provenir du bassin médian et inférieur de la Salt et ont une susceptibilité magnétique faible à moyenne, comprise entre 100 et 300 SI. Ils indiquent des phases de stagnation d'eau et la structure prismatique traduit des phases d'humectation/dessiccation répétées.

2) **Les faciès bioturbés limono-argileux à limoneux** (faciès 3 et 4) sont faiblement à moyennement triés et ont une susceptibilité magnétique comprise entre 100 et 470 SI. Ils ne peuvent nous renseigner sur une dynamique d'écoulement mais révèlent un arrêt temporaire de la sédimentation.

3) **Les sédiments limono-argileux et limono-sableux granoclassés** (faciès 2b, 7) sont composés de particules subarrondies de petite taille et très bien triées, notamment des micas et des carbonates. Ce faciès témoigne d'une sédimentation rythmée de compétence variable avec des phases de montée et chute de l'eau bien marquées

4) **Les faciès limoneux grossiers, sableux et sables homogènes bien triés** (faciès 6b, 8, 9b, 10b) sont généralement microlaminés (cm) et présentent un faciès à litage

parallèle. Ils sont composés de particules basaltiques, pour les dépôts en provenance du bassin de la Verde (facies 9b, 10), et de particules micacées et carbonatées pour ceux en provenance de la Salt (facies 6b, 8). La susceptibilité magnétique est comprise entre 100 et 500 SI. L'orientation horizontale de certaines particules minérales dans ces facies suggère un écoulement laminaire. Ils caractérisent dans l'ensemble une dynamique hydrique plus élevée que les facies granoclassés mais plus faible que les facies à suspension uniforme.

5) **Les facies limoneux grossiers, sableux et sables faiblement triés** (facies 5, 6a, 9a, 10a) caractérisent les suspensions uniformes. Ils sont composées de particules de forme subarrondie à subangulaire, d'assemblages pétrographiques diversifiés, et d'une susceptibilité magnétique comprise entre 100 et 1500 SI. Ce facies indique la présence d'une arrivée d'eau rapide à forte capacité érosive. L'intensité de l'évènement dépend de la texture des sédiments, de leur origine géographique et de la zone d'échantillonnage. Les textures plus fines (type limon argileux) résultent d'une compétence fluviale plus faible à l'échelle du bassin versant de la Salt (facies 2a). Leur observation peut également être liée à un échantillonnage dans la zone aval de la basse vallée de la Salt. Les sédiments y sont plus fins car une grande partie de l'eau chargée en sédiments a déjà été dérivée et va conduire à des résultats légèrement biaisés.

3.1.2.2. Facies alluvio-éoliens et éoliens

3 facies regroupent les sédiments alluvio-éoliens et éoliens. Le premier facies est composé de sédiments éoliens bien triés (facies 11), avec des particules de forme subarrondie en provenance du bassin amont de la Salt, dont du basalte et de l'amphibole. Ces sédiments sont caractérisés par leur microstructure pelliculaire (revêtements orangés autour des particules). La susceptibilité magnétique est comprise entre 200 et 500 SI. Le facies alluvio-éolien 12 est composé de sable très fin, faiblement trié, caractérisé par une susceptibilité magnétique comprise entre 500 et 1700 SI et quelques revêtements périgranulaires autour des particules de forme subarrondie. Des fragments de basalte indiquent une origine dans le bassin de la Verde. Enfin le facies alluvio-éolien 13 est composé de limons sableux faiblement triés, riches en amphibole. Il est principalement caractérisé par sa microstructure bioturbée. Les dépôts ont une origine indéterminée, mais proviennent probablement du bassin de la Salt.

3.1.2.3. Facies alluvio-colluviaux à colluvial

Regroupés en un ensemble, les sédiments à empreinte colluviale sont composés de 4 textures différentes : les limons argileux, grossiers, sableux et sables très fins (Facies 14). Ils correspondent à des épisodes d'effondrement/glissement des berges, de sapements latéraux, de canalisation des eaux de ruissellement, ou d'épisode d'érosion en provenance des cônes détritiques latéraux. Ces sédiments plurimodaux correspondent au mélange de particules locales et alluviales, mais il n'a pas été possible de distinguer l'origine exacte des dépôts fluviaux. La variabilité texturale est indicatrice d'un degré d'érosion plus ou moins intense.

Milieu de sédimentation	Origine sédimentaire	Texture	Facies	Médiane (µm)	Grain max (µm)	Tri des dépôts	Suspension et écoulement	SM (SI)
ALLUVIAL	BASSIN DE LA SALT	<i>Argile</i>	1	15-35	75-300	Excellent	Décantation, stagnant	100-300
		<i>Limon argileux</i>	2a	27-35	130-400	Faible à moyen	Uniforme, turbulent	100-300
			2b	20-37	30-320	Excellent	Graduée, laminaire	
			3	22-35	130-700	Moyen	Non identifié / bioturbation	150-300
		<i>Limon grossier</i>	4	25-37	150-940	Faible	Non identifié / bioturbation	100-470
			5	30-40	160-900	Faible	Uniforme, turbulent	100-300
		<i>Limon (grossier et sableux)</i>	6a	25-37	200-600	Faible à excellent	Uniforme, turbulent	100-450
			6b	25-50	130-480		Litage parallèle, turbulent	
	<i>Limon sableux</i>	7	30-50	160-280	Excellent	Graduée, laminaire	150-500	
	<i>Sable très fin</i>	8	30-50	180-820	Excellent	Litage parallèle, laminaire	100-501	
	BASSIN DE LA VERDE	<i>Limon (grossier et sableux)</i>	9a	27-37	230-650	Faible à moyen	Uniforme, turbulent	200-350
			9b				25-40	
		<i>Sable très fin</i>	10a	30-65	700-1300	Faible	Uniforme, turbulent	100-1500
			10b	37-45	450-750	Excellent	Litage parallèle, laminaire	100-502
ALLUVIO/EOLIENS à EOLIENS	AMONT SALT ET INDET	<i>Limons sableux à sable très fin</i>	11	35-45	240-600	Moyen à excellent	/	200-500
ALLUVIO-EOLIEN	BASSIN DE LA VERDE	<i>Sable très fin</i>	12	32-40	300-700	Moyen	Uniforme, turbulent	500-1700
	INDETERMINE	<i>Limon sableux</i>	13	35-42	260-360	Moyen	Non identifié / bioturbation	100-500
ALLUVIO-COLLUVIAL	INDETERMINE, SALT OU VERDE	<i>Limon argileux</i>	14a	22-40	200-800	Faible à moyen	Uniforme, turbulent	50 à 200
		<i>Limon grossier</i>	14b	30-50	150-800			
		<i>Limon sableux</i>	14c	30-40	150-500			
		<i>Sable très fin</i>	14d	30-40	500-1800			

Tab. 29 : Classification des facies hydrosédimentaires alluviaux, éoliens et colluviaux identifiés dans les remplissages de canaux, Salt River

3.2. Dans le bassin de la Gila

3.2.1. *En contexte naturel*

La typologie présentée ci-dessous concerne les dépôts des séquences stratigraphiques naturelles étudiées sur les terrasses T1 et T2 de la Gila River ainsi que l'interface terrasse T2/cônes détritiques Holocènes. Dix facies ont été obtenus, dont 7 qui traduisent des dynamiques sédimentaires fluviales, 1 des dynamiques éoliennes, et 2 des dynamiques alluvio-colluviales (Tab. 30 et Annexe 4A).

3.2.1.1. Facies alluviaux

7 facies alluviaux caractérisent 4 dynamiques distinctes (Tab. 30).

- **Les argiles, argiles sableuses et limons sableux granoclassés positivement** (facies 1, 2, 4) à structure massive sont très bien triés. Ils présentent des lamines de taille inférieure ou égale au cm. La susceptibilité magnétique de ces dépôts est comprise entre 40 et 450 SI. Ils proviennent du bassin amont de la Gila (assemblage pétrographique composé de micas, plagioclases, pyroxènes, quartz et carbonates) et indiquent un écoulement de faible à moyenne énergie, rythmé et laminaire, avec une montrée et chute progressive du niveau de l'eau.

- **Les limons argileux bioturbés** (facies 3) sont faiblement triés et présentent une structure en chenaux à grumeleuse. Ils sont composés de particules de forme subarrondie, avec des micas et des carbonates, ce qui suggère une origine sédimentaire dans le bassin versant amont. Le signal magnétique est faible (entre 100 et 300 SI). La microstructure bioturbée suggère une diminution de l'aggradation de la plaine alluviale, malgré des conditions humides qui favorisent l'activité biologique. Bien que l'énergie associée soit plus intense et l'origine sédimentaire plus diverse (bassin amont et central, avec des particules micacées, carbonatées et des amphiboles), les **limons sableux bioturbés** (facies 6) signent également une diminution des taux de sédimentation. Ils trouvent leur origine dans le bassin amont et central de la Gila, sont composés de micas, basaltes et amphibole métamorphique, et ont une susceptibilité magnétique comprise entre 100 et 700 SI.

- **Les limons sableux et occasionnellement argileux à litage parallèle** (facies 5, 7a) en provenance du bassin amont et central ont une structure massive. Leur signal magnétique est faible, compris entre 100 et 200 SI. Les dépôts sont composés de particules de forme subarrondie, bien triées, avec notamment des basaltes, de la quartzite, de l'amphibole métamorphique, des feldspaths calcitisés et des grès (facies 5), ainsi que des micas et des carbonates (facies 7a). L'orientation horizontale des particules ainsi que la présence de laminations pluri-centimétriques témoignent d'un écoulement laminaire de moyenne énergie et d'un fort taux de sédimentation.

- **Les limons sableux à suspension uniforme** sont définis par leur faible tri et leur structure massive. Ces dépôts sont composés de particules de forme angulaire à subangulaire (micas, basaltes, amphibole) et proviennent du bassin amont et central de la Gila. La susceptibilité magnétique est comprise entre 100 et 300 SI.

Ils caractérisent une dynamique de type crue-éclair, favorisée par les pluies locales à régionales intenses, mais de courte durée, qui favorisent une sédimentation rapide en aval et limite le tri des sédiments

3.2.1.2. Facies alluviaux-éoliens à éoliens

Un unique facies (facies 8) regroupe **les limons sableux à empreinte éolienne**. Ils présentent une structure particulière à grains revêtus et contiennent à la fois des minéraux locaux ainsi que des particules en provenance de la zone centrale et amont du bassin versant (ex : feldspath calcitisé, feldspath, plagioclases, quartzite, amphibole métamorphique, grès). La susceptibilité magnétique fluctue entre 300 et 350 SI.

Ces dépôts traduisent soit la mise en place de dunes en bordure du lit majeur, soit la remobilisation par l'eau de dépôts éoliens dans la zone centrale et amont du bassin versant.

3.2.1.1. Facies à empreinte colluviale

Ce facies regroupe **les sédiments limono-argileux à limono-sableux à suspension uniforme** (facies 9 et 10), faiblement triés, en provenance de la zone 1 et/ou 2 avec des particules locales de la zone 3. Les particules arrondies à angulaires sont composées de quartzite, feldspath calcitisé, grès, micas, ainsi que des minéraux basaltiques d'origine locale. La microstructure massive à subangulaire indique une mise en surface de durée variable. Ce facies caractérise tout particulièrement les formations sédimentaires identifiées à la transition entre la terrasse T2 et les cônes détritiques des Santan Mountains.

Milieu de sédimentation	Origine sédimentaire	Texture des sédiments	Facies	Médiane (μm)	Grain max. (μm)	Tri des sédiments	Suspension et Ecoulement	SM (SI)	
ALLUVIAL	BASSIN AMONT	Argile à argile sableuse	1	20-37	50-300	moyen à excellent	Graduée, laminaire	50-300	
		Argile, argile sableuse, limon argileux	2	15-45	50-300	excellent	Graduée, laminaire à turbulent	35-450	
		Limon argileux	3	25-30	100-300	chenaux à grumeleuse	/	100-300	
		Limon sableux	4	30-35	150-300	excellent	Litage parallèle à graduée, laminaire	130-240	
	BASSIN AMONT ET CENTRAL	Limon argileux	5	30	150-200	moyen à excellent	Litage parallèle à uniforme, turbulent	100-200	
		Limon sableux	6	30-35	140-500	faible	Non identifié, bioturbé	100-700	
		Limon sableux	7a	20-35	100-300	excellent	Litage parallèle, laminaire	100-200	
			7b	30-35	150-300	faible à moyen	Uniforme, turbulent	100-300	
	ALLUVIO-EOLIEN A EOLIEN	BASSIN AMONT, CENTRAL ET LOCAL	Limon sableux	8	20-35	100-700	faible à moyen	/	300-350
	ALLUVIO-COLLUVIAL	BASSIN AMONT, CENTRAL ET LOCAL	Limon sableux	9	25-35	400-1000	faible	Uniforme, turbulent	180-270
BASSIN AMONT ET LOCAL		Limon argileux	10	25-30	130	faible	Uniforme, turbulent	130	

Tab. 30 : Classification des facies sédimentaires alluviaux, éoliens et colluviaux identifiés dans les dépôts des terrasses T1, T2 et des transitions cônes détritiques/terrasse T2, Gila River

3.2.2. *En contexte semi-anthropique*

Cette dernière typologie correspond à la classification des sédiments de remplissage de canaux dans la moyenne vallée de la Gila. Ils ont été regroupés en 13 facies : 8 caractérisent les sédiments d'origine fluviale, 1 regroupe les dépôts éoliens à alluvio-éoliens, et enfin 4 facies définissent les sédiments à empreinte colluviale (Tab. 31 et Annexe 4A).

3.2.2.1. **Facies alluviaux**

Les 8 facies alluviaux étudiés permettent de définir 4 ambiances fluviales :

1) **Les argiles à limons argileux** de décantation (facies 1) sont composées de microparticules micacées. Ces dépôts ont une susceptibilité magnétique qui fluctue entre 50 et 300 SI et trouvent leur origine dans le bassin amont de la Gila. Leur structure massive à prismatique indique des phases de stagnation d'eau, suivies par des épisodes d'assèchement.

2) **Les argiles à limons grossiers bioturbés** (facies 2 et 7) sont faiblement à moyennement triés et ont une susceptibilité magnétique comprise entre 100 et 300 SI. Les particules de forme arrondie à subarrondie proviennent de la zone amont du bassin versant ainsi que de la zone centrale pour certaines (micas, plagioclases, quartz, basalte). La microstructure à chenaux et grumeleuse résulte d'épisodes d'exondation, de réduction ou d'arrêt temporaire des taux de sédimentation.

3) **Les limons grossiers et sableux fins à litage parallèle**, à écoulement presque laminaire sont bien triés et proviennent de la zone amont et centrale du bassin versant (facies 3, 4, 6b et 8). Les assemblages pétrographiques sont très diversifiés. Les particules sont de forme subarrondie et composées de micas, de carbonates exogènes, de plagioclases et de quartz (facies 3), des particules basaltiques et de pyroxènes (facies 4), de basalte et de quartz (facies 6b) et enfin de quartzite, feldspath calcitisé et grès (facies 8). La susceptibilité magnétique est comprise entre 100 et 300 SI. La microstructure faiblement développée suppose des phases d'exondation réduites.

4) **Les limons argileux et grossiers à suspension uniforme** (facies 5 et 6a) caractérisent un écoulement turbulent. Ils sont composés de particules de forme arrondie à subangulaire, d'assemblage pétrographiques composés de micas, de basalte, de quartz et de plagioclases, avec d'occasionnels feldspaths calcitisé, quartzite et grès. Les valeurs de susceptibilité magnétique s'échelonnent entre 100 et 400 SI.

Le faible tri des dépôts, leur épaisseur et leur structure massive témoignent de taux de sédimentation importants, de conditions de déposition rapides et brutales, peut-être en réponse à une arrivée soudaine de l'eau dans les canaux, puis son retrait rapide.

3.2.2.2. **Facies alluvio-éoliens à éoliens**

Seul un facies regroupe les dépôts alluvio-éoliens à éoliens de texture sablo-limoneuse (facies 9). Les sédiments sont plus ou moins bien triés, composés de particules de toute taille et forme, revêtues par des argiles brun orangé. L'origine de ces dépôts a été tracée à l'amont du bassin versant ainsi qu'aux formations géologiques locales (dans la GRIC).

3.2.2.3. Facies alluvio-colluvial et alluvio-éolien colluvial

Les quatre facies obtenus correspondent à des dynamiques alluvio-colluviales et strictement colluviales. Les facies 10, 11 et 12, sont composés de sédiments fluviaux en provenance de l'amont et de la zone centrale du bassin versant, mais ils contiennent également des particules locales (Sacaton et Santan Mountains). Le mélange des dépôts induit un faible tri et un assemblage pétrographique polygénique. Le facies 13 caractérise les dépôts d'origine locale exclusivement (provenance Sacaton mountains). Ils sont faiblement triés et composés de feldspaths altérés, de quartz polycristallins et de fragments de granite.

Excepté pour les limons-argileux qui témoignent d'un écoulement de faible intensité (facies 10), les autres facies de texture limoneuse grossière et sableuse indiquent une dynamique hydrosédimentaire forte (facies 12, 13, 14). La microstructure particulière et les nombreuses traces de bioturbation suggèrent des rythmes de sédimentation variables.

Milieu de sédimentation	Origine sédimentaire	Texture des sédiments	Facies	Médiane (µm)	Grain max (µm)	Tri des sédiments	Suspension et Ecoulement	SM (SI)
ALLUVIAL	BASSIN AMONT	Argile à limon argileux	1	20-45	100-400	moyen à excellent	Décantation, stagnant	50-300
		Argile à limon argileux	2	20-30	100-300	moyen	Non identifié, bioturbation	75-175
		Limon grossier	3	20-35	100-400	moyen à excellent	Graduée, laminaire	170-300
		Sable limoneux à sable fin	4	30-40	200-1500	excellent	Litage parallèle à graduée, moy.turbulent	100-300
	BASSIN AMONT ET CENTRAL	Argile à limon argileux	5	20-35	200-500	moyen	Uniforme, turbulent	100-400
		Limon grossier	6a	30-40	150-800	faible	Uniforme, moy.turbulent	150-400
			6b	30-35	200-300	excellent	Litage parallèle, moy.turbulent	150-300
		Limon grossier	7	30-32	100-300	faible à moyen	Non identifié, bioturbation	200-320
Sable limoneux à sable fin	8	30-35	400-2000	moyen à excellent	Litage parallèle, turbulent	100-300		
ALLUVIO-EOLIEN A EOLIEN	BASSIN AMONT	Sable limoneux	9	35-40	300-800	faible à excellent	/	100-300
ALLUVIO-COLLUVIAL	BASSIN AMONT, CENTRAL ET LOCAL ou AMONT /LOCAL	Limon-argileux	10	25-35	120-800	faible	Uniforme, turbulent	100-550
		Limon grossier	11	20-33	128-1000	faible		170-700
		Sable limoneux	12	30-37	400-1300	faible		130-400
	LOCALE	Sable fin	13	25-300	2000	faible		90-150

Tab. 31 : Classification des facies hydrosédimentaires alluviaux, éoliens et colluviaux identifiés dans les remplissages de canaux, Gila River

4. Interprétation des facies hydrosédimentaires: confrontation des archives sédimentaires et historiques

4.1. Les hydrosystèmes : impacts géographique et humain des crues majeures historiques

Une analyse régressive des paysages intégrant des données écrites, sédimentaires et ethnographiques nous a permis de proposer une interprétation des facies hydrosédimentaires identifiés. Nous présenterons dans cette section l'analyse de deux dépôts de crue (1891 et 1993) et du remplissage de deux canaux historiques pour lesquels les archives écrites sont accessibles.

4.1.1. Sensibilité du bassin de la Salt aux crues et implications

Des photographies, conjointement à d'autres données historiques (topographie, rapports) mettent en évidence une forte variabilité latérale du lit mineur de la Salt River au cours des 120 dernières années (Graf, 1983 dans Fuller, 1987), mais une configuration stable du lit majeur (Fig. 159).

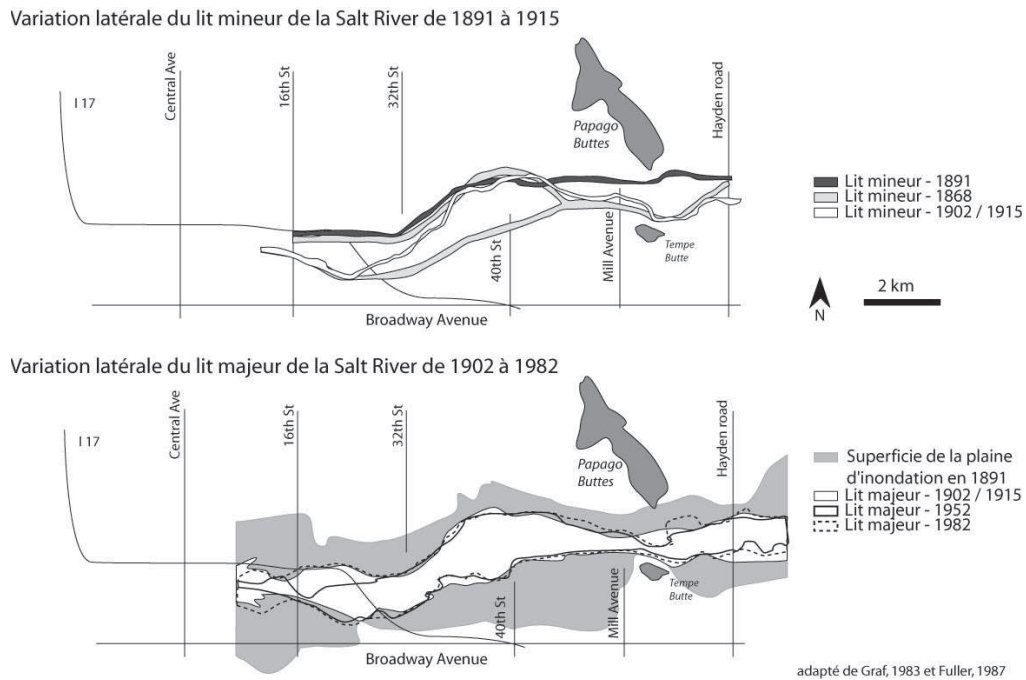


Fig. 159 : Variation du lit mineur et majeur de la Salt River au cours des périodes historiques

La transposition de ces informations aux périodes préhistoriques concernant la mise en place, la gestion et l'entretien des canaux permet d'affirmer que :

1) Les variations latérales du lit mineur limitent l'efficacité de la dérivation d'eau et nécessitent des aménagements adéquats.

2) Une morphologie stable du lit majeur augmente l'efficacité de la dérivation d'eau. Les canaux sont alimentés de façon certaine, mais uniquement si les vannes d'entrées ne sont pas détruites par la brutale augmentation de l'intensité de l'écoulement. Seules des phases humides favorables à la montée des eaux (et aux crues) vont permettre l'approvisionnement des canaux en eau.

3) Une évolution morphologique du cours d'eau est observée après la crue de 1891 au cours de laquelle un pic de crue de 8000 m³/s est enregistré. Les crues récurrentes, de faible intensité (2000 m³/s), enregistrées en 1905 et 1906 conduisent à une nouvelle configuration du lit majeur et à la destruction de structures hydrauliques sur plusieurs kilomètres. Des décharges de 2000 m³/s à 8000 m³/s conduisent donc à des évolutions morphologiques du cours d'eau et à la destruction des structures hydrauliques, du moins des dérivations et des prises d'eau.

4.1.1.1. La crue historique majeure de 1891 : sources écrites et sédimentologiques

- Données historiques

L'Arizona Republican, 20 février 1891 :

A terrible calamity has fallen upon Phoenix and the Salt River valley, a calamity that people would not have believed possible to occur. Although the Salt River has before been a turbulent stream, nothing more than the low flats immediately adjoining it ever suffered from its overflow. Situated as high above the stream as Phoenix is, no one believed it to be possible for a flood to come that would carry its waters into the city, yet such an event did come.



Fig. 160 : Destruction du Tempe Railroad bridge au cours de la crue de 1891
(Herbe and Dorothy Mc Laughlin Collection, Arizona)

Au cours de l'hiver 1890, des pluies hivernales, résultant d'une série d'orages frontaux en provenance de l'Océan pacifique, sont transformées en neige dans les zones amont des bassins versants où les sols sont déjà saturés en eau suite à des précipitations estivales importantes. La fonte rapide des neiges conduit à des décharges qui atteignent 4250 m³/s au niveau de Roosevelt Lake (Salt River) et en aval de Tangle Creek sur la Verde River (USGS) et à un ruissellement qui passe de 0,01 m²/km² en janvier à 0,1 m²/km² en février. La Salt mesure 12 km de large au niveau de sa confluence avec la Verde, et 3 à 4 km en aval de Phoenix (Brazel et Evans, 1984).

Cette crue présente un temps de retour entre 25 et 100 ans (USGS, 2004). Dans la vallée, le pont, la voie ferrée et de nombreux canaux d'irrigation sont détruits (Honker, 2002) (Fig. 160 et Fig. 161).

La répartition géographique de cette crue montre qu'une grande partie des canaux préhistoriques auraient été colmatés ou détruits sur presque 1 km.

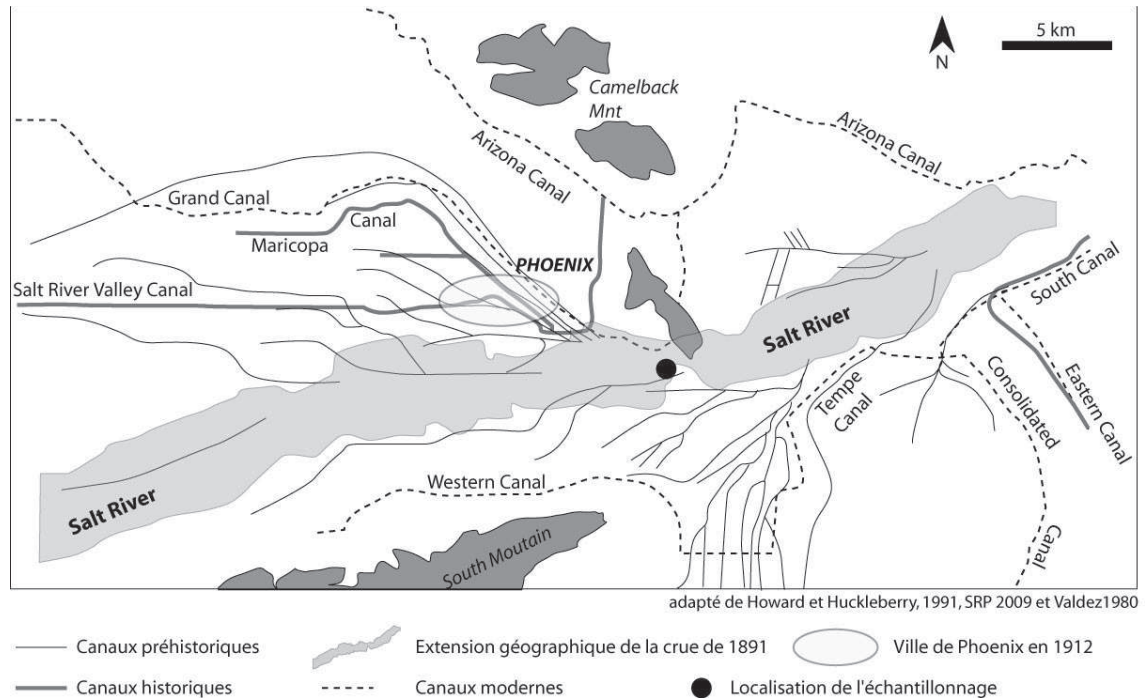


Fig. 161 : Carte de répartition géographique de la crue de 1891 le long de la basse vallée de la Salt

Ces pluies sont perçues avec enthousiasme par les Phoeniciens qui souffrent d'un manque d'eau important. Les sédiments apportés par la crue ont fertilisé les sols (*Phoenix Daily Herald*, 9 avril 1891) et tué en grande partie des ravageurs de cultures (lapins, etc...) (*Arizona Republican*, 1891 dans Honker, 2002).

- Observation de terrain et caractéristiques micromorphologiques

La ville de Tempe est située sur la plaine alluviale sud de la Salt, au niveau d'une zone de résurgence d'eau et d'un rétrécissement du cours d'eau. L'augmentation du niveau de l'eau en février 1891 submerge rapidement ces zones basses (Honker, 2002).

Les dépôts de la crue de 1891 ont été échantillonnés au niveau du moulin de Hayden Mill suite à un projet de fouille préventive (Fig. 162) et identifiés grâce à l'aide de l'historien Jack August. Ce sont des limons sableux jaune clair laminés, mais ces caractéristiques peuvent très largement varier selon la localisation de l'échantillonnage : position amont-aval, éloignement du lit de la rivière, etc... Malheureusement, il n'a pas été possible de suivre ces sédiments selon un transect afin de faire ces observations, du fait de la très faible superficie fouillée et de la localisation du site dans le centre ville de Tempe.

Les caractères micromorphologiques indiquent un Fg (Facies granulométrique) limoneux, un Fss (Facies source sédimentaire) dans le bassin médian-inférieur de la Salt, et un Fms (Facies milieu de sédimentation) alluvial. La microstructure est massive mais des traces de bioturbation ont fragmenté des lamines granoclassées.

Cet échantillon appartient au facies hydrosédimentaire 4a de la typologie des facies sédimentaires, formations alluviales, Salt River (Tab. 28).

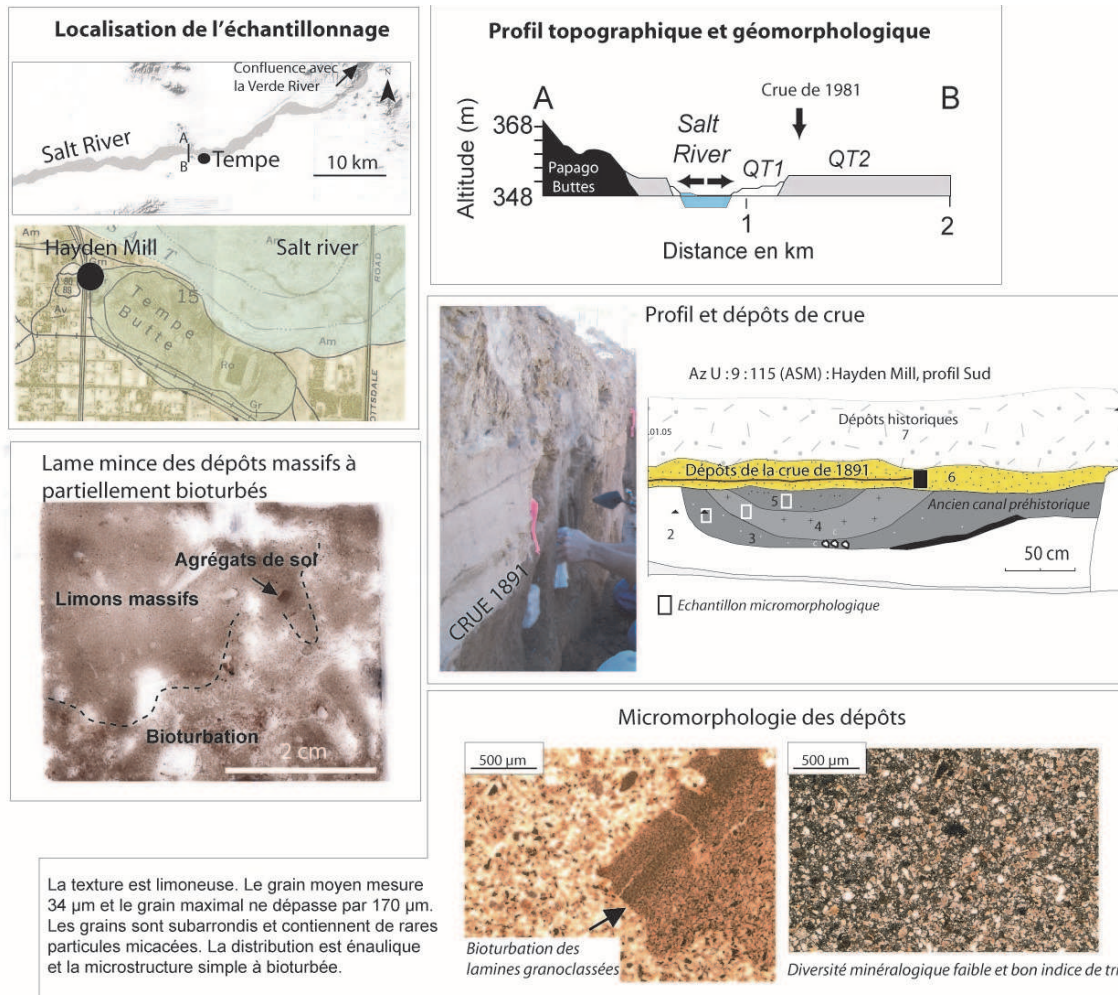


Fig. 162 : Archive sédimentaire de la crue de 1891

• Conclusion

La remise en contexte climatique montre des conditions chaudes et sèches entre 1850 et 1900 (Salzer et Kipfmüller, 2005), avec des pluies dominantes estivales qui contribuent à augmenter le stock érodable facilement mobilisable lors de pluies hivernales de longue durée. Ceci pourrait expliquer la puissance sédimentaire associée à cette crue dans la basse vallée de la Salt. Malgré une décharge similaire dans le bassin de la Salt et de la Verde, aucun sédiment en provenance du bassin de la Verde n'a été identifié. Leur absence peut être liée soit à un stock sédimentaire plus faible dans ce bassin versant au cours de la seconde moitié du 19^{ème} siècle, soit à un biais lié à la représentativité réduite de l'échantillonnage.

4.1.1.2. La crue moderne de 1993 : sources écrites et sédimentologiques

En décembre 1992, des masses frontales d'air froid déposent une forte quantité de neige en amont des bassins versants et des précipitations saturant les sols en eaux. Les pics de crues enregistrés atteignent 3313 m³/s au niveau de Roosevelt Lake, 2684 m³/s en aval de la Verde River.

Puis 4 orages frontaux majeurs, intensifiés par des températures élevées enregistrées à la surface de l'océan pacifique suite à un évènement El Niño, circulent anormalement au sud de l'Arizona entre le 6-9 janvier, 13-19 janvier, le 7-10 février et le 18-21 février. Le pic de crue atteint 3511 m³/s le 9 janvier à la confluence Salt/Verde (Smith et al., 1994). Les nombreux barrages localisés en amont du bassin versant de la Salt ont limité l'impact de la crue de 1993 dans la basse vallée de la Salt où le cours d'eau est entièrement canalisé. Ils ont donc fonctionné comme des barrages excréteurs de crues.

- Observation de terrain, caractéristiques sédimentaires et micromorphologiques

Les dépôts associés à la crue de 1993 ont été repérés au niveau de la confluence Salt/Verde (33°32'43.25''N, 111°39'48.52''O) sur les conseils de Jonathan Fuller, géomorphologue à Hydrology & Geomorphology, Inc.. Les traces sédimentaires de cette crue ne sont préservées que dans cette zone, facilement accessible au sein d'un parc naturel. Des sédiments associés à la crue sont visibles sur des îlots et sur les berges du cours d'eau (Fig. 163) et sont composés de 5 cm de sable brun clair, homogène et massif, qui contraste avec les limons organiques bruns sous et sus-jacents.

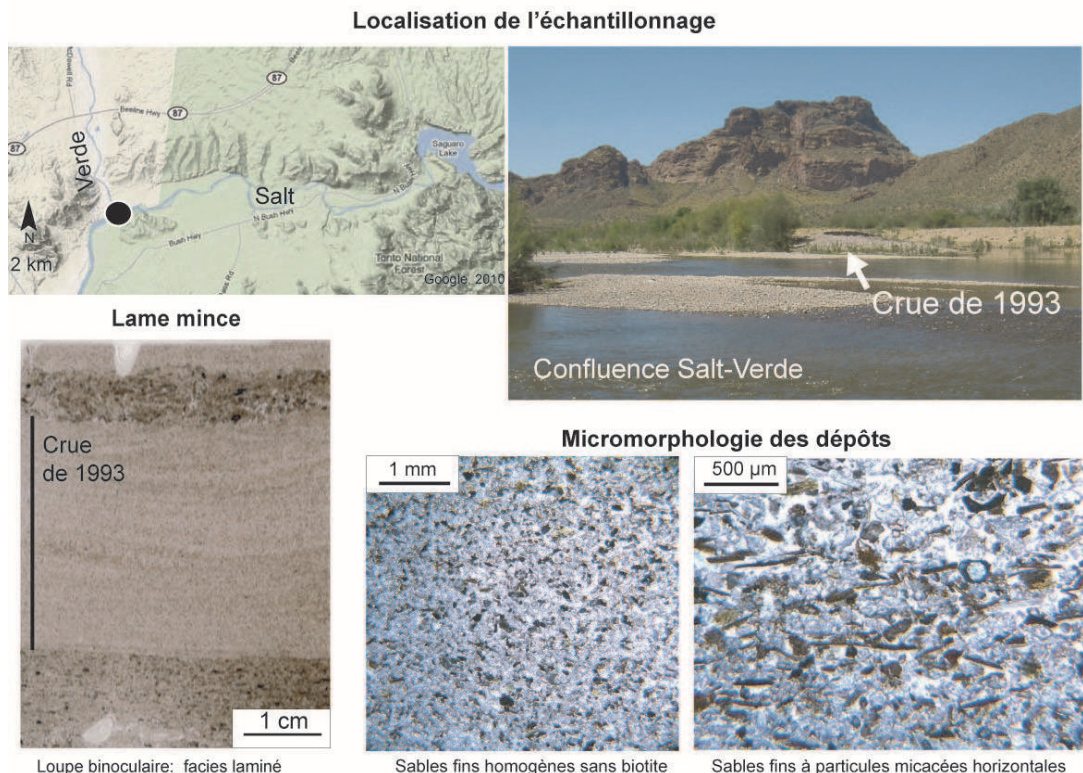


Fig. 163 : Localisation et caractéristiques micromorphologiques de la crue de 1993

Au microscope optique, cette formation apparaît sous forme de sables fins micacés laminés et très bien triés avec un grain moyen autour de 52 μm et un grain maximal à 235 μm . Les microlaminations observées résultent de pics de crues distincts ou de phases temporaires de ralentissement/accélération des flux internes à la crue. La partie sommitale des litages est composée de paillettes micacées probablement transportées en suspension.

Leur orientation subhorizontale indique une déposition en contexte non turbulent, qui pourrait correspondre à une durée de submersion longue. Ces sables sont composés de grains subarrondis revêtus, et contiennent des feldspaths, plagioclases, grès, pyroxène, chlorite, amphibole, biotite, carbonates et des microparticules basaltiques opaques qui indiquent une érosion à l'échelle du bassin versant de la Salt River (amont et zone centrale). Ces sédiments ont été regroupés dans le groupe 6a de la typologie des facies sédimentaires, séquences stratigraphiques naturelles, Salt River (Tab. 28).

- Conclusion

L'analyse de la crue de 1993 permet d'affirmer que :

- Les fortes crues sont favorisées par des pluies estivales importantes qui saturent les sols en eau, érodent les formations superficielles et augmentent le stock sédimentaire érodable. Les températures élevées n'ont qu'un impact modéré sur l'intensité des crues et les dommages occasionnés, du moins dans la zone géographique de Phoenix.
- Les crues maximales enregistrées résultent d'une succession d'orages frontaux hivernaux qui déposent de la neige à l'amont des bassins versants et de la pluie en aval (Webb et Betancourt, 1992). Les probabilités de crues sont plus élevées au cours d'évènements El Niño (Ely et al., 1994 ; House et Hirschboeck, 1997).
- Les décharges maximales enregistrées au cours de l'hiver 1992-1993 sont relativement similaires le long de la Salt et de la Verde. 38 % de la décharge totale mesurée à Granite Reef Dam provient du bassin de la Verde. En revanche, la charge solide en suspension est nettement plus élevée dans le bassin de la Salt en janvier et mars 1993 (Arizona Geological Survey, communication personnelle) (Fig. 164 et Fig. 165). Les flux solides sont très faibles dans le bassin de la Verde car les pluies et le ruissellement sont localisés dans les « Central Highlands » où les formations géologiques sont difficilement érodables (Fig. 165). Au mois de février, 95% de la charge solide dans le bassin de la Verde provient de l'érosion des formations sédimentaires entre Paulden et Camp Verde (Fig. 165) alimentées et érodées par des cours d'eau en provenance du plateau du Colorado.

La signature pétrographique des dépôts de crue révèle une contribution majoritaire de la Salt River, ce qui semble cohérent. Cependant, il ne faut pas oublier que cette crue résulte d'orages frontaux et de décharges relativement équivalentes dans les deux bassins versants. Ceci peut être lié à la rétention de sédiments par le barrage Horseshoe, à la dilution des sédiments de la Verde dans ceux de la Salt ou même être inhérent à l'échantillonnage.

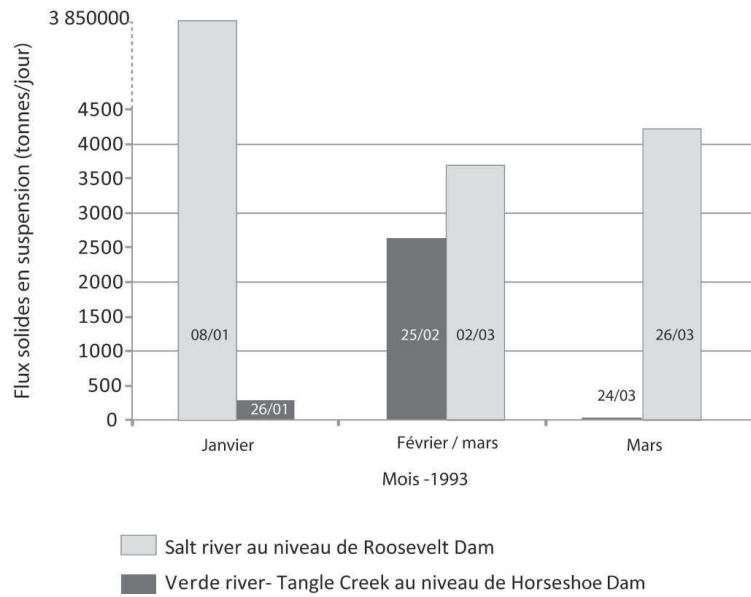


Fig. 164 : Flux solides en suspension dans la Salt et la Verde entre janvier et mars 1993
 (Données acquises auprès de l'Arizona Geological Survey. La valeur très élevée de 3 850 000 t/jour correspond à une décharge instantanée de 3454 m³/s, mesurée le 8 janvier à 15h15)

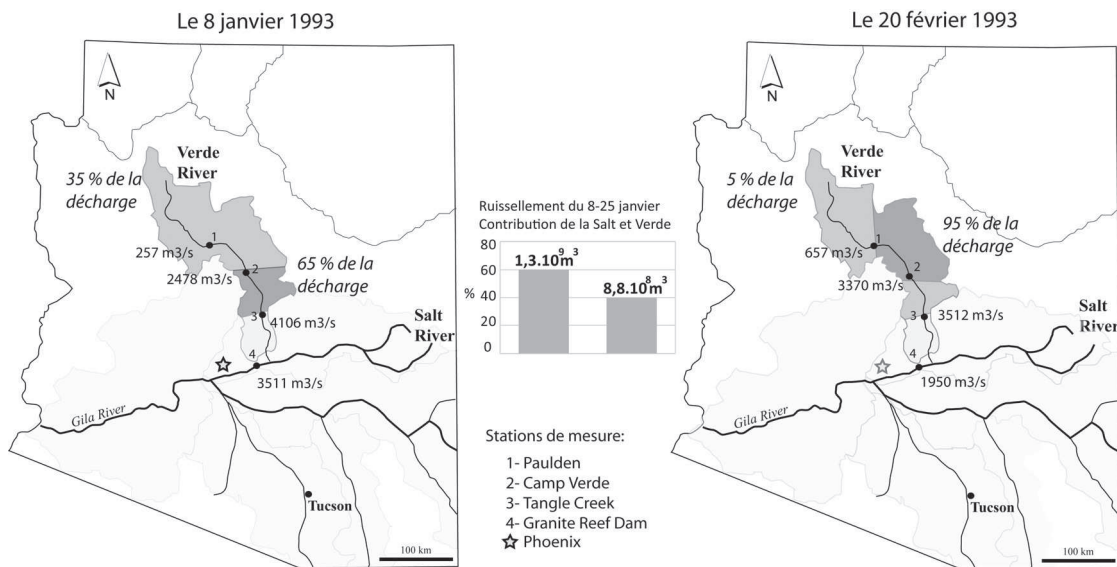


Fig. 165 : Répartition géographique du ruissellement le long de la Verde River au cours de la crue de 1993

4.1.2. Observations historiques des crues le long de la Gila River et leur impact sur la gestion de l'hydraulique

4.1.2.1. **Morphologie historique de la Gila River**

Les premières données relatives à la géographie et aux paysages dans le bassin versant de la Gila correspondent aux descriptions sans nul doute subjectives des missionnaires espagnols entre 1538 et 1868, puis des combattants de la guerre mexico-américaine entre 1646 et 1848. Après la ruée vers l'or en 1849, la Gila River devient une zone de passage privilégiée et les descriptions se multiplient et se systématisent grâce aux études scientifiques et cadastrales.

L'ensemble de ces informations met en relief trois phases principales d'évolution morphologique de la Gila, qui sont relativement similaires à celles observées le long de la Salt River. De 1849 à 1880, le cours d'eau est étroit et méandrique. Après la crue de 1891 (pic de crue de 2872 m³/s), la Gila est tressée, et ce n'est qu'en 1903 que la rivière reprend sa configuration méandrique après presque 10 années de sécheresse. Les crues de 1905-1906 (pic de crue de 5380 m³/s) favorisent un retour vers un système tressé, après des pluies récurrentes suivies par un fort enneigement (Tab. 32) (Partie 1.1., Fig. 17). Enfin, des pics de crue et des variations latérales du cours d'eau sont enregistrés en 1915-1916 (3337 m³/s), suite à des épisodes neigeux et des pluies chaudes cycliques.

4.1.2.2. Impacts des crues sur les structures hydrauliques et parcelles agricoles

Les données relatives à l'impact des crues sur les canaux d'irrigation et parcelles agricoles sont présentées dans le Tab. 32. Les canaux d'irrigation, en réponse à des facteurs intrinsèques, peuvent être détruits quelle que soit la décharge. Mais leur colmatage en est fortement dépendant. Des crues dont la décharge est inférieure à 1000 m³/s conduisent à un colmatage des canaux par des débris et des sédiments sur presque 1 km. Des décharges autour de 3000 m³/s colmatent et détruisent des canaux sur environ 2,5 à 3 km. Enfin des décharges supérieures à 5000 m³/s conduisent à une aggradation de la rivière, la destruction et l'enterrement des canaux (la crue de 1905 (5380 m³/s) illustre bien les effets de tels événements. Elle détruit 7 canaux et conduit à l'élargissement du lit mineur, et l'aggradation de la plaine).

4.1.3. Interprétation des facies hydrosédimentaires

Les facies hydrosédimentaires créés correspondent à des crues régionales ou des crues éclair plus localisées. Une tentative d'interprétation climatique et géomorphologique est proposée dans le Tab. 33 en intégrant les données référentielles historiques. Les facies et leur interprétation sont présentés selon leur origine sédimentaire, les caractéristiques de l'écoulement et le numéro de facies affecté.

4.1.3.1. Crues en provenance des bassins versants amont

Dans le bassin de la Salt, les signatures morphologiques associées à des assemblages minéralogiques en provenance de l'amont des bassins versants sont plus diversifiées que celles identifiées dans la moyenne vallée de la Gila où les sédiments étudiés sont de texture plus fine et à suspension graduée.

Les sédiments de décantation traduisent des phases d'écoulements réduits, mais leur occurrence peut être liée à la position géomorphologique de l'échantillonnage. Les sédiments qui présentent des traces de granoclassement sont de texture très fine. Ils traduisent une sédimentation rythmée, avec une montée et chute du niveau de l'eau marquée, mais une dynamique d'écoulement réduite. Cette dernière peut être liée à des précipitations longues mais de faible intensité à l'amont des bassins versants.

III.2 : Caractérisation et classification des dynamiques hydrosédimentaires

Année	Description morphologique de la Gila	Végétation	Crues et types de dommages occasionnés	Localisation	Mesure du cours d'eau (m)		Décharge (m ³ /s)	Succession des événements météo. en cause	Source	Référence bibliographique
					Largeur	Profondeur				
1538	Chenal large et profond, avec des flots et des zones de stagnation d'eau (marais)	Nombreux roseaux							Juan de la Asuncion, Pedro nadal	Hartmann, 1972
1697				Casa grande					Père Kino, capitaine Juan Manje	Bolton, 1948
1744- 1797	Chenal peu incisé à écoulement intermittent	Berges couvertes de peupliers, graminées et saules, zones marécageuses							Père Jacob Sedelmayr, 1744; Père Ignaz Pfeffercorn, 1763; Père franciscain Pedro Font, 1775; Fray Diego Bringas 1797	Huckleberry, 1991; Brewer, 1977
1833			Toute la plaine alluviale Holocène est couverte d'eau		5000		>= 31000		« bâtons calendriers » des Pimas	Dobyns, 1981 ; Huckleberry, 1992; Russell, 1908 ; Olmstead, 1919
1846				Mont Graham	60				Docteur Griffin	Ames, 1942
1849				Casa grande	<90				John Durivage , George Evans	Rea, 1983
1853-1856					6	0.3			Park	Rea, 1983
1856	Chenal principal profond et étroit, à méandre unique, à fond sableux	Végétation dense, et berges couvertes d'herbes, de saules et de peupliers		San Simon river et aval	21	1			Lieutenant Colonel William H. Emory	Calvin, 1951; Emory, 1848, 1857
1868			Destruction de 3 villages Pimas à 3km de la rivière et de nombreuses parcelles agricoles.		700				Norris	Rea, 1983, Russell, 1908 ; Hackenberg, 1974 ; Dobyns, 1981
1874			Terres agricoles inondées	Florence						Rea, 1983, Durrenberger, 1978 Dobyns, 1981
1880		Berges peu cultivées, nombreux peupliers, saules, et mesquite			800				White	Rea, 1983; Huckleberry, 1995
1884	Chenal principal large		Terres agricoles inondées, fossés détruits, canaux colmatés jusqu'à 2.5 km du lit mineur	Florence						Olmstead, 1919; Durrenberger, 1978; Dobyns, 1981; Ackerly, 1991; Jackson, 1884

III.2 : Caractérisation et classification des dynamiques hydrosédimentaires

22/02/1891	Incision de la San Pedro, aggradation de la Gila River et évolution vers un système en tresse (haute et moyenne Gila)	Terres agricoles inondées, destruction du canal "White Ditch"	Ensemble de la GRIC, Florence	60	2872	Pluie chaude sur sol saturé en eau	Ackerly, 1991; Davis in Lippincott, 1900; Burkham, 1972; Durrenberger, 1978; Dobyns, 1981; Hereford et Betancourt, 1993; Huckleberry, 1991; Southworth, 1919;
1903-1905	Retour à un chenal principal profond et étroit, à méandre unique						U.S. Indian Irrigation Service
10/01/1905		Forte crue	GRIC		5320	Pluie, sols saturés en eau, neige puis pluie et neige	Burkham, 1970; Huckleberry, 1991
28/01/1905		Terres agricoles inondées à Florence, élargissement du cours d'eau, aggradation de la plaine (10 cm à 1.8 m), 7 canaux détruits	Florence et l'ensemble de la GRIC		5380	Sol saturé en eau, puis pluie, neige et pluie	Southworth, 1919; Burkham, 1970; Durrenberger, 1978; Dobyns, 1981; Ackerly, 1991; Murphey, 1906
1911	Evolution vers un système en tresse, avec des chenaux larges et mobiles (mobilité latérale de 950 m en 1916)	Destruction du Santan canal (centre, rive nord)	GRIC		991		Ackerly, 1991
1912		Destruction du canal Gila Ditch et des barrages de dérivation, dépôt de 1 à 3 m de sédiment dans les canaux sur 0.8 km de longueur	GRIC		991		Peterson, 1913; Ackerly, 1991
1914/1915		Terres agricoles inondées, canaux détruits	Haute Gila: vallée de la Safford et San Carlos		1415 à 1359	Pluie et neige	Burkham, 1972; Ackerly, 1991
1916		Destruction de 2.4 km de canaux, colmatage des canaux sur 2.7 km de longueur	GRIC	50	3337	Neige, pluie, pluie chaude, neige, pluie chaude	Burkham, 1972

Tab. 32 : Liste des évolutions historiques de la morphologie de la Gila River, des crues, des dommages enregistrés et de leurs causes climatiques

III.2 : Caractérisation et classification des dynamiques hydrosédimentaires

Origine sédimentaire	Suspension	Facies Salt		Facies Gila		Interprétation		Dommages occasionnés	Référentiel
		N° de faciès	Texture	N° de faciès	Texture	Climato-météorologique	Géomorphologique		
BASSIN VERSANT AMONT	Décantation	3	AS	X	X	Fin de la saison des pluies, décrue, ou période de faible pluviométrie	Eloignement du chenal, diminution du rythme des crues	/	
	Graduée	1	AS	1, 2 et 4	A, AS, LS	Précipitations régulières de faible intensité	Crue/décrue, sédimentation rythmée QI > Qs	/	
	Litage parallèle	4a, 6a	L à LS	X	X	Pluies estivales, neige en amont du BV (orages frontaux hivernaux) puis fonte suite à la saturation des sols en eau	Crue intermédiaire, sédimentation moyenne à rapide, écoulement non turbulent, évolution morphologique du cours d'eau et/ou rapprochement du chenal QI > Qs	Destruction des vannes d'entrée des canaux de presque tous les systèmes et colmatage	Crue 1891 et 1993
	Uniforme	4b, 6b	LS	X	X	Pluies localisées intenses mais courtes à l'amont du BV	Crue rapide, aggradation, localisation de l'échantillonnage Qs > QI	Dommages potentiellement élevés	
	Décantation	X	X	X	X			/	
REGIONALE/MULTIPLE	Graduée	X	X	X	X			/	
	Litage parallèle	8a	L	5, 7a	LA, LS	Précipitations hivernales dominantes, neige à l'échelle régionale	Crue intermédiaire régionale, sédimentation moyenne à rapide, écoulement laminaire, possible évolution morphologique du cours d'eau QI > Qs	Destruction des vannes d'entrée des canaux de presque tous les systèmes et colmatage	>= Crue 1891 et 1993, crue de 1905 ?
	Uniforme	8b	LS	7b	LS	Pluies localisées intenses (augmentation du stock sédimentaire)+pluies hivernales	Crue et sédimentation rapide, forte charge solide, écoulement turbulent, localisation de l'échantillonnage, aggradation de la plaine Qs > QI	Dommages élevés	
	Uniforme	10	LS à S	9, 10	LS, LA	Pluies courtes régionales et locales intenses	Crue rapide régionale Qs > QI	Dommages potentiellement élevés	
/	Bioturbé	2, 5 et 7	AS, L	3	LA, LS	Diminution de la pluviométrie, mais conditions humides	Eloignement du chenal, diminution du rythme des crues ou phase de stabilité paysagère	Aucun	
/	Eolien	10	LS à S	8	LS	Période de faible pluviométrie, épisodes arides	Eloignement/incision du chenal, diminution du rythme des crues	Possible colmatage accéléré des canaux	Sable éolien

Tab. 33 : Synthèse et essai d'interprétation climatique et géomorphologique des faciès sédimentaires en plaine d'inondation, Salt et Gila
(QI : décharge liquide, Qs : décharge solide)

Les deux échantillons référentiels historiques des crues de 1891 et 1993, échantillonnés dans le bassin de la Salt, ont été classés respectivement dans le groupe 4a et 6a (sédimentation moyennement rapide, facies à litage parallèle). Ces crues, caractérisées par un rapport débit liquide/débit solide élevé, résultent de pluies hivernales bien réparties spatialement, de la fonte des neiges (Burkham, 1972; Huckleberry, 1994) et d'une augmentation du niveau de l'eau relativement longue. Elles conduisent à l'élargissement du cours d'eau et son déplacement latéral, suivi de l'aggradation de la plaine alluviale, la destruction des barrages de dérivation, voire l'enterrement des canaux sur plusieurs kilomètres. L'observation de ces facies dans les bassins de la Salt et de la Gila peut signer la présence d'orages frontaux majeurs à circulations anormales combinés à des effets El Niño.

4.1.3.2. Crues régionales

Les facies dont l'origine est multiple (bassins de la Salt et Verde / zone amont et centrale de la Gila) ne présentent pas de figures sédimentaires liées aux processus de décantation et suspension graduée. Les sédiments sont alors transportés de deux façons : en suspension uniforme ou ont une signature morphologique à litage parallèle. *Les facies à litage parallèle* horizontal présentent les mêmes caractéristiques que les sédiments en provenance de l'amont de bassin versant, mais l'érosion généralisée des zones à plus fortes pentes (bassin de la Verde, zone centrale du bassin de la Gila) indique une augmentation des précipitations et des chutes de neige, voire un régime pluvio-nival plus marqué. Cet ensemble est donc caractérisé par des précipitations accrues réparties spatialement.

L'écoulement uniforme caractérise un processus de transport, résultant de pluies régionales rapides qui entraînent une charge solide importante accumulée dans des bassins versants exploités à des fins agricoles ou fragilisés par des incendies. Si les débits solides augmentent simultanément aux débits liquides (à plus ou moins forte concentration), un changement fluvial vers un système tressé qui s'incise ou s'exhausse est envisageable. La sédimentation rapide et de forte intensité suggère un événement type « catastrophe soudaine » avec une montée et descente des eaux rapides. Les dégâts peuvent être très importants.

4.1.3.3. Arrêt de la sédimentation

Les facies éoliens et bioturbés suggèrent une évolution dans la dynamique hydrosédimentaire avec une diminution de la pluviométrie ou un éloignement du chenal. Les facies bioturbés impliquent toutefois des conditions d'humidité minimale sans lesquelles la flore et la faune ne pourraient se développer.

4.2. L'hydro-agro-système : interprétation climatique, géomorphologique et anthropique des remplissages de canaux

Afin d'interpréter plus finement les remplissages de canaux préhistoriques d'un point de vue géomorphologique, climatique et humain, deux canaux historiques utilisés entre la fin du 19^{ème} siècle et la première moitié du 20^{ème} ont été étudiés et échantillonnés.

Les données écrites relatives à leur fonctionnement sont succinctes car ils n'appartiennent pas au *Salt River Project*, qui centralise l'ensemble des données historiques sur l'irrigation. Par conséquent l'utilisation du remplissage sédimentaire de ces canaux comme référentiel est moins pertinente que ce qui était initialement espéré. Toutefois, certaines hypothèses et corrélations sont proposées.

4.2.1. Etude micromorphologique et textuelle des remplissages de canaux historiques

4.2.1.1. Canal historique, rive sud, Salt River

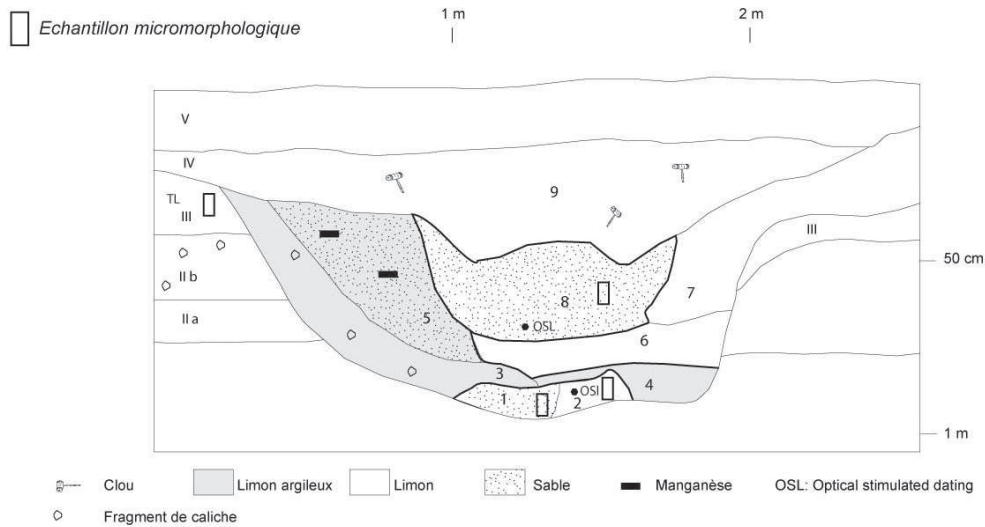
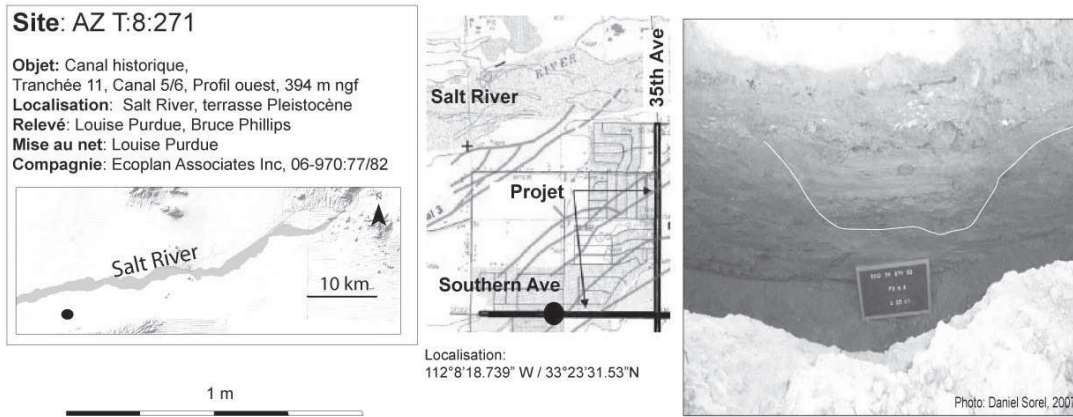
- Cadre environnemental et géographique

Ce canal a été fouillé en collaboration avec la compagnie privée EcoPlan Associates, Inc en 2007 dans le cadre du projet 06-970:77/82 (Fig. 166). Il a été recoupé à 1.5 km de la rivière à la jonction entre la terrasse pléistocène Mesa et la terrasse holocène Lehi. Ce canal suit l'alignement d'un canal préhistorique, le canal Laveen. Les sols appartenant au groupe Gilman Loam sont salins à alcalins.

- Description, stratigraphie et échantillonnage

Le canal mesure 1.7 m de largeur et 0.86 m de profondeur et sa partie supérieure est érodée par des dépôts détritiques. Quatre phases distinctes de fonctionnement ont été observées (Fig. 166). 1) Les sédiments sont initialement sableux (US 1 et 2) et laminés. 2) Ils sont couverts par des limons faiblement triés, riches en fragments de caliche, indiquant des phases locales d'érosion de pente (US 3). La présence de métal rouillé et de débris de verre confirme l'utilisation historique de ce canal. Ils sont couverts par des limons argilo-sableux (US 5) qui proviennent probablement d'épisodes d'effondrement des buttes qui longent le canal, composées des sédiments dégagés lors de sa construction. 3) Le canal semble entretenu, puis colmaté par des sédiments anthropiques, de couleur et de composition hétérogènes (US 6-7). 4) Un curage est effectué et le remplissage du second canal présente ensuite des laminations régulières de sable fin (US 8) ensevelies sous des limons anthropiques de type ordure probablement post-abandon (US 9). Ces dépôts n'ont pas été identifiés dans d'autres tranchées.

De nombreuses analyses paléoenvironnementales ont été conduites (palynologie, ostracodes, etc.), mais nous ne présenterons ici que les résultats de l'analyse micromorphologique.



REPLISSAGE DE CANAL

- 1 : Sf à moyen, 10 YR 6/4, avec laminations occasionnelles
- 2 : L sableux, 10 YR 7/3, avec laminations occasionnelles
- 3 : LA, 10 YR 6/4.5/3, très mal trié, tacheté, nombreux fragments de caliche, graviers (dépôts de pente)
- 4 : L, 10 YR 6/4, très tacheté (idem que 3)
- 5 : LAS, 10 YR 6/4.5/3, oxydation de manganèse, nodules CaCo3
- 6 : L à LA, 10 YR 6/4, très tacheté
- 7 : L, 10 YR 7/3.6/3, légèrement tacheté
- 8 : Sf à L, 10 YR 7/4.6/4, laminations horizontales
- 9 : L, 10 YR 7/4.6/4, possible dépôts de débordement mais clous épars

DEPOTS NATURELS

- V : 10 YR 6/4.5/4, Dépôts de gravier / route
- IV : 10 YR 7/4.6/4, Dépôts de remblais historiques avec verre patiné et métal rouillé
- III : LAS, 10 YR 6/3.5/3, avec fragments de caliche, ressemble à l'US 3.
- II b : AL, 10 YR 6/3.5/3 massif avec nodules de caliche de 2 à 5 mm
- II a : LA, 10 YR 6/3.5/3, massif à légèrement structuré, avec gros fragments de caliche (0,5 à 1 cm)
- I : LAS, 10 YR 6/3.5/3, massif avec fragments de caliche bien développés (state III)

**Fig. 166 : Localisation et stratigraphie du canal historique Az T :8 :271
(S : sable ; L : limon ; A : argile)**

• Données chronologiques et historiques

L'absence d'archives historiques relatives à la construction et à l'abandon de ce canal a été comblée par deux dates OSL prélevées dans les US 2 et 8. Ces dernières ont été effectuées par Glen Berger à l'Université de Reno, Nevada. Afin de tester la validité de cette approche, deux types de dates ont été effectués : les dates OSI à grains multiples et les dates OSI à grain unique. Malheureusement ces dernières sont inversées.

La date multi grains suggère un début d'utilisation du fossé autour de 1899-1911 (US 2), alors que la date à grain unique estime cette construction autour de 1931-1948. De la même façon, les échantillons prélevés dans l'US 8 indiquent un probable abandon autour de 1871-1897 pour la multi grain et vers 1911-1926 apr. J.-C. pour la datation par grain unique. Pour Glen Berger, la date à grain unique est la plus valide, basée sur un rapport "probabilité-densité". Il semble donc que tous ces dépôts se soient donc mis en place relativement rapidement entre 1900 et 1930.

- Résultats

Les trois prélèvements ont permis de décrire 10 microUS dont les caractéristiques hydrosédimentaires sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tab. 34). Les numéros de facies font référence à la typologie présentée dans le Tab. 29.

US	Texture	Origine	Ecoulement	Classe typologique
1 a	Sable très fin	Verde	Uniforme	10a
1 b	Limons sableux	Indéterminée	<i>Granoclassé</i>	7
1 c	Limons sableux	Indéterminée	<i>Granoclassé</i>	7
2a	Limon grossier	Salt	Litage parallèle	6B
2b	Limons sableux	Indéterminée	/	11
2c	Limons sableux	Salt	Litage parallèle	6B
2d	Sable très fin	Verde	Litage parallèle	10B
2e	Limon argileux	/	Effondrement	14
8a	Limon grossier	Salt	<i>Granoclassé</i>	7
8b	Limons sableux	Salt	Uniforme	6A

Tab. 34 : Résultats de l'analyse micromorphologique conduite dans le canal historique Az T :8 :271 (ASM)

Bien que les limons granoclassés (facies hydrosédimentaire 7) n'aient été mis en évidence que dans les US 1b, 1c et 8a, l'analyse micromorphologique du même canal dans une autre tranchée a mis en évidence la dominance de ce type d'écoulement dans l'ensemble de cette structure hydraulique. Ces sédiments témoignent d'une forte dynamique fluviale et d'une sédimentation rythmée. L'US 2 est caractérisée par les facies 6b, 10b qui définissent un écoulement à litage parallèle, qui pourrait indiquer un équilibre temporaire entre débits liquides et solides, associé à une arrivée d'eau saisonnière à permanente. Un épisode d'effondrement des berges est attesté suite à cette dynamique (US 2 e).

Des sédiments grossiers à forte capacité érosive et faiblement triés ont été mis en évidence dans les US 1a et 8b (facies hydrosédimentaire 10a et 6a). Ils prennent leur origine dans le bassin de la Verde et/ou la Salt. Le processus de transport traduit une forte compétence, une sédimentation rapide à forte capacité érosive, suite à d'intenses précipitations réparties sur l'ensemble des bassins versants et un stock sédimentaire facilement mobilisable. L'eau arrive soudainement dans les canaux, chargée en sédiments faiblement triés, et remobilise les particules dans le fond du canal. Ce type de sédimentation peut résulter d'épisodes de crues-éclair.

- Conclusions

Le canal historique étudié fut utilisé probablement entre 1900 et 1930. Son utilisation nous a paru initialement discontinue mais l'observation de différents profils a mis en évidence une utilisation continue (l'épisode de nettoyage observé entre l'US 7 et 8 n'est pas visible dans d'autres tranchées). La Fig. 167 propose des corrélations entre les événements sédimentaires et les archives climatiques historiques. Deux dynamiques prévalent : 1) Une période de débit supérieure à la moyenne entre 1905 et 1920 (Fig. 167). 2) Trois épisodes de crues qui touchent les bassins de la Salt et de la Verde sont enregistrés en 1905 (orage hivernal frontal), voire 1916 (orage hivernal frontal) et 1926 (pluies automnales) (Fig. 167). Les sédiments de deux US proviennent du bassin de la Verde et pourraient donc correspondre aux crues de 1905 et 1916.

Nous posons donc l'hypothèse que la sédimentation granoclassée et à litage parallèle dans les canaux traduit des conditions humides, associées à des décharges importantes qui charrient des particules charbonneuses et organiques. Les sédiments faiblement triés résultent d'épisodes de sédimentation brutale à forte charge solide associée à des crues dans la plaine.

Canal historique, ECOPLAN

Proposition de corrélation entre les archives historiques et sédimentaires
tiré de Paulsen et al., 1988; et the Flood Control District of Maricopa County

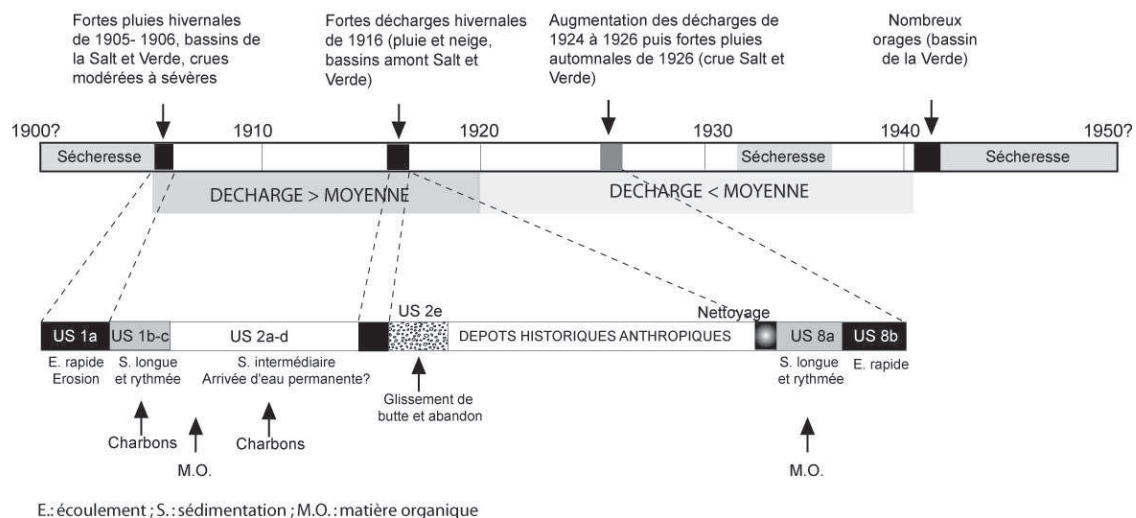


Fig. 167 : Proposition de corrélation entre les archives historiques et sédimentaires d'un canal historique fonctionnant au début du 20^{ème} siècle

4.2.1.2. St John canal, Salt River

Le Saint John Canal, référencé sous le code Az T:11:42 (ASM, Arizona State Museum) a été fouillé en collaboration avec Soil System Inc en 2007. Ce canal est situé sur la rive nord de la Salt River, à 14 km au sud ouest de Phoenix (Fig. 168), sur la terrasse pléistocène Sawik.

- Données historiques

Les données historiques disponibles sur ce canal sont celles de George Carlin dont les mémoires "Life on the Saint Johns Ditch" sont parues dans le *Journal of Arizona*

History en 1981. Cet article nous a permis d'apprendre que ce canal a été construit en février 1887 par W.H. John et 3 autres personnes afin d'irriguer « 40 sections » de terre¹³. Ce canal mesurait 11 km de long quand il a été vendu en 1892 à l'Orange Belt Land et la Canal Company (Zarbin, 1997; Carlin, 1981).

Localisation et évolution du canal

Ce canal est toujours visible sur les cartes du comté de Maricopa en 1919, ainsi que sur la carte des réseaux d'irrigation publiée par Turney en 1929 (Fig. 168). Les photographies aériennes de 1934 témoignent d'un recouvrement partiel par des alluvions de crue. L'abandon du fossé étudié se situe donc entre 1929 et 1934. Les travaux de terrain effectués par l'URS corporation en 2001, et les communications orales témoignent de la construction de nouveaux canaux alimentés par l'Agua Fria (Hoffman, 1991) à partir des années 1930 (Rogge et al., 2001). Par conséquent, le canal a probablement été utilisé entre 1887 et 1930.

Domages et impact des crues

Suite à la crue de 1891, la vanne d'entrée du canal est reconstruite 1,5 km en aval de la première (Davis, 1892). Aucune donnée n'est disponible sur l'impact de la crue de 1905. Entre 1914 et 1915, le canal est colmaté par des mauvaises herbes et des fragments de bois sur 1.6 km. Suite aux crues de 1915-1916, le canal est rempli de boue et déborde. Les habitants quittent leurs fermes et se réfugient sur les terrasses élevées. La communauté décide alors de réparer certaines zones du canal, et dans certains secteurs plus endommagés, de le reconstruire entièrement, grâce à un travail collectif et communautaire. Pour cela, un nouvel alignement du canal est tramé et le travail débute à l'aval du système, la Salt River étant toujours en crue. Le canal est rapidement envahi d'eau qui stagne alors que le niveau du cours d'eau diminue. Un nouveau barrage de dérivation, façonné à l'aide de buches de saule, peuplier et de rochers, est construit à l'entrée du canal.

Problèmes quotidiens : maladies et ravageurs

Carlin se remémore les dommages réguliers causés aux cultures par les lièvres d'Amérique et les battues régulières pour s'en débarrasser. Par ailleurs, il insiste sur le fait que le canal était porteur de maladies comme la typhoïde et précurseur de diarrhées fréquentes, du fait de sa salinité et du manque d'hygiène, le canal étant le seul endroit où les gens se lavaient à l'époque.

- *Description, stratigraphie et échantillonnage*

Le canal mesure 50 à 70 cm de profondeur, et 2.30 m de largeur (Fig. 168). Il a été construit dans des dépôts limono-graveleux massifs très riches en fragments de caliche. La première phase de fonctionnement (US 4 et 5) est composée de limons graveleux, sables et galets faiblement triés. Le canal est curé après cette phase.

¹³ Une section mesure 26 ha, ce qui ferait un total de 10 400 ha, ce qui est plus élevé que n'importe quel canal le long de la Salt et de la Gila ! Il est fort probable que Carlin fasse référence à la subdivision standard d'1/4 de section au lieu d'une section complète. Ceci correspondrait donc à un total de 1600 acres irriguées, soit 650 ha.

La seconde phase d'utilisation (US 6 et 7) est constituée de dépôts limoneux à argileux massifs partiellement laminés. Le canal est à nouveau nettoyé. La troisième période d'utilisation (US 8 à 15) est caractérisée par des sédiments argilo-limoneux contenant des graviers et des nodules carbonatés (US 8 à 10), auxquels se superposent des limons massifs laminés (US 11 et 12). La phase terminale d'utilisation du fossé comprend des dépôts limoneux et argileux à structure prismatique et grumeleuse, très bioturbés et riches en microcharbons (US 13 à 16). Ce canal est entièrement recouvert par des limons brun jaune très graveleux à structure prismatique (US 17) dont l'origine n'est pas connue. Etant donnée la configuration des dépôts, il est possible de poser l'hypothèse d'un comblement sédimentaire en vue de niveler les terres. 9 échantillons micromorphologiques et de sédiments en vrac pour la susceptibilité magnétique ont été prélevés.

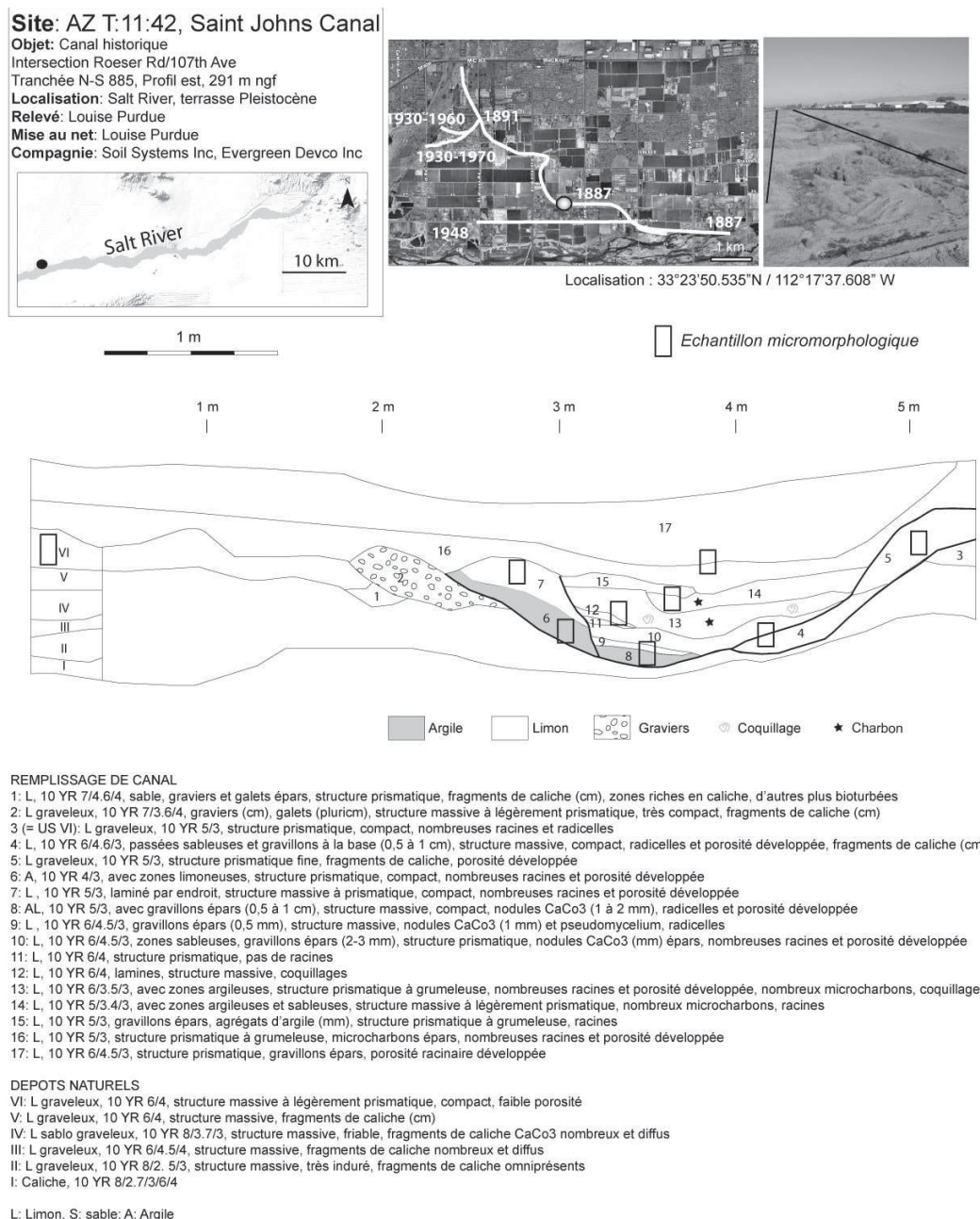


Fig. 168 : Localisation et stratigraphie du canal historique Saint John

• Résultats de l'analyse micromorphologique et magnétique

Les résultats obtenus mettent en relief 6 phases de fonctionnement (Fig. 169). Les caractéristiques des faciès de dynamique hydrosédimentaire sont présentées Tab. 29 et en Annexe 4.

1- US 4-5 : *forte dynamique hydrosédimentaire et engravement*

Ces deux US appartiennent à une dynamique érosive bien identifiée sur le terrain (US 1 et 2). L'US 4 est caractérisée par le faciès hydrosédimentaire 9 composé de limons grossiers faiblement triés en provenance du bassin de la Salt et de la Verde. L'US 5, hétérogène et mal triée, colmate une partie du canal. La microstructure mixte, les fragments de caliche, les agrégats de sols angulaires traduisent un mélange de sédiments suite au sapement des berges ou au glissement des buttes (faciès hydrosédimentaire 14). Le canal est nettoyé après ces événements.

2- US 6.a, b, c : *faible dynamique hydrosédimentaire et bioturbation*

Des limons argileux moyennement triés et à une faible diversité minéralogique composent cette seconde phase (faciès hydrosédimentaire 3). Ils résultent d'un transport fluvial en suspension, suite à une entrée d'eau de faible dynamique. La microstructure prismatique à bioturbée indique une phase d'exondation, des taux de sédimentation réduits et des conditions humides. Des limons sablo-argileux (US 6C) à structure subangulaire témoignent d'une intensification temporaire de la dynamique hydrique, avec des cycles d'assèchements et d'humidifications répétés.

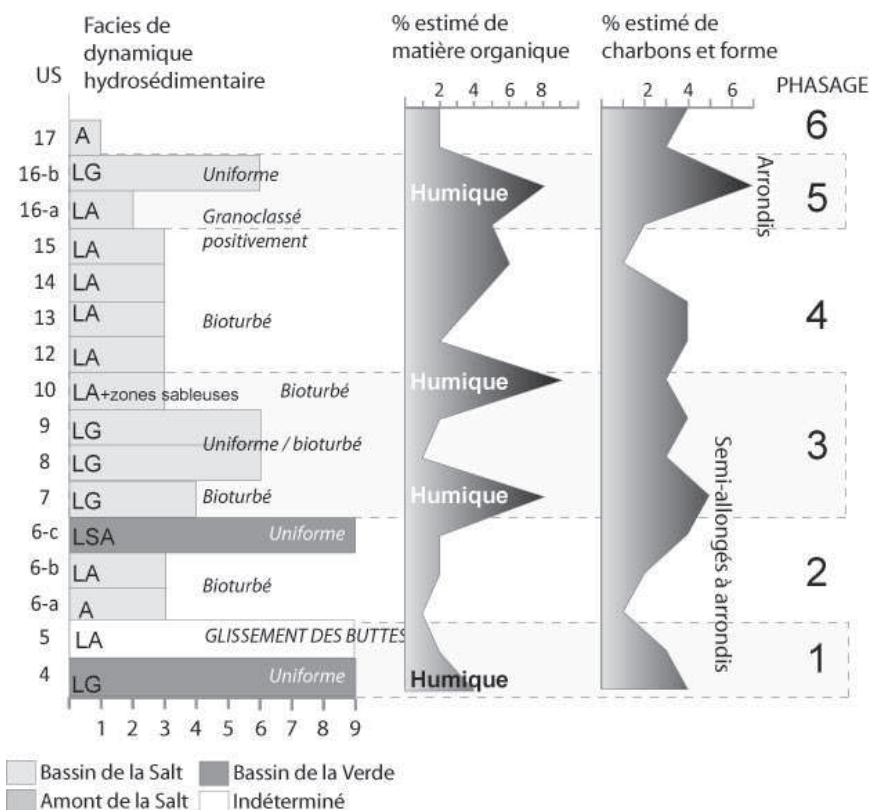


Fig. 169 : Résultats de l'analyse micromorphologique conduite dans le canal historique Saint Johns.

3- US 7-10 : *persistance de la forte dynamique hydrique*

Les US 7, 8 et 9 sont de texture limoneuse grossière et sont faiblement triées (faciès hydrosédimentaire 4 et 6a). La première phase de déposition (US 7) est composée de limons grossiers bioturbés (faciès 4),

riches en macrocharbons semi-allongés et en particules végétales. La microstructure en chenaux implique à la fois des conditions humides et des phases temporaires d'arrêt de sédimentation.

Ces dépôts sont superposés par des limons grossiers à suspension uniforme, qui contiennent des traces partielles de bioturbation, et traduisent une arrivée d'eau brutale dans le canal, suivie par son retrait rapide. Nous avons intégré à cette phase l'US 10, composée de limons argileux à passées sableuses et graveleuses visibles sur le terrain. La forte teneur en matière organique et microcharbons, transportés en suspension, pourrait indiquer la fin de l'épisode de crue, suivie par une mise en surface et le développement de l'activité biologique.

4- US 11-15 : *Réduction des taux de sédimentation et bioturbation*

Cette phase de sédimentation de texture limono-argileuse est caractérisée par une activité biologique et faunique très développée qui a en grande partie mélangé les sédiments, ce qui rend difficile leur interprétation hydrosédimentaire (facies 3). Le taux de charbons diminue progressivement, et la teneur en matière organique reste relativement élevée, ce qui indique un milieu en voie d'eutrophisation avec des écoulements diffus.

5- US 16a-16b : *légère intensification des débits liquides*

Les sédiments limono-argileux de l'US 16a sont granoclassés positivement et indiquent une sédimentation rythmée avec une décharge fluviale régulière de faible intensité (facies hydros. 2b). La microstructure cavitaire nous informe de l'effondrement de la structure du sol suite à des phases d'hydromorphie prolongée. La forte concentration estimée de matière organique humique résulte soit de la présence d'une végétation hydro-hygrophile in situ dans l'axe du canal, ce qui pourrait être confirmé par les traces de bioturbation, ou d'une ripisylve bien exprimée.

6- US 17 : *Les dépôts post-abandon*

Dans l'US 16b, des limons grossiers à suspension uniforme sont identifiés (facies hydrosédimentaire 6a). Étant donné la configuration du canal et la diminution progressive de la pente du fait de sa siltation progressive, il est possible que ces dépôts correspondent à une réutilisation naturelle de la dépression du canal lors de crues ultérieures.

Des dépôts argileux massifs (facies 1) à structure cavitaire (effondrement de la structure suite à une hydromorphie prononcée) les recouvrent. Ce facies est indicatif d'une phase d'écoulement réduite. Comme observé dans certains canaux modernes, la présence de flaques d'eau persistantes dans un canal après son abandon pourrait confirmer l'hypothèse de stagnation d'eau post-abandon.

- *Conclusion : corrélation avec les données historiques, climatiques et hydrologiques (Fig. 170)*

Le canal a été utilisé entre 1887 et 1930. Trois épisodes de crues majeures ont pu contribuer à son remplissage : les crues de 1891, 1905 et 1916 (Fig. 170). Lors d'un épisode de crue, l'eau chargée en sédiments s'engouffre dans le canal, érode ses berges et le colmate sur une certaine distance et une certaine épaisseur avec des sédiments grossiers faiblement triés.

Les sédiments des US 4 et 6c (facies hydrosédimentaire 9a), 8 à 9 et 16b (facies hydrosédimentaire 6a), qui caractérisent une suspension uniforme peuvent correspondre à des dépôts de crue. Des dépôts hétérogènes à agrégats de sols traduisent des sapements de berges et/ou des épisodes de glissement de buttes (US 5), peut-être en réponse à une dynamique hydrosédimentaire intense.

Entre ces épisodes, des sédiments bioturbés riches en matière organique (US 11 à 14) témoignent d'une réduction des taux de sédimentation, de conditions humides et de traces de végétation. Ceci pourrait peut-être correspondre à la phase de colmatage en amont du canal en 1915.

L'US 16a, dont les sédiments sont granoclassés, signe une sédimentation rythmée avec une colonne d'eau élevée qui permet le tri des sédiments.

Or entre 1910 et 1920, et notamment entre 1915 et 1916, les décharges dans la basse vallée de la Salt sont supérieures à la moyenne. Nous avons donc supposé que ces dépôts granoclassés se sont mis en place au cours de cette période. Par ailleurs, sur le terrain, l'US 16 correspond à des dépôts qui colmatent et débordent sur la partie nord du canal. Ceci se corrèle bien avec les données écrites qui attestent d'un débordement du canal, puis son abandon dans certaines zones après 1916.

Canal historique, Saint Johns

Proposition de corrélation entre les archives historiques et sédimentaires
tiré de Paulsen et al., 1988; et the Flood Control District of Maricopa County

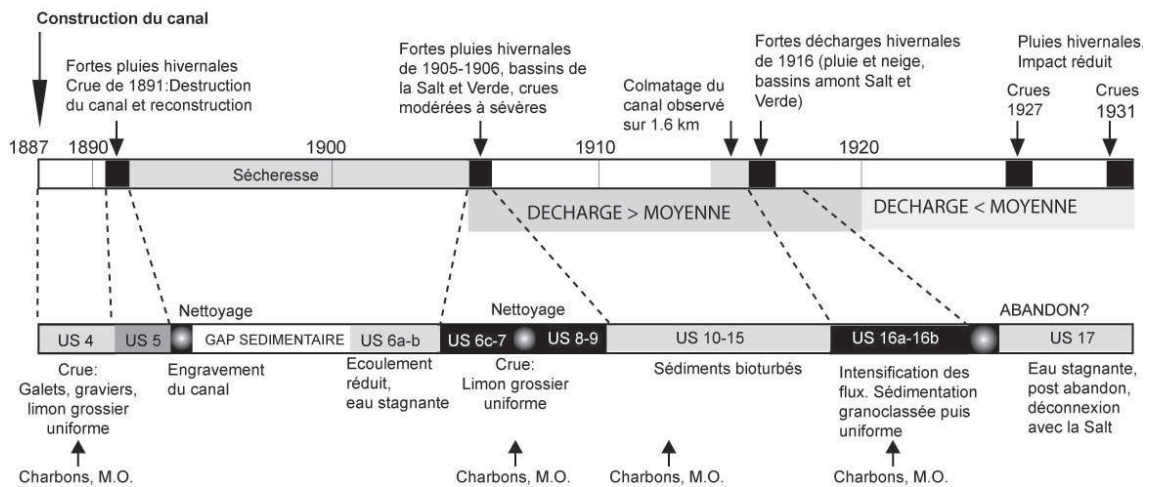


Fig. 170 : Corrélation entre archives sédimentaires et les données climatiques textuelles, Saint Johns canal

4.2.2. Essai d'interprétation de la typologie des remplissages de canaux

Les faciès obtenus dans les remplissages de canaux peuvent être interprétés de façon purement hydrosédimentaire mais leur occurrence peut également être l'effet de l'activité humaine. Une signature sédimentaire dans un canal ne renseigne qu'indirectement sur la dynamique fluviale. Le tableau ci-dessous (Tab. 35) met en relation les évènements climatiques, géomorphologiques ou anthropiques qui pourraient expliquer l'observation des faciès hydrosédimentaires décrits dans la section 2. Ils peuvent à eux seuls expliquer leur occurrence, mais leur interaction peut également en être responsable.

4.2.2.1. Les dépôts de décantation

Les dépôts de décantation caractérisent ici des phases de faible circulation d'eau, voire d'eau stagnante. L'origine de ces dépôts a été retracée à l'amont des bassins versants. Les sédiments issus de l'érosion régionale (bassin de la Salt et de la Verde, bassin amont et central de la Gila) ne présentent pas de figures sédimentaires liées à la décantation. Or, dans ce second contexte, les bassins versants érodés ont des pentes plus marquées et sont sensibles aux longues pluies hivernales.

Cela suppose que les argiles se déposent de façon préférentielle au cours des périodes de faible pluviométrie ou d'étiage. Toutefois, d'autres conditions propices à leur sédimentation doivent être exposées.

- 1) D'un point de vue géomorphologique, la présence d'argile dans les canaux peut résulter de l'éloignement du chenal principal, son rétrécissement, voire son incision.
- 2) Les dépôts de décantation se mettent en place au cours de l'eutrophisation du canal et après son abandon, au cours duquel il fonctionne comme un bras mort.
- 3) Sur le terrain, des dépôts de décantation ont été identifiés dans un canal légèrement en aval d'une zone percutée latéralement par une ravine. Le canal bouché ne laisse passer qu'un filtre d'eau chargé de particules en suspension.
- 4) Les sédiments étudiés dans des structures hydrauliques tertiaires auront une texture plus fine que les dépôts dans un canal principal à proximité des vannes d'entrée, en réponse au tri granulométrique amont-aval.
- 5) Les canaux peuvent être fermés par des vannes, de façon préventive. Ainsi, une signature sédimentaire indicatrice d'une faible circulation d'eau peut en réalité correspondre à un épisode de forte dynamique hydrique.

4.2.2.2. La sédimentation rythmée sans crue

Les dépôts à granoclassement positif traduisent des décharges élevées dans le chenal principal, avec une montée et chute du niveau de l'eau bien marquée, mais dont la durée est difficile à estimer (saisonnière ?). Leur observation dans les canaux principaux à proximité des barrages peut être liée à une augmentation progressive du niveau de l'eau du cours d'eau puis à sa diminution. Le chenal principal peut-être en voie d'exhaussement ou d'incision. Dans les canaux de distribution ou latéraux, la sédimentation granoclassée peut résulter d'épisodes d'ouverture/fermeture du canal sous contrôle anthropique (Huckleberry, Dubar, communication personnelle). D'un point de vue sédimentaire, le tri des sédiments de même que l'orientation horizontale des particules sommitale (type biotite) impose un niveau de l'eau élevé avec des dynamiques de courants distinctes dans la colonne d'eau (Devillers, 2005). Ce faciès peut indiquer une certaine efficacité dans la gestion de l'eau.

4.2.2.3. La sédimentation intermédiaire

Les sédiments à litage parallèle sont grossiers et observés dans des canaux dans les deux bassins versants. Ils résultent d'un transport par des eaux turbulentes suite à des précipitations intenses en amont des bassins versants. L'absence de bioturbation et de matériel fin en suspension permet de poser l'hypothèse d'une sédimentation permanente dans les canaux. Cette dernière est favorisée par un lit mineur large et facilement dérivable. Toutefois, la texture grossière des sédiments peut également traduire un risque de défluviation. L'écoulement laminaire malgré la granulométrie des dépôts pourrait suggérer un filtrage de l'eau. En effet, si les vannes d'entrée sont positionnées à la limite du lit mineur, une dérivation stable de l'eau est envisageable.

4.2.2.4. Les dépôts de crue

Les facies à suspension uniforme sont faiblement triés et de texture variable. L'absence de traits sédimentaires est liée à une arrivée d'eau soudaine et incontrôlée dans le canal, avec la destruction des barrages et vannes d'entrée sur plusieurs kilomètres (Huckleberry, 1999a).

La capacité érosive de l'eau conduit à la remobilisation des particules situées au fond du canal. La faible pente des canaux favorise leur colmatage accéléré. L'analyse des canaux historiques suggère que les dépôts résultant des crues de 1891, 1905 et 1916 sont probablement caractérisés par une sédimentation à suspension uniforme (facies hydrosédimentaire 6a et 9a).

4.2.2.5. Facies bioturbés ou éoliens

Les facies bioturbés suggèrent des phases de réduction des rythmes et des taux de sédimentation associées à des conditions humides qui permettent l'activité biologique dans le fossé. Ils impliquent une réduction des débits liquides et solides (baisse de la pluviométrie ou répartition saisonnière différente, saison sèche, fermeture du canal). Dans le canal Saint John, les unités stratigraphiques caractérisant une phase de stagnation d'eau reliée à une phase de nettoyage du canal due à son colmatage sont associées au facies 3 des « limons argileux bioturbés »..

4.2.2.6. Dépôts éoliens

Les facies éoliens témoignent d'un arrêt de la sédimentation d'origine fluviale lié à l'abandon temporaire ou définitif des structures hydrauliques. Les conditions climatiques et paysagères propices à ce type de processus sédimentaire sont variables. En effet, l'éloignement du chenal principal ou son incision, associé à une réduction de la fréquence des crues en réponse à des conditions plus chaudes et sèches, peut conduire à la réactivation des dunes, notamment dans la Gila. A l'opposé, des études récentes dans la moyenne vallée de la Gila (Wright et al., 2011) ont montré que les dunes se forment et colmatent les canaux au cours de phases d'aggradation et de migrations latérales du chenal principal. En effet, les dépôts de débordement et la charge de fond sableuse des chenaux abandonnés sont rapidement remobilisés par les vents d'ouest et contribuent à la formation des dunes.

5. Conclusion

33 sites ont été étudiés, ce qui représente un corpus de 607 unités microstratigraphiques. Nous avons réalisé une typologie pédo-sédimentaire par milieu fluvial (canaux et formations alluviales) et par secteur géographique (Salt et Gila). Une interprétation climatique, géomorphologique, sédimentologique et humaine est proposée grâce à des données référentielles géo-historiques (canaux historiques et dépôts de crue bien datés). Les résultats mettent en évidence que les sédiments fins granoclassés dans les canaux témoignent de conditions humides et d'une sédimentation rythmée, voire contrôlée par l'homme.

Les facies grossiers à litage parallèle pourraient indiquer une sédimentation continue. Les dépôts à suspension uniforme traduisent des épisodes de sédimentation rapide et brutale et sont souvent associés à des crues et des évolutions morphologiques du cours d'eau. Dans la plaine, les phases de stabilité sont marquées par la déposition de sédiments fins granoclassés. A l'opposé, les facies grossiers à litage parallèle sont des signatures de crues hivernales et les dépôts à suspension uniforme résultent d'épisodes de crues-éclair. Ces premières interprétations, qui ont également une vocation méthodologique, vont faciliter l'interprétation de nos résultats.

III.2 : Caractérisation et classification des dynamiques hydrosédimentaires

Origine sédimentaire	Ecoulement	Facies Salt		Facies Gila		Interprétation			Référentiel	
		N° de facies	Texture	N° de facies	Texture	Géomorphologique	Sédimentologique	Humaine		
AMONT DU BASSIN VERSANT	Décantation	1	A	1	A à LA	Eloignement/ encaissement et rétrécissement du chenal	Diminution de l'énergie des crues, période d'étiage	Fermeture préventive du canal, abandon, diminution du gradient du canal		
	Gradué	2b, 7	LA à LS	2	LG	Configuration « channel into channel » (système à méandre dans configuration en tresse) (exhaussement ou encaissement du lit)	Sédimentation rythmée avec augmentation/diminution saisonnière du niveau de l'eau, colonne d'eau élevée, (Q)>(Qs)	Ouverture/fermeture des canaux de distribution et latéraux Augmentation de la décharge dans les canaux principaux	Décharge> moyenne	
	Litage parallèle	6b, 8	L à Stf	4	Stf	Lit mineur large facilement dérivable, aggradation, risque de défluviation	Transport laminaire à turbulent et sédimentation rapide à permanente. (Q)>=Qs	Bonne gestion de l'eau en amont avec filtrage de l'eau mais possible impact désastreux si mauvais contrôle		
	Uniforme	2a, 5, 6a	LA, Lg	X	X	Exhaussement et élargissement du lit (système en tresse) puis possible encaissement	Sédimentation rapide, forte turbulence, forte charge solide, remobilisation des particules au fond de canal (Qs>Q)	Localisation de l'échantillonnage, absence de protection ou destruction/colmatage des canaux	Crue de 1906 ; crue de 1916	
	Décantation Gradué	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Litage parallèle	9b, 10b	L, Stf	6b, 8	LG, LS	Lit mineur large facilement dérivable, aggradation, risque de défluviation	Ecoulement turbulent, sédimentation moyenne à rapide, saisonnière à permanente (Q)>=Qs	Bonne gestion si protection des canaux à l'aide de vannes ou destruction majeure		
REGIONALE	Uniforme	9a, 10a, 12, 13	L, Stf	5, 6a	LA, LG	Exhaussement et élargissement du lit (système en tresse) puis possible encaissement	Sédimentation rapide, forte turbulence, remobilisation des particules du fond du canal	Absence d'organisation, destruction des barrages et des vannes d'entrées, colmatage des canaux	Crue de 1891, crue 1905	
REGIONALE ET LOCALE	Uniforme	14a à d	LA à Stf	10, 11, 12, 13	LS, LA	Ravinement, exhaussement et élargissement du lit (système en tresse) puis possible encaissement	Effondrement des berges et mélange des alluvions/colluvions. sédimentation brutale avec ou sans crues régionales associées (Qs>Ql)	Possible canalisation des eaux de ruissellement (si texture des alluvions fine), ou destruction des structures de dérivation locales (si texture grossière qui implique des conditions hydrosédimentaires plus intenses à l'échelle régionale)		
/	Bioturbé	3, 4, 13	LA, LG, LS	2, 7 voire 10, 11, 12 et 13	LA, LS	Variation latérale du chenal	Arrêt temporaire de l'alimentation en eau et nécessité de reconstruire la prise d'eau	Fermeture du canal pour cause de nettoyage, colmatage en amont, protection contre les fortes crues	référence historique	
/	Eolien	11	Stf	9	LS	Eloignement / incision du chenal principal	Eloignement/incision du chenal, diminution ou augmentation du rythme des crues	Nettoyage du canal au cours de la période sèche, abandon de la structure		

Tab. 35 : Synthèse et essai d'interprétation climatique, géomorphologique et humain des facies sédimentaires dans les canaux d'irrigation, Salt et Gila

Chapitre 3

Caractérisation et classification des processus pédologiques, écologiques et agraires

1. Introduction	354
2. Typologie des traits pédologiques et écologiques observés dans les remplissages de chenaux et les formations alluviales	355
2.1. Activité biologique animale et microstructure associée	355
2.2. Matière organique et charbons	356
2.3. Transfert de particules solides : description et dynamique	358
3. Signature micromorphologique de la mise en surface et du développement d'un couvert végétal dans les formations alluviales non cultivées et les remplissages de canaux	364
3.1. Référentiels actuels des traits micro-pédologiques et écologiques de surface sur sols non cultivés	364
3.2. Signature de l'absence de mise en surface	366
3.3. Signature de la présence d'un couvert végétal local à régional	366
4. Signature micromorphologique de la culture et de l'irrigation des sols	368
4.1. Critères traditionnels de reconnaissance des sols agricoles et de la pratique de l'irrigation	368
4.2. Référentiel micromorphologique de sols cultivés historiques et modernes	370
5. Conclusion	374
5.1. Synthèse des résultats obtenus dans les formations alluviales de référence (sols cultivés/non cultivés)	374
5.2. Dans les remplissages de canaux	375

1. Introduction

L'évolution pédologique dans le bassin de Phoenix est contrôlée par sept processus (Fuller, 1975).

- a- *L'activité biologique*
- b- *L'accumulation de matière organique*
- c- *Les transferts solides dans les sols (particules fines et grossières)*
- d- *La formation de duripan (argile, caliche, fer, silicates)*
- e- *La dissolution et précipitation de carbonates (section pédoclimat)*
- f- *L'accumulation de sels solubles et/ou insolubles (section pédoclimat)*
- g- *La précipitation et la dissolution d'oxydes de fer et de manganèse (section pédoclimat)*

Sur ces sept paramètres, seuls les trois premiers seront pris en compte dans la création des faciès pédologiques. Les formations étudiées étant relativement jeunes, aucun duripan n'a été mis en évidence et leur étude ne sera pas abordée ici. Les processus liés à l'accumulation de sels, carbonates et traits ferrugineux seront abordés avec plus de détails dans le chapitre 4 qui vise à comprendre les traits pédoclimatiques.

Trois objectifs ont été définis :

- 1) Le premier vise à restituer les ***rythmes de sédimentation***. Si un canal n'est pas alimenté de façon permanente et si l'eau s'évapore, les sédiments dans le fond du canal sont soumis à des processus pédologiques, et ce jusqu'à ce que de nouveaux sédiments les recouvrent. Cette dynamique est similaire en contexte de plaine alluviale où les processus pédologiques sont susceptibles de se développer. La structure pédologique initiale est préservée et est un témoin de l'activité biologique ainsi que de la vitesse et des rythmes de sédimentation. Parce que les sédiments dans le bassin de Phoenix sont souvent fins et homogènes, seule la micromorphologie peut nous permettre de comprendre l'interaction entre ces traits environnementaux et leur origine. La plupart de ces traits ont été différenciés de lamines en lamines, et il a donc semblé cohérent de considérer les traits pédologiques présents dans chaque lamine comme signature des conditions paléoenvironnementales au cours de la formation de la strate.
- 2) Dans un second temps, nous tenterons d'identifier la signature micromorphologique d'un couvert végétal local à régional. La présence de végétation dans le canal ou sur ses berges nous renseigne sur la vitesse de circulation de l'eau mais également sur les paysages agraires locaux. Un couvert végétal plus en amont est un indicateur de la présence ou de l'absence d'une ripisylve, signature à partir de laquelle il est possible de d'extrapoler sur les conditions climatiques et/ou les pratiques humaines.
- 3) Enfin, dans un troisième temps, nous caractériserons la signature micromorphologique de l'exploitation et de l'irrigation des sols, à partir de données bibliographiques et de référentiels de terrain, historiques, modernes et actuels.

2. Typologie des traits pédologiques et écologiques observés dans les remplissages de chenaux et les formations alluviales

2.1. Activité biologique animale et microstructure associée

Presque 90 % de la faune en Arizona vit dans les sols, et la plupart n'est visible qu'à l'échelle microscopique (Hendricks et al., 1985). La texture fine à moyenne et la structure aérée des sols favorise l'activité biologique (Kuhnelt, 1976; Wallace, 1956) de même que le degré d'humidité et les propriétés basiques du sol (Kevan, 1962). Les arthropodes et nématodes, qui sont les plus abondants du fait de leur adaptation à de nombreux biotopes (Freckman et Mankau, 1977), ne contribuent que très faiblement à la décomposition de la matière organique (Wallwork, 1970), et ils n'ont qu'un rôle limité dans la bioturbation à l'opposé de l'activité des termites (Courty, 1990). Très peu de données sont disponibles sur l'activité des vers de terre. Leur présence implique au moins 40% d'humidité dans les sols de même qu'un pH neutre. On les trouve de façon préférentielle dans les ripisylve et les plaines alluviales où l'eau est présente, de même que dans les sols cultivés. Leur impact sur la structure et les propriétés des sols est majeur (Wallwork, 1970) car ils favorisent la mise en place de complexes organo-minéraux (Evans, 1948; Gerard, 1967; Satchell, 1967; Thorp, 1949) en ingérant la matière organique et les minéraux.

2.1.1. Bioturbation totale

Les faciès totalement bioturbés sont caractérisés par une porosité d'entassement associée à des traits de passages (compaction de la masse basale autour des chenaux) et des traits de foussements (chenaux comblés de façon plus ou moins dense par du matériel en forme d'assiettes empilées) (Fig. 171a). Les sédiments peuvent être structurés en nid d'abeille ou totalement pédoplasés jusqu'à une microstructuration granulaire millimétrique. L'homogénéisation des sédiments se traduit par une distribution chitonique à porphyrique, de même qu'un assemblage granostrié à porostrié lorsque les sédiments sont micacés (Courty, 1990). Ces conditions ont toutefois rarement été observées. 21% du corpus total des US étudiées (n=607) présentent des traces de bioturbation complète.

2.1.2. Bioturbation partielle

La bioturbation affecte le sédiment par la présence de traits de passages et de foussements (Fig. 171b) mais dont la faible intensité préserve les figures sédimentaires et la microstructure. Repérée dans des faciès de remplissage de canaux, cette activité biologique marque des arrêts plus ou moins durables de la sédimentation.

2.1.3. *Bioturbation réduite*

Seuls quelques chenaux isolés cylindriques (canaliculaire) (Fig. 171c) avec des traces de compaction mélangent le matériel parental. La structure sédimentaire est préservée et visible en lame mince.

2.1.4. *Bioturbation inexistante*

Le matériau parental conserve toute sa structure sédimentaire initiale (Fig. 171d). Cette signature témoigne de rythmes d'accrétion et de comblements accélérés de ces chenaux-canaux ou de la plaine d'inondation. Presque 50% des 607 US étudiées ne présentent aucune trace d'activité biologique.

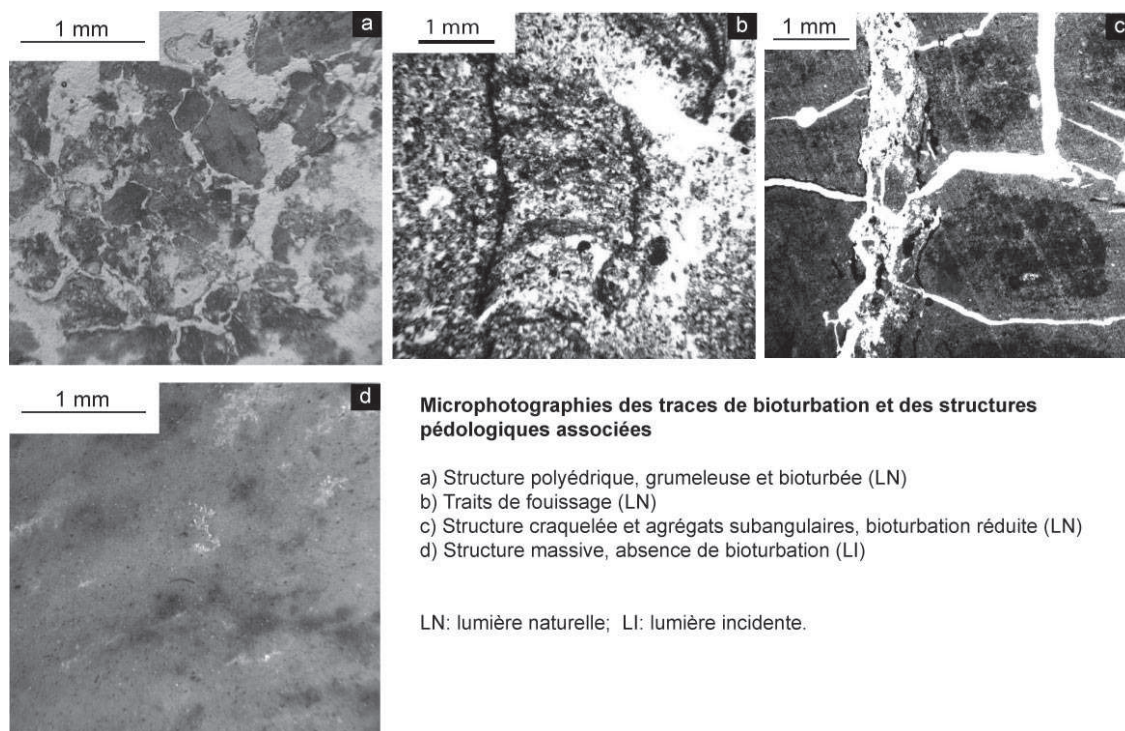


Fig. 171 : Micromorphologie des traces de bioturbation animale et microstructure associée

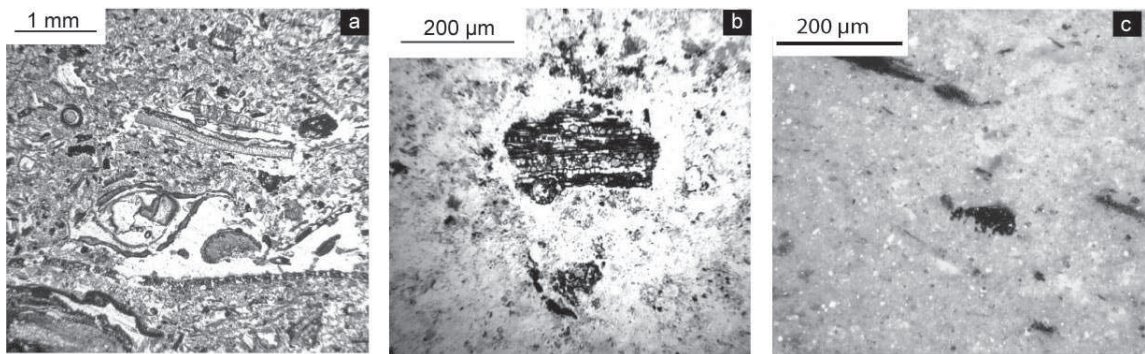
2.2. Matière organique et charbons

La teneur en matière organique est faible dans les sédiments à litage parallèle, les dépôts issus de crues rapides et les sédiments éoliens à structure particulaire. A l'opposé les teneurs en matière organique moyennes à élevées dominent dans les sédiments granoclassés positivement et bioturbés. Elle s'observe sous plusieurs formes dans les remplissages de canaux et dans les formations alluviales.

2.2.1. *Matière organique fraîche (avec structure cellulaire préservée)*

Elle est observée principalement dans la porosité des alluvions granoclassés et à litages parallèles, de texture limoneuse à limono (argilo)-sableuses, et à microstructure variable.

Dans les échantillons référentiels (Fig. 172 a), les fragments de matière organique à structure cellulaire préservée mesurent plus d'1 cm et sont de couleur jaune orangée en lumière naturelle. Les cellules sont facilement identifiables. Dans les sédiments archéologiques, les fragments observés ont généralement une taille inférieure à 200 μm et leur couleur est orangée à brune. Seules quelques cellules sont identifiables, bien que dans certains dépôts, des enchaînements de cellules ont été observés (Fig. 172b). Ces traces, considérées comme une signature de végétation in situ, pourraient correspondre à la colonisation rapide de la végétation après l'humectation des sols, suite à des pluies ou une arrivée d'eau dans les canaux.



Microphotographies des formes de matière organique identifiées en lame mince

- a) Fragments de matière organique fraîche avec préservation de sa structure cellulaire (LN) ;
 b) Fragment de matière organique en voie d'humification (coloration brun, noireâtre)(LN) ;
 c) Fragments de végétaux alluvionnés (LP) ;
 LN: lumière naturelle, LP: lumière polarisée

Fig. 172 : Microphotographie de la morphologie de la matière organique identifiée en lame mince

2.2.2. Matière organique humique à microparticulaire

C'est la forme la plus fréquemment observée (46% du corpus total étudié). Les particules amorphes sont présentes en quantité variable dans les sédiments de texture limono-argileuse, argileuse et limoneuse grossière, quel que soit le type d'écoulement (Fig. 171c). Cette forme résulte soit de l'activité biologique, de la décomposition in situ de la matière organique ou de l'érosion et du transport par ruissellement de matière organique déjà humifiée.

Les textures limoneuses grossières et les sables à microstructure simple présentent souvent des microparticules organiques, de couleur noire et de taille inférieure à 20 μm . Ces fragments végétaux alluvionnés sont probablement fragmentés au cours du transport. Presque 30% des US étudiées (n=607) contiennent de la matière organique sous cette forme.

2.2.3. Matière organique en agrégats

Les limons massifs à prismatique, moyennement bioturbés, le plus souvent granoclassés, sont riches en matière organique transportée sous forme d'agrégats. Cette dernière peut donc provenir de l'érosion d'horizon de surface ou organo-minéraux.

2.2.4. Matière organique absente

Les textures grossières sableuses à limono sableuse ne contiennent aucune trace de matière organique si ce n'est quelques microparticules humiques. 10% des 607 US étudiées ne contiennent pas de matière organique.

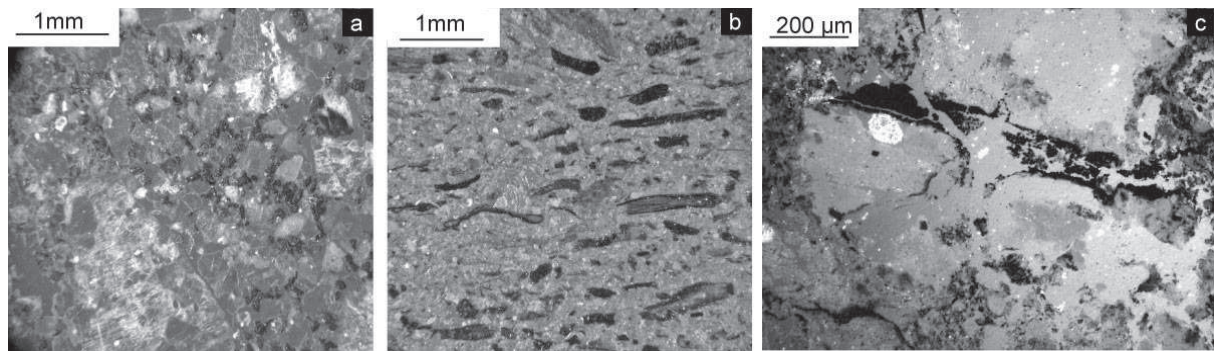
2.2.5. Matière organique brûlée et charbons

Dans les remplissages de canaux et les formations alluviales, nous avons identifiés plusieurs formes de matière organique carbonisée. Nous présenterons brièvement ces faciès étant donné qu'une section plus détaillée sur les charbons est présentée dans le Chapitre 4, section 4.

Des charbons de forme arrondie ont été observés dans les sédiments de toute texture (Fig. 173a). Leur taille peut être le résultat d'un tri granulométrique, d'une fragmentation au cours du transport ou suite aux processus post-dépositionnels de retrait-gonflement.

Des charbons de forme allongée, de taille supérieure à 125 μm (Fig. 173b) ont été identifiés principalement partie sommitale des sédiments granoclassés où ils sont probablement transportés en suspension. Des macrocharbons ont également été observés dans des sédiments faiblement triés. Dans ce contexte, leur présence indique des apports latéraux, résultat d'un ruissellement favorisé par des sols nus après nettoyage à feu courant.

Des fragments de matière organique noire partiellement carbonisée et à limite diffuse ont été observés dans des faciès cendreaux. Leur présence témoigne d'un épisode de feux in situ, anthropique ou naturel (Fig. 173c).



Microphotographies de particules charbonneuses. a) microcharbons arrondis à angulaires (LI) ; b) charbons allongés en paillettes et matière organique (LI) ; c) charbons et matière organique brûlés (LI). LI: lumière incidente.

Fig. 173 : Microphotographies des particules organiques carbonisées identifiées en lame mince

2.3. Transfert de particules solides : description et dynamique

Les traits texturaux sont des microfabriques reconnaissables par leur fraction granulométrique présente dans les sols suite à un transport mécanique (Bullock et al., 1985). Les principaux traits texturaux observés sont les revêtements, les croûtes de surface et les intercalations. Leur variabilité et leur quantité nous ont incités dans un second temps à créer un *faciès des traits texturaux* qui sera utilisé dans l'analyse diachronique des données.

2.3.1. Description des traits texturaux observés

2.3.1.1. Les revêtements

- *Revêtements gravitaires simples autour de la porosité (Salt et Gila River)*

Ils recouvrent partiellement ou non les vides et ne sont pas lités. Ils sont généralement homogènes et composés de limons argileux et d'argiles impures brunes organiques et poussiéreuses à faible biréfringence.

- *Revêtements simples autour de la porosité (Salt et Gila River)*

Ce sont les traits les plus fréquents. Ils sont soit réguliers soit discontinus autour de la porosité et le plus souvent constitués d'argiles ou de limons argileux non lités. Ces dépôts sont souvent de couleur grise en lumière naturelle, poussiéreux et micritique, bruns organiques à faible biréfringence ou orangés et hyalins à plus forte biréfringence (Fig. 174a).

- *Revêtements périgranulaires (Salt et Gila River)*

Ils sont omniprésents, réguliers, non lités et composés de particules argileuses de couleur jaune orangé à brun, à biréfringence variable (Fig. 174b). Des revêtements périgranulaires bruns organiques ont été mis en évidence dans des dépôts à composante sableuse et souvent bioturbés. Les revêtements brun clair ont été observés sur des sédiments dont la structure simple est à grains revêtus. Certains revêtements carbonatés ont été identifiés sur des particules basaltiques et des feldspaths très altérés à proximité des formations pléistocènes. Ils sont exogènes et proviennent de l'érosion de sols carbonatés. Enfin, les revêtements orangés périgranulaires rappellent les sables éolien.

- *Revêtements lités autour de la porosité (Salt et Gila River)*

Bien que rarement observés, ces traits sont plus fréquents le long de la Salt que de la Gila. Ils sont composés d'une à trois lamines avec des limons argileux à argiles organiques brunes ou grises à faible biréfringence souvent poussiéreuses et des argiles hyalines ou légèrement impures à biréfringence moyenne (Fig. 174 c). Ils sont souvent observés en association avec des revêtements simples autour de la porosité de composition texturale identique.

2.3.1.2. Les intercalations

Très fréquentes et de taille variable, elles sont composées d'argiles hyalines, brunes organiques, poussiéreuses, ou ferrugineuses (Fig. 171 d et e). Elles ont été observées dans les dépôts sableux peu structurés à massifs. Plus homogènes le long de la Gila, elles sont généralement argileuses, brunes, organiques et poussiéreuses. On les observe dans des sédiments limoneux à structure subangulaire.

2.3.1.3. Les croûtes pédologiques / croûte de battance

Les croûtes structurales se distinguent des croûtes de sédimentation par l'absence d'orientation des particules, le faible tri et l'absence de laminations (Bresson et Valentin, 1994 ; Evans et Buol, 1968; Chen et al., 1980). Les croûtes les plus épaisses (> 200 μm) ont été observées dans des dépôts limoneux à limono-argileux, tandis que les plus fines (<50 μm) sont généralement présentes sur des sols sableux. Les croûtes structurales identifiées sont rarement laminées (Fig. 171 f et g).

Elles sont souvent de texture argileuse ou argilo-limoneuse, poussiéreuse et riche en particules organiques et/ou charbonneuses. Lorsqu'elles sont laminées (Fig. 174 h), la base est argileuse, poussiéreuse, de couleur grise, riche en particules organiques et/ou charbonneuses ; la partie sommitale est argileuse, brune et organique. Etant donné le contexte semi-aride et l'état fragmentaire dans lequel ces croûtes ont été identifiées, il est possible qu'une grande partie d'entre elles aient été érodées.

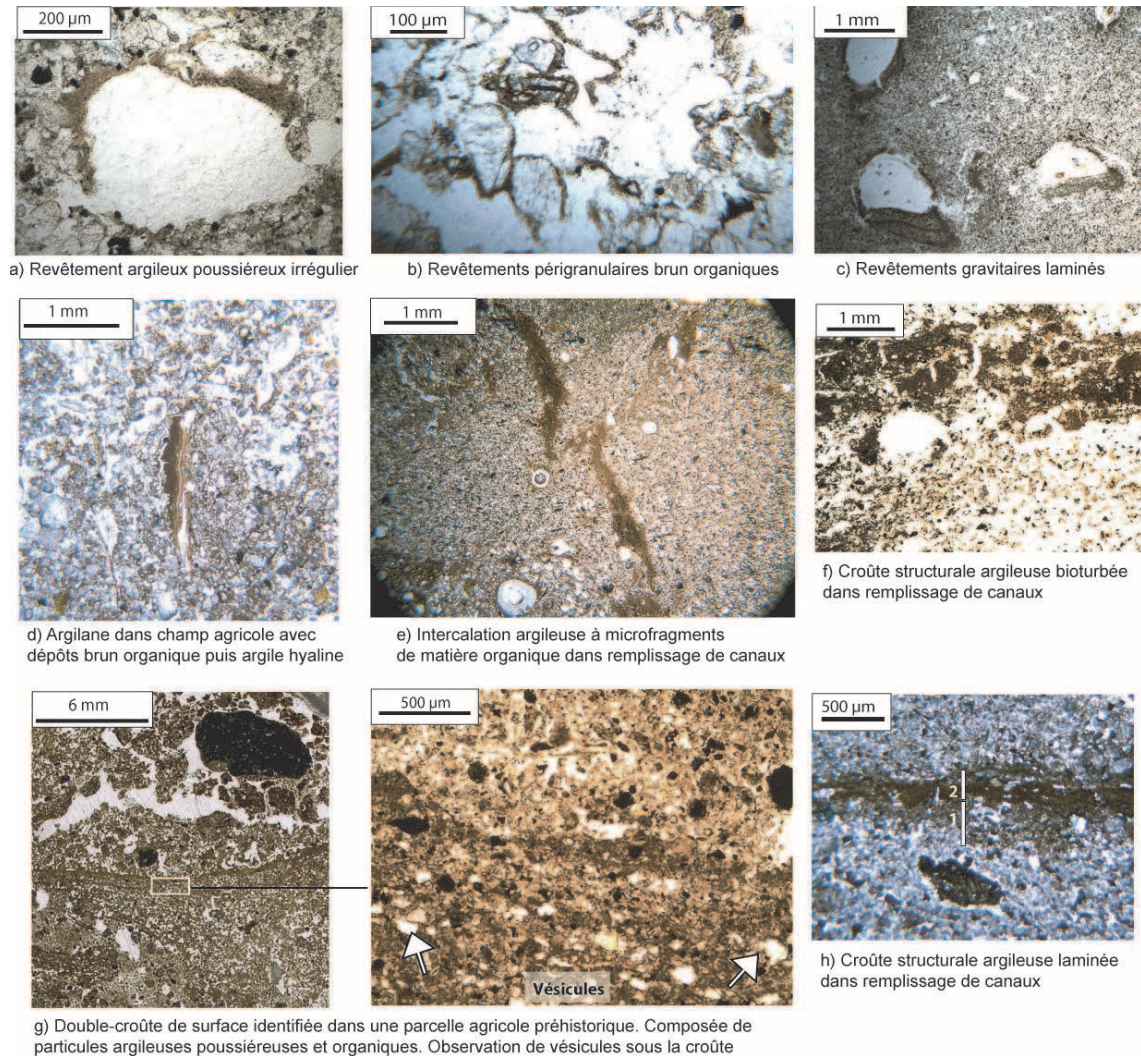


Fig. 174 : Microphotographies des traits texturaux identifiés en lame mince (Lumière Naturelle)

2.3.2. *Dynamique des transferts solides*

Etant donné la diversité des traits observés nous avons souhaité créer un Facies de traits texturaux qui sera plus facilement exploitable lors de l'analyse des résultats. Les processus pédologiques ont été considérés comme indépendants du milieu fluvial (excepté le substratum, mais les formations étudiées ont une pédogénèse trop peu développée), et l'ensemble des données a été analysé simultanément.

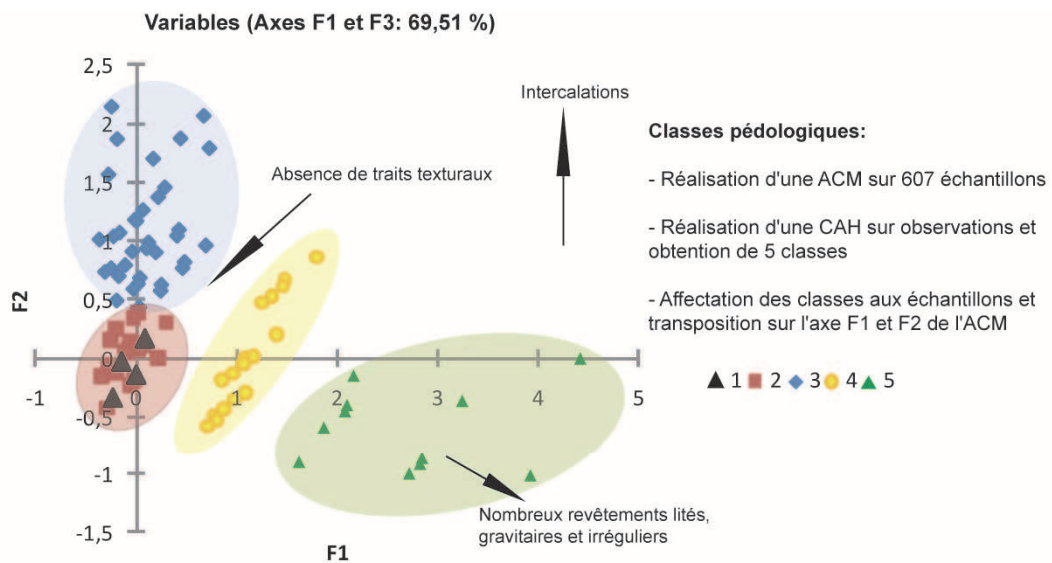
2.3.2.1. Classification des traits texturaux

L'analyse statistique (ACM puis CAH) conduite intègre six variables présentées dans le Tab. 36. Leur fréquence d'occurrence dans les dépôts, semi-quantifiée en pourcentage (ex : % des vides avec revêtements, % d'intercalation dans la matrice) et en présence/absence, a été recodifiée en 0, 1 et 2 afin de faciliter l'analyse statistique (Tab. 36). Le corpus total analysé regroupe les 607 micro-unités stratigraphiques étudiées.

Variable / Codification	0	1	2
Revêtement brun périgranulaire	0	0,5-10%	> 10%
Revêtement irrégulier/total autour de la porosité	0	0,5-10%	> 10%
Revêtement gravitaire	0	0,5-10%	> 10%
Revêtement laminé	0	0,5-10%	> 10%
Intercalation dans la matrice sédimentaire	0	0,5-10%	> 10%
Croûte pédologique	Absente	Présente	

Tab. 36: Codification des traits texturaux pour les analyses statistiques

L'ACM/CAH sur observations a permis d'obtenir 4 classes distinctes (Fig. 175).



Facies	Sous-facies	Nombre d'US	Revêtements				Intercalations	Croûte pédologique
			Laminés	Gravitaires	Périgranulaires	Total/irréguliers		
1		262	0	0	0	0	0	
2	A	99	0	0	1/2	0	0	
	B	117	0	0	0/2	1	0	
3	A	13	1	1	0	0	1/0	
	B	72	0	1/0	0	0/1	2/1/0	
4	A	16	0	0	0	2	1/0	
	B	15	0	2	2/0	0	1/2	
5		13	2	2	0/2	2	0/1	

0: absent ; 1: faible (0,5-10%) ; 2: élevé (>=10-60 %)

Fig. 175 : Identification du Faciès des traits texturaux. Analyse conduite sur 607 US. Chaque point représente une unité microstratigraphique visible sur les axes F1 et F2. Le % de variabilité expliqué par les axes F1 et F2 atteint 69,51%.

La classe 1, prépondérante (43% du total des US étudiées), ne présente aucun trait textural. La classe 2, qui se superpose graphiquement à la classe 1, est caractérisée par la présence de revêtements périgranulaires brun organiques (facies 2A) et de quelques revêtements irréguliers autour de la porosité (facies 2B). La classe 3 a été séparée en deux sous-facies. La sous classe 3A est composée de revêtements gravitaires et laminés et la sous classe B est définie par la présence de revêtements gravitaires et de nombreuses intercalations. La classe 4 regroupe les traits texturaux irréguliers autour de la porosité et des intercalations (sous classe 4a). La sous classe 4b regroupe les revêtements périgranulaires, gravitaires et les intercalations observés en forte proportion. C'est le cas également de la classe 5, faiblement représentée, qui présente une superposition de traits lités, gravitaires, irréguliers et d'occasionnelles croûtes pédologiques.

2.3.2.2. Interprétation du Facies des traits texturaux

La présence de traits texturaux a été interprétée par certains auteurs (Courty, 1990 ; Courty et al., 1989 ; Gebhardt, 1988, 1993) comme des témoins d'écoulement en conditions calmes (revêtement laminé), de translocation sous conditions turbulentes (revêtement total/irrégulier), de milieu saturé en eau (intercalation), d'arrêt de la sédimentation (croûtes pédologique), ou de circulations d'eau mobiles d'origine capillaire (revêtements périgranulaires). Afin de justifier ces interprétations, nous avons analysé les conditions de formations de ces traits grâce à la comparaison de certains marqueurs entre eux.

- *Traits texturaux et microstructure*

Les traits texturaux les plus nombreux et diversifiés (facies 3A et 5 : revêtements laminés, gravitaires, intercalations) sont observés dans les sédiments à microstructure bioturbée et subangulaire. Ces microstructures résultent respectivement d'épisodes de forte activité biologique sous conditions humides et de cycles d'assèchement-humectation répétés. Ces processus se développent en surface et traduisent des phases d'exondation. Cet ensemble témoigne donc d'une histoire complexe de circulation latérale et verticale d'eau chargée de particules en suspension, suite à des épisodes pluvieux.

A l'opposé, les structures particulières et massives ne contiennent que des revêtements périgranulaires ou irréguliers autour de la porosité (facies 2 et 4a). Ces structures signent un épisode de sédimentation, parfois brutal, suivi par un recouvrement rapide qui limite le développement biologique et microstructural des dépôts. La porosité intergrain dominante favorise la sédimentation périgranulaire des particules fines en suspension issues des dépôts de crue (contexte d'accrétion) et la présence occasionnelle de larges pores favorise la déposition de particules en suspension sous forme de revêtements irréguliers. De façon identique, la mise en surface est trop courte pour permettre la formation d'une croûte pédologique.

- Traits texturaux et processus de transport des sédiments

Les sédiments de décantation et bioturbés, qui témoignent d'écoulement réduits et de conditions humides locales, sont caractérisés par les facies 2 et 3b, et plus précisément par la présence d'intercalations. Ces dernières pourraient donc indiquer une origine liée à l'engorgement des sols comme le suggère Gebhardt (1988) mais pourraient également résulter d'une homogénéisation par le brassage de la faune. Les dépôts éoliens ne présentent aucun trait textural (classe 1).

- Relation entre les traits texturaux et la matière organique

Lorsque les sédiments ne contiennent aucune trace de matière organique (couvert végétal inexistant), les traits observés sont rares et appartiennent à la classe 1, 2A et 3B. Les traits texturaux observés résultent soit : 1) de la déposition de particules transportées en suspension dans les dépôts de crue, 2) de l'effet des pluies sur des dépôts mis en surface et de l'entraînement des particules désagrégées à faible profondeur, 3) si les dépôts sont bioturbés, l'incorporation des particules fines résulte du brassage biologique des poussières accumulées en surface suivi par une remobilisation au cours des phases d'assèchement.

Lorsque la teneur en matière organique est faible et de forme humique ou microparticulaire, les traits texturaux sont les plus nombreux et les plus diversifiés (classe 3B, 4 et 5). Ces débris organiques peuvent être alluvionnés avec les particules en suspension (argiles, organismes microscopiques) et se déposent lors d'un ralentissement du courant. Les particules fines sont entraînées dans les pores du sol. Dans un second cas, ces fragments organiques correspondent à la dégradation in situ de la litière du sol, après mise en surface. La pédoturbation a pu favoriser le mélange des particules dans la matrice du sol. Des croûtes pédologiques ont également été identifiées. Elles se forment lorsque l'horizon de surface disparaît et que l'agrégation biologique décroît. Elles sont associées à des pluies de forte intensité ou une irrigation trop irrégulière et témoignent d'un assèchement complet du sol ou des sédiments qu'elles recouvrent ainsi qu'un couvert végétal discontinu. Les vides irréguliers et les vésicules observés sous la croûte se forment lorsque l'eau et des gaz sont piégés sous un sol dont la surface s'assèche rapidement (Charles et al., 1985; Courty, 1986).

Lorsque la concentration en matière organique est moyenne à élevée et sous forme fraîche à humique (trace de végétation in situ) les traits texturaux sont composés de revêtements périgranulaires et de revêtements simples autour de la porosité (classe 1, 2B). La protection qu'assure le couvert végétal réduit l'impact causé par les pluies, mais indique également une diminution de l'apport sédimentaire. Ces deux facteurs peuvent expliquer la faible concentration en traits texturaux.

3. Signature micromorphologique de la mise en surface et du développement d'un couvert végétal dans les formations alluviales non cultivées et les remplissages de canaux

3.1. Référentiels actuels des traits micro-pédologiques et écologiques de surface sur sols non cultivés

3.1.1. Échantillonnage de référence

Afin de comprendre la dynamique des transferts de particules solides à l'échelle microscopique en surface, quatre échantillons de référence, pour lesquels les conditions paysagères et climatiques sont connues, ont été prélevés dans les bassins de la Salt et la Gila (Fig. 176) (sites de Gila Florence, Maricopa Plant, F 366, Salt SRMG). Ces échantillons proviennent d'horizons non cultivés et 2 des 4 sites possèdent une végétation de surface. Très éparse sur le site GRIC F 366, elle est nettement plus concentrée sur le site de Gila Florence. La granulométrie, les traits biologiques, texturaux et écologiques ont été décrits pour chaque site.

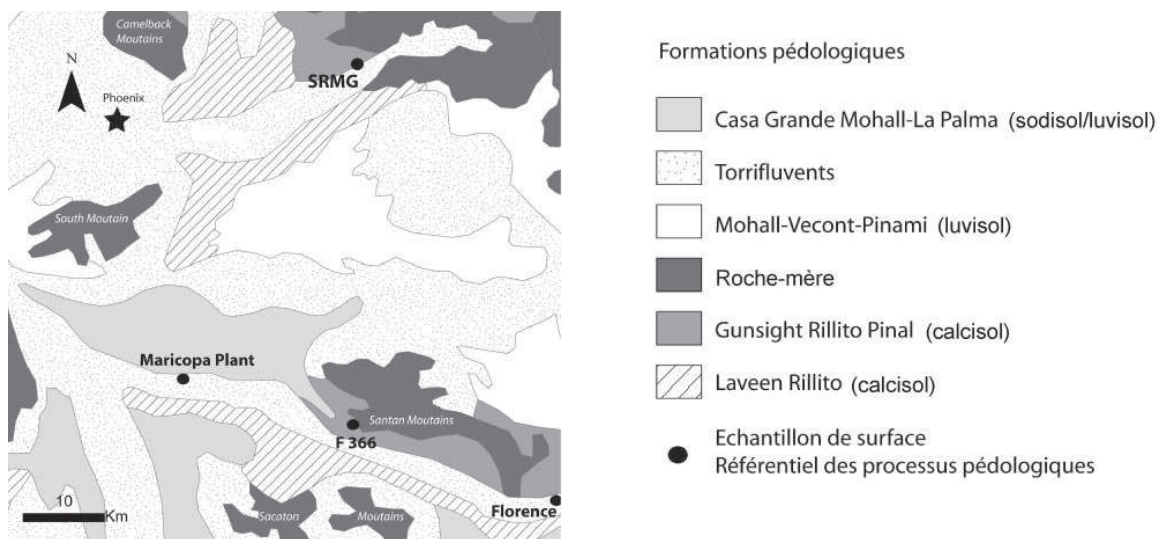


Fig. 176 : Localisation de l'échantillonnage de surface

3.1.2. Traits pédologiques de surface

3.1.2.1. Traits biologiques et structuraux

Les observations micromorphologiques sont décrites dans le Tab. 37. Les sites dépourvus de couvert végétal possèdent une structure particulière et des traces éparées d'activité biologique sur quelques centimètres (SRMG, Maricopa Plant). Lorsque la végétation est présente les sédiments ont une structure en chenaux dont la profondeur peut atteindre une trentaine de centimètres.

Lorsque le couvert végétal est existant, la matière organique est préservée (fraîche) et des coquilles ont été observées (Gila F 366, Gila Florence). Lorsque le couvert végétal a disparu ou est totalement absent (SRMG, Maricopa Plant), peut-être en réponse à des

épisodes d'érosion, seules des microparticules humiques sont identifiées. L'évolution de la forme de cette matière organique n'a pas d'impact sur sa concentration. Toute trace de matière organique disparaît rapidement (10-15 cm) quel que soit le couvert végétal initial sur les sols non cultivés.

Marqueurs		Gila River			Salt River
		Plaine alluviale		Terrasse	Terrasse Lehi
		Gila Florence; 12/2005	Maricopa Plant; 07/2007	GRIC F 366; 12/2006	SRMG ; 08/2006
Granulométrie	Facies hydrosédimentaire	1	2	10	8a
Traits biologiques	Degré de bioturbation	total	partielle	totale	partielle
	Microstructure	/	grain compact	chenaux	grain compact
	% estimé de matière organique	5	1	6	2
	Forme matière organique	fraîche à humique	à microparticules	humique	humique
	Trace de végétation in situ	oui	non	oui, oxydée	oui
	Autres	coquilles	/	coquilles	/
Traits texturaux	Revêtements gravitaires	/	/	/	/
	Revêtements totaux	5-10 % (A. hyalines)	/	/	/
	Revêtements lités	/	/	/	/
	Revêtements périgranulaires	40-60% (orangé)	/	40% (brun et orangé)	/
	Intercalation	/	/	/	/
	Croûte de surface	/	oui	/	/

Description des sites étudiés :

Gila Florence : Carrière de gravier, berge de cours d'eau, végétation de surface très présente

Maricopa Plant : Carrière de gravier, zone de ravinement, absence complète de couvert végétal de surface

GRIC F 366 : Site naturel, probable ancien champ historique, pied de cône alluvial, végétation éparse

SRMG : Carrière de gravier, absence de végétation

A.: argile; pouss: poussiéreux; orga: organique; carbo: carbonaté

Rq : La végétation clairsemée dans le bassin de Phoenix explique la très faible teneur en matière organique dans les sols (0.1 à 1%). Les valeurs présentées ici sont élevées et représentent une tendance plus qu'une réalité.

Tab. 37 : Traits micro-pédologiques de surface identifiés sur 4 échantillons modernes de surface

3.1.2.2. Traits texturaux

- Croûtes pédologiques

Les croûtes pédologiques ont été mises en évidence uniquement sur le site de Maricopa Plant. Par conséquent, elles sont des indicateurs de mise en surface, mais également d'un sol nu pour lequel l'horizon A a été érodé, ou ne s'est jamais formé.

- Revêtements et intercalations

Les traits texturaux sont absents lorsque l'activité biologique est absente (SRMG, Maricopa Plant). Seuls quelques revêtements gravitaires et intercalations argileuses poussiéreuses grises ont été observés à 5 cm de profondeur.

A GRIC F 366, où la végétation est éparse et la microstructure en chenaux, des intercalations argileuses poussiéreuses et des revêtements gravitaires épais sont présents à 20 cm de profondeur mais absents en surface.

Sur le site de Gila Florence (forte végétation en surface) des revêtements irréguliers d'argiles hyalines autour de la porosité ont été déterminés et de nombreux revêtements et intercalations gravitaires limono-argileuses poussiéreuses sont présents dans l'US sous jacente (15 cm de profondeur). Seuls quelques revêtements périgranulaires bruns attestent d'épisodes de percolation d'eau.

Il semblerait donc que le couvert végétal et son développement, qui protège la surface du sol, ait un impact sur la présence et la préservation des traits texturaux.

3.2. Signature de l'absence de mise en surface

Quatre critères diagnostiques signent une mise en surface de durée réduite, dans les canaux et les formations alluviales:

- 1) La préservation des litages sédimentaires, le granoclassement et l'orientation des particules minérales, qui sont des indicateurs d'une sédimentation rythmée.
- 2) Les microstructures à grains compacts, massives à cavitaires, où les processus biologiques et pédologiques sont réduits. La structure cavitaire signe également un effondrement de la structure sous des conditions humides.
- 3) La coloration des sédiments, de même que l'absence de matière organique, renseigne sur la vitesse de circulation de l'eau et par conséquent sur le stade de fonctionnement du réseau ou de la plaine alluviale.
- 4) Les traits texturaux sont rares. Lorsqu'ils sont présents, ils sont syn-sédimentaires et sont imputables à des crues (Courty, 1990).

3.3. Signature de la présence d'un couvert végétal local à régional

Il a paru intéressant d'estimer *la présence d'un couvert végétal* dans les canaux, qui reflète la plus ou moins grande efficacité de l'écoulement, nous informe sur les rythmes de sédimentation, et d'un point de vue plus anthropique, sur l'entretien des structures hydrauliques. En contexte de plaine d'inondation, la présence de végétation est un frein à l'expansion des crues et informe sur l'humidité des sols ainsi que les ressources disponibles. Quatre critères diagnostiques ont été sélectionnés: 1) Présence et forme de la matière organique, 2) Forme de la porosité et microstructure, 3) Occurrence d'espèces animales et végétales/ identification de phytolithes.

3.3.1. *Couvert végétal in situ*

L'observation des traits écologiques de surface présentés dans la Fig. 176 a mis en évidence plusieurs critères de reconnaissance d'un couvert végétal in situ :

- 1) La matière organique est préservée et la structure cellulaire des dépôts est visible (Fig. 177 a).
- 2) La porosité en chenaux (vides arrondis) est la plus fréquente dans notre contexte, mais des microstructures grumeleuses ont également été identifiées, de même que des structures prismatiques qui préservent des empreintes racinaires (vides allongés à extrémités pointues).

3) Des coquilles ont également été observées (Gila F 366, Gila Florence). Dans les remplissages de canaux, des traces indirectes de végétation ont été déterminées sous forme de coupes transversales de characées (Fig. 177 b). Les rhizoconcrétions racinaires carbonatées indiquent la présence de végétation in situ et de processus d'évaporation.

4) Enfin, les phytolithes peuvent refléter la présence d'une couverture végétale dans le canal ou dans la plaine (décomposition in situ) (Fig. 177 c). Leur diversité taxinomique est limitée, et seul des phytolithes de carex ont été déterminés.

Seules 7% des 607 US étudiées présentent des traces de végétation in situ.

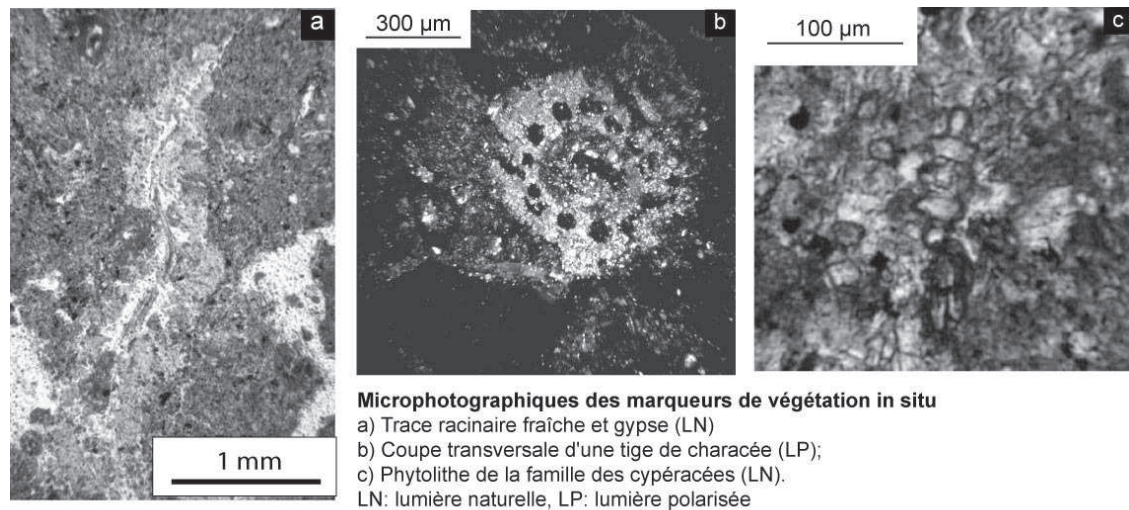


Fig. 177 : Marqueurs micromorphologiques de la dynamique végétale

3.3.2. *Couvert végétal semi-local ou en amont*

Quatre critères permettent de reconnaître la présence d'un couvert végétal non-local :

1) La matière organique est rarement préservée au cours d'un transport fluvial. En revanche, elle peut indiquer la présence d'un couvert végétal en amont (érosion des litières de la ripisylve) lorsqu'elle est observée sous forme de particules humiques de couleur noire, voire de microparticules amorphes transportées dans des agrégats de sols de couleur brun foncé.

2) La microstructure des dépôts ne présente pas de trace de développement végétal in situ. La porosité est simple et définie par une porosité d'entassement libre ou compact, avec d'occasionnels chenaux, des craquelures ou des vides cavitaires (structure massive, cavitaire, craquelée).

3) La présence d'oogone de characées, facilement reconnaissables par leur gangue en calcaire et l'oogone lui-même de couleur rouge et organique, peut résulter d'un transport fluvial à courte distance.

4) L'identification de phytolithes peut signifier la présence d'une couverture végétale sur les berges du réseau hydraulique (redéposition locale) ou dans la plaine alluviale amont. Les assemblages phytolithiques sont alors érodés avec la litière des sols et redistribués avec les alluvions.

3.3.3. Absence de couvert végétal local/en amont

L'étude des 4 sites référence de surface (Fig. 176, Tab. 37) met en relief 3 critères diagnostiques d'une absence de couvert végétal :

- 1) Lorsque le couvert végétal a disparu ou est totalement absent (SRMG, Maricopa Plant) seules des microparticules humiques noires sont identifiées. L'évolution de la forme de cette matière organique n'a pas d'impact sur sa concentration.
- 2) Les dépôts sont principalement caractérisés par une microstructure simple, massive à cavitaire. D'occasionnels chenaux peuvent être identifiés mais ils proviennent alors de dépôts sus-jacents.
- 3) Enfin, aucune trace de flore ni de faune n'est visible.

4. Signature micromorphologique de la culture et de l'irrigation des sols

4.1. Critères traditionnels de reconnaissance des sols agricoles et de la pratique de l'irrigation

L'étude micromorphologique de sols agricoles enterrés a conduit à l'identification de traits spécifiques liés aux pratiques agraires et à leur impact sur la compaction, l'érosion, l'activité biologique et la structure des sols. Dans notre travail, nous allons nous focaliser principalement sur la culture, les processus de défrichement et de fertilisation, étant donné l'absence de pastoralisme.

4.1.1. Signatures de l'irrigation des sols

4.1.1.1. Traits texturaux

L'irrigation résulte en la formation de traits texturaux et de microfabriques spécifiques (Macphail, 1992 ; Gebhardt, 1992, 1993, 1995 ; Courty, 1990). La comparaison de sols modernes cultivés et non cultivés (ex. Pang et al., 2006 ; Presley et al., 2004) a permis de mettre en évidence des grains plus arrondis, des vides de forme plus régulière, l'accumulation de sels solubles et l'apparition de revêtements argileux autour de la porosité. La présence de ces derniers est toutefois controversée car ils sont souvent absents de profils cultivés (ex : Davidson et Carter, 1998 ; Usai, 2001). Des croûtes superficielles de surface sont également observées, associées à une augmentation des traits texturaux grossiers jusqu'à 40 cm de profondeur (Courty, 1990). En effet, l'eau chargée en particules en suspension entraîne en profondeur des micro-débris organiques et des particules fines qui se déposent sous forme de colmatages de vides et de revêtements plus ou moins pelliculaires sur les parois des vides.

Leur distribution, morphologie et superposition sont liées à la vitesse de circulation de l'eau, contrôlée par l'état de surface du sol, du type de précipitation, de la porosité ainsi qu'au type de particules charriées.

4.1.1.2. Microstructure

En fonction de la texture des sols, les traits observés sont sensiblement différents (Courty, 1990). Lorsque les sols sont lourds et les zones faiblement drainées, l'irrigation conduit à une saturation des sols. L'impact de l'irrigation est observé dans la partie sommitale du profil, avec la présence de croûtes superficielles fragmentées et l'absence de traits texturaux à plus de 20 cm de profondeur. Cet engorgement limite l'activité biologique, la structure s'effondre, la porosité diminue et l'essentiel des particules en suspension sont déposées dans la partie supérieure du profil. En revanche, lorsque les sols sont moins denses, l'eau circule à travers la porosité ouverte, favorise l'activité biologique et l'agrégation des sols, et donc leur stabilité structurale.

4.1.1.3. Traits d'oxydation

L'irrigation saisonnière conduit à des processus d'oxydo-réduction dans les sols (voir chapitre III). En effet, la stagnation de l'eau en surface favorise les processus de réduction sur quelques centimètres, suivie par leur évaporation. Cette alternance saisonnière d'oxydation et de réduction conduit à une perte du fer par percolation ou par circulation latérale d'eau. Le sol est alors fragilisé, voire lessivé.

4.1.2. *Signature de l'exploitation agricole des sols*

Les sols exploités acquièrent une texture plus fine que les sols non cultivés grâce à l'apport de particules en suspension par les eaux d'irrigation (limonage). Malgré une bioturbation presque totale (Davidson et Carter, 1998), ils conservent des traces d'une exploitation antérieure caractérisée par la présence:

- 1- De fragments de croûte structurale et de déposition
- 2- Une concentration en matière organique plus élevée variable en fonction du contexte
- 3- Des traits texturaux et une matrice granostriée. La redistribution de l'argile autour des particules minérales résulte d'épisodes d'humectation/dessiccation répétés (Courty et al. 1989 ; Presley et al., 2004)
- 4- Présence de calcite aciculaire. Cette dernière est un indicateur de la décomposition de la matière organique dans des horizon Ap (Pang et al., 2006), mais également de l'humidité et de l'aération du sol (Becze-Deak et al., 1997)
- 5- Colmatages de vide. Leur présence est un marqueur potentiel de l'irrigation des sols (Courty, 1990).

Dans notre secteur (sites de Santan et de Vulcan), la pratique de l'amendement n'est pas attestée. L'absence d'animaux domestiques dans l'ensemble de l'Amérique du Nord rejette l'hypothèse de l'épandage de fumier jusqu'aux périodes historiques. La concentration en charbons dans les sols exploités est trop faible pour attester de la pratique du brûlis. La présence de fragments d'os épars réfute l'hypothèse d'un tel fertilisant. En revanche, des analyses physico-chimiques de sol (Purdue, en cours) montrent que les parcelles agricoles sont extrêmement riches en nitrates et en phosphates. Des analyses similaires dans les remplissages de canaux suggèrent que l'eau d'irrigation et les particules transportées en suspension étaient un fertilisant naturel.

L'hypothèse selon laquelle les sédiments de colmatage des structures hydrauliques aient pu être dispersés sur la parcelle agricole est également posée (Purdue en cours, Miles et al., 2010).

4.2. Référentiel micromorphologique de sols cultivés historiques et modernes

4.2.1. *Caractéristiques sédimentaires et micromorphologiques de surface*

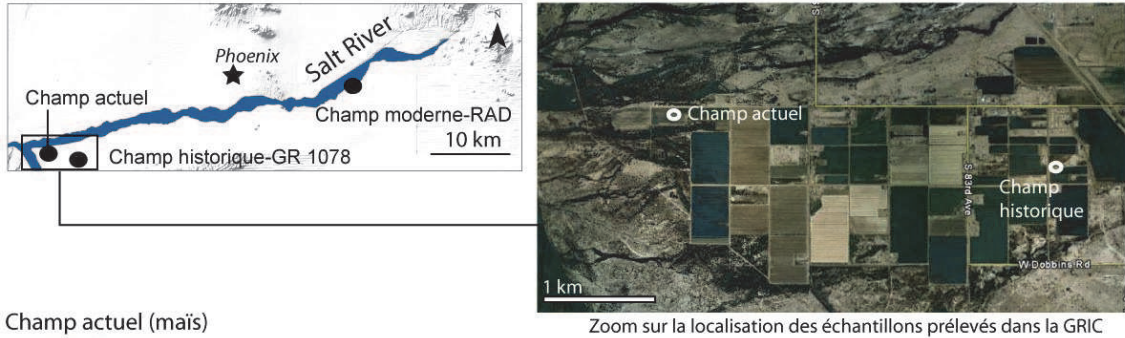
Trois échantillons micromorphologiques ont été prélevés dans des parcelles agricoles modernes (Salt River, site RAD), historiques et actuelles (Gila River Indian Community) (Fig. 178). Ces échantillons, prélevés sur la terrasse Lehi, n'appartiennent pas aux mêmes positions morpho-pédologiques ni aux mêmes types de sol. Le long de la Salt River, les champs exploités sur la terrasse Lehi/T'1 sont rares et les agriculteurs ont refusé les prélèvements de sols. Les sols cultivés historiques et modernes ont pour la plupart été vendus à des promoteurs immobiliers et ont disparu. Dans la GRIC, l'échantillonnage est opportuniste et autorisé uniquement en collaboration avec la GRIC-CRMP lors de l'ouverture d'un sondage archéologique.

Ainsi, les champs historiques et modernes étudiés ont été alimentés par la Salt River et appartiennent respectivement à la formation Gila-Estrella-Avondale (US Department of Agriculture, 1972) qui sont des fluviosols (Référentiel Pédologique, 2008), et Yahana-Indio (US Department of Agriculture, 1991) qui sont des salisols (Référentiel Pédologique, 2008). Le champ moderne, échantillonné dans la GRIC, est probablement irrigué par les eaux de la Colorado River, et appartient également à la formation Yahana-Indio (US Department of Agriculture, 1991). Seul un échantillon a été prélevé par unité stratigraphique, soit environ 15 cm d'information, excepté pour le champ moderne où environ 1 m d'information est disponible. Les champs actuels et modernes ont été échantillonnés dès la surface, mais le prélèvement dans la parcelle historique a été réalisé à environ 30 cm de profondeur. Les espèces cultivées dans les parcelles historiques et modernes ne sont pas connues, mais du maïs était cultivé dans le champ actuel. La durée d'exploitation de ces sols n'est pas connue.

4.2.1.1. **Microstructure**

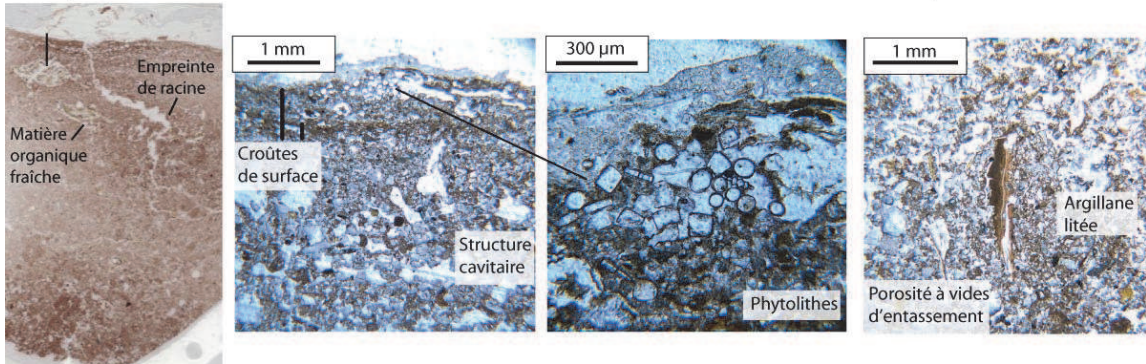
Les sédiments contiennent un mélange de sable, limon et argile, avec des grains de toute forme et taille (Tab. 38). La microstructure est le plus souvent micro-agrégée suite à l'activité biologique et est plus compacte dans le champ actuel, suite au passage des engins agricoles, où une structure cavitaire a été observée sous la surface. Elle traduit un assèchement de surface et la préservation de conditions humides sous la croûte, où l'eau et l'air sont piégés (Charles et al., 1985; Courty et al., 1989).

Localisation de l'échantonnage

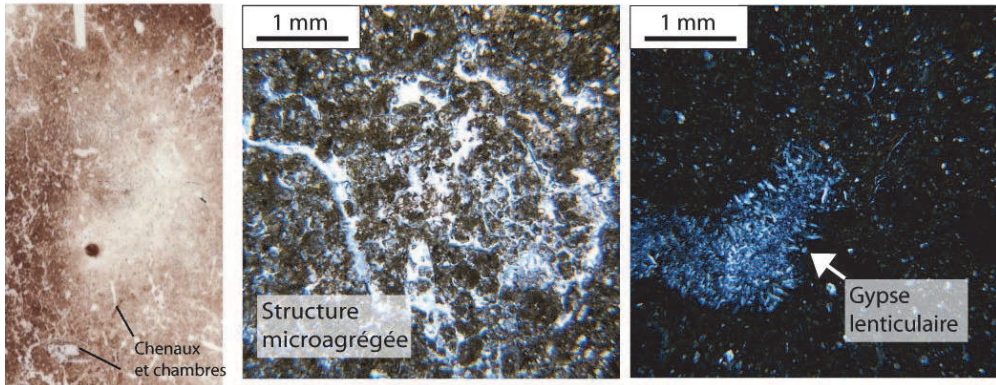


Zoom sur la localisation des échantillons prélevés dans la GRIC

Champ actuel (maïs)



Champ historique



Champ moderne

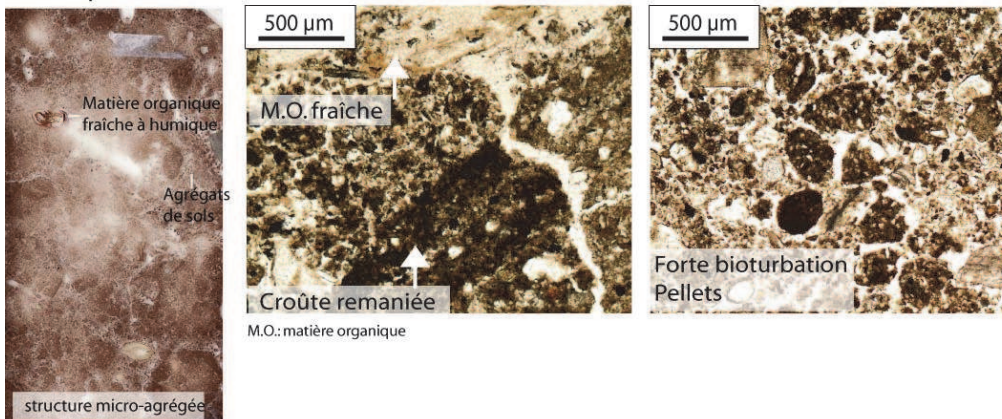


Fig. 178 : Microphotographie des principales caractéristiques des sols cultivés et irrigués historiques, modernes et actuels

		Gila River Indian Community, Gila River		Salt River
		Champ actuel, 04/2008 Alimentation par la Colorado River	Champ historique, 06/2007 Alimentation par la Salt	Champ moderne, 12/2005 Alimentation par la Salt
Facies hydrosédimentaire		4	7	7
Traits biologiques	% bioturbation	> 10 %	> 10 %	> 10 %
	Microstructure	prismatique, compacte à grumeleuse	prismatique à grumeleuse	grumeleuse
	% matière organique	30	2	5
	Forme matière organique	fraîche	en microparticules	fraîche
	Trace de végétation in situ	oui	non	oui
Autres	coquilles de gastéropodes et phytolithes	coquilles de gastéropodes	/	
Traits d'oxydation, carbonatations et salinité	% traits carbonatés	<0.5%	5-15 %	1-5%
	Type traits carbonatés	<0.5%	imprégnations et revêtements, micrite	micrite en revêtements
	% traits ferrugineux	<0.5%	1-5%	1-5%
	Type traits ferrugineux	<0.5%	imprégnations	imprégnations
	Gypse	non	oui	non
Traits texturaux	Revêtements gravitaires	2-5%, argiles brun-clair	<0.5%	<0.5%
	Revêtements totaux	<0.5%	<0.5%	0,5-2%, argiles organiques brunes à faible biréfringence
	Revêtements lités	<0.5%	<0.5%	<0.5%
	Revêtements périgranulaires	70% de particules revêtues, marron orangé à orangé	50% de particules revêtues, marron et orange	50% de particules revêtues, marron et orange
	Colmatage de vides	oui	oui	oui
	Intercalation (% de la matrice)	2-5%, argiles brunes +/- organiques, faible biréfringence	2-5%, argiles organiques brunes poussiéreuses, faible biréfringence	0,5-2%, argiles organiques brunes poussiéreuses, faible biréfringence
	Croûte de surface	Oui, préservée	Non	Fragments remaniés
Régime des feux	% charbons	3	2	4
	Forme des charbons	arrondis	arrondis	semi-allongés
	Taille des charbons (μm)	53	27	83

Tab. 38 : Caractéristiques micromorphologiques des champs historiques, modernes et actuels

4.2.1.2. Composants biologiques

Les champs historiques et modernes sont très pauvres en matière organique à l'opposé du champ actuel qui enregistre probablement des amendements réguliers (Tab. 38). Par ailleurs, plus la parcelle est ancienne, plus le taux de matière organique diminue sous l'effet de la faune dans le sol. En effet, le paléosol historique ne contient que des microparticules de matière organique (i.e. < 20 μm). Les traces d'activité biologique sont relativement bien préservées comme le suggère le degré de bioturbation et la présence de coquilles de gastéropodes dans les champs modernes et historiques.

Les phytolithes n'ont été observés que dans le champ actuel (mauvaise préservation dans les formations pédologiques plus anciennes, peut-être pour des raisons de pH du sol). Les charbons identifiés sont de petite taille (< 100 μm), et leur faible concentration ne permet pas de poser l'hypothèse de brûlis in situ.

4.2.1.3. Traits cryptocristallins

Les traits carbonatés, d'oxydo-réduction et salins sont inexistant dans le champ actuel, rares dans le champ moderne et nettement plus nombreux dans le champ historique (Tab. 38). En effet, ce dernier est riche en gypse lenticulaire (voir chapitre IV), peut-être en rapport avec sa position pédo-géomorphologique dans les basses plaines à la confluence Salt/Gila (Fig. 178). Sa présence signe des phases de stagnation d'eau et de conditions chaudes, liées probablement à une pratique d'irrigation par inondation. La présence simultanée d'imprégnations ferrugineuses et de carbonates secondaires suggère des cycles d'humectation et de dessiccation fréquents, que la structure prismatique du sol confirme. Toutefois, la formation des traits crypto-cristallins peut résulter d'épisodes de percolation en provenance de l'horizon supérieur car l'échantillonnage a été effectué en profondeur (30 cm). Dans le champ moderne, quelques revêtements micritiques et des imprégnations ferrugineuses ont été observées en surface. Leur formation peut résulter d'épisodes temporaires de circulation latérale et verticale d'eau.

4.2.1.4. Traits texturaux

Dans le champ historique, les traits texturaux ont entièrement disparu probablement sous l'effet d'une forte bioturbation. Seules les intercalations sont préservées. Ces dernières sont de texture fine, de couleur brune, et riches en microparticules organiques. Dans le champ moderne, d'occasionnels revêtements jouxtent des zones bioturbées dans lesquelles de rares intercalations ont été mises en évidence. La présence de revêtements simples poussiéreux résulte probablement d'une arrivée d'eau violente sur un sol asséché au couvert végétal discontinu.

Dans le champ actuel, des intercalations litées et des revêtements plus ou moins continus ont été mis au jour à environ 10 cm de profondeur. L'arrivée régulière d'eau d'irrigation dépose les particules en suspension qu'elle charrie avec une compétence initialement élevée puis régulièrement décroissante (Courty, 1990). Le litage de ces particules résulte d'applications d'eau d'irrigation successives. Sous la surface, les revêtements sont inexistant suite à l'activité biologique qui modifie fortement la porosité et conduit à son effondrement. Au dessus de cette zone bioturbée, deux croûtes de battance ont été distinguées (Fig. 178). La première est composée de limons argileux grossiers d'une épaisseur de presque 200 μm . Elle est surmontée par une couche de phytolithes mêlés à des sédiments. Ces derniers sont protégés par une nouvelle croûte pédologique de surface d'une épaisseur d'environ 50 μm , de texture identique.

La présence de ces deux croûtes peut traduire des phases d'irrigation rapprochées dans le temps, suivies par l'assèchement de la surface du champ, sans labour entre ces deux épisodes. La croûte sous-jacente peut également correspondre à la sédimentation de particules en suspension dans un milieu saturé en eau, à la suite à l'application des eaux d'irrigation.

4.2.1.5. **Remarque sur l'évolution en profondeur des traits texturaux, organiques et carbonatés.**

L'analyse de séquences sédimentaires en contexte alluvial, continuellement exploitées et cultivées depuis plusieurs millénaires, ne nous permet pas d'établir un modèle d'évolution et de redistribution des traits crypto-cristallins et texturaux. En effet, elles présentent des profils de carbonatation sans différenciation verticale. Leur étude permet toutefois d'établir des phases préférentielles d'exploitation agricole et des cycles probables d'apport d'eau d'irrigation.

5. **Conclusion**

Ce troisième chapitre nous a permis d'établir une typologie des traits pédologiques et écologiques dans les remplissages de canaux et les formations alluviales. La diversité des traits texturaux nous a incités à créer statistiquement un *Facies des traits texturaux* qui sera exploité et interprété lors de l'analyse des résultats.

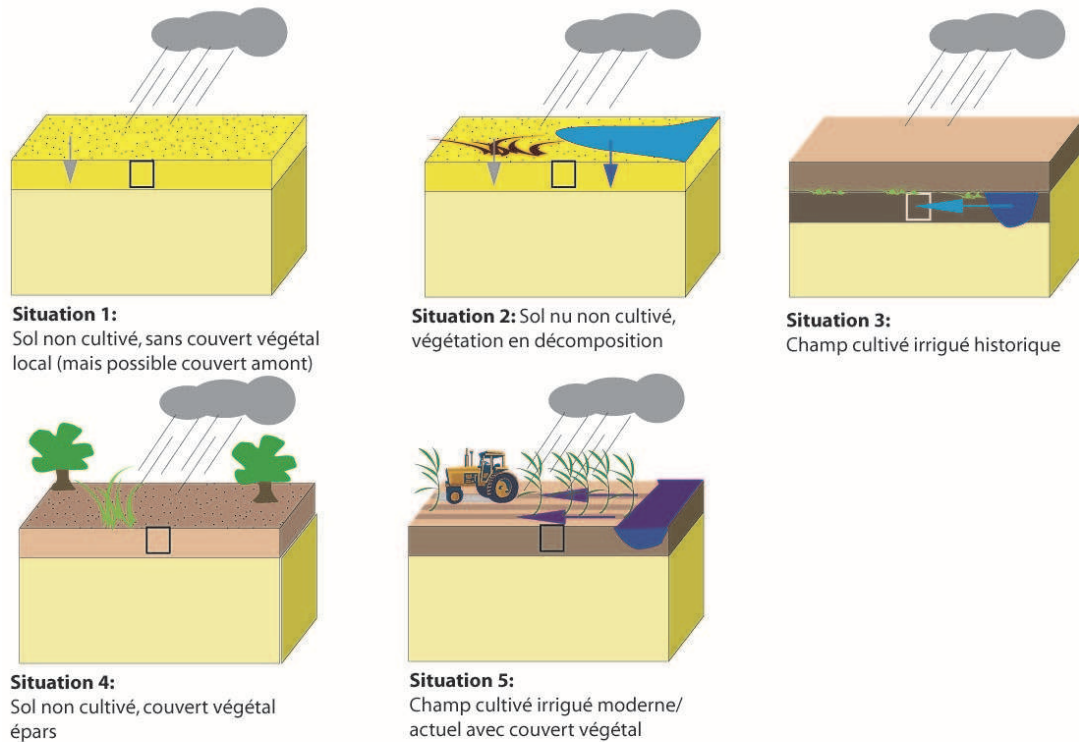
5.1. **Synthèse des résultats obtenus dans les formations alluviales de référence (sols cultivés/non cultivés)**

Grâce à l'étude d'échantillons de référence de sols cultivés/non cultivés, avec ou sans végétation, nous avons identifié les signatures micromorphologiques d'un certain nombre de processus environnementaux et anthropiques. La Fig. 179 synthétise ces résultats.

La signature micromorphologique de sols cultivés s'exprime par la présence de gypse, de revêtements laminés autour de la porosité, d'une masse basale granostriée, des fragments de croûte de battance, d'une structure microagrégée par endroits, cavitaire sous les croûtes de battance et également subangulaire. Ces critères diagnostiques ne sont pas toujours préservés, notamment du fait des processus post-dépositionnels qui détruisent cette information agraire originale. C'est le cas des processus de compaction et de bioturbation (Carter et Davidson, 1998).

L'analyse des horizons non cultivés échantillonnés en surface a mis en évidence le lien entre la végétation de surface, une microstructure bioturbée sur une faible épaisseur, la présence de coquilles de gastéropodes, l'altération rapide et la disparition de la matière organique à faible profondeur, l'absence de croûte pédologique, et la présence de revêtements et d'intercalations de couleur orangée sous l'effet des pluies et de la circulation verticale d'eau. Les microstructures entièrement bioturbées effacent les traits texturaux. A l'opposé, les sols dénudés possèdent des croûtes pédologiques et de rares traits texturaux poussiéreux à faible profondeur. Lorsqu'ils sont présents, les traits texturaux sont de forme simple, rarement lités, faiblement triés et le plus souvent de couleur brune organique poussiéreuse.

Leur formation résulte de l'impact des pluies sur des sols asséchés ou d'un ruissellement de surface associé au transport de particules en suspension lors des crues (Courty, 1990). Pour distinguer une origine de l'autre, il s'agira de corréler l'information aux rythmes d'accrétion sédimentaires.



SITUATION	Microstructure	Matière organique		Facies traits Texturaux	Référentiel mise en surface
		Type	Teneur		
1	Particulaire	Absente, humique à particulaire	0-1	Revêtements irréguliers et intercalations (facies 2A ET 1)	SRMG, Maricopa Plant
2	Massive-cavitaire	Humique/ agrégats	1-2	Revêtements gravitaires, intercalations, croûtes, quelques revêtements irréguliers et périgranulaires (4A, 3B, 2B et 1)	
3	Prismatique	Humique/ Particulaire	1-2	Revêtements gravitaires, lités, intercalations (4A, 3A et 1)	Champ historique (GRIC)
4	Chenaux-en éponge	Humique/ Particulaire	3	Revêtements lités, gravitaires, irréguliers, croûtes, revêtements périgranulaires (classe 2B et 5 et 1)	Gric F 366
5	Grumeleuse-en miette dans des agrégats de forme prismatique	Fraîche	1-3	Revêtements gravitaires et traces d'intercalations (4B et 1) (argile hyaline quand non sol cultivé, brun et organique dans sol cultivé)	Gila Florence, Champ moderne et actuel

Fig. 179 : Synthèse et interaction des traits texturaux et écologiques identifiés en surface des formations cultivées et non cultivées

5.2. Dans les remplissages de canaux

Nous considérons que les traits pédologiques et écologiques caractéristiques d'une mise en surface (sol non cultivé) et du développement d'un couvert végétal sont identiques dans les contextes de plaine alluviale et dans les canaux d'irrigation. En complément, nous avons présentés les assemblages caractéristiques d'une mise en surface de durée variable, de même que la présence de végétation, locale à régionale. Toutefois, à l'opposé des formations alluviales, une partie des traits identifiés dans les canaux est imputable à la circulation de l'eau et non pas à une évolution pédologique.

Les sédiments de texture fine et à structure subangulaire ou partiellement bioturbée présentent des traits texturaux diversifiés dans tous les types de vides (cavitaire, chenaux, etc..) et autour des grains.

Leur présence résulte d'épisode de processus pédologiques associés à l'impact des pluies sur les sols, mais la possibilité d'une accrétion simultanée lente doit également être prise en considération. Par conséquent, l'interprétation des marqueurs sera propre à chaque site en fonction du contexte de sédimentation.

Au sein de chaque site étudié seront donc présentés indépendamment : le contexte de dépôts, la microstructure, les classes de traits texturaux (Fig. 175 et Annexe 4) et la matière organique (type et teneur).

L'identification de certains traits pédologiques et écologiques a de fortes implications sur la compréhension des systèmes d'irrigation. La présence de matière organique fraîche, qui traduit un développement de la végétation in situ, suppose un ralentissement des débits liquides, l'accumulation accélérée de matière fine, un espacement du temps entre deux épisodes de dépôts sédimentaires, voire même un manque d'entretien. Les traces de bioturbation modérée suggèrent des phases d'exondation temporaires qui impliquent une sédimentation saisonnière ou un arrêt de la sédimentation. Les bioturbations fortes, malgré l'absence de matière organique, supposent un arrêt complet de la sédimentation sous des conditions toujours humides. Cette ambiance est confirmée par la présence de croûtes pédologiques structurales qui indiquent des phases d'exondation et des épisodes de pluies au sein du canal asséché. De l'absence d'eau dans le canal découle une diminution de l'apport d'eau dans les champs, favorisant donc une compétition accrue pour l'eau au sein des communautés d'agriculteurs.

Chapitre 4

Caractérisation et signature pédoclimatique des sédiments

1. Introduction	378
2. Typologie et dynamique des traits cristallins et crypto-cristallins observés	378
3. La microstructure comme indicateur pédoclimatique	389
4. Les charbons : marqueurs climatiques ou anthropiques ?	390
4.1. Transport et érosion	390
4.2. Corrélation avec les données pédo-climatiques	394
5. Limites dans l'interprétation du pédoclimat	395
6. Conclusion et proposition de classification	396

1. Introduction

Le climat du sol, encore appelé le pédoclimat (Bonneau, 1979 : Bonneau et Souchier, 1994), est fonction:

- De la température, contrôlée par le climat atmosphérique,
- Du régime hydrique et de la teneur en eau dans le sol,
- De la richesse en oxygène,
- De la teneur en pression partielle en CO₂,

Le *pédoclimat* a été reconstruit ici grâce à l'étude de trois types de cristaux et traits microcristallins : les sels, les carbonates secondaires et le fer. Interpréter leur présence/absence est une tâche délicate, d'autant plus lorsque l'objet d'étude correspond à une structure faiblement drainée. Dans des perspectives de recherche future, il sera nécessaire de construire des référentiels précis sur la formation et la dissolution de ces traits. Malgré cela, l'observation des microlamines dans les remplissages de fossés et en contexte naturel de plaine d'inondation a montré une distinction nette entre les cristaux observés, ce qui nous a poussés à garder ces marqueurs. Avant de présenter des traits diagnostiques de processus identifiés, nous avons souhaité présenter brièvement l'état de la recherche en micromorphologie sur l'étude de ces traits.

2. Typologie et dynamique des traits cristallins et crypto-cristallins observés

2.1.1. Les traits d'oxydo-réduction

2.1.1.1. **Processus physico-chimiques et état de la recherche sur les traits d'accumulation ferrugineux**

L'état d'oxydo-réduction des sols est contrôlé par le système fer ferreux/fer ferrique. La réduction du fer (mobilisation) dépend de la teneur en oxygène dans l'eau et donc de la durée de la saturation et de la vitesse de renouvellement de l'eau (Vizier, 1988). Elle est également influencée par la température, le pH, la teneur en matière organique dissoute (qui favorise le pouvoir réducteur du fer) et la texture du sol. L'oxydation (immobilisation du fer) résulte de l'oxygénation du sol suite à l'évaporation ou le drainage de l'excès d'eau (Aguilar et al., 2003, Costantini et al., 2005). L'immobilisation du fer et sa localisation dépend de la rapidité du dessèchement, de la température (Baize et al., 2009), mais également de la présence de substances organiques décomposables. Le fer et le manganèse, précipités sous forme d'oxydes, sont généralement insolubles lorsque les sols sont bien aérés, excepté dans les sols acides.

Il existe cinq stades de développement de ces traits ferrugineux (Tab. 39) (Dorronsoro et al., 1996) mais notre étude n'en a mis que 3 en évidence.

Stade 0 : Les sols sont saturés en eau pendant quelques jours et sont principalement soumis à des processus d'oxydation qui s'expriment par une matrice brun rouge.

Stade 1 : Lorsque les sols sont saturés en eau pendant plusieurs jours, l'intérieur des agrégats reste humide. Le fer ou le manganèse y est réduit et mobilisé.

Lorsque le sol s'assèche, la solution migre vers des pores plus larges, aérés et oxydés, au niveau desquels elle s'oxyde en revêtements ferro-manganiques brun rouge à noirs.

Stade 2 : La saturation du sol s'effectue pendant quelques jours, mais cette situation se répète plusieurs fois au cours de l'année et le sol reste humide pendant plusieurs mois. Par conséquent, les micropores restent saturés en eau. Au cours de la période sèche, le fer et le manganèse migrent à la surface des agrégats où ils seront oxydés. Les zones centrales des agrégats sont alors lessivées et plus claires.

	Stade 0	Stade 1	Stade 2
Degré d'hydromorphisme	aucun	naissant	faible
Macromorphologie			
Couleur	brun/rouge	brun/rouge	brun/jaune
Présence de taches	/	éparse	occasionnelles
Couleur des taches	/	noires	claires
Micromorphologie			
Couleur de la masse basale	brun/rouge	brun/rouge	jaune
Accumulation	/	Mn	Fe/Mn
Déplétion	/	rare	occasionnelles
Régime hydrologique			
Saturation	faible (1/2 jours)	quelques jours	quelques mois
Humidité	quelques semaines	quelques mois	quelques mois
Régime physico-chimique			
Oxydation	intense	intense	intense
Réduction	/	naissante	faible

Tab. 39 : Développement des traits ferrugineux et discrimination en lame mince

La mise en relation de ces degrés d'hydromorphie avec les paléotracés observés dans les canaux doit nous permettre de restituer et reconstruire les conditions d'humidité dans les sédiments et les phases de stagnation d'eau dans les canaux.

2.1.1.2. Typologie des traits d'oxydo-réduction observés

Les traits associés aux processus de réduction sont très rares, voire inexistant dans notre zone d'étude. Les traits d'oxydation et d'accumulation sont les plus fréquents et diversifiés :

- Les nodules et taches mouchetées (Fig. 180a)

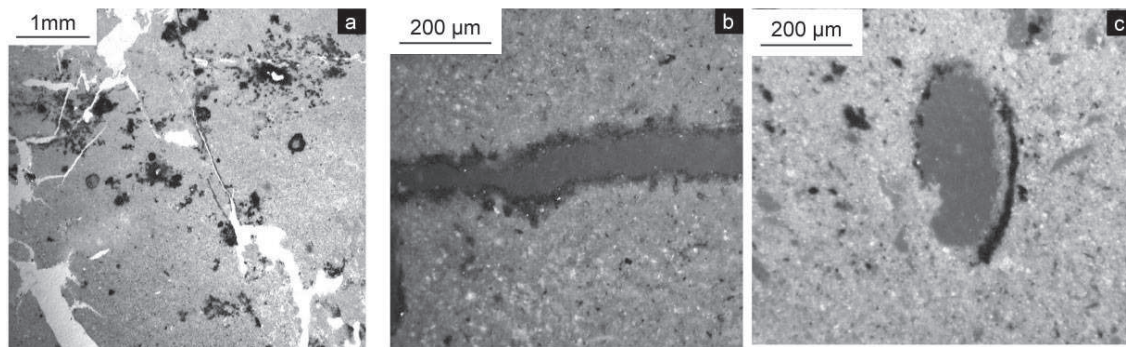
Les nodules sont de couleur noire (nodules de manganèse) ou orangés à jaunes (nodules de fer) et sont isotopiques sous le microscope. Ils sont observés principalement sous la forme d'imprégnation à limites irrégulières et diffuses qui attestent d'une formation in situ.

- Les revêtements (Fig. 180b), hyporevêtements (Fig. 180a) et quasi-revêtements (Fig. 180c).

Principalement ferrugineux et de couleur orangée, les revêtements correspondent à l'accumulation de fer sur les surfaces de la porosité ou des agrégats de sols.

Ils sont souvent observés en association avec des particules fines argileuses. Les hyporevêtements sont des accumulations principalement ferrugineuses dans la matrice du sol, à une faible distance de la surface. Enfin, les quasirevêtements correspondent à des oxydations dans la matrice.

Nous avons caractérisé leur forme et leur type dans l'ensemble des US étudiées.



Microphotographies des marqueurs pédoclimatiques: a) hyporevêtements et imprégnations ferro-manganiques dans la masse basale (LI) ; b) revêtement ferro-mangannique autour de la porosité (LI); c) quasirevêtement autour de la porosité (LN)
LP: lumière polarisée; LI: lumière incidente

Fig. 180: Marqueurs micromorphologiques de la dynamique pédo-climatique (traits d'oxydation)

2.1.1.3. Dynamique des processus d'oxydo-réduction

Afin de comprendre la dynamique de formation des traits d'oxydo-réduction dans nos dépôts, nous avons estimé l'influence de certains marqueurs : la texture des dépôts, le mode de suspension et la teneur/type de matière organique. Nous avons également comparé les traits texturaux et ferrugineux identifiés.

- *Influence de la texture des sédiments sur la teneur et le type de traits d'oxydation*

L'absence de traits d'oxydation est liée à la texture grossière des sédiments (limon sableux, sable limoneux, sable très fin) à faible capacité de rétention d'eau. A l'opposé, les traits d'oxydation bien imprégnés comme les nodules dominant dans les textures fines, comme les argiles ou les limons-argileux qui ont la propriété de stocker l'eau dans la microporosité. Des études récentes, que notre travail complète, se sont penchées sur la variabilité dans la forme des traits ferrugineux et leur signification en ce qui concerne les rythmes d'évaporation (Aguilar et al., 2003 ; Costantini et al., 2005). Plus la période de saturation est longue (favorisée dans les sédiments fins), plus le fer et le manganèse deviennent mobiles ; plus la période d'assèchement est intense, plus l'accumulation est marquée. Les nodules se forment lors d'une évaporation complète et durable. Les revêtements, hyporevêtements, et nodules en quantité moyenne (entre 1 et 15%) sont présents dans toutes les textures. Les hyporevêtements/quasirevêtements sont identifiés lors d'une sécheresse brusque et intense au cours de laquelle l'eau est aspirée par capillarité, mais l'évaporation reste incomplète (Aguilar et al., 2003 ; Costantini et al.,

2005 ; Dorronsoro et al., 1996). Les revêtements indiquent des phénomènes de percolation et/ou d'engorgement, suivis d'un assèchement progressif mais incomplet.

- Influence du type de transport des sédiments sur la concentration et le type de traits ferrugineux

L'analyse de la teneur et du type de traits d'oxydation avec les caractéristiques de l'écoulement a mis en évidence que les fortes concentrations en traits d'oxydation sont observées dans les dépôts granoclassés au sein desquels un facies de décantation est bien exprimé. Ces dépôts de texture plus fine ont une capacité de rétention en eau importante, ce qui favorise la mobilité du fer puis son oxydation au cours d'épisodes d'assèchements.

Les hyporevêtements ferrugineux sont également observés dans les facies à suspension uniforme. Ce mode de transport est caractérisé par une sédimentation brutale (type crue-éclair) avec une montée et une chute du niveau de l'eau rapide. L'humidité des dépôts est momentanée et leur évaporation favorise la formation des hyporevêtements (Aguilar et al., 2003 ; Costantini et al., 2005 ; Dorronsoro et al., 1996).

- Influence de la teneur et du type de matière organique sur la concentration et le type de traits d'oxydation

L'analyse de ces 4 variables a mis en évidence que :

- Les traits ferrugineux sont rares lorsque la teneur en matière organique est faible, excepté dans les sédiments de texture fine (argileuse) et à structure polyédrique dans lesquels la matière organique et le fer sont observés ponctuellement en forte concentration. La capacité de rétention en eau des argiles et limon argileux peut favoriser l'action de bactéries sidérophiles qui consomment la matière organique et produisent du fer en milieu anaérobie.
- La matière organique présente en quantité faible à moyenne, sous forme humique ou en agrégats est associée à des traits d'oxydation de tous types, entre 1 et 15%.
- La matière organique préservée est associée à des nodules ferrugineux en quantité variable.

- Remarque sur la relation entre intercalations et traits d'hydromorphie

Afin de tester l'hypothèse selon laquelle les intercalations se forment dans les milieux saturés en eau (Gebhardt, 1988), nous avons estimé la relation entre la présence et la fréquence des intercalations et la présence/type des traits d'oxydation (Fig. 181).

9 % des US étudiées (soit 57 US sur un total de n= 607 US) contiennent plus de 5% d'intercalations dans leur matrice. 63% de ces 57 US présentent des traits d'oxydation, et 35% d'entre elles en contiennent plus de 5%, de type hyporevêtements et nodule exclusivement, en proportions égales. La présence d'un trait relativement à l'autre doit être fonction de la texture des dépôts et de l'intensité de l'évaporation. Ces traits ont été observés presque exclusivement dans les remplissages de canaux.

Il semblerait donc y avoir un lien entre la présence des intercalations et le % de traits d'hydromorphie, mais ces observations ne sont pas généralisables, dans plus d'un tiers des cas.

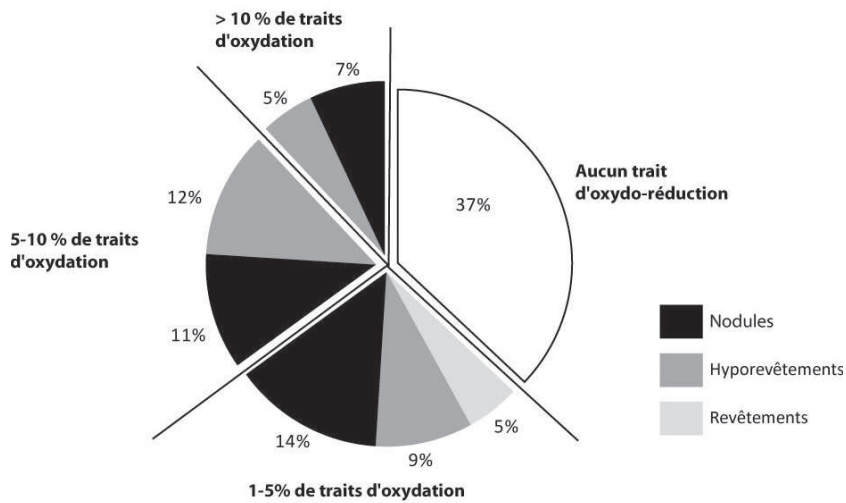


Fig. 181 : Type et pourcentage de traits d'oxydation dans les faciès contenant plus de 5% d'intercalations, soit n=57 US sur un total de 607 US étudiées (par rapport à la superficie totale de la matrice)

2.1.2. Les traits d'accumulation carbonatés

Les processus de dissolution et de précipitation des carbonates dépendent fortement de la roche mère, du climat et de la végétation (Wright, 1987). Les carbonates se dissolvent sous des conditions humides et une pression partielle en CO₂ élevée et précipitent lorsque le taux d'humidité décroît (Wang et Anderson, 1998). Les cristaux de carbonates sont de fréquence et de taille variable ; de la micrite <5 µm à la sparite > 20 µm (Stoops, 2003). L'ensemble des US ne contiennent qu'une faible concentration en carbonates (<1 à 5%), et les cristaux principalement identifiés sont de type micritique (45%) (Fig. 182).

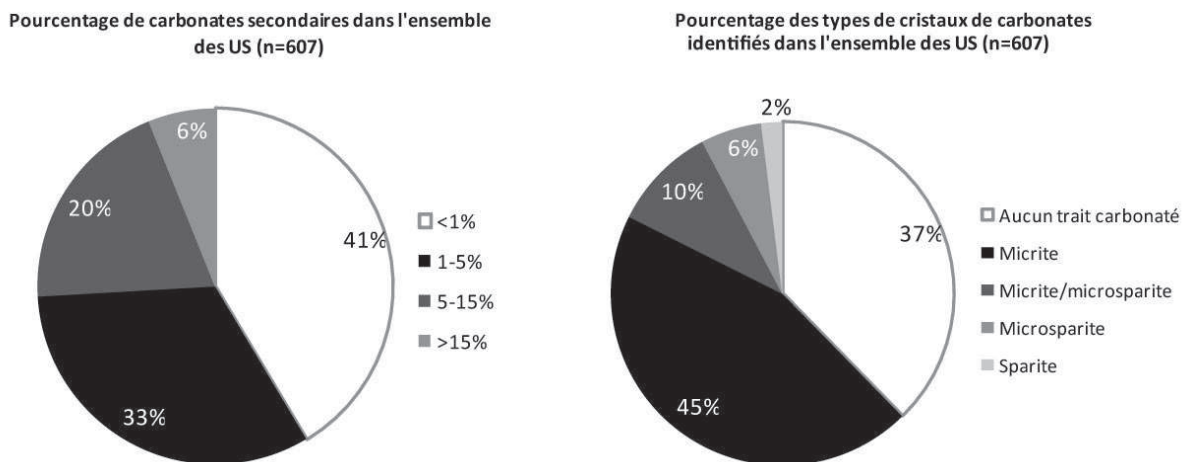


Fig. 182 : Pourcentages et types de cristaux de carbonates secondaires identifiés dans l'ensemble des US étudiées (n=607)

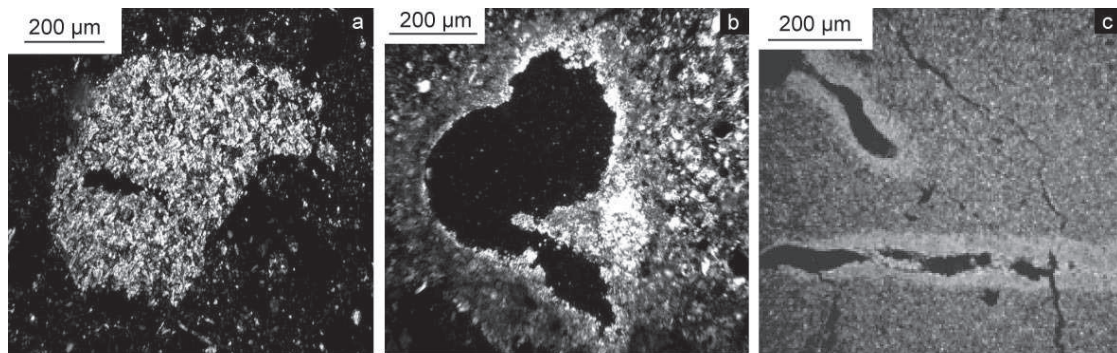
2.1.2.1. Typologie des traits carbonatés secondaires observés

Les carbonates secondaires sont observés sous différentes formes dans les sols: en revêtements autour et le long de la porosité, en hyporevêtements autour des racines, sous forme de nodules exogènes et de nodules in situ.

- *Les nodules* in situ sont la forme la plus commune. Leur taille et morphologie dépendent fortement des conditions d'hydromorphie, de la concentration en sels, des processus de dissolution-recristallisation (Sehgal et Stoop, 1972), de la texture des sols (Wieder et Yaalon, 1982), de leur structure et stabilité. Leurs limites sont diffuses et ils sont composés de micrite, microsparite, et plus rarement de sparite. Ils ne doivent pas être confondus avec des nodules exogènes dont les limites externes sont mieux marquées (Fig. 183a).

- *Les revêtements* carbonatés couvrent les parois des vides (le plus fréquent), des grains ou des agrégats (Fig. 183b). Ils n'appartiennent pas à la matrice sédimentaire. Ils sont de texture micritique le plus souvent, microparitique à sparitique (rarement observés).

- *Les hyporevêtements* carbonatés correspondent à l'imprégnation de la masse basale directement à la surface des pores, des grains ou des agrégats. Ils sont bien plus fréquents que les revêtements et presque exclusivement composés de micrite (Fig. 183c).



Microphotographies des marqueurs pédo-climatiques. a) nodule microsparitique à sparitique exogène (LP); b) revêtement microsparitique autour de la porosité (LP); c) hyporevêtements micritiques autour de la porosité racinaire (LP). LP: Lumière Polarisée

Fig. 183 : Marqueurs micromorphologiques de la dynamique pédo-climatique (traits carbonatés)

2.1.2.2. Dynamique des processus de carbonatation secondaire

- *Etat de la recherche sur la formation des traits carbonatés secondaires (type et taille)*

La formation des revêtements peut-être associée à des épisodes de percolation d'eau dans la porosité, suivie par son évaporation. Si le matériel parental ne contribue pas à la formation de ces carbonates, alors leur précipitation indique une évolution dans la quantité et la chimie de l'eau qui percole à travers les pores, indiquant des conditions plus sèches (Becze-Deak et al., 1997).

Les hyporevêtements résultent de la précipitation rapide de CaCO_3 dans la masse adjacente aux pores suite à l'absorption capillaire d'eau par les racines (Jaillard et al., 1991 ; Herrero et al., 1992 ; Wieder et Yaalon, 1982).

Ils peuvent également se former suite à l'évaporation d'eau riche en Ca^{2+} qui percole à travers les pores et pénètre dans la matrice du sol (Seghal et Stoops, 1972 ; Courty et Fedoroff, 1985 ; Courty, 1990 ; Kemp, 1995). Il est également possible que ces hyporevêtements se forment suite à des cycles d'humectation-dessiccation (Thompson et al., 1991).

Enfin, la formation des nodules carbonatés in situ semble dans certains cas exprimer la saisonnalité de l'humidité (Rabenhorst et al., 1984) et une évaporation rapide après saturation en eau (Folk, 1974).

En ce qui concerne la taille des cristaux de carbonates, elle semble refléter les rythmes de cristallisation (Bathurst, 1971 ; Folk, 1974 ; Bal, 1975 ; Courty, 1990 ; Dorronsoro et al., 1996) et les conditions du milieu (sparite=milieu phréatique ; micrite=milieu vasode) (Hall et al., 2004). Les cristaux de grande taille, qui ont le temps de se former, impliquent une vitesse d'évaporation réduite, à l'opposé des cristaux de plus petite taille. Il semblerait toutefois que la texture des sols ait un fort impact sur le type de cristaux (Wieder et Yaalon, 1974 ; 1978; Elbersen, 1982).

Nous avons testé la validité de ces hypothèses en analysant l'influence de certains marqueurs sur la formation des traits carbonatés secondaires.

- Relation entre les traits carbonatés secondaires et les traits d'oxydation

Nous avons cherché à comprendre si la dynamique de précipitation des carbonates est liée à l'humidité des sols et avons mis en évidence que :

- 20 % des unités stratigraphiques sont caractérisées par l'absence de tout trait cristallin, ferrugineux ou carbonaté.
- 20% des US ne présentent aucun trait d'oxydation, mais entre 10 et 20 % de carbonates secondaires micritiques. A l'opposé, 20 % des US possèdent entre 10 et 30 % d'hyporevêtements et nodules ferrugineux et aucun trait carbonaté secondaire.
- 40% des sédiments contiennent des traits carbonatés et des traits ferrugineux. Ainsi, les hyporevêtements et nodules ferrugineux en quantité moyenne (10-20%) sont observés simultanément à la précipitation de 30 % de carbonates secondaires, micritiques à sparitiques. Les sédiments présentant une moyenne à forte concentration en revêtements et nodules ferrugineux (> 10%) contiennent entre 10 et 20% de carbonates de tout type.

Il est alors possible d'estimer que dans presque la moitié des cas, la distribution des carbonates secondaires est liée au degré d'hydromorphie des sols. Dans le reste des cas, il est possible que leur présence soit liée à des paramètres biochimiques ou à leur redistribution verticale.

- Influence de la texture des sédiments sur la taille et la fréquence des carbonatations secondaires

Expérimentation

Une expérimentation en laboratoire a été conduite en analysant le degré de cristallisation des carbonates en fonction de la texture et de la température.

Cette expérimentation ne reproduit pas les conditions de volume, de circulation hydrique et de pression propre aux sols. Elle a pour vocation de comprendre les processus physico-chimiques en jeu.

Nous avons isolé 10 g d'argile, de limon et de sable, que nous avons mélangés à une solution carbonatée préparée en laboratoire. Les trois échantillons placés sur une lame mince ont été mis à l'étuve à 35°C.

Trois échantillons similaires ont été mis au réfrigérateur (6°C) et trois autres échantillons ont été laissés à l'air libre (environ 20°C) jusqu'à évaporation complète.

Les résultats obtenus mettent en évidence la très faible cristallisation des carbonates (Fig. 184). Toutefois leur observation au microscope optique a permis de mettre en évidence plusieurs points :

- L'évaporation à chaud (35°C) montre des cristaux mieux définis au sein des argiles que parmi les dépôts limoneux ou sableux.
- L'évaporation en milieu ambiant suggère une cristallisation plus nette au sein des particules fines argileuses que dans les sédiments limoneux ou sableux. Les cristaux sont toutefois de taille inférieure à ceux formés au cours de l'évaporation à chaud dans les sédiments argileux, mais plus nombreux dans les limons et les sables.
- L'évaporation à froid met en évidence une très faible cristallisation des carbonates et ce quelle que soit la texture des sédiments.

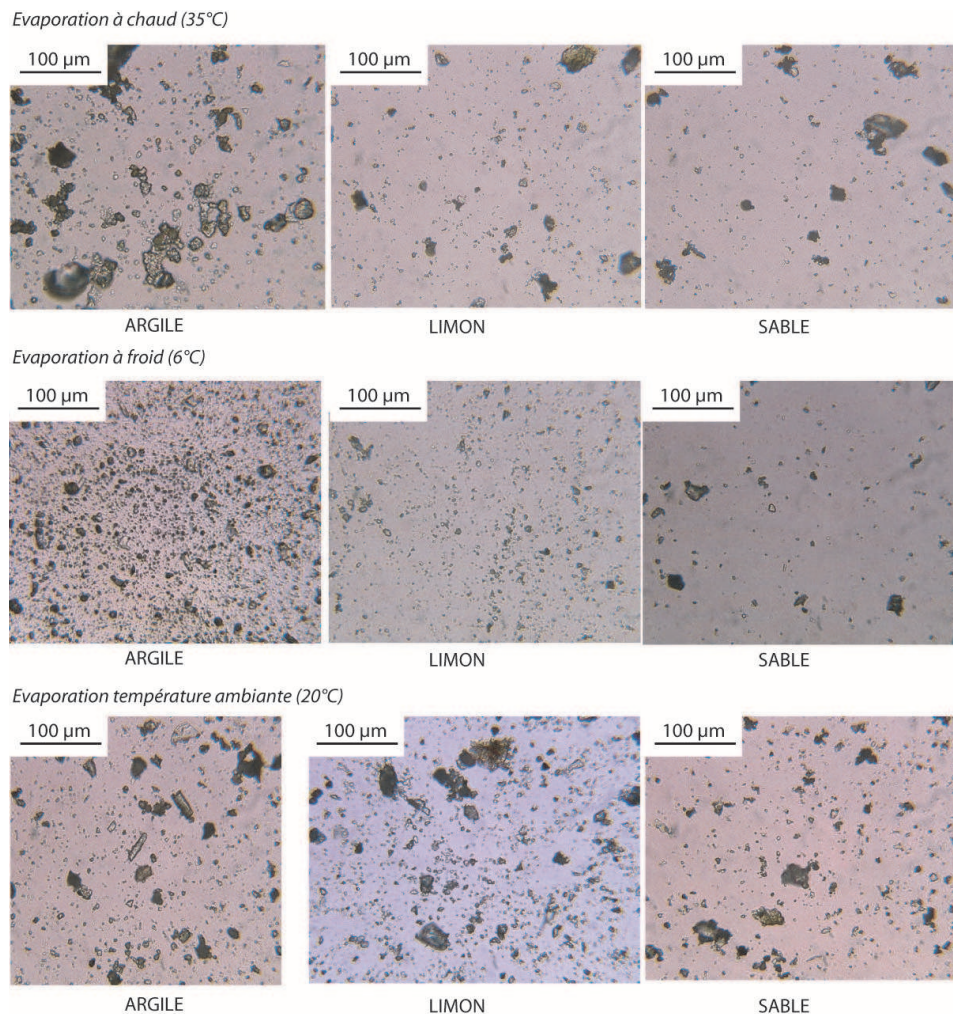


Fig. 184 : Cristallisation des carbonates en fonction de la texture des sédiments et de la température

Approche statistique

L'analyse statistique du % de carbonates, de la taille des cristaux et de la texture des sédiments grâce à la réalisation d'une ACM/CAH sur observations a mis en évidence que :

- Les carbonates secondaires sont absents ou présents en quantité moyenne (10-20%) sous forme micritique dans toutes les textures de sédiments.
- Une concentration en carbonates secondaires plus importante (10% à 70%), de forme micritique, microsparitique et sparitique a été mise en évidence dans les faciès à texture fine (argileux, argilo-sableux et limons argileux). Leur capacité de rétention en eau favorise donc la formation de cristaux plus grands au cours d'épisodes d'assèchement.
- Occasionnellement, certains dépôts de texture sableuse ont révélé la présence de revêtements microsparitiques secondaires autour des particules sableuses. La porosité plus lâche a probablement favorisé leur développement.

- Impact de l'activité biologique sur la précipitation des carbonates secondaires

L'analyse de la microstructure des 607 micro-unités stratigraphiques étudiées en relation avec les traits cristallins a mis en évidence que les cristaux de sparite ($> 20 \mu\text{m}$) et de microsparite (entre 5 et $20 \mu\text{m}$) sont associés aux microstructures massives, prismatiques fines et dans une moindre mesure aux microstructures à chenaux (Fig. 185). Ils sont absents dans les sédiments à structure grumeleuse, peut-être en raison du brassage biologique qui efface les traces de carbonatations secondaires, comme c'est le cas pour les traits texturaux. Les sédiments à microstructure particulaire contiennent peu de traits d'accumulation carbonatée. Leur absence peut résulter à la fois de conditions trop sèches ou d'une percolation rapide de l'eau dans les macropores et micropores.

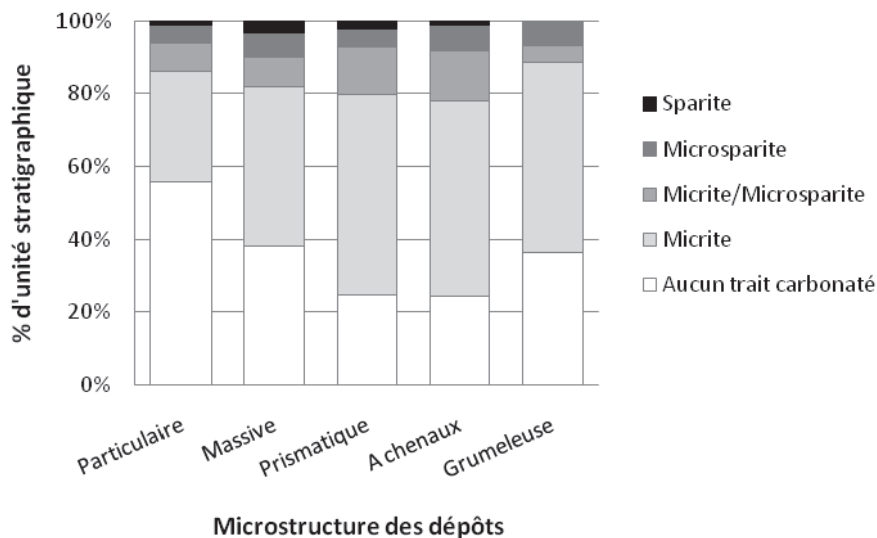


Fig. 185 : Pourcentage des traits carbonatés secondaires en fonction de la microstructure des dépôts (Structure particulaire : n= 165 ; massive : n=171 ; prismatique : n=142 ; en chenaux :n=84 ; grumeleuse : n=45)

En revanche, aucun lien n'a été établi entre la teneur et le type de matière organique et les traits carbonatés secondaires. Il a été uniquement observé que la matière organique fraîche est associée à une faible concentration en carbonates secondaires micritique à microsparitique.

- Conclusion

Les résultats obtenus indiquent que la cristallisation des carbonates secondaires est favorisée dans les sédiments qui présentent une texture fine et une structure prismatique à polyédrique. Cette dernière résulte de processus pédologiques et notamment de cycles d'humectation-dessiccation répétés. C'est également dans ces contextes que les cristaux atteignent leur plus grande taille. Ainsi, l'interprétation des traits d'accumulation est purement hydrique et thermique. Le lien entre carbonatation secondaire et activité biologique semble être plus secondaire dans notre secteur.

2.1.3. Salinité des sols

2.1.3.1. Répartition géographique des formations salines, identification et formation

Dans le bassin de Phoenix, les fonds de vallées évaporitiques et les eaux riches en sels solubles favorisent une forte salinité des sols. Au cours des périodes historiques, la plaine alluviale et la première terrasse Lehi, le long de la Salt River, étaient caractérisées par une salinité entre 2100 ppm à 4500 ppm (Means, 1901). Il était et il est toujours fréquent d'observer en surface, et plus particulièrement le long de la Gila River (Forbes, 1911), des croûtes ou une poudre blanche (halite) qui se concentre dans les zones de changement de texture. Sur les formations pléistocènes et les cônes alluviaux, où les conditions de drainage sont plus importantes et la nappe phréatique profonde, la salinité est nettement plus faible, bien que des cristaux de gypse aient été identifiés.

Sur le terrain, le gypse est observé sous forme de granules ou de traits vermiformes de quelques mm (Porta, 1998). Il est difficile de le discriminer des pseudomycéliums carbonatés. Sa formation débute par les remplissages de vides et induit une augmentation du volume du sédiment et la désagrégation progressive de la fabrique du sol (Courty et al., 1989). Son accumulation requiert une eau riche en CaSO₄ ainsi que des températures élevées (Cody et Cody, 1988; Rosen et Warren, 1990). La présence de composés organiques (Porta, 1986; Cody, 1979; Cody et Cody, 1988) favorise également sa cristallisation. Des cristaux nombreux de petite taille peuvent résulter d'une rapide évaporation de l'eau (Watson, 1985).

2.1.3.2. L'observation microscopique

- Expérimentation

Une grande partie des sels solubles sont dissous dans la résine d'imprégnation (Hanna et Stoops, 1976; Courty, 1990) et par conséquent ne sont pas observables en lame mince, excepté pour le gypse.

Un protocole analytique a donc été mis en place en collaboration avec Michel Dubar (CEPAM-CNRS) afin de déterminer le type de sels présents dans les sédiments.

Un échantillon contenant des cristaux de gypse identifiés en lame mince a été sélectionné (canal préhistorique, Gila River). 25 g de sédiments ont été filtrés à l'eau distillée et l'eau chargée en sels solubles mise à évaporer.

Les résultats de cette analyse ont révélé la présence de cristaux en baguette et de cristaux de forme cubique (Fig. 186 a). La comparaison avec des lames référentielles a confirmé la présence d'halite dont le système cristallin est cubique. En revanche, ce n'est que l'approche diffractométrique (DRX), conduite sur ce même échantillon, qui a permis d'affirmer que les cristaux en forme de baguette correspondent à du gypse.

- Repérage en lame mince

Dans notre étude, les cristaux de gypse n'ont été que ponctuellement observés le long de la Gila River, dans des sédiments limono-argileux à limono-sableux bioturbés (Fig. 186b). Ils sont observés en association avec des revêtements et hyporevêtements ferrugineux ainsi que quelques cristaux de calcite micritique à sparitique dans les sédiments à structure prismatique, et de type micritique dans les sédiments bioturbés.

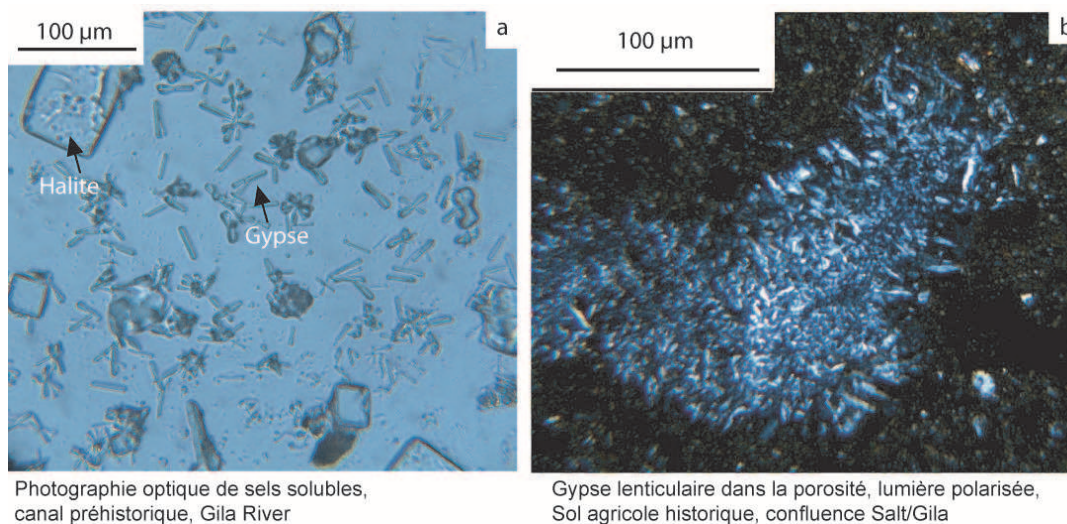


Fig. 186 : Photographie optique des sels solubles et du gypse lenticulaire

2.1.3.3. Impact et signification

- Impact de la salinité sur la fertilité des sols

La présence de cristaux d'halite et de gypse dans les eaux d'irrigation le long de la Gila implique que les Hohokam irriguaient leur champ avec de l'eau salée.

Faute de temps, cette analyse n'a pas été réalisée sur l'ensemble des US étudiées, mais les cristaux de gypse ont été identifiés en lame mince dans les dépôts de la moyenne vallée de la Gila principalement. Ceci peut s'expliquer par le fait que la Gila est un des cours d'eau du Sud-Ouest américain qui contient le plus de sels solubles (entre 700 et 1200 mg/L, la Salt River n'en contient qu'entre 250 et 900 mg/L). Leur concentration augmente de l'amont à l'aval.

L'impact du gypse sur les sols est très variable. La fertilité des sols augmente si sa concentration est inférieure à 2% (van Alphen et los Rios Romero, 1971) mais le système racinaire est affecté à partir de 10% (Smith et Robertson, 1962). Des concentrations supérieures à 25 % ont un effet toxique sur la croissance (Bureau et Roederer, 1960) et empêchent la pénétration racinaire (Kovda, 1954). La réponse est toutefois variable selon l'espèce cultivée. Ainsi, l'alfalfa se développe très bien sur des sols qui contiennent jusqu'à 50% de gypse (Boyadjev, 1974 ; Amami et al., 1967) ce qui pourrait expliquer sa culture massive en Arizona dès le début du siècle. L'halite a un effet nettement plus néfaste sur la productivité agricole dès que sa concentration dépasse 3/4 mmhos/cm. Les haricots ont une faible tolérance à la salinité (1-3 mmhos/cm), le maïs et les cucurbitacées une tolérance moyenne (3-8 mmhos/cm), et le coton une plus forte tolérance (≥ 8 mmhos/cm) (Rhoades et al., 1992).

- *Le sel : un bon marqueur climatique ?*

Les processus d'accumulation/dissolution des sels solubles peuvent prendre seulement quelques jours, notamment pour l'halite. Ils se dissolvent pendant la saison humide et précipitent au cours de la saison sèche. Par ailleurs, ils peuvent être entièrement dissous suite à un changement des pratiques agraires. L'utilisation de ces traits en lame mince en tant que témoin de phases de salinisation passées est donc très délicate. Seule l'alcalinisation des sols peut être correctement déterminée par les changements structuraux qu'elle induit (Courty, 1990), mais cela n'a pas été observé. Les sels moins solubles, comme le gypse, sont mieux préservés. Malgré une dissolution ultérieure, les vides préservés de forme losangique permettent de restituer des conditions environnementales plus précises (Courty et al., 1989) si les processus post-dépositionnels n'ont pas éliminé leur empreinte.

3. La microstructure comme indicateur pédoclimatique

En complément des critères diagnostiques présentés ci-dessus (traits carbonatés, ferrugineux et salins), certaines caractéristiques pédologiques des dépôts peuvent aider à l'interprétation du pédoclimat.

Les épisodes de stagnation d'eau sont caractérisés par une microstructure massive à cavitaire, associée à une fermeture de la porosité qui indique une mise en eau permanente associée à un effondrement de la structure. A l'opposé, les structures prismatiques et craquelées sont le résultat de processus de retraits et gonflements à la suite de cycles d'humectation et de dessiccation (Retallack, 2001) et indiquent la présence d'un niveau d'eau saisonnier.

Ces microstructures sont souvent observées en association avec de nombreux traits ferrugineux d'oxydation. Enfin, les croûtes pédologiques de surface indiquent une exondation complète et une évaporation presque totale de l'eau dans le canal.

4. Les charbons : marqueurs climatiques ou anthropiques ?

4.1. Transport et érosion

Afin de déterminer l'origine des flux de charbons et les contextes dans lesquels ils sont observés, nous avons analysé le lien entre leur forme, leur taille et leur concentration avec la texture des sédiments et le type d'écoulement.

4.1.1. Lien entre la taille des particules charbonneuses et la texture des sédiments

La concentration en charbon est indépendante de la texture des sédiments, mais leur taille est liée à la granulométrie des dépôts (Fig. 187). Basé sur l'algorithme des ruptures naturelles de Jenks, nous avons établi une première limite de taille entre micro et macrocharbons à 70 μm , et une seconde à 125 μm . Les charbons de taille inférieure à 70 μm dominent dans notre corpus, mais sont plus rares dans les sédiments sableux. Les charbons de taille comprise entre 70 et 125 μm dominent dans les sables, limons et limons argileux. Enfin, les charbons de taille supérieure à 125 μm dominent dans les textures grossières, limoneuses à sableuses.

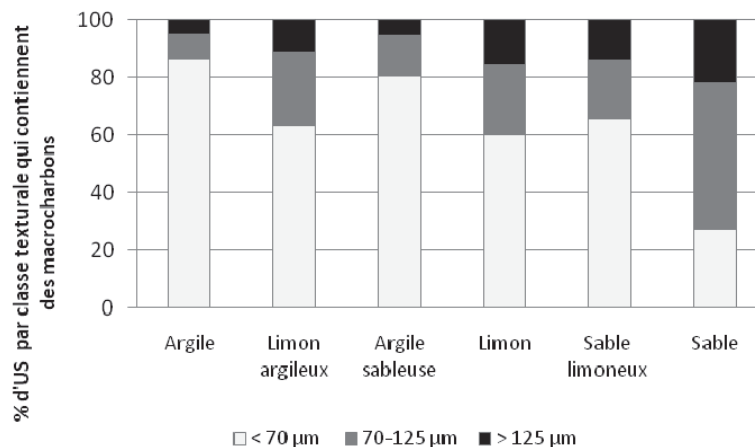


Fig. 187 : Lien entre la taille des charbons et la granulométrie. Le corpus total est de 607 US (argile : n= 95 ; limon argileux : n= 98 ; argile sableuse : n=36 ; limon : n=180 ; sable limoneux : n=143 ; sable : n=55)

Nous posons l'hypothèse que les charbons de taille supérieure à 70 μm observés dans les US à texture fine (argileuse à argilo-sableuse) pourraient provenir de pratiques anthropiques locales. Dans les facies limono-argileux, ils sont peut-être transportés en suspension.

4.1.2. Lien entre la forme, le % de charbons et le type de transport des sédiments

Les charbons de forme allongée (ratio longueur / largeur >2) à semi-allongée (ratio longueur / largeur = [1;2]) sont présents en quantité moyenne (entre 6 et 10%) dans les

dépôts granoclassés et en quantité faible à moyenne (3-9%) dans les dépôts bioturbés. Leur occurrence dans les dépôts granoclassés suggère un transport en suspension à la fin d'épisodes de crue ; ils ont donc une origine allochtone. Dans les facies bioturbés, ils peuvent résulter de pratiques de brûlis. La forme allongée de ces charbons est probablement associée à un couvert végétal de type graminées (Enache and Cumming, 2006 ; Umbanhowar et Mcgrath, 1998).

Les charbons de forme arrondie (ratio longueur / largeur = 1) à semi-allongée (ratio longueur / largeur = [1;2]), en quantité moyenne à élevée (de 6% à 25%), sont quant à eux observés dans les dépôts faiblement triés issus d'une suspension uniforme. Ils sont probablement fragmentés et roulés au cours du transport fluvial.

4.1.3. Lien entre la taille des particules charbonneuses et le transport des sédiments

Nous avons corrélé la taille des particules charbonneuses (< 70 µm, de 70 à 125 µm et > 125 µm) avec le type d'écoulement (Fig. 188). Les résultats mettent en évidence la dominance des macrocharbons dans les facies à suspension uniforme (dépôts faiblement triés). Cela résulte soit : 1) d'apports latéraux, résultat d'un ruissellement favorisé par des sols nus après nettoyage à feu courant à proximité des sites échantillonnés, 2) de l'augmentation du stock sédimentaire remobilisable au cours d'épisodes de pluies hivernales ou estivales suite à des incendies dans les bassins versants amont.

Les macrocharbons ont également été observés dans les facies à litage parallèle, de texture plus grossière, dont l'origine est exclusivement alluviale. Leur occurrence résulte alors d'un tri granulométrique et d'un transport alluvial sur une longue distance, ou d'incendies dans le canal ou dans des parcelles agricoles proches. La présence de macrocharbons dans des US bioturbées peut être liée à des pratiques de brûlis in situ d'arbustes ou de grandes monocotylédones ayant colonisé les canaux et leurs berges.

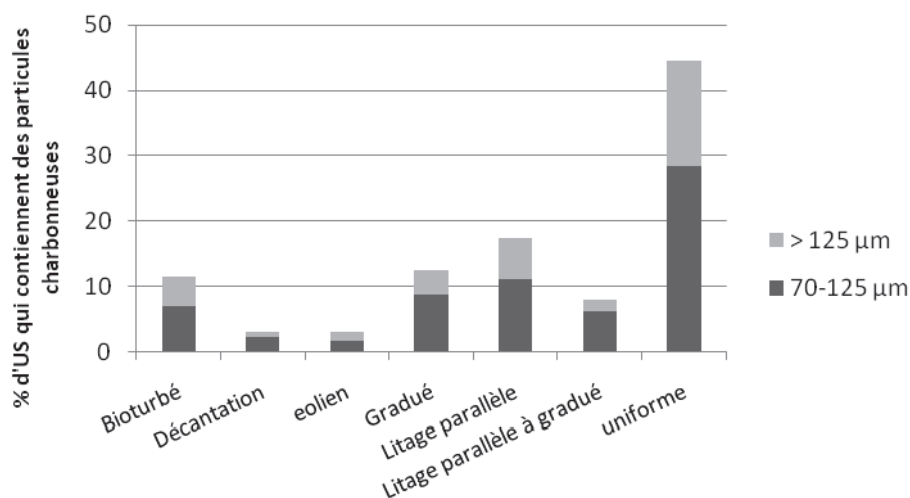


Fig. 188 : Répartition de la taille des charbons en fonction du processus de transport de la charge solide. Sur un corpus de 607 US, 225 US contiennent des charbons de taille > 70 µm. 12 % de ces US sont bioturbées, 17% ont un facies à litage parallèle, et 44% un facies uniforme.

4.1.4. Lien entre la taille, le % de charbons et les sources sédimentaires

Afin de mettre en évidence les flux de charbons et leur origine, nous avons réalisé deux AFC/CAH sur variables. La première AFC vise à établir le lien entre le pourcentage de particules charbonneuses (Classe 1 : 0-2%, 2 : 3-5%, 3 : 6-9%, 4 : > 10%) et l'origine sédimentaire des dépôts. La seconde AFC a pour objectif de comparer la taille des particules charbonneuses et l'origine sédimentaire des dépôts. Nous avons discriminé les US étudiées dans le bassin de la Salt de celles de la Gila. Dans le bassin de la Salt, les sédiments proviennent du bassin amont et du bassin médian-inférieur de la Salt, du bassin de la Verde ou ont une origine indéterminée (dépôts colluviaux ou éoliens). Dans le bassin de la Gila, les dépôts ont une origine dans le bassin amont, le bassin central, une origine locale, voire leur mélange.

Les résultats obtenus dans le bassin de la Salt (Fig. 189 A et B) mettent en relief le fait que les faciès qui contiennent le plus de charbons proviennent du bassin de la Verde ou du bassin amont de la Salt (Fig. 189 A). Ces charbons sont de taille supérieure à 125 μm pour ceux en provenance du bassin de la Verde, et de 70 à 125 μm pour ceux en provenance du bassin amont de la Salt (Fig. 189 B). Ceci se corrèle bien avec la granulométrie des dépôts car les sédiments en provenance du bassin de la Verde sont de texture relativement grossière. Les sédiments éoliens ou ceux qui ont une origine colluviale contiennent entre 3 et 5% de charbons de taille très variable. En revanche, les dépôts en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt sont pauvres en charbons et ces derniers mesurent moins de 70 μm (Fig. 189 A et B). Par conséquent, les principaux paléo-incendies prennent naissance sur les formations à fortes pentes, dans les massifs forestiers amont.

Les résultats de l'AFC : % particules charbonneuses/origine sédimentaire sont moins probants dans le bassin de la Gila (Fig. 189 C et D). Les sédiments qui contiennent le plus de charbons ont une origine dans le bassin amont de la Gila, ce qui est identique aux résultats obtenus dans le bassin de la Salt. En revanche, les dépôts contenant entre 0 et 9% de charbons ont une origine très variable.

La seconde AFC (Fig. 189 D) met en évidence le lien entre la faible taille des particules charbonneuses et l'origine des dépôts dans le bassin amont, ce qui s'oppose aux résultats obtenus dans le bassin de la Salt. Les particules charbonneuses les plus grosses (> 125 μm) sont présentes dans des sédiments d'origine régionale (en provenance des bassins amont, central et local). Celles de taille intermédiaire sont observées dans des sédiments en provenance du bassin amont mélangées à des dépôts plus locaux. Par conséquent, les particules charbonneuses les plus grandes ont une origine locale à la Gila River Indian Community. Celles en provenance du bassin amont sont probablement roulées et fragmentées au cours du transport.

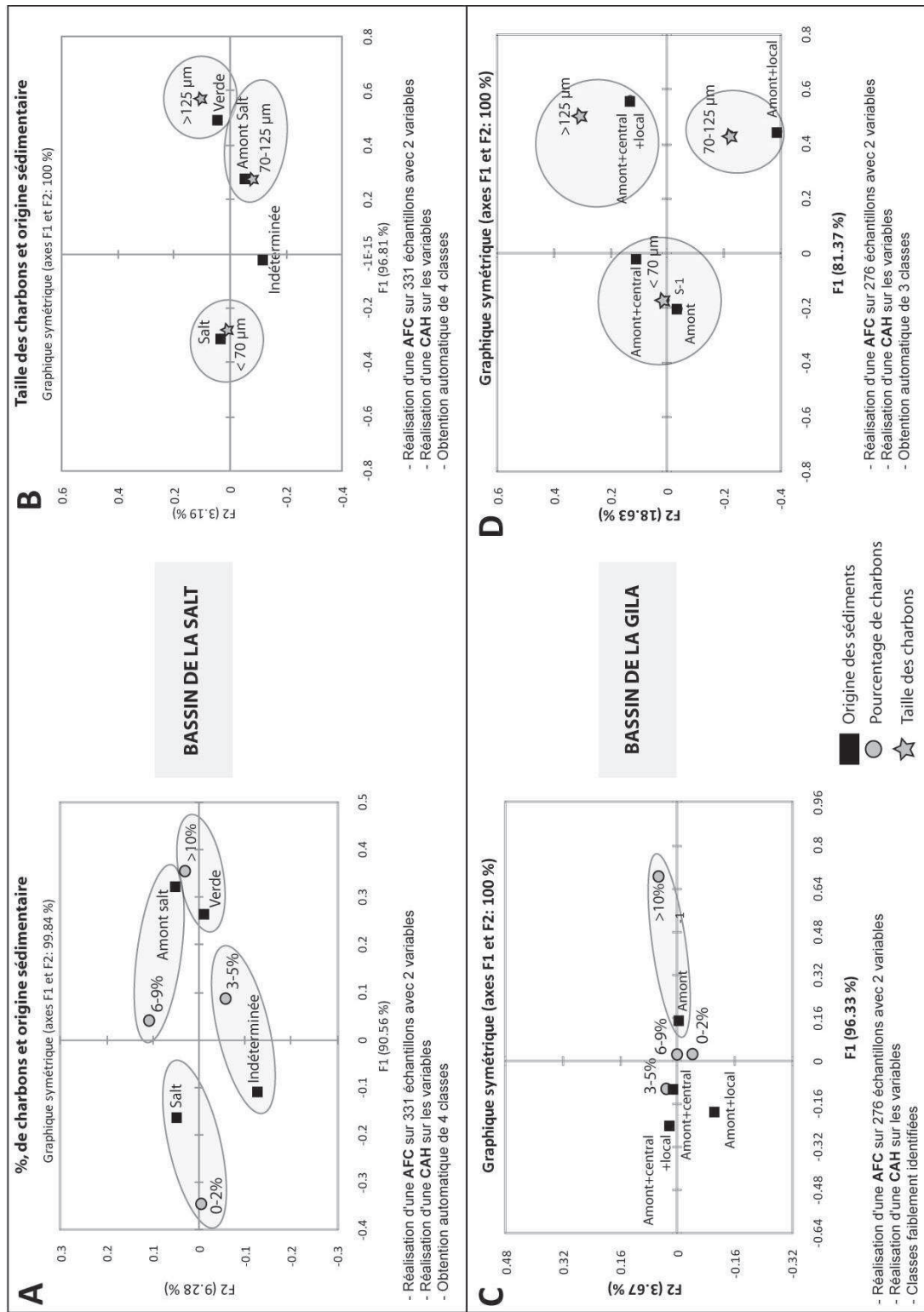


Fig. 189 : Résultats des AFC/CAH réalisées sur les variables : % de charbons, taille des charbons et origine sédimentaire. Ces analyses intègrent 331 US dans le bassin de la Salt et 276 US dans le bassin de la Gila.

4.2. Corrélation avec les données pédo-climatiques

Afin d'estimer la valeur du pédoclimat comme marqueur climatique et d'établir un lien entre le pédoclimat et les flux de charbons, nous avons réalisé une ACM sur les 607 US étudiées en intégrant les variables : % de charbons (Classe 1 : 0-2%, 2 : 3-5%, 3 : 6-9%, 4 : $\geq 10\%$), type de trait d'oxydation (revêtement, hyporevêtement, quasirevêtement, nodule) et taille des cristaux de carbonates secondaires (micrite, micrite/microsparite, microsparite, sparite). Cette première analyse a été suivie par une CAH sur variables qui nous a donné une troncature automatique en 3 classes (Fig. 190).

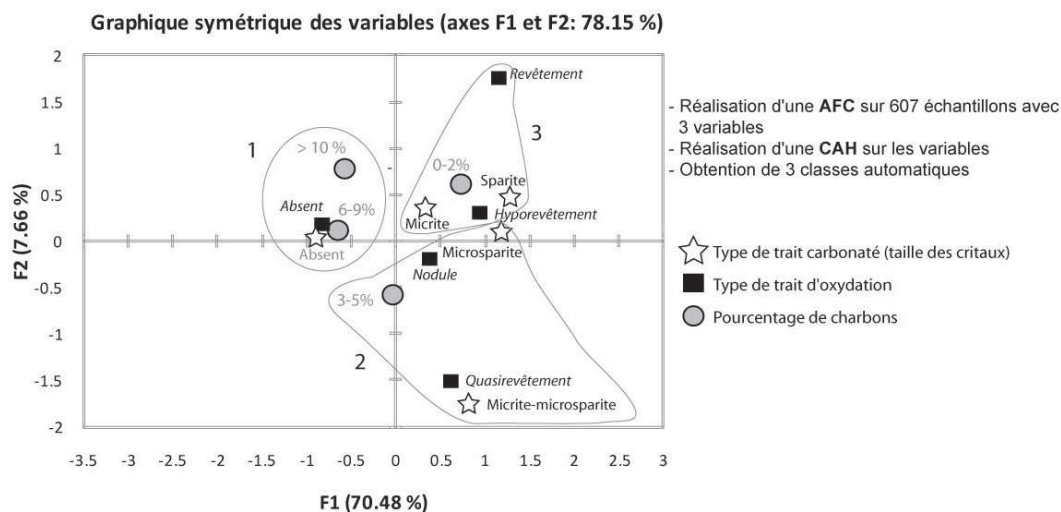


Fig. 190 : Résultats de l'AFC/CAH réalisée sur 3 variables : % de charbons, taille des cristaux secondaires de carbonates, type de traits d'oxydation. Analyse effectuée sur 607 US.

1) Lorsque les flux de charbons sont importants (concentration moyenne à élevée, de 6 à $> 10\%$), les traits d'oxydation et les carbonates secondaires sont généralement absents, bien que des cristaux de micrite ont été ponctuellement identifiés. L'absence de trait cristallin peut traduire des conditions sèches, que confirment les nombreux charbons, si leur origine est naturelle. Toutefois, des épisodes de percolation d'eau favorisée par une texture grossière des sédiments peuvent également expliquer l'absence de trait cristallin. Par conséquent, il est difficile d'interpréter cette première classe dans une perspective climatique.

2) La présence de nodules ferrugineux est indépendante de la concentration en microcharbons. Toutefois, nous observons une forte proximité entre les quasirevêtements ferrugineux et les traits carbonatés micritiques à microsparitiques, considérés ici comme le résultat de cycles humectations/dessiccation répétés. Cette seconde classe est caractérisée par une concentration en charbon moyenne (3-5%).

3) Les cristaux sparitiques ont été observés en association avec des revêtements et hyporevêtements ferrugineux. La formation des larges cristaux de sparite, de taille supérieure à $20 \mu\text{m}$, est un indicateur d'une évaporation lente. Les revêtements/hyporevêtements ferrugineux caractérisent des phases d'assèchement incomplètes. Ceci permet donc de poser l'hypothèse de conditions humides que la faible concentration en charbon pourrait confirmer, s'ils sont d'origine naturelle.

Ces résultats permettent de conclure à un contrôle partiellement climatique de la présence de charbons dans les sédiments mais d'autres analyses et une approche référentielle devront être réalisées.

5. Limites dans l'interprétation du pédoclimat

5.1.1. Nappe phréatique et mouvements latéraux/verticaux

En fonction de la topographie, du type de substrat et des précipitations, les nappes phréatiques peuvent circuler latéralement et verticalement. Au cours des périodes préhistoriques et historiques, la pratique de l'irrigation ainsi que des conditions climatiques favorables ont conduit à des remontées de nappes, qui ont remis en solution le sel, le fer et les carbonates. En effet, l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du sol peut conduire à une remontée des nappes par capillarité, si ces dernières se situent à faible profondeur. Ce processus va conduire à la précipitation de sels solubles dans des unités stratigraphiques initialement dépourvues en sel. Lors de l'interprétation des résultats, il faut prendre en compte ces facteurs post-dépositionnels qui n'informent pas sur les conditions environnementales au moment de la déposition.

5.1.2. Percolation

L'eau des pluies ou de l'irrigation circule initialement à travers les pores les plus larges, puis remplit les pores les plus petits du fait de leur pouvoir de succion plus élevé. L'eau dissout les sels précipités qui limitent la fertilité des sols. Si la nappe phréatique est à faible profondeur, et si l'eau atteint cette nappe, elle peut conduire à des phénomènes d'hydromorphie. L'analyse des processus de surface pointe toutefois vers une pénétration à faible profondeur, du fait des précipitations trop faibles.

5.1.3. Activité biologique végétale

Les plantes absorbent l'eau du sol par capillarité. Cela s'exprime par des traits carbonatés en périphérie des racines qui sont d'origine biochimique, facilement discriminables en lame mince.

Toutefois, la présence de rhizoconcrétions et de cellules racinaires pseudomorphosées sont aussi indicatrices de stress hydrique, en fonction des conditions climatiques.

6. Conclusion et proposition de classification

Ce chapitre s'est focalisé sur l'étude de 4 marqueurs et 7 variables : les traits ferrugineux (type et %), les traits carbonatés (type et %), les traits salins, et les charbons (type, taille, %). La figure ci-dessous synthétise les principales interactions observées (Fig. 191) qui ont permis de dissocier 3 dynamiques distinctes.

1) Les sédiments de texture fine, argileuse à limono-argileuse, présentant une structure massive, cavitaire à polyédrique, contiennent le plus de traits ferrugineux et carbonatés secondaires.

Ces sédiments sont généralement caractérisés par des épisodes de stagnation d'eau ou un écoulement granoclassé avec un facies de décantation sommital. Les traits identifiés sont des nodules ferrugineux qui traduisent une saturation en eau longue, suivie par une évaporation intense et complète. Des hyporevêtements et revêtements ferrugineux ont également été observés. Les traits carbonatés sont de forme variable, mais de texture microsparitique à sparitique. Des charbons de forme semi-allongée à allongée sont observés de façon préférentielle dans ces facies et sont probablement transportés en suspension dans les eaux de crues. La concentration en matière organique est variable mais elle a été identifiée sous forme préservée.

2) Le second groupe bien identifié correspond aux sédiments grossiers, limono-sableux, sablo-limoneux et sableux à structure particulière ou bioturbée. Les traits cristallins sont rares, excepté pour quelques revêtements et hyporevêtements ferrugineux, et quelques cristaux de micrite à microsparite. La forte porosité intergrains favorise la circulation latérale et verticale de l'eau, de même que son évaporation rapide. Le brassage biologique peut également contribuer à la disparition des traits cristallins. Ces dépôts, principalement caractérisés par une suspension uniforme ou à litage parallèle, contiennent des charbons de forme variable, mais en forte concentration et de grande taille. Ces charbons proviennent du bassin amont de la Salt ou de la Verde, mais ont une origine plus locale dans le bassin de la Gila. La concentration en matière organique est faible.

3) Enfin un troisième groupe, moins bien identifié, est composé de sédiments de texture limoneuse, mais des sédiments argileux à sableux ont également été observés. Ces dépôts ont une structure particulière à en chenaux. Des revêtements et hyporevêtements en concentration variable ont été observés, de même que des carbonates secondaires micritiques. Ces sédiments sont caractérisés par un écoulement granoclassé, à litage parallèle, voire même uniforme. Ils charrient des particules organiques dans des fragments de sols érodés, et contiennent de la matière organique humique. Des cristaux de gypse ont également été identifiés, de même que des charbons de taille, de forme et de concentration variable.

Texture des sédiments	Degré d'oxydation	Matière organique	Traits carbonatés	Écoulement	Charbons	Gypse
Grossière (Limons grossiers à sables)	Faible	Faible	Faible (Micrite et microsparite)	Tout type	/	non
Variable	Moyen (Revêtements/ Hyporevêtements)	Moyenne (Humique à agrégats)	Moyen (Micrite)	Tout type	Teneur en charbons faible Tout type	oui
Fine (Argiles à limons)	Elevé (Nodules)	Elevée (Fraîche à humique)	Elevé (Micrite à sparite)	Granoclassés/ Bioturbés	Allongés à semi-allongés	oui

Fig. 191 : Principaux résultats obtenus sur l'interaction entre les processus pédoclimatiques

Afin de faciliter l'interprétation des sites et réduire le nombre de marqueurs à analyser simultanément, nous avons classifié les facies pédoclimatiques en fonction de quatre variables uniquement : le type et le % de traits d'oxydation et traits carbonatés (Tab. 40 et Annexe 4). Ces facies, classés par intensité d'évaporation et d'oxydation (de la plus forte à la plus faible) permettent d'affecter à chaque unité stratigraphique une ambiance paléoclimatique interprétée grâce aux dépôts référentiels de surface et aux expérimentations décrites dans ce chapitre.

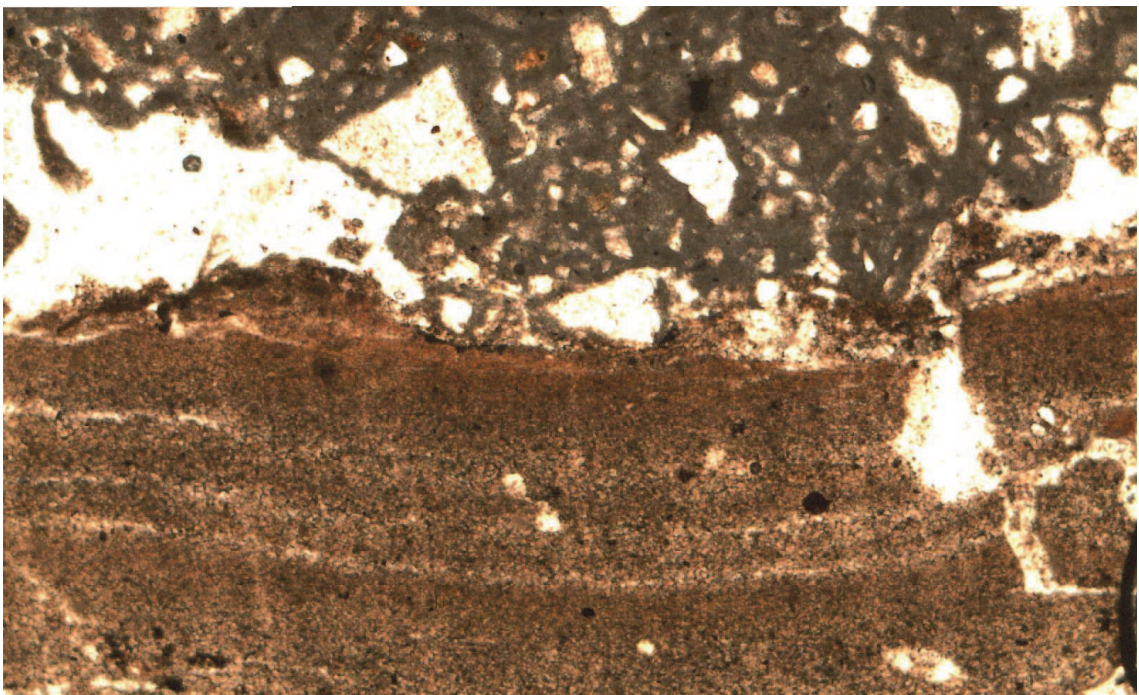
Facies	Traits de carbonatation		Trait d'oxydation		Interprétation
	Teneur	Type	Teneur	Type	
1	0	0	0	0	Lessivage complet du fer et des carbonates OU conditions trop arides, absence de traits liés à la circulation de l'eau
2	Faible	Micrite	0	0	Évaporation rapide, fer mobilisé Bioturbation totale des sédiments
3	0	0	Faible	Nodules	Évaporation intense Végétation
4	Faible	Micrite et microsparite	Faible à moyenne	Nodules (et autre)	Alternance humectation/dessiccation contrastée, oxydation complète des sédiments Texture des sédiments Degré de bioturbation et/ou végétation
5	Moyenne	Microsparite ou sparite	Faible	Hyporevêtements ou imprégnations	Stagnation de l'eau, évaporation incomplète Présence de végétation in situ Texture des sédiments

0: Absent ; Faible : 1-15% ; Moyen > 15%

Tab. 40 : Proposition de classification et d'interprétation des facies pédoclimatiques

Partie IV

Dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales des réseaux hydrauliques et des formations alluviales



CONTENU DE LA PARTIE IV

CHAPITRE 1 :

Evolution des paysages de la basse vallée de la Salt

Le premier chapitre présente en diachronie les dynamiques hydrosédimentaires et les stratégies de subsistance dans la basse vallée de la Salt au cours deux derniers millénaires. Du fait de l'utilisation sur la longue durée de certaines structures hydrauliques, les résultats sont présentés par système d'irrigation. Cette approche spatiale permet d'appréhender les dynamiques amont-aval, de même que les modes de gestion de l'eau et leur variabilité spatiale.

CHAPITRE 2 :

Evolution des paysages de la moyenne vallée de la Gila

Le deuxième chapitre présente les dynamiques hydrosédimentaires et les stratégies de subsistance dans la basse vallée de la Gila au cours du même intervalle chronologique. Les résultats sont également présentés par système d'irrigation. Trois secteurs géographiques et archéologiques ont été étudiés. Les résultats mettent en évidence des degrés de stabilité et d'efficacité des systèmes hydrauliques très variables sur la longue durée.

CHAPITRE 1

Evolution des paysages de la basse vallée de la Salt

1. Résultats micromorphologiques et paléoenvironnementaux	404
1.1. Le Canal System 1	404
1.2. Le Scottsdale System	415
1.3. Le Canal System 2	420
1.4. Le Canal System 7	424
1.5. Le Canal System 12	433
2. Phasage des dynamiques pédo-sédimentaires et paléoenvironnementales	439
2.1. Phase 1 : - 610 apr. J.-C. (Période Formative)	439
2.2. Phases 2 et 3 : 610-850 apr. J.-C. (Période Pionnière/Coloniale)	442
2.3. Phases 4 et 5: 850-1150 apr. J.-C. (Période Coloniale/Sédentaire)	443
2.4. Phases 6, 7, 8: 1150-1450 apr. J.-C. (Période Classique)	444
2.5. Phase 9 : 1450-1600/1650 apr. J.-C. (Période Protohistorique)	445
2.6. Phases 10 et 11 : 1600/1650 à 1930 apr. J.-C. (Périodes Protohistorique et Historique)	446

1. Résultats micromorphologiques et paléoenvironnementaux

Les résultats présentés dans cette section sont doubles. Nous développerons dans un premier temps les résultats micromorphologiques obtenus dans les canaux et les formations alluviales présentées en partie II. Ces résultats sont complétés par les analyses paléoenvironnementales réalisées dans les structures hydrauliques étudiées, ainsi qu'une synthèse paléoenvironnementale bibliographique.

1.1. Le Canal System 1

1.1.1. Un système spécialisé et résilient

1.1.1.1. Le projet Riverview at Dobson (Période Coloniale à Classique)

Les résultats détaillés de l'analyse micromorphologique réalisée dans cinq structures hydrauliques appartenant au Canal System 1 sont présentés en Annexe 5A, mais les figures ci-dessous synthétisent les principales caractéristiques et corrélations pédosédimentaires et écologiques entre les dépôts (Fig. 192 et Fig. 193). Les faciès mentionnés (hydrosédimentaire, traits texturaux, traits d'oxydation) sont présentés dans la partie III, Tab. 29 et en Annexe 4. Cette étude nous a permis de reconstruire quatre phases majeures de fonctionnement du 7^{ème} au 15^{ème} siècle au niveau des vannes d'entrée du Canal System 1. Trois d'entre elles ont eu lieu au cours de la période PréClassique (entre le 7^{ème} et le 11^{ème} s.).

PERIODE 1 : T 204 (US 1 à 4a)

Comme nous l'avons vu dans la partie II, la première phase de construction des canaux au cours de la période PréClassique (611-675 apr. J.-C) a lieu pendant une phase de stabilité temporaire du paysage. Les limons riches en charbons au sommet desquels les canaux sont construits attestent de pratiques de *brûlis pour éclaircir la plaine*. Des sables alluvio-éoliens riches en matière organique humique et microcharbons se déposent dans le canal (phase 1A). Des limons grossiers d'origine régionale à faciès uniforme les recouvrent (phase 1B). Ils indiquent une *forte dynamique sédimentaire* à capacité érosive, mais la structure prismatique des dépôts atteste d'épisodes d'assèchement complet. La matière organique fraîche indique le développement de la végétation dans le canal. La partie supérieure des dépôts est absente car le canal est curé. Les crues dans la plaine sont récurrentes et enterrent cette structure.

PERIODE 2 : T 204 (US 4b à 6),

Observé uniquement dans T 204, l'épisode 2 caractérise des sédiments de texture limono-sableuse à sableuse à suspension uniforme ou granoclassée en provenance de l'amont du bassin de la Salt. Les dépôts sont épais et leur structure massive atteste *d'une aggradation rapide du canal*. La matière organique sous forme humique pourrait traduire une végétation semi-locale à régionale bien exprimée.

Les traits texturaux (facies 3b et 4a), ferrugineux et carbonatés secondaires indiquent des phases de circulation latérale et verticale d'eau de même que de nombreuses particules en suspension (facies 4a et 5). L'US 6 semble correspondre à des sédiments d'effondrement des buttes une fois le canal colmaté et abandonné.

PERIODE 3 : T 206 (US 2 à 5)

La troisième période est caractérisée par la succession de microlamines de limons sableux à sables charbonneux dans les canaux en provenance du bassin de la Salt et de la Verde. Elles indiquent des phases de *sédimentation rythmée voire saisonnière*. Le colmatage des canaux est rapide. La présence de matière organique transportée en suspension dans les dépôts provient peut-être de *l'érosion des litières de la ripisylve* et pourrait traduire une végétation toujours présente à l'échelle du bassin versant, malgré l'augmentation du signal incendie.

PERIODE 4 : T 206 (US 6 à 23)

Cette période est caractérisée par une *sédimentation de faible compétence*, mais un bon entretien des structures hydrauliques (5 curages identifiés).

Des limons-argileux granoclassés à structure prismatique en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt se déposent (phase 4a). Des phases d'effondrements des buttes se superposent (phase 4b) ; ces dépôts riches en matière organique attestent d'une végétation sur les berges du canal. Puis le canal est curé. Des limons argileux à grossiers à facies uniforme traduisent une compétence moyenne, mais une sédimentation rapide, suivie d'un assèchement complet que la structure prismatique confirme (phase 4c).

Des sables fins et de limons grossiers à facies uniforme en provenance de la Salt et de la Verde sont ensuite observés (début de la phase 4d). Ils traduisent une augmentation temporaire des dynamiques hydrosédimentaires, avec une sédimentation rapide et brutale. Le canal est entretenu au cours de cette période.

Puis, la sédimentation d'argile de décantation et de limons argileux granoclassés en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt, peut-être au cours de la phase Sédentaire, témoigne d'écoulements très réduits dans le canal principal, puis le retour à une sédimentation rythmée mais de faible compétence (phase 4e). Le canal est ensuite colmaté et érodé par des chenaux naturels et des dépôts de crues.

PERIODE 5 : T 204 (US 7)

Une nouvelle structure est creusée dans ces dépôts de crue sur l'ancien emplacement de T 204 mais *elle est rapidement colmatée par des sables laminés* en provenance du bassin de la Verde, comme le montrent les pics de susceptibilité magnétique. Elle est ensuite enterrée sous de nouveaux *dépôts de crue*. L'unique date disponible pour cette période se situe légèrement avant 1029-1209 apr. J.-C. Des feux locaux à régionaux contribuent à une érosion importante alimentant une forte charge solide. L'évolution de la morphologie de la Salt identifiée sur la T 206, en parallèle à l'aggradation de la plaine aurait limité l'irrigation d'une grande partie des terres situées le long du Canal System 1.

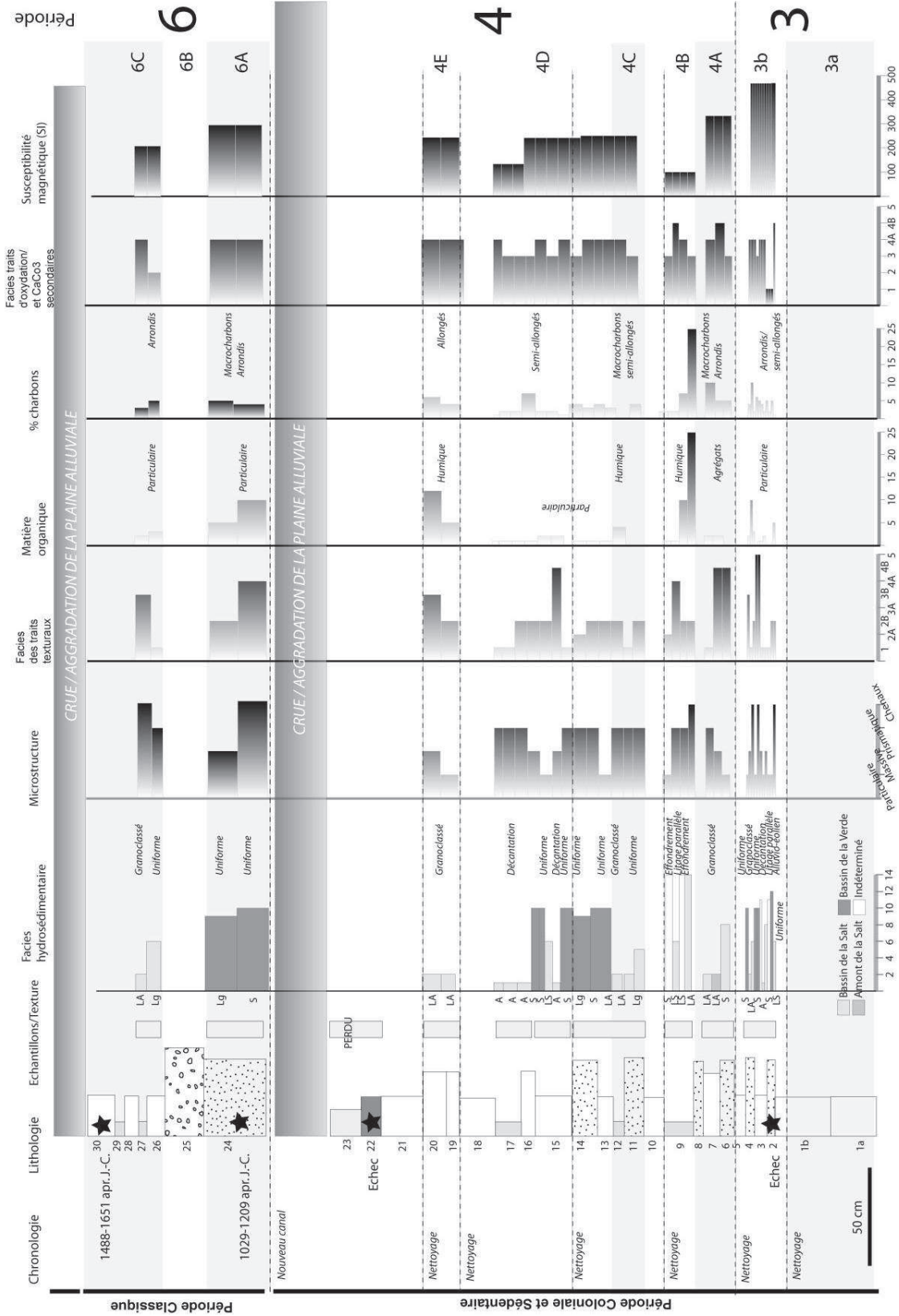


Fig. 192 : Résultats micromorphologiques/magnétiques, projet Riverview at Dobson, CS1, Canal

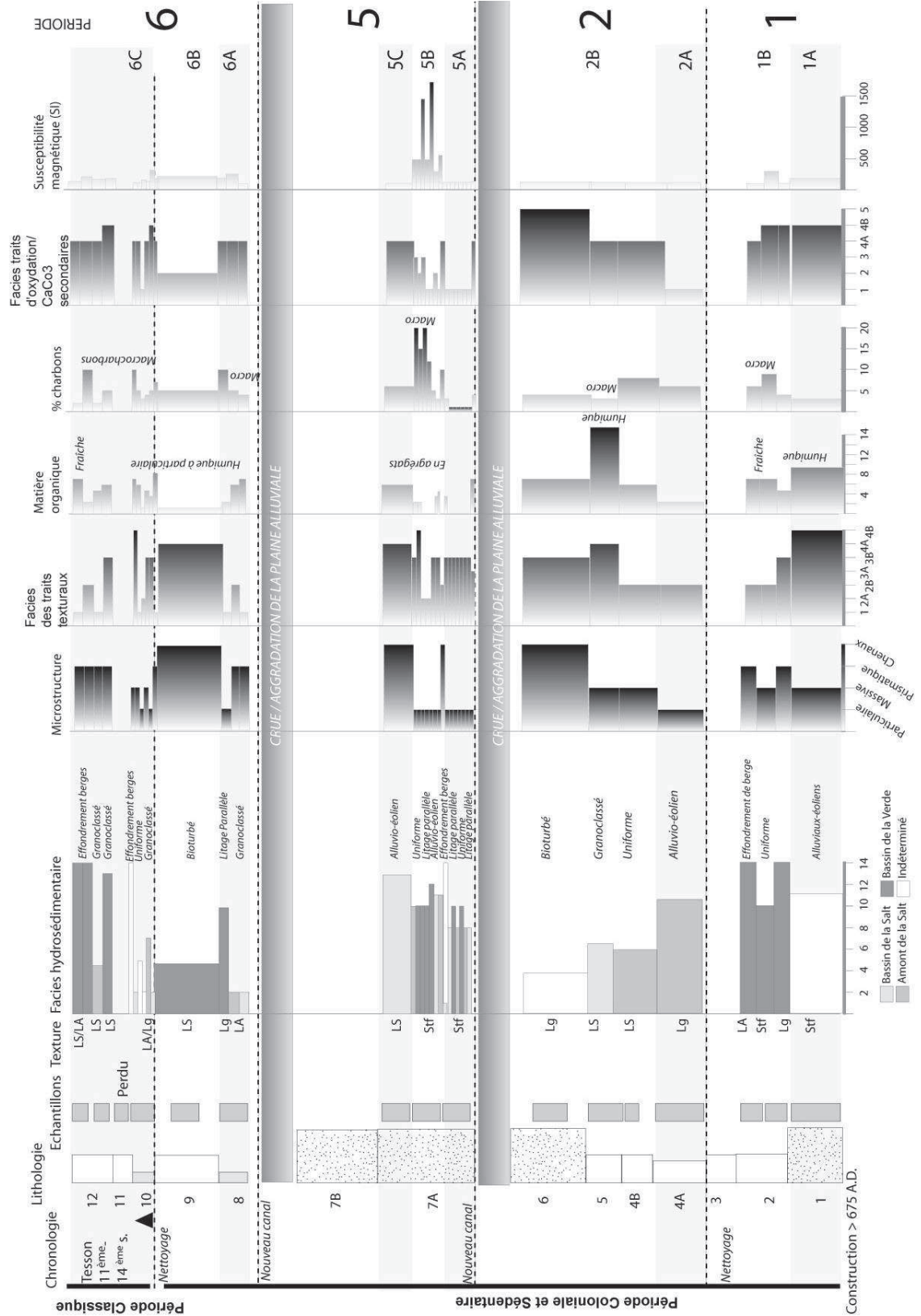


Fig. 193 : Résultats micromorphologiques/magnétiques projet Riverview at Dobson, CS1, Canal

PERIODE 6 : T 204 (US 8 à 12), T 206 (US 24 à 30)

Des canaux plus petits sont construits à la fin de la période Sédentaire/début de la période Classique. Le canal T 206 est probablement construit avant le canal T 204, car son remplissage basal indique des *phases de très fort débit* qui se poursuivent (sables en provenance de la Verde à écoulement uniforme) puis une sédimentation rythmée (limons argileux granoclassés), qui rappelle alors le colmatage de T 204. Les *écoulements de faible compétence* sont associés à des exondations fréquentes au cours desquelles la bioturbation est active et la végétation se développe. Les canaux sont alors abandonnés malgré leur efficacité potentielle.

Nous pouvons noter que les canaux sont bien entretenus au cours de la période PréClassique. Les épisodes de nettoyage sont concentrés au cours des périodes 3 et 4 dans T 206 avant la phase d'évolution morphologique de la plaine alluviale, alors que T 204 n'est pas en fonctionnement. Au cours de la période Classique, les canaux sont très peu entretenus et de très petite taille.

Une hypothèse possible pour expliquer ces changements repose sur une évolution dans l'organisation de l'agrosystème, avec une gestion différente des systèmes d'irrigation, notamment en ce qui concerne la main d'œuvre. Toutefois, la réutilisation sur la même durée d'alignements similaires témoigne d'une pérennité des traditions et des techniques, avec un effort régulier pour maintenir l'efficacité du système même dans des zones géomorphologiques sensibles.

1.1.2. Synthèse des résultats micromorphologiques obtenus dans les formations alluviales (terrasse Lehi)

Les épisodes de crue identifiés sur la terrasse Lehi, au cours de la période Sédentaire notamment, ont été échantillonnés et analysés à l'échelle microscopique (Fig. 82). Trois d'entre eux sont caractérisés par le facies hydrosédimentaire 7 qui regroupe les sédiments de texture limoneuse à sableuse, riches en basalte, et dont l'origine a été attribuée au bassin versant de Verde (érosion régionale) (Fig. 194). Malgré l'effet de la bioturbation qui a effacé presque l'ensemble des traits sédimentaires, ces dynamiques, dont l'intensité a pu dépasser les crues de 1891 et 1993, impliquent une destruction majeure des systèmes d'irrigation, leur colmatage instantané sur plusieurs kilomètres ainsi qu'une forte diminution de la productivité agricole.

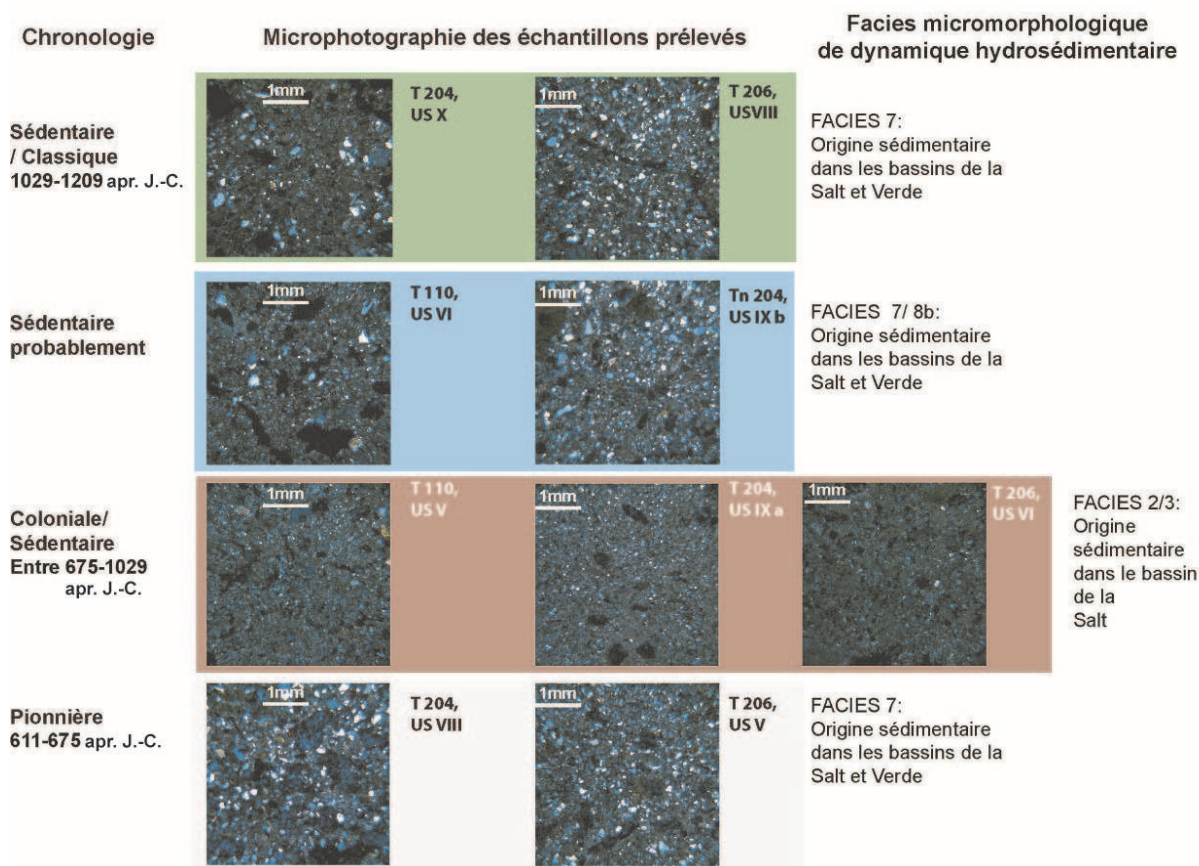


Fig. 194 : Analyse micromorphologique des dépôts de crue, projet RAD

1.1.2.1. SRMG LOG 5 (Terrasse T'1)

L'analyse micromorphologique, détaillée en Annexe 5B, nous a permis de confirmer les trois phases de fonctionnement identifiées sur le terrain qui se mettent en place au cours de la période Classique/Protohistorique (Fig. 195). Les facies présentés (hydrosédimentaire, traits texturaux, traits d'oxydation/carbonatations secondaires) sont décrits dans la partie III, Tab. 28 et en Annexe 4.

PERIODE 1 : Des argiles à argiles sableuses laminées, en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt, sont identifiées à la base de la séquence. Les phases de décantation alternent avec des dépôts granoclassés positivement qui traduisent une sédimentation rythmée mais de faible compétence. Cette *stabilité temporaire de la plaine* est marquée par des processus pédologiques, notamment le *développement de la végétation*, des cycles humectation-dessiccation répétés qui s'expriment par la circulation latérale et verticale de l'eau, la déposition de particules fines dans les pores du sol (traits texturaux, facies 3a), et la présence de traits d'oxydations et de carbonates secondaires (facies 4b, 3). La dynamique hydrique s'intensifie avec la sédimentation de limon puis d'argile sableuse granoclassée positivement. Leur structure massive témoigne d'une réduction des processus pédologiques et d'une durée de mise en surface réduite.

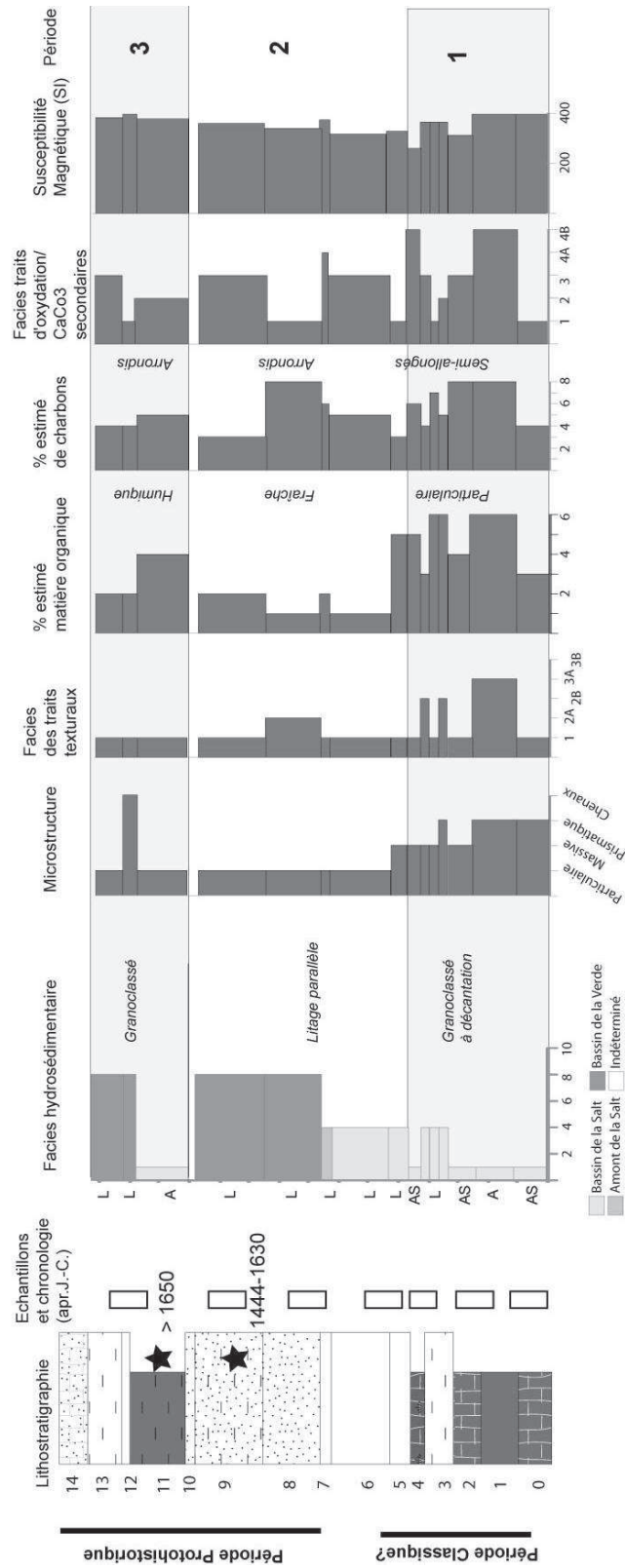


Fig. 195 : Lithostratigraphie, chronologie et résultats micromorphologiques, SRMG LOG 5

PERIODE 2 : Des limons grossiers à litage parallèle, à structure particulière, en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt, puis du bassin de la Verde, traduisent une aggradation rapide qui se poursuit dans la plaine au cours de la période Protohistorique (15^{ème}-16^{ème} s.). Le taux de matière organique est très faible, mais la présence de fragments bien préservés pose l'hypothèse d'une *végétation toujours présente*. Les traits texturaux sont rares, peut-être en réponse à la diminution des particules fines transportées en suspension. L'atténuation des processus pédologiques correspond à une *reprise rapide de l'aggradation fluviale*.

PERIODE 3 : Des lamines argileuses indiquent une *sédimentation rythmée* mais de plus faible compétence, probablement au cours du 17^{ème} s., en réponse à un chenal étroit à méandres ou à l'éloignement de ce chenal. Puis, les limons granoclassés en provenance des bassins de la Verde et Salt indiquent une *augmentation de la compétence fluviale au cours des périodes historiques* (18^{ème}-19^{ème} s.) et une aggradation rapide, comme le montre la microstructure particulière des dépôts et l'absence de tout autre trait pédologique. La matière organique humique pourrait provenir d'un transport en suspension des fragments de litières de la ripisylve et indiquer une *reconquête de la végétation dans les bassins amont*.

1.1.3. Moyens de subsistance le long du Canal System 1

Les analyses paléoenvironnementales conduites dans les canaux, les parcelles agricoles ou les *fieldhouses* le long du Canal System 1 sont rares. Les résultats d'une étude botanique et malacologique conduite sur trois complexes (canaux, champs, *fieldhouses*) dans les sites Az U:9:68 (La Cuenca del Sedimento), U:9:69 et U:9:71 (ASM) (Fish, 1987 ; Miksicek, 1987 ; Vokes et Miksicek, 1987) sont présentés dans le Tab. 41.

Site	Période culturelle	Zone de prélèvement	Résultat paléobotaniques	Signification / interprétation
La Cuenca Del Sedimento	Coloniale	Cabane des champs	Pollen de maïs, cucurbitacées, orge, pavot, mesquite. <i>Graines de maïs, d'amaranthe et de tomatillo</i>	Zone agricole proche, exploitation des ressources locales
La Cuenca Del Sedimento	Sédentaire	Bassin de sédimentation	Absence de pollen. <i>Graines d'amaranthe et de pourpier. Coquilles de Physa et Pisidium, Lymnaea et Hawaiia</i>	Eau douce, conditions humides mais évaporation complète ce qui remet en question la fonction de bassin de rétention
U:9:71 (ASM)		Canal et jonction	Pollen de cheno-am en très forte proportion (60%), <i>Graines de maïs, Coquillage Physa et Hawaiia</i>	Surexploitation des sols ou salinité, conditions humides mais évaporation complète
La Cuenca Del Sedimento	Classique	Canal	Pollen d'euphorbia et d'espèces halophytes. <i>Graines de maïs et de tomatillo</i>	Zone agricole proche, conditions salines et sèches
U:9:69 (ASM)		Canal principal 1	Pollen de sarcobatus et de haricots tépari à la base, espèces de ripisylve in situ (<i>Pluchea sericea</i>) et plus régionales (aulne, saule). <i>Coquilles de Physa et Pisidium</i>	Conditions salines, ripisylve locale et régionale bien exprimée, eau douce permanente
		Canal latéral dérivé de 1	Pollen de pin, chêne, et cheno-am	Signal régional (plus que le signal moderne de référence)
		Canal latéral dérivé de 1	Pollen de pin, chêne, cheno-am et massettes	Signal régional, ripisylve, eau stagnante

U:9:71 (ASM)	Canal de distribution parallèle à 1	Pollen de rudérales et de maïs	Zone agricole proche
	Champ irrigué	Pollen de pin, chêne, et massettes	Signal régional, eau stagnante, ripisylve
	Cabane des champs	Pollen de maïs en agrégats	Maïs in situ
	Champ	Pollen de pin, typha, maïs. <i>Graine de maïs, fragment de cœur d'agave.</i> Coquillage Physa et Pisidium	Phases de stagnation d'eau, exploitation du maïs et de l'agave
	Canal de distribution	Pollen de pin, typha, cheno-am (30%)	Signal régional et eau stagnante
	Canal de distribution	Pollen de maïs et de cheno-am	Zone agricole proche, perturbation agricole
	Canal latéral	Pollen de pin en très forte quantité, maïs et coton	Signal régional+culture proche

Rq: cheno-am correspond à l'abréviation de chénopodiacées-amarantacées

Tab. 41 : Synthèse des données botaniques le long du CS1 (Fish, 1987 ; Miksicek, 1987 ; Vokes et Miksicek, 1987)

Au cours de la période Coloniale, les résultats obtenus à La Cuenca del Sedimento mettent en évidence une exploitation des ressources naturelles en parallèle au développement des pratiques agraires, mais ce secteur semble se spécialiser rapidement. Les cheno-am qui dominent les spectres au cours de la période Sédentaire témoignent d'une très forte perturbation du paysage en parallèle à des conditions salines et des phases d'évaporation intenses qui altèrent les spectres polliniques (biais taphonomique). Les espèces autochtones et cueillies disparaissent des spectres polliniques.

Au cours de la période Classique, les conditions sont salines et sèches sur la terrasse Lehi mais la ripisylve reprend de l'ampleur, ce que confirme la diminution des espèces rudérales (cheno-am). Les pollen de massettes témoignent de phases d'eau stagnante dans les canaux et d'une végétation locale naturelle bien exprimée. Maïs, coton, agave et haricots sont cultivés sur la terrasse Mesa (U :9 :69 et 71), mais aucune spécialisation agricole locale ne transparait. La dominance des Pinus dans les diagrammes polliniques peut résulter d'un transport aérien des pollen et de leur déposition dans des milieux à faible circulation d'eau mais également de précipitations dans les secteurs montagneux à l'amont des bassins de la Salt et/ou de la Verde. Les pollen sont alors transportés par les crues.

1.1.4. Conclusion partielle

L'analyse micromorphologique de 5 canaux d'irrigation, de deux séquences alluviales associées à de nombreux dépôts de crues nous a permis de préciser le premier phasage construit et présenté dans la partie II. L'identification de six tendances paléoenvironnementales dans le secteur du CS1 permet de discuter de l'évolution des paysages de la période Coloniale à la période historique (Fig. 196).

1) **Brûlis, ripisylve, colmatage rapide des canaux**

La fin de la période Pionnière début de la **période Coloniale** est caractérisée par la *construction de canaux dans la plaine*. Malgré la présence d'une *ripisylve bien exprimée* qui pourrait limiter l'impact local des crues, les canaux implantés à proximité

des vannes d'entrée du système sont colmatés rapidement par des sables fins alluvio-éoliens ou à facies uniforme qui traduisent une érosion régionale.

Des phases d'exondation sont observées, de même que des épisodes de glissement des buttes du canal, peut-être suite à l'entrée brutale de l'eau. Nous posons l'hypothèse d'un système à chenaux multiples, facilement dérivable à la saison des pluies grâce à l'augmentation du niveau de l'eau. Les structures hydrauliques sont toutefois entretenues. Les Hohokam exploitent les ressources locales qu'offrent la ripisylve ainsi que la végétation en bordure des canaux, et cultivent du maïs.

2) Sédimentation saisonnière, disparition de la végétation

Cette seconde phase est caractérisée par une dynamique sédimentaire de forte compétence. La *sédimentation semble saisonnière* avec la déposition de microlamines de limons sableux à granoclassement positif, à suspension uniforme et à litage parallèle. Les dépôts proviennent du bassin médian-inférieur de la Salt et du bassin de la Verde (érosion régionale). La structure particulière en alternance avec une microstructure en chenaux attestent de phases de réduction temporaire des débits et d'épisodes d'exondation. Les dépôts sont pauvres en charbons et matière organique.

3) Apport d'eau faible, stabilisation des paysages, végétation locale

Entre 850 et 1000 apr. J.-C. (période Coloniale/ période Sédentaire) les sédiments grossiers sont progressivement remplacés par des limons argileux granoclassés ou à litage parallèle, puis des argiles de décantation en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt. La structure prismatique des dépôts atteste d'épisodes de mise en surface et du développement de la végétation, que les traits pédologiques (texturaux, oxydation, carbonatations secondaires) confirment. La Salt river passe peut-être à un système à méandres, plus encaissé, avec une montée saisonnière des eaux. Les données bibliographiques (Phillips et al., 2004) indiquent la *formation d'une zone marécageuse en bordure du cours d'eau*. Sa présence signe un écosystème exploitable à des fins alimentaires et domestiques. Les parcelles agricoles situées en aval auraient souffert d'un manque d'eau important. En parallèle, le signal incendie augmente avec pour conséquence directe une augmentation du stock sédimentaire érodable et des particules en suspension plus importantes dans l'hydrosystème et ses ramifications hydrauliques.

Cette tendance est suivie par une intensification des dynamiques hydrosédimentaires qui s'exprime tout d'abord par *l'érosion de la partie sommitale des canaux* étudié par des chenaux naturels au cours du 11^{ème} s. Les canaux recreusés durant cette période sont colmatés rapidement par des sables massifs à litage parallèle en provenance du bassin de la Verde et enterrés sous d'épais *dépôts de crue*, composés de limons sableux à facies uniforme toujours en provenance du bassin de la Verde. La plaine s'élargit et le niveau de base de la Salt augmente.

4) Erosion régionale, colmatage accéléré, feux locaux et régionaux

A partir du 11^{ème} siècle et jusqu'au 14^{ème} siècle (période Sédentaire/Classique), les conditions sont humides mais salines. Des épisodes de forte compétence qui traduisent toujours une érosion régionale (sables massifs) sont identifiés dans les canaux reconstruits et témoignent peut-être d'un système à chenaux mobiles et d'un haut niveau de l'eau saisonnier.

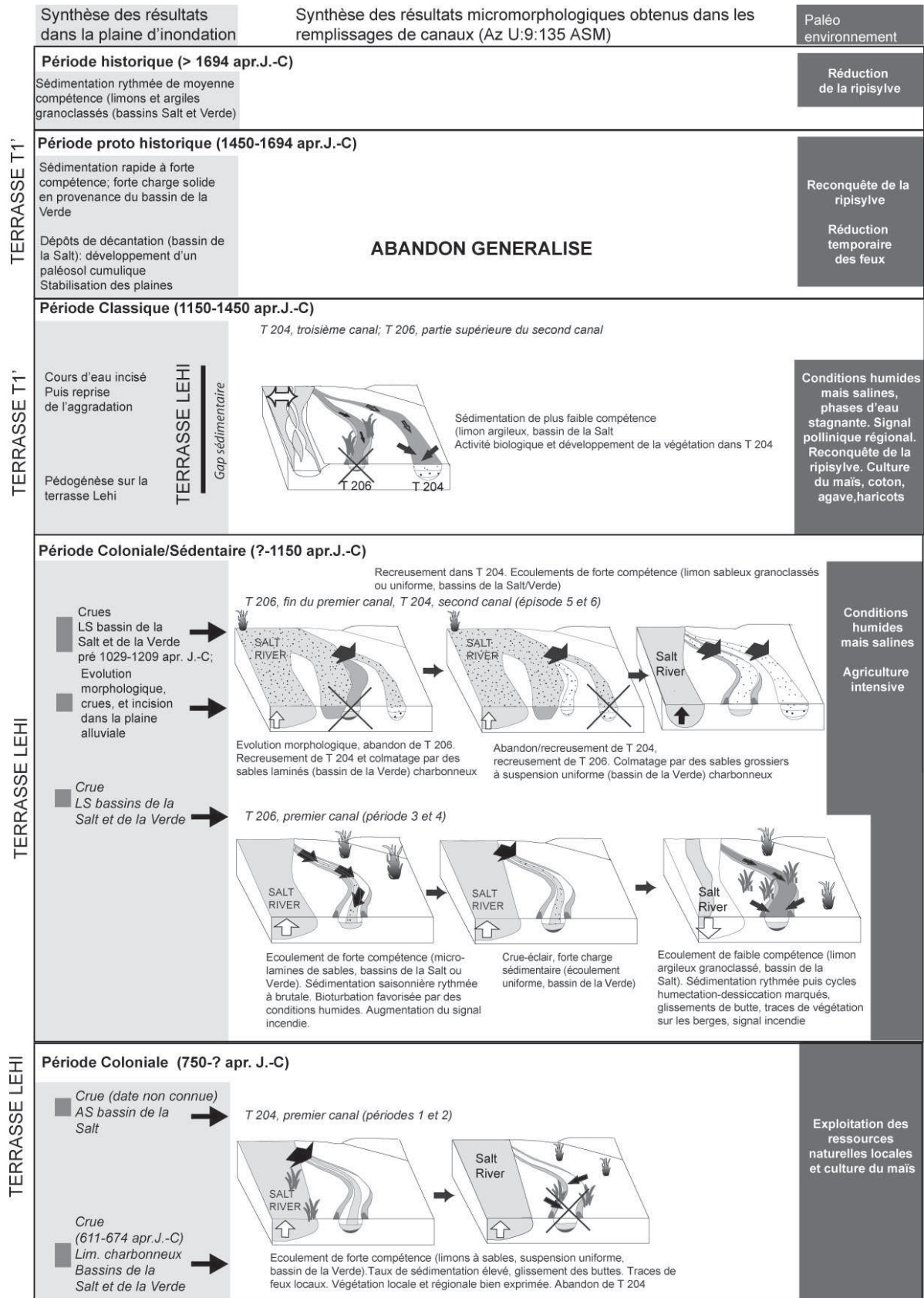


Fig. 196 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du CS1, période Coloniale à Classique (de 600 à 1700 apr. J.-C.)

Le signal pollinique régional enregistré et les résultats pétrographiques confirment l'origine des sources sédimentaires. Des limons argileux à sableux granoclassés les superposent. Certains de ces dépôts présentent des traces de bioturbation qui attestent d'épisodes d'exondations. Dès cette période, les crues sont réduites sur la terrasse Lehi, ce qui favorise le développement pédologique dans ce secteur. Maïs, agave, coton et haricots sont cultivés. Les canaux sont abandonnés à la fin de la période Classique, malgré ce retour à une sédimentation rythmée, qui signe des conditions d'irrigation potentiellement optimales.

5) **Stabilisation des paysages, développement de la ripisylve, puis aggradation**

Dès la fin de la période Classique (post 1450 apr. J.-C.), une sédimentation de faible compétence est observée dans la plaine alluviale. Un paléosol cumulique composé d'argile à argile sableuse en provenance du bassin amont se développe. Sa structure prismatique fine indique des épisodes d'humectation/dessiccation répétés, associée à la reconquête de la ripisylve à proximité du chenal encaissé ou éloigné. Ceci est suivi par une aggradation rapide de la plaine au cours du 16^{ème}-17^{ème} s. par des limons à litage parallèle en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt, puis de la Verde. Le litage parallèle bien exprimé est un indicateur d'un équilibre temporaire entre décharge solide et liquide (Huckleberry, communication personnelle). La ripisylve semble toujours bien exprimée.

6) **Erosion régionale, aggradation rapide et rythmée**

Entre le 17^{ème} et le 18^{ème} s., la **période historique** est caractérisée par la poursuite de l'aggradation des plaines par des limons en provenance du bassin de la Verde, mais qui présentent une suspension graduée. L'absence de traits pédologiques et de matière organique indique une sédimentation rapide, rythmée et une disparition de la végétation dans le lit majeur. Une phase d'incision est observée et conduit à la formation de la terrasse T'1.

1.2. Le Scottsdale System

1.2.1.1. **Dynamiques pédosédimentaires et paléoenvironnementales, SRMG LOG 4 (Terrasse T'1/Lehi)**

L'analyse micromorphologique du site SRMG Log 4 est détaillée en Annexe 5C. La synthèse des tendances pédo-sédimentaires permet de distinguer 4 phases (Fig. 197). Les faciès hydrosédimentaires, les traits texturaux et des traits d'oxydation mentionnés sont présentés dans la partie III, Tab. 28 et en Annexe 4.

PERIODE 1 (US 1-7): Cette première période n'a pas été calée chronologiquement, mais elle date peut-être de la période Sédimentaire. Des argiles de décantation à structure prismatique, riches en traits d'oxydation, sont observées à la base de la séquence. Elles témoignent d'écoulements réduits, de conditions humides et d'un développement pédologique. Des limons et argiles sableuses granoclassées en provenance du bassin amont et central de la Salt les superposent et indiquent une sédimentation rythmée et rapide de faible compétence (phase 1a). Cette dynamique évolue avec la déposition de limons à litage parallèle et à granoclassement positif (phase 1b).

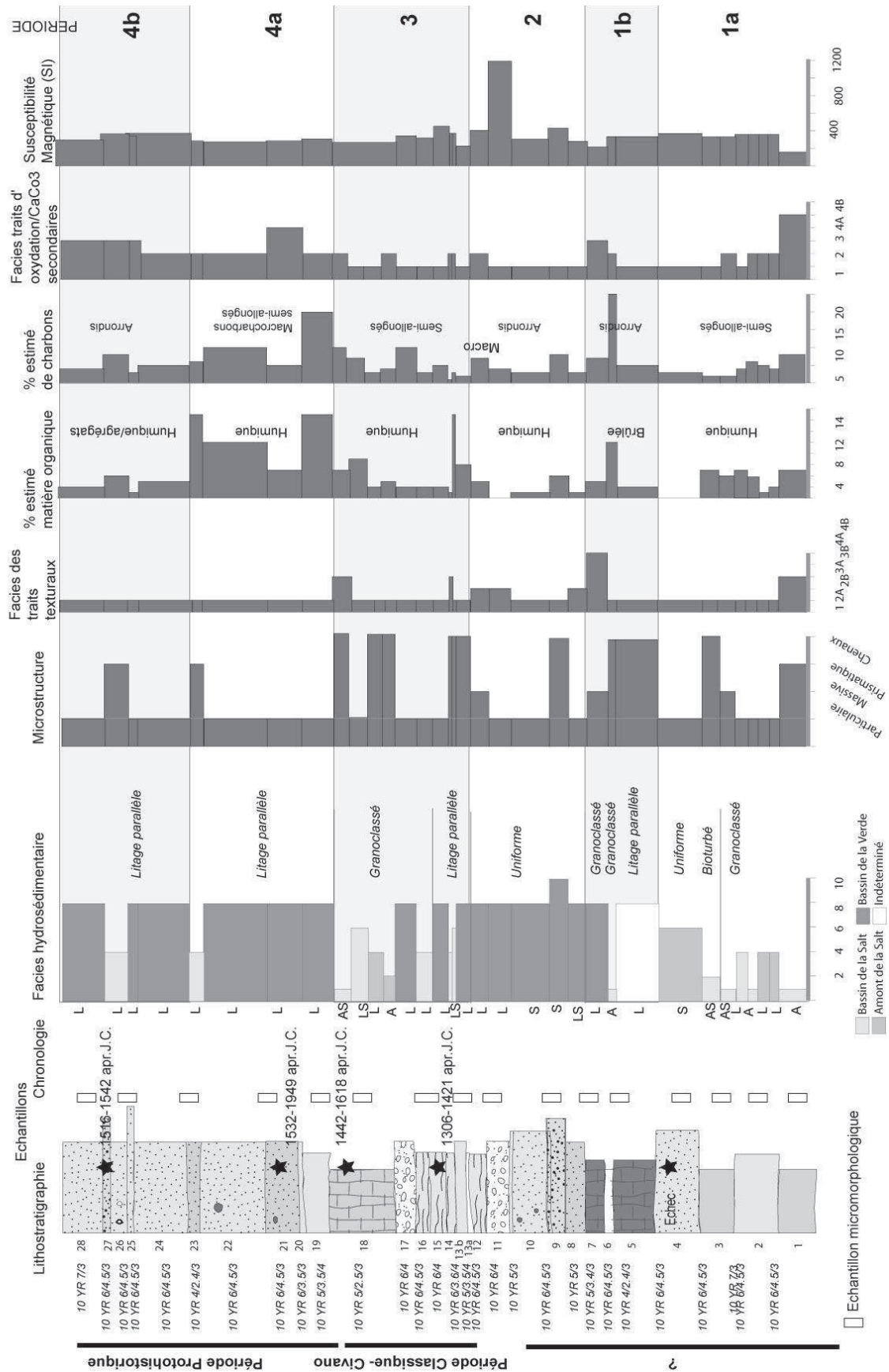


Fig. 197 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, SRMG LOG 4

La microstructure en chenaux de ces dépôts et l'apparition simultanée de traits texturaux et ferrugineux indique une mise en surface et le développement de processus pédologiques. La présence de cendres in situ met en évidence une phase d'éclaircissement de la végétation par le feu dans la plaine. Cette phase traduit la mise en place d'un paléosol cumulique.

PERIODE 2 (US 8-13): Des sables et limons à suspension uniforme en provenance du bassin de la Verde indiquent une dynamique de *crues* ou le rapprochement du chenal principal. Des feux sont attestés. La date exacte de cette dynamique n'est pas connue.

PERIODE 3 (US 13b à 18): Des limons en provenance de l'ensemble du bassin de la Salt et du bassin de la Verde se déposent entre le 14^{ème} et la 15^{ème} s. apr. J.-C (période Civano-Polvoron). Des argiles laminées les couvrent et les traces de bioturbation (US 18) attestent d'un ralentissement temporaire de l'aggradation de la plaine et du développement des processus pédologiques. Cette évolution peut être le résultat d'un éloignement du chenal par rapport au site étudié ou d'une diminution de la décharge et de la compétence fluviale.

PERIODE 4 (US 19-29): Le dépôt de sédiments limoneux grossiers à litages parallèles en provenance du bassin de la Verde, principalement, caractérise la période 4 (16^{ème}-17^{ème} s.). La sédimentation est rapide et les débits solides importants. La phase 4a est caractérisée par une forte concentration en matière organique humique, puis sous forme d'agrégats, qui provient de l'érosion des litières de la ripisylve. La présence de macrocharbons augmente rapidement et traduit également une reprise des incendies dans le bassin de la Verde.

1.2.2. *Moyens de subsistance*

1.2.2.1. Répartition géographique des ressources

L'emplacement géographique du système Scottsdale sur des terrasses escarpées suppose une répartition des ressources différente des autres systèmes. L'architecture publique et l'habitat sont concentrés dans ces zones. Un découpage hypothétique peut être proposé (Doyel et Crary, 1995). Les terrasses Lehi et Mesa ainsi que la plaine alluviale de l'Indian Wash Bend ont été cultivées et irriguées (Midvale, 1968). Des dépôts de pente et cônes détritiques (bajadas) formés par l'érosion des McDowell Mountains sont observés au nord de la terrasse Mesa. La concentration en artefacts, les fours et les zones de stockage suggèrent des occupations temporaires liées au traitement des espèces cueillies (cactus). Au pied de ces formations, la découverte de sites agricoles de petite taille, d'amas rocheux, de pictogrammes et d'artefacts isolés (ex : Schroeder et al., 1999) pose l'hypothèse d'une agriculture sèche. A une altitude supérieure, la présence de mammifères de grande taille (herbivores) aurait pu constituer un terrain de chasse privilégié.

1.2.2.2. Evolution des moyens de subsistance

Des échantillons de pollen ont été prélevés dans des structures type maison en fosse et canaux (village de Az U:9:95 ASM et cabane des champs U:9:97 ASM).

Les résultats (Tab. 42) mettent en évidence une augmentation de la récolte de graminées et de massettes au cours de la période Classique, mais aucune autre évolution des moyens de subsistance n'a été décelée en diachronie.

Phase	Az U :9 :95 (ASM)	Az U :9 :97 (ASM)
Coloniale-Gila Butte (750-850 apr. J.-C.)	Maïs, cholla, coton, mesquite, cactus raquette, saguaro	Maïs, cholla, saguaro, courge, massettes
Classique tardif (1300-1450 apr. J.-C.)	Maïs, cholla, coton, graminées, mesquite, cactus raquette, saguaro, massettes	Maïs, cholla, coton, massettes

Tab. 42 : Synthèse diachronique des analyses polliniques conduites sur des sites implantés le long du Scottsdale System (Smith, 1995)

1.2.2.3. Signature botanique et malacologique des remplissages de fossés

Des analyses malacologiques et palynologiques ont été conduites dans les canaux appartenant aux sites Az U:9:99 et U:9:100 ASM (Smith, 1995b ; Palacios-Fest, 1995) (Fig. 198).

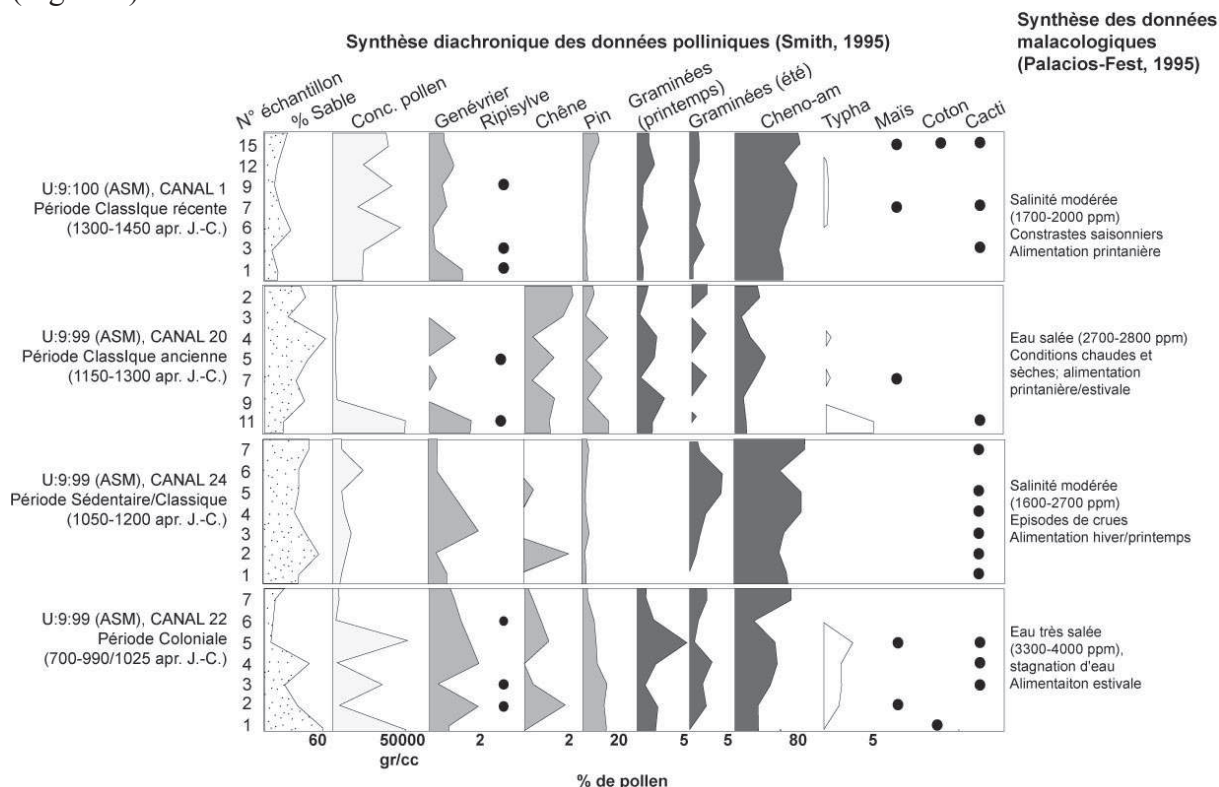


Fig. 198 : Résultats des analyses malacologiques et polliniques conduites dans 4 canaux du système Scottsdale, exploités de la période Coloniale à Classique.

Les canaux sont localisés sur les terrasses Mesa (F1, F20) et Lehi (F 22, 24) et leur utilisation s'étend de la période Coloniale à Classique. Ces résultats ne permettent pas de discuter de l'évolution régionale de la végétation mais mettent en évidence quelques points remarquables en ce qui concerne les moyens de subsistance.

- Les remplissages de canaux de la période Sédentaire et du début de la période Classique ont une texture nettement plus grossière que les autres canaux et par conséquent une concentration en pollen inférieure.

- Quelle que soit la période culturelle, les chénopodiacées/amarantacées dominent dans le corpus. Leur présence est le témoin de perturbations anthropiques liées à l'activité agricole (Gish, 1979) et d'une préservation différentielle du corpus pollinique. Des concentrations plus faibles en cheno-am, maïs et coton au cours de la période Classique, peuvent résulter d'une phase de déprise agricole. Les massettes, bien présentes au cours des périodes Coloniale et Classique témoignent de conditions humides, peut-être en bordure de fossé. Ces dernières sont récoltées et consommées, car elles sont mises en évidence sur les sites d'habitats.

- Enfin, des pollen de cactus ont été identifiés au cours des périodes Coloniale et Sédentaire dans la plaine alluviale, en dehors de leur habitat naturel. Leur concentration diminue au cours de la période Classique, ce qui est en contradiction avec les autres systèmes d'irrigation où les ressources secondaires (espèces favorisées ou cueillies) dominent. Il semblerait donc que ces derniers soient exploités en plaine (Smith, 1995), ou introduits dans ces zones.

1.2.3. *Conclusion partielle*

Les résultats pédo-sédimentaires et paléoenvironnementaux dans le secteur de Scottsdale complètent le phasage chronostratigraphique proposé en partie II.

Un ralentissement des dynamiques hydrosédimentaires associé à la formation de paléosols cumuliques est peut-être observé au cours de la période Sédentaire et attesté au début de la période Protohistorique (9^{ème}-11^{ème} s., et circa 1450-1600 apr. J.-C.). Les traits pédologiques observés en lame mince (traits texturaux, traits d'oxydation, traits carbonatations secondaires) attestent d'un développement pédologique plus prononcé au cours de la période Sédentaire qu'au cours de la période Protohistorique. La formation du second paléosol est favorisée par la déprise agraire à la fin de la période Classique, qui contribue à la reconquête de la ripisylve dans la plaine alluviale. Le cours d'eau est peut-être étroit et plus encaissé. La végétation limite par ailleurs la dispersion des sédiments lors d'épisodes de crue et piège les sédiments fins. Cette reconquête de la ripisylve est observée à l'échelle régionale, de même que la recrudescence des incendies.

Les deux phases d'aggradation majeures identifiées sur la terrasse T'1 entre 1150-1300 apr. J.-C. (période Classique Soho) puis au cours du 16^{ème}-17^{ème} s. (période Protohistorique) sont composées de sables à suspension uniforme, à forte capacité érosive, qui proviennent du bassin de la Verde (régime pluvio-nival). Ils détruisent les vannes d'entrée des canaux utilisés au cours de la période Classique, qui sont abandonnés dans la plaine. L'exploitation agricole dans ce secteur diminue entre 1150 et 1300 apr. J.-C.

Une période d'aggradation de dynamique intermédiaire est observée entre 1300 et 1450 apr. J.-C. Les sédiments granoclassés et à litage parallèle en provenance du bassin de la Salt attestent d'une sédimentation rythmée dans la plaine. A cette même période, graminées et typha sont exploitées ce qui pourrait suggérer des conditions toujours humides et des épisodes de remontée de nappe durables dans la plaine.

1.3. Le Canal System 2

1.3.1. *Un système d'irrigation fragilisé*

1.3.1.1. Analyse micromorphologique d'un canal de la période Classique dans le village de La Lomita (Az U :9 :67 ASM)

Les résultats détaillés de l'analyse micromorphologique sont présentés en Annexe 5D. De façon synthétique, 4 phases ont été distinguées (Fig. 199). Elles témoignent d'une efficacité modérée de cette structure hydraulique. Les facies présentés (hydrosédimentaire, traits texturaux, traits d'oxydation) sont décrits en Annexe 4.

PERIODE 1 (US 2-7) (1212-1282 apr. J.-C.) : Les US 1 et 2 correspondent au glissement des buttes dans le canal avant sa mise en fonctionnement car ils sont identiques au substrat de la terrasse Mesa. Le canal est alimenté par des limons graveleux, grossiers, sableux et argileux en provenance des chenaux intermittents sur les cônes détritiques (Phoenix/Camelback Mountains). Le remplissage est initialement torrentiel et la sédimentation rapide (phase 1a).

Les traits texturaux, d'oxydations et les carbonates secondaires attestent d'un développement pédologique que confirment la microstructure bioturbée (phase 1b) et la présence de matière organique dans le canal. Ce dernier finit par s'assécher totalement. Le canal est toutefois bien entretenu au cours de cette première phase.

PERIODE 2 (US 10-17) (1272-1291 apr. J.-C.) : Les sédiments à la base du nouveau canal (US 11, phase 2a) sont de texture limono-argileuse, granoclassés et de couleur rouge. Ils proviennent du bassin amont de la Salt. Certaines des lamines ont une microstructure grumeleuse qui indique une exondation complète peut-être pluriannuelle. En effet, le développement des traits pédologiques (traits texturaux et traits cristallins) témoigne d'une circulation latérale de l'eau. Les nombreux charbons attestent d'épisodes de feu dans le bassin de la Salt et peut-être localement. Des limons argileux granoclassés de couleur beige à brun clair se superposent à ces dépôts (phase 2b). Ces microUS ont une structure massive à cavitaire qui indique des conditions humides et une sédimentation plus rapide bien que de faible compétence. La présence d'agrégats de matière organique témoigne d'une érosion des sols toujours marquée à l'échelle du bassin versant.

PERIODE 3 (US 18-20) : Des limons argileux rouges mélangés à des nodules de caliche caractérisent cette phase. Des graviers ont également été identifiés. Matière organique, charbons, traits texturaux, traits d'oxydation sont absents. Ces dépôts proviennent probablement du glissement des buttes ou du sapement des berges au moment de l'abandon du canal.

PERIODE 4 (US 21-24) : Des graviers de taille millimétrique mélangés à des sédiments fluviaux qui proviennent du bassin amont de la Salt colmatent le canal. Etant donné leur position en partie sommitale du canal, ces dépôts sont post-abandon. Ils correspondent donc à des épisodes de ruissellements latéraux depuis les cônes torrentiels proches qui remobilisent les sédiments déposés en partie sommitale du canal. Le moment de leur mise en place n'est pas connu.

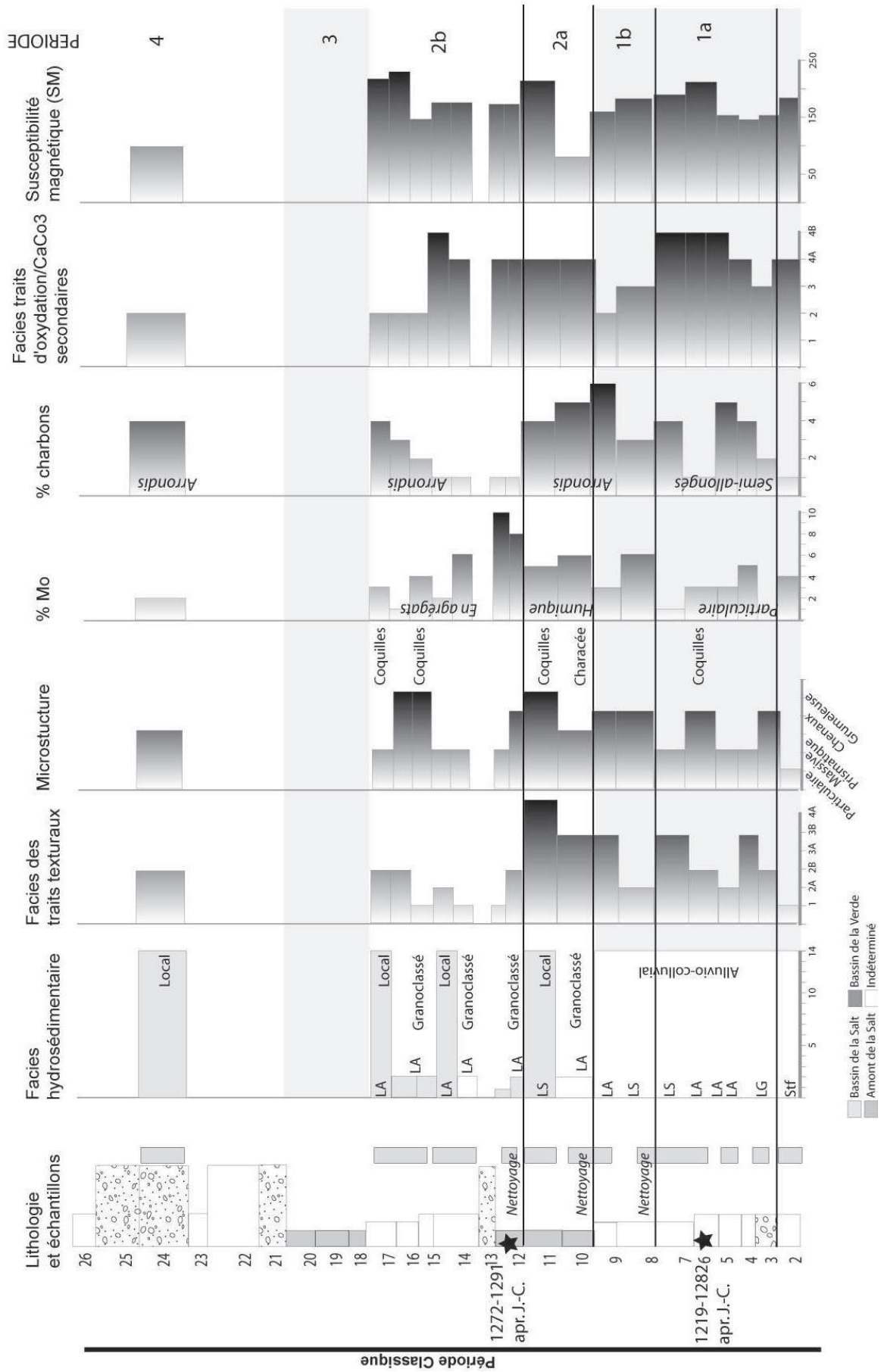


Fig. 199 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, La Lomita

1.3.2. *Moyens de subsistance le long du Canal System 2*

Les données paléoenvironnementales sont plus nombreuses le long du CS2 (Tab. 43). Elles mettent en évidence qu'au cours de la **période Préclassique (500-950 apr. J.-C.)**, presque la totalité des espèces cultivées sont présentes dans les corpus. Le maïs et les chénopodiacées-amarantacées dominant, le coton est exploité, de même que les cactus sur les piémonts, les espèces de ripisylves et l'agave.

Site	Unité géomorphologique	Auteur	Période Préclassique (400-1150 apr. J.-C.)	Période Classique (1150-1450 apr. J.-C.)
<i>Dutch canal Ruin</i>	QT3	Cummings, 1988 ; Ruppe, 1988 ; Kwiatkowski, 1994 ; Diehl, 2003 ; Smith, 2003	Maïs, cheno-am, agave, mesquite, cacti, courge, coton	Diminution du maïs et du mesquite, diversification des ressources, utilisation de graminées
<i>Pueblo Salado</i>	QT3	Greenwald et al., 1994	Maïs, chen-am, cholla, massette	Maïs, cholla, cattail, maïs, haricots, coton, graminées, mesquite, cholla, cactus raquette, diminution des cheno-am
<i>Pueblo Grande</i>	QT3	Miller, 1994 ; Anderson et Smith, 1994	Maïs, cheno-am, moutarde, cacti, mesquite et graminées	Utilisation plus prononcée du Cholla, diminution du mesquite et saguaro
<i>Aéroport de Phoenix</i>	QT3	Smith, 2003	Mesquite	Augmentation du pollen de cacti (<i>Cylindropuntia</i> et <i>Carnegiea</i>) et de typha
<i>Pueblo Patricio</i>	QT3	Smith, 1995 ; Gish, 1983, 1984	Creosote, ambroisie, mesquite, maïs, cholla et coton	Diminution du maïs
<i>Las Colinas</i>	QT2	Miksicek et Gasser, 1989	Cheno-am, agave	Importation de produits agricoles
<i>La Lomita Pequena</i>	QT2	Fish, 1988a	Maïs, coton, cucurbitacées, orge sauvage, chénopodiacées, cactus raquette, mesquite	/
<i>La Ciudad</i>	QT2	Gish, 1987	Maïs, courge, coton, cholla et cheno-am	Plus grande diversité pendant la période PréClassique (Pionnière)
<i>La Lomita</i>	QT2	Fish, 1990	Cheno-am, maïs, courge, coton, graminées (orge sauvage), cholla, "cactus raquette", mesquite, moutarde, massette et saule	
<i>T :12 :48 (ASM)</i>	QT2	Fish, 1988b	<i>Cabane des champs</i> : Zea Maïs, mesquite, cactus	Augmentation de l'ambroisie, de l'arroche, de la moutarde, du plantago, du pourpier, et de la sauge et l'apparition du coton
<i>T :11 : 51 (ASM)</i>	QT2	Fish, 1988b	<i>Cabane des champs</i> : Cucurbitacées, agave, ambroisie, malvacées (<i>Sphaeralcea</i>), zygophylacées (<i>Kallstroemia</i>)	

Tab. 43: Synthèse des données botaniques sur les principaux sites archéologiques le long du Canal System 2

Une des principales caractéristiques du couvert végétal sur la rive nord de la Salt River est la présence d'un **bosquet de mesquite** dans la plaine alluviale, également observé au cours des périodes historiques.

Dès la période Coloniale (750 apr. J.-C.), certaines zones du bosquet sont éclaircies afin de construire des canaux d'irrigation, mais probablement également afin de s'approvisionner en bois et/ou créer de nouvelles parcelles agricoles (Cable et Mitchell, 1988). Sur le site de Las Colinas, juste au nord du bosquet, le pourcentage de mesquite atteint 54% du spectre des espèces identifiées. Ces valeurs sont réduites à 27% 4 km au nord, à 19% à 6km du bosquet, et disparaissent 8 km au nord (Mitchell, 1989b), ce qui témoigne d'une utilisation locale des ressources. A la fin de la période Coloniale (950 apr. J.-C.), la proportion totale de mesquite identifiée dans les *fieldhouses* et les fermes est nettement inférieure à celle du maïs (Gasser, 1984). La réduction progressive de la superficie de ce bosquet a très probablement favorisé la fréquence des crues. Ce n'est qu'à la fin de la période Classique que ce bosquet reprend de l'ampleur.

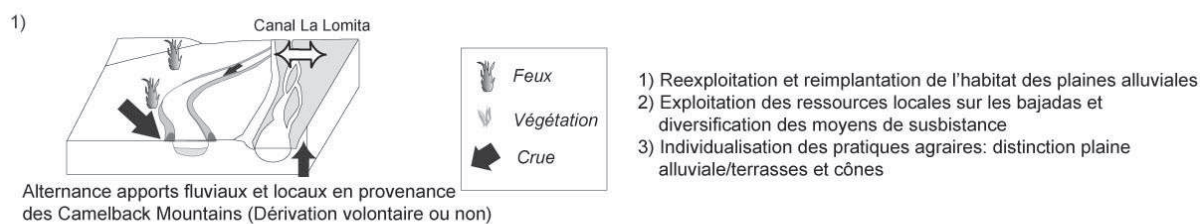
Au cours de la **période Classique (1150-1300 apr. J.-C)**, la gestion agricole du territoire évolue. Le corpus mis en évidence suggère une dynamique similaire à celle du début de la période Coloniale (Miksicek et Gasser, 1989), avec la pratique de la cueillette sur les piémonts et les pieds de pente. Les ressources disponibles exploitées diminuent de façon exponentielle sur le court terme (Kwiatkowski, 2003). En parallèle, les pratiques agraires s'individualisent. Ainsi, dans le village de Pueblo Salado, légèrement isolé géographiquement sur la plaine alluviale, les espèces exploitées sont plus diversifiées que dans d'autres sites. On a avancé qu'au sein de ce village, le travail et la transformation directe des récoltes se faisaient au sein de l'unité familiale, et les produits exportés. Dans les villages implantés sur les terrasses pléistocènes au nord (ex : Las Colinas ou Casa Buena), la concentration en espèces cultivées ne dépasse pas 3 %. Ainsi, seuls des produits transformés arrivent dans les villages (Gish, 1988). L'importation de produits agricoles et la diversification des ressources consommées est facilement associée à une forte poussée démographique. Il est possible que superficie totale cultivée subvienne difficilement aux besoins alimentaires d'une population en augmentation.

1.3.3. Conclusion partielle

Une synthèse de l'approche micromorphologique et paléoenvironnementale entre 1150 et 1450 apr. J.-C. (période Classique) est présentée dans la Fig. 200. Elle met en évidence la dominance des dynamiques érosives locales entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (période Soho) qui s'expriment par la réactivation des cours d'eau temporaires sur les cônes détritiques latéraux. Ces dynamiques résultent de fortes pluies sur les Phoenix Mountains et les Papago Buttes. Elles favorisent le développement de la végétation sur les bajadas et pourraient expliquer l'augmentation de l'exploitation des ressources locales au cours de cette période, et le besoin, pour les villages plus au nord, d'importer des produits transformés. La présence de charbons dans les dépôts pourrait indiquer une exploitation agricole des piémonts, associée à des épisodes de brûlis. Entre 1300-1450 apr. J.-C. (période Civano), les canaux sont colmatés par des limons argileux granoclassés en provenance du bassin amont de la Salt. Ils traduisent une arrivée d'eau rythmée, avec une montée/chute saisonnière du niveau de l'eau. Malgré une compétence faible qui pourrait conduire à un volume d'eau dérivable réduit, le fonctionnement des

canaux semble optimal. Le canal de La Lomita est abandonné malgré son efficacité. En parallèle à la déprise agraire, une reconquête de la ripisylve est observée.

Période Classique Soho (1220-1300 apr. J.-C.)



Période Classique Civano (1270-1300 apr. J.C.)

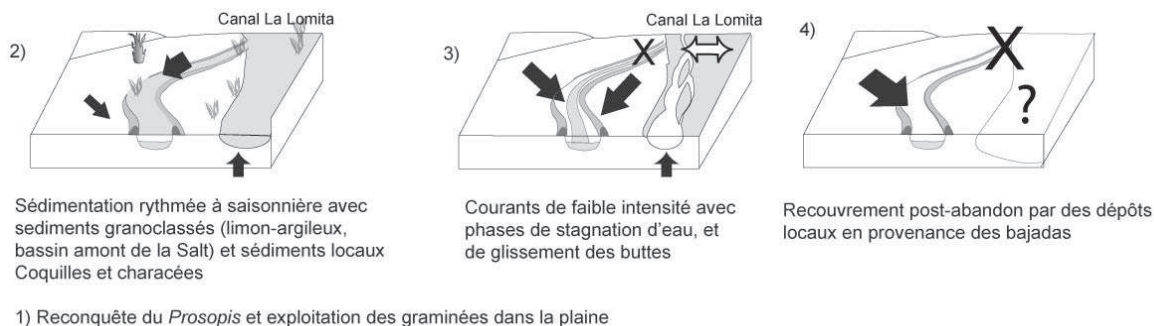


Fig. 200 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du Canal System 2, période Classique Soho (1220-1300 apr. J.-C.)

1.4. Le Canal System 7

1.4.1. Irrigation et agriculture sur la rive sud, en aval

1.4.1.1. Résultats de l'analyse micromorphologique et paléoenvironnementale (canaux Ecoplan F7 et F1)

Les résultats détaillés de l'analyse micromorphologique sont présentés en Annexe 5 E mais les Fig. 201 et Fig. 202 synthétisent les principales caractéristiques pédosédimentaires et écologiques des dépôts. Les canaux ne sont pas utilisés de façon contemporaine, donc 8 phases ont été identifiées et se succèdent. Les faciès présentés (hydrosédimentaires, traits texturaux, traits d'oxydation) sont décrits en Annexe 4.

PERIODE 1 (F 7, US 1-6) : Des sables granoclassés à structure massive indiquent une *alimentation en eau peut-être saisonnière à permanente* du canal au cours du 7^{ème} s. La dynamique fluviale est de forte intensité. Pollen et ostracodes sont absents.

PERIODE 2 (F 7, US 7-8) : Des limons sableux homogènes, à litage parallèle, en provenance du bassin de la Salt River sont identifiés (US 7) et traduisent une *sédimentation rythmée*, voire permanente, de forte compétence. Ils sont superposés à des limons sableux organiques faiblement triés qui caractérisent un épisode d'effondrement des berges ou de glissements des buttes car ils contiennent des nodules de caliches (encaissant). Quelques fragments de matière organique préservée pourraient indiquer une *végétation dans le canal ou sur ses berges*.

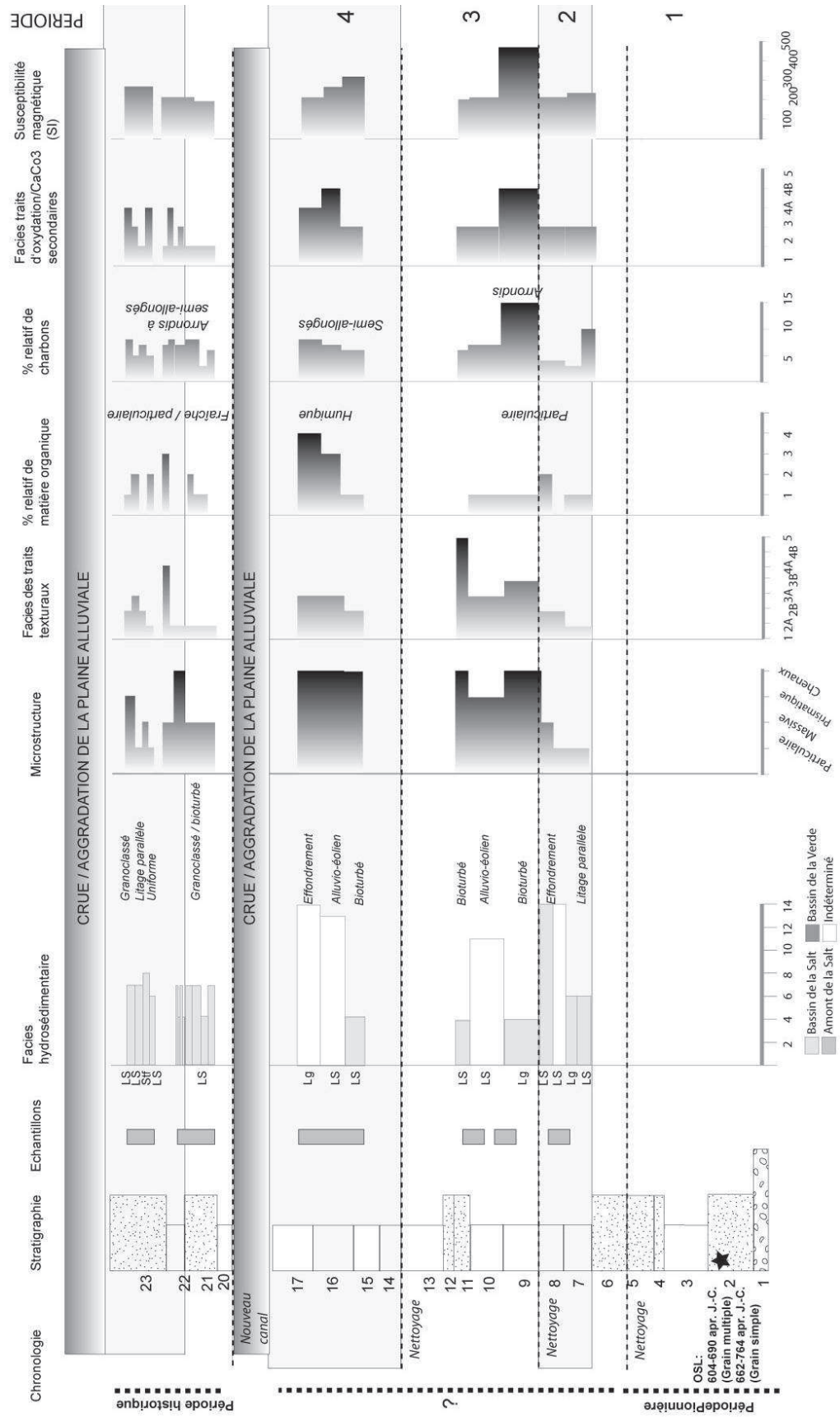


Fig. 201 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques /magnétiques, Ecoplan F 7

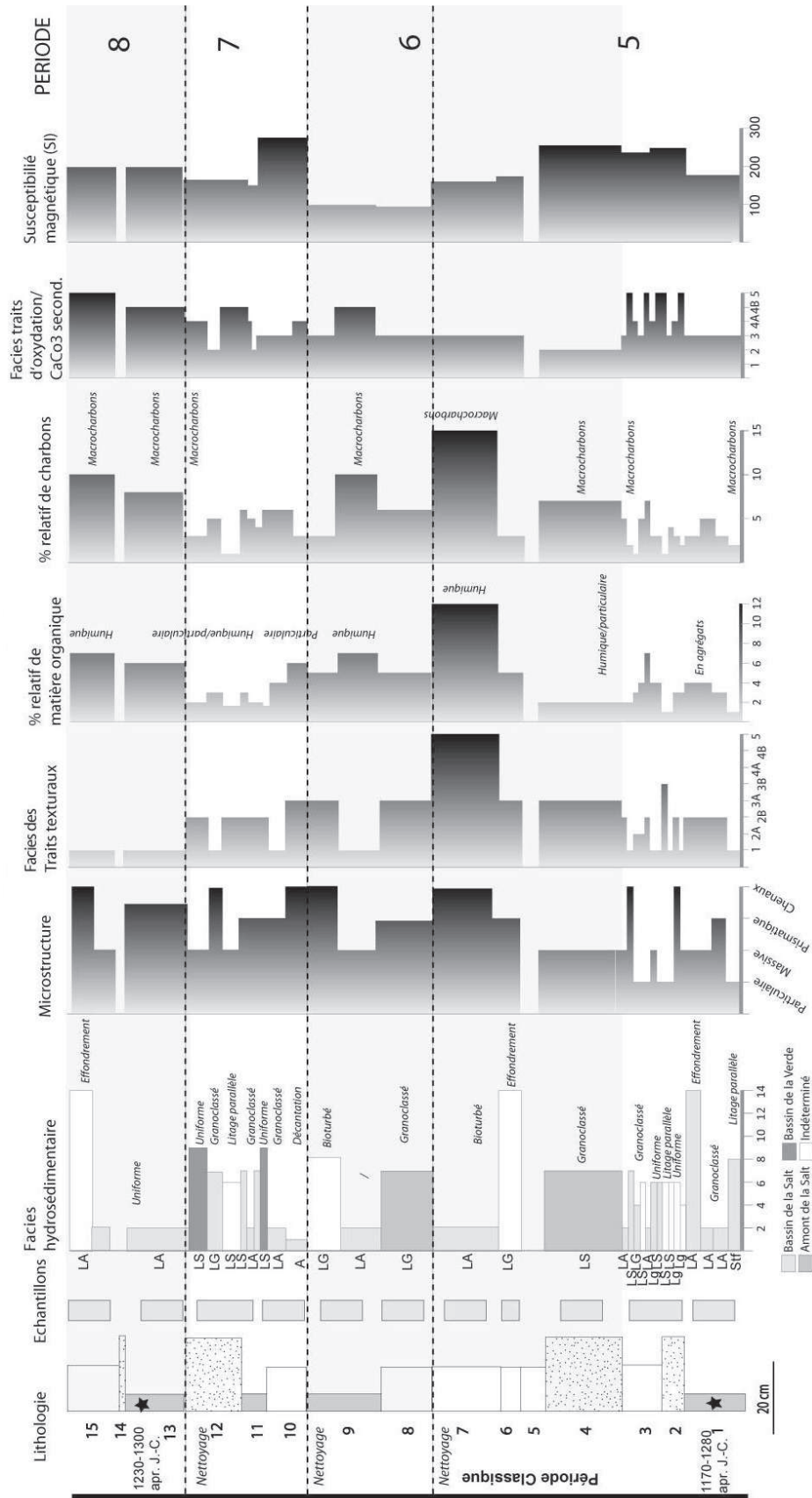


Fig. 202 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques /magnétiques, Ecoplan F 1

PERIODE 3 (F 7, US 9-13) : Cette phase est composée de limons grossiers à sableux à structure cavitaire et bioturbée. Les analyses malacologiques suggèrent une longue *stagnation de l'eau et des eaux salines* qui ne dépassent pas 2000 mg/l STD (Solides Totaux Dissous). La détermination de pollen de chénopodiacées-amarantacées (90% du corpus total) pourrait signifier leur présence sur les berges des canaux. Des pollen de maïs ont été observés et renseignent sur les cultures à proximité, et enfin des anthères de compositae (famille Asteracées, genre Baccharis) indiquent leur présence localement, voire dans le canal.

La croûte pédologique observée au sommet de cette US 9 témoigne d'un assèchement terminal. En parallèle, la très forte teneur en microcharbons arrondis de petite taille, transportés avec la matière en suspension, indique des feux régionaux. Cette US est recouverte par des limons sableux homogènes alluvio-éoliens (US 10) et les rythmes de sédimentation diminuent. Les limons sableux bioturbés (US 11) traduisent des conditions humides, que les traits texturaux confirment, et des taux de sédimentation réduits.

PERIODE 4 (F 7, US 14-17): Des limons grossiers à sableux à litage parallèle, alluvio-éoliens ou issus de *l'effondrement des berges* indiquent un écoulement turbulent interrompu par des *phases d'exondation* (structure bioturbée). La teneur en matière organique est importante, ce que confirment les pollen de chénopodiacées-amarantacées, graminées et légumineuses, et le fort degré de bioturbation. La faible concentration en mollusques et ostracodes, altérés et fragmentés, suggère des conditions *d'évapotranspiration et salinisation croissante*. Un épisode de crue colmate le canal de façon définitive peut-être au cours de la période historique.

PERIODE 5 (F1, US 1-3) : Cette phase correspond à la sédimentation au cours de la période Classique Soho (1170-1280 apr. J.-C.) dans le canal F 1. Des limons argileux granoclassés en provenance du bassin de la Salt indiquent une sédimentation rythmée peut-être saisonnière, mais de faible compétence. Quelques macrocharbons pourraient indiquer des épisodes de brûlis sur la terrasse à proximité des canaux. Les déterminations palynologiques/carpologiques de massettes et de graminées évoquent une végétation en bordure du canal plus qu'au sein du canal (végétation non observée en lame mince). Quelques microlamines limono-sableuses à limoneuses grossières, à écoulement uniforme en provenance du bassin de la Salt, et des microlamines granoclassées en provenance de l'amont et du bassin médian-inférieur de la Salt les recouvrent. La sédimentation est toujours rapide et traduit une alimentation optimale des canaux au cours de cette période.

PERIODE 6 (F1, US 4-9) : Des limons sableux granoclassés positivement en provenance du bassin amont de la Salt sont observés et indiquent une sédimentation rythmée (US 4). Puis des conditions toujours humides (massettes et structure cavitaire des dépôts) favorisent un glissement des buttes du canal (US 6). Les limons argileux épais à structure prismatique fine, qui se déposent alors, témoignent *d'écoulements diffus ainsi que d'épisodes d'exondation* et d'assèchement (US 7). Les charbons sont nombreux. Le canal est curé puis des limons granoclassés en provenance du bassin

amont de la Salt se déposent à nouveau (US 8) et sont couverts par des limons argileux prismatiques (US 9).

Etant donné le degré de développement des processus pédologiques (traits texturaux et traits ferrugineux) le temps d'exposition du sédiment semble de longue durée. *Le canal ne semble plus alimenté en eau.* La végétation se développe alors dans le canal: massettes et cheno-am sont observées en très forte quantité (pollen et graines) ainsi que des anthères de roseaux et cheno-am. La présence de maïs suggère son exploitation à proximité.

PERIODE 7 (F1, US 10-12) : Un nouveau canal est construit (autour de 1230-1300 apr. J.-C.). Des lamines sablo-limoneuses à limono-argileuses se succèdent. Elles sont granoclassées ou faiblement triées et proviennent des bassins de Salt et de la Verde. La microstructure prismatique indique des conditions humides suivies par des phases d'assèchement, peut-être *saisonnnières*. Au sein de ces dépôts, des pollen de chêne et de genévrier ont été mis en évidence, ce qui pourrait confirmer l'évolution des sources sédimentaires. Le canal est nettoyé après cette phase.

PERIODE 8 (F1, US 13-15) : Le canal est colmaté par des limons argileux bioturbés (US 13) en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt entre 1230 et 1300 apr. J.-C. Matière organique à l'état humique et macrocharbons semi-allongés sont observés en forte quantité et les nombreux traits d'oxydation attestent d'une condition de saturation en eau de longue durée. La détermination de maïs, saguaro, massette et cheno-am (en agrégats donc in situ) confirment l'activité agricole avoisinante bien que le *canal semble en voie d'eutrophisation*. L'absence de mollusques dans ce même canal suppose des eaux très salines, soit plus de 2000 mg/l de STD (Solides Dissous Totaux).

1.4.1.2. Analyse micromorphologique d'une parcelle agricole sur la terrasse Lehi (Vulcan)

L'étude de la séquence stratigraphique de Vulcan apporte pour la première fois une information micromorphologique sur l'exploitation des sols de la terrasse Lehi (Fig. 204).

Trois phases de fonctionnement distinctes ont été mises en évidence. Les résultats détaillés de l'analyse micromorphologique sont présentés en Annexe 5F et les faciès décrits en partie III, Tab. 28 et en Annexe 4.

PERIODE 1 (US 1-5): Les sédiments de l'US 1 ont une origine éolienne et témoignent de la présence de dunes dans ce secteur. La faible altération des grains et leur forme subangulaire à subarrondie témoigne d'un faible transport. Des limons et sables magnétiques en provenance du bassin amont de la Salt les recouvrent. L'absence totale de matière organique et les nombreux macrocharbons arrondis témoignent de feux locaux et d'un couvert végétal réduit. Malheureusement il n'a pas été possible d'estimer l'origine de ces feux (anthropique ou naturelle).

PERIODE 2 (US 6-9a) : Cette phase n'a pas été datée, mais elle correspond probablement à la fin de la période Formative/début de la période Pionnière. Les sédiments sont limoneux bruns et proviennent des bassins de la Salt et de la Verde. Leur occurrence est un témoin d'épisodes de crue dans la plaine.

Leur couleur et structure prismatique, ainsi que les nombreux pseudomyceliums (1 à 3 mm), coquilles de mollusques, nodules ferrugineux et tessons très altérés (US 8), les distinguent très nettement des dépôts sus et sous-jacents. Des fragments de croûte pédologique attestent d'une mise en surface au sommet de l'US 9a, ainsi que d'un assèchement complet. Les autres traits texturaux, nombreux, sont très diversifiés (colmatage de vides, revêtements lités-US 8, gravitaires-US 7) (Fig. 203). La présence de traits grossiers a été rattachée aux pratiques d'irrigation des sols (Courty et Trichet, 1985). Dans les zones massivement irriguées, ces traits peuvent s'accumuler sur presque 40 cm, ce qui est le cas dans notre secteur. Dans la porosité, les revêtements sont initialement fins et poussiéreux, puis ils sont couverts par des colmatages de vides grossiers, témoins de phases d'instabilité en surface (US 7-8). Dans l'US 9, ces revêtements sont argileux mais peu poussiéreux, indiquant une probable évolution du couvert végétal. Les analyses paléopédologiques et référentielles modernes considèrent cette accumulation de particules fines en profondeur comme un témoin de l'exploitation des sols (Jongerius, 1970; Courty et Nørnberg, 1985 ; Ricks et al., 2004).

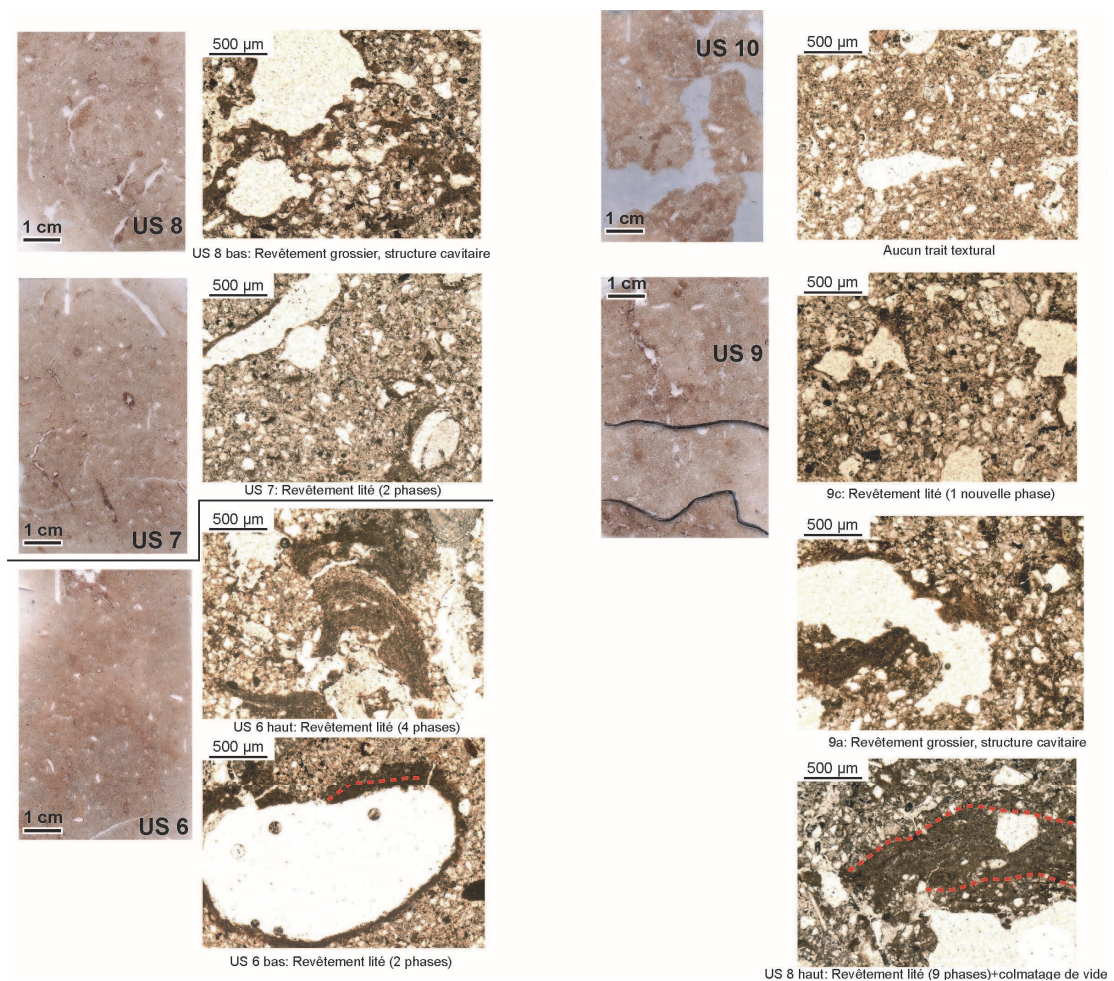


Fig. 203 : Scan des lames minces et microphotographies des sédiments de la phase 2 et des traits texturaux

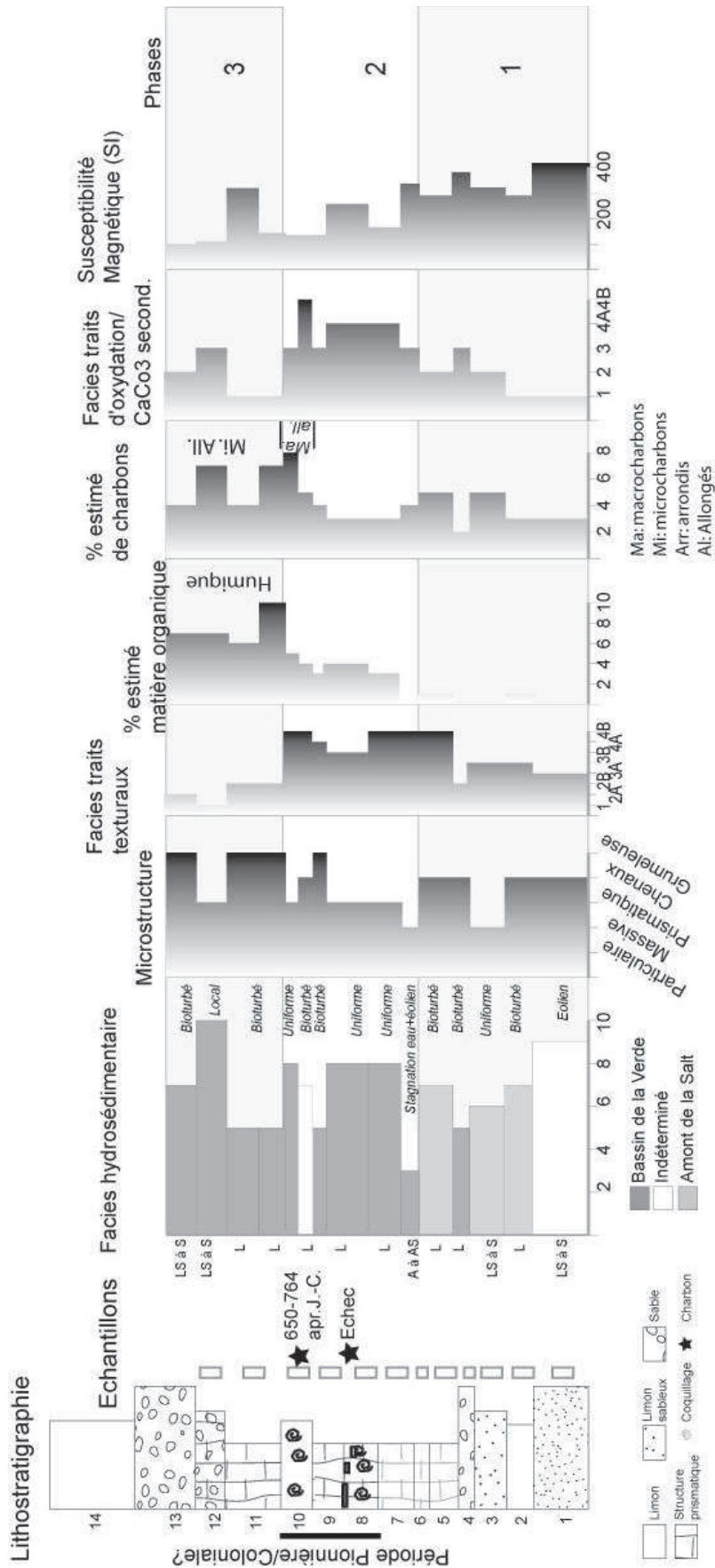


Fig. 204 : Stratigraphie et description de la séquence stratigraphique Vulcan, rivière Salt, terrasse Lehi

La *masse basale* évolue très nettement avec des facies grano- et porostriés. Ce sont les cycles d'humectation-dessiccation (Hussein et Adey, 1998) qui tendent à modifier la masse en fabrique granostriée (Ricks et al., 2004).

Le taux de matière organique est faible, suite peut-être à son ingestion par l'activité biologique. En revanche, des cristaux de calcite aciculaire ont été identifiés. Ils proviennent de la décomposition de la matière organique dans des horizons humides Ap et indiquent des conditions humides et aérées (Becze-Deak et al., 1997). Cet environnement humide est confirmé par la *structure cavitaire* des US 8 et 9a et les traits d'oxydation.

Bien que peu nombreux, des macrocharbons arrondis ont été mis en évidence dans toutes les US. Leur faible concentration et l'absence de cendres n'indiquent pas d'épisodes de feu in situ, mais pourraient témoigner de brûlis dans le champ.

PERIODE 3 (US 10-12) : Les dépôts sus-jacents sont limoneux et proviennent du bassin de la Verde. Ils comprennent de nombreuses racines et radicules, pseudomycéliums et coquilles éparses. Leur mise en place, qui résulte d'un épisode de crue régionale, s'échelonne entre 650 et 764 apr. J.-C. (période Pionnière à Coloniale).

En lame mince, la microstructure est grumeleuse. Le degré de bioturbation très élevé et les excréments organiques mis en évidence dans l'ensemble des US témoignent d'une activité biologique développée et de phases de stabilité de la plaine alluviale. Au sommet de l'US 12, une croûte structurale préservée témoigne d'une mise en surface. Les traits texturaux sont rares.

La teneur en matière organique est élevée, notamment dans l'US 10 où de longs fragments organiques amorphes ont été mis en évidence, en parallèle à la présence de coquilles et de nombreux microcharbons. Dans l'US 11, la matière organique est observée sous forme de lit de matière amorphe. L'ensemble des traits micromorphologiques observés ne permet pas d'attester de la pratique de l'irrigation au cours de cette phase. En effet, la microstructure grumeleuse s'oppose à la structure prismatique des sols irrigués, et le taux de matière organique est nettement plus élevé. Il est possible qu'un couvert végétal de type prairie se soit développé dans cette zone suite à son abandon temporaire (rotation des cultures ?) ou à la recrudescence des crues. Ce site représente une zone agricole optimale, par sa proximité à la rivière et la fertilité des sols, et l'hypothèse de son abandon ne paraît pas pertinente. Si cette zone est toujours occupée, les pratiques agraires semblent évoluer (agriculture sur eaux de crue ?).

1.4.2. Conclusion partielle

L'approche paléoenvironnementale et micromorphologique du comblement de deux canaux utilisés de la période Pionnière à Classique et d'une séquence stratigraphique permet de reconstruire l'évolution des dynamiques paléoenvironnementales sur presque 1000 ans (Fig. 205).

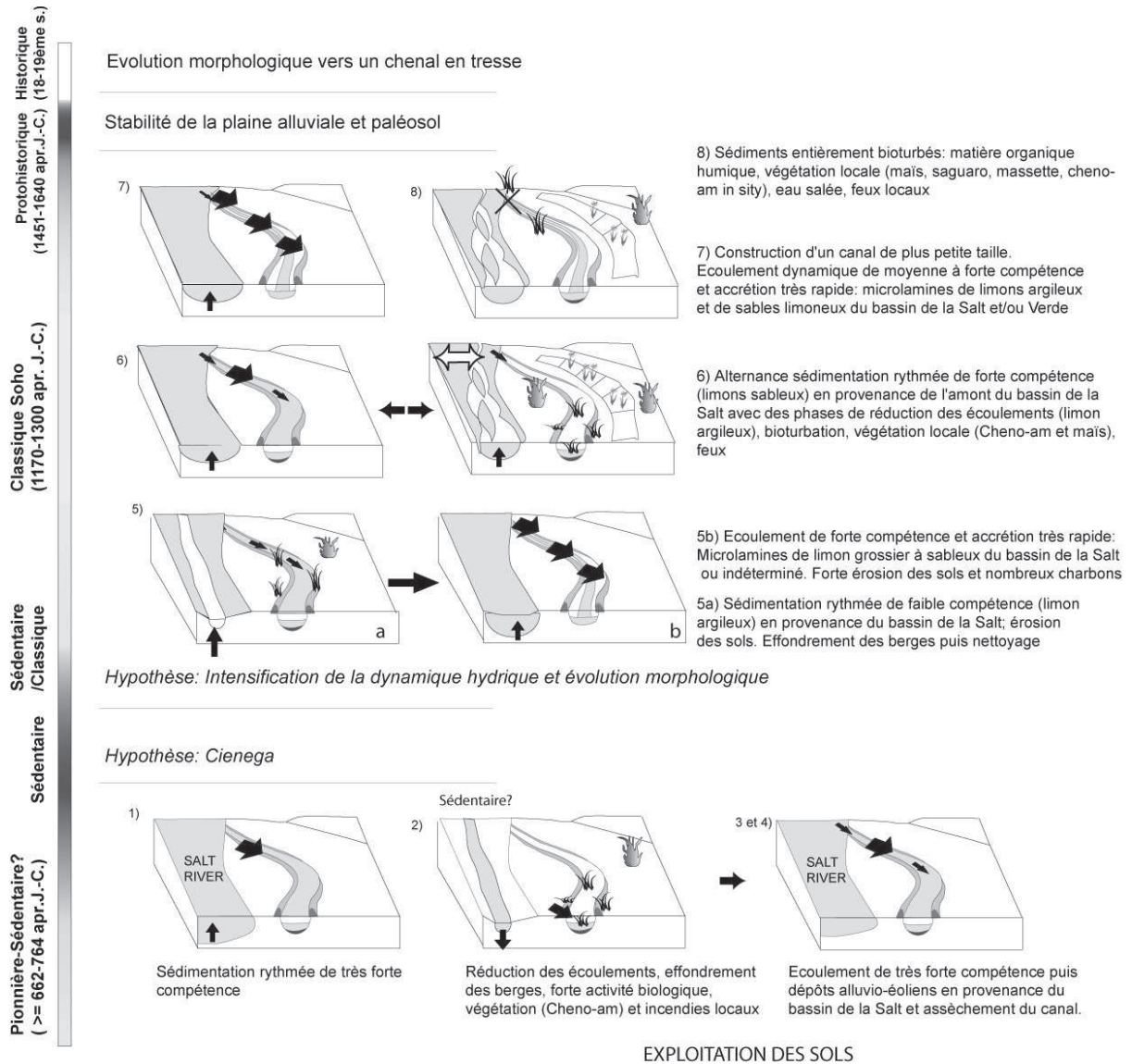


Fig. 205 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du Canal System 7, période Pionnière à Historique (7^{ème}-19^{ème} s.)

Du 6/7^{ème} s. au 10^{ème} s. (**période Pionnière à Sédentaire**), les conditions sont très contrastées. Dans la plaine, des périodes de crues sont attestées au cours du 7^{ème} s. Le secteur semble cultivé et irrigué au cours de cette période, comme le suggère l'identification de marqueurs micromorphologiques de l'irrigation. Dans les canaux, des sédiments grossiers granoclassés en provenance du bassin amont de la Salt indiquent un écoulement turbulent et une sédimentation rythmée, avec une Salt River peut-être large et facilement dérivable à la saison des pluies. Des épisodes fréquents d'effondrement des berges indiquent que ces structures sont alors instables et sensibles aux fortes dynamiques hydrosédimentaires.

Puis ces sédiments grossiers alternent avec des épisodes de plus faibles débits, caractérisés par un degré de bioturbation et une structure subangulaire qui témoignent de phases d'exondations temporaires avec le développement de la végétation.

On assiste à l'encaissement progressif du cours d'eau en parallèle à la mise en place d'une cienega qui témoigne de zones humides en bordure du cours d'eau au cours de la période Sédentaire. Des feux locaux, peut-être d'origine anthropique ainsi que des feux à l'échelle du bassin versant sont attestés.

Entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (**période Classique Soho**), comme observé dans de nombreux autres canaux, la sédimentation est très rythmée, voire permanente (microlamines de sédiments : limons argileux, puis limons grossiers à sableux, et enfin sables et argiles en alternance), ce qui témoigne d'un fonctionnement optimal des canaux, avec un haut niveau de l'eau saisonnier. Nous posons l'hypothèse d'un système à chenaux mobiles en voie d'exhaussement avec un lit majeur large au cours de la saison des pluies. La végétation se développe en bordure de ces structures hydrauliques. Des traces de maïs cultivé ont été mises en évidence à proximité. Les conditions sont toujours humides, et la zone cultivée, lorsque le canal est abandonné à la fin de la période Soho.

1.5. Le Canal System 12

1.5.1. L'irrigation en zone terminale

1.5.1.1. Résultats et interprétation de l'analyse micromorphologique et magnétique

Les résultats de l'analyse micromorphologique réalisée dans le Canal System 12 sont détaillés en Annexe 5G. Les principales caractéristiques pédo-sédimentaires des dépôts sont présentées dans les Fig. 206 et Fig. 207. Les facies mentionnés sont décrits dans la partie III, Tab. 29 et en Annexe 4. Six dynamiques pédo-sédimentaires ont été distinguées du 8^{ème} au 13^{ème} s. (période Coloniale (période 1 à 3), Sédentaire (période 4), Classique (périodes 5 et 6)). Elles sont schématisées Fig. 208.

PERIODE 1 (US 1-5 dans T 890 ; 2-5 dans T 887) : Le premier canal est en fonctionnement au cours de la période Coloniale (post 750 apr. J.-C.). La sédimentation est initialement rythmée (limon-argileux en provenance du bassin médian-inférieur de la Salt), mais de *faible compétence* et entrecoupée de phases d'exondations fréquentes. Ces dépôts sont couverts par des sables fins laminés ou à facies uniforme (phase 1B). La microstructure bioturbée et les traces de characées in situ indiquent le développement de la végétation dans le canal. Des dépôts d'effondrement des buttes sont observés.

PERIODE 2 (US 6-7 dans T 890 et T 887) : La texture grossière des sédiments (en provenance du bassin médian inférieur de la Salt) observés sous forme de microlamines massives, indique *une sédimentation rythmée, rapide et de forte compétence*. Le canal est alimenté en eau et fonctionne de façon efficace, peut-être en réponse à une augmentation du niveau de base de la Salt River ou un élargissement du chenal principal.

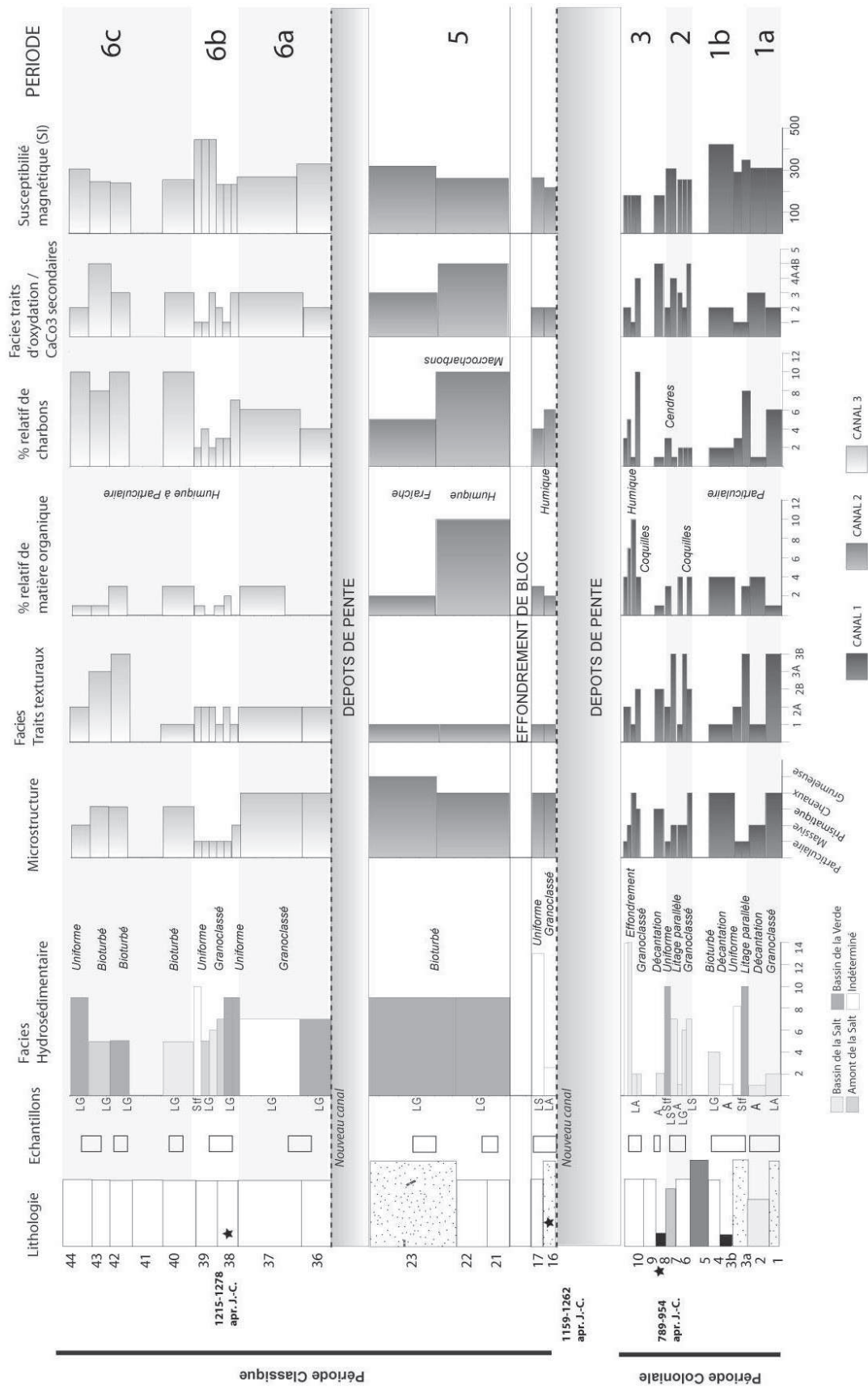


Fig. 206 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, Cashion site, T 890



Fig. 207 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, Cashion site, T 887

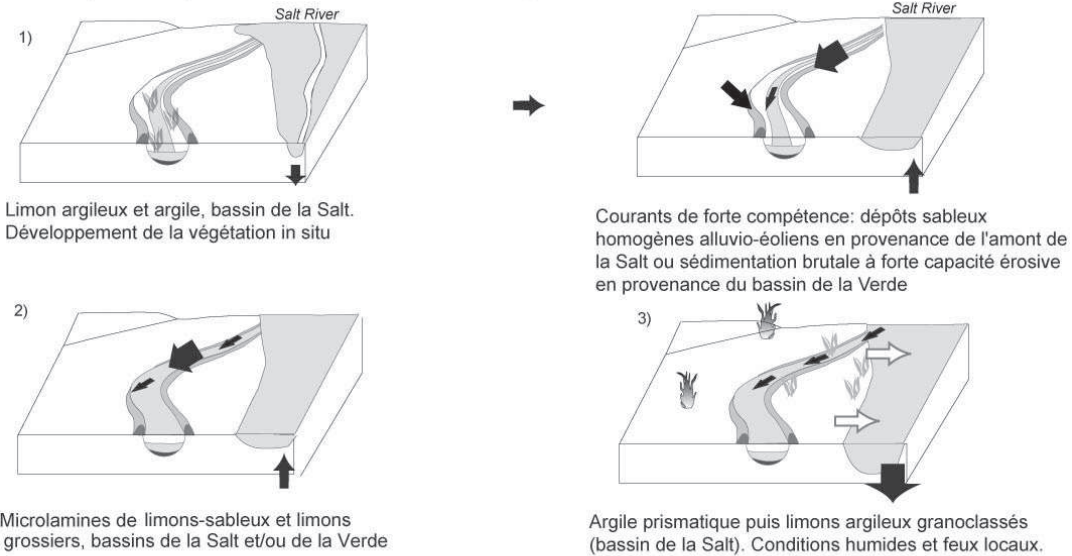
PERIODE 3 (US 8-10 dans T 890 et T 887) : Les écoulements diffus et de faible compétence (789-854 apr. J.-C.) indiquent une efficacité limitée du canal. Des limons argileux granoclassés les recouvrent et témoignent d'une sédimentation rythmée et d'une alimentation en eau peut-être saisonnière associée à des précipitations régulières mais de plus faible intensité à l'échelle du bassin versant. Les conditions sont initialement humides, puis s'assèchent comme le montre la déposition de sable éolien. Le canal ne semble plus alimenté en eau, peut-être suite aux épisodes de crues enregistrés dans la basse vallée qui détruisent les vannes d'entrée des canaux au milieu de la période Sédentaire (circa 1000 apr. J.-C.) ou par l'encaissement du cours d'eau qui suit ces épisodes de crue. La forte concentration en matière organique et charbons atteste de feux à l'échelle du bassin versant et d'une végétation dans le canal et/ou la plaine alluviale. Le canal est colmaté rapidement par des dépôts de glissements des berges puis abandonné.

PERIODE 4 (US 12-17 dans T 887) : Les dépôts d'effondrement de texture limoneuse datent de la période Sédentaire. Une forte concentration en matière organique amorphe et en charbons expliquent leur couleur brun foncé. L'observation de cristaux d'oxalate de calcium ($< 100 \mu\text{m}$), présents dans certaines espèces végétales comme l'agave (Ishii, 1992 ; Salinas et al., 2001), le yucca (Reinhard et Danielson, 2005) ou les cactus raquette (Rodriguez-Felix et Cantwell, 1988) pourrait suggérer des rejets liés à l'alimentation (four ?). Superposée à ces dépôts, une couche charbonneuse à macrocharbons semi-allongés et légèrement cendreuse, hétérogène, a été mise en évidence. Elle peut résulter de la bioturbation de la couche sous-jacente.

PERIODE 5 (US 16-23 dans T 890, US 32-35 dans T 887) : Le second canal en fonctionnement au cours de la période Classique (1159-1262 apr. J.-C.) est colmaté par des limons grossiers charbonneux en provenance du bassin de la Salt, à structure massive et cavitaire, qui indiquent une sédimentation rapide et des conditions humides locales. La forte teneur en matière organique humique résulte de l'érosion des litières dans le bassin amont. La présence de matière organique fraîche suggère un développement de la végétation dans le canal.

PERIODE 6 (US 36-44 dans T 890) : Le dernier canal en fonctionnement au cours de la période Classique Soho (1215-1278 apr. J.-C.) est colmaté par des limons grossiers granoclassés et à facies uniforme (bassin de la Salt et de la Verde), à structure particulière. Ces dépôts faiblement triés, riches en agrégats de sols, indiquent une sédimentation brutale, un recouvrement rapide et une érosion des sols à l'échelle du bassin versant. Cette dynamique peut résulter 1) d'une alimentation par des chenaux mobiles, 2) d'un contrôle relativement maîtrisé de l'arrivée de l'eau. La fin de l'utilisation du canal est marquée par le dépôt de limons grossiers à structure subangulaire qui rappellent des dépôts de crue post-abandon.

750-? apr. J.-C. (Période Coloniale à Sédentaire)



? à 1150 apr. J.-C. (Période Sédentaire)



1150-1300 apr. J.-C. (Période Classique)

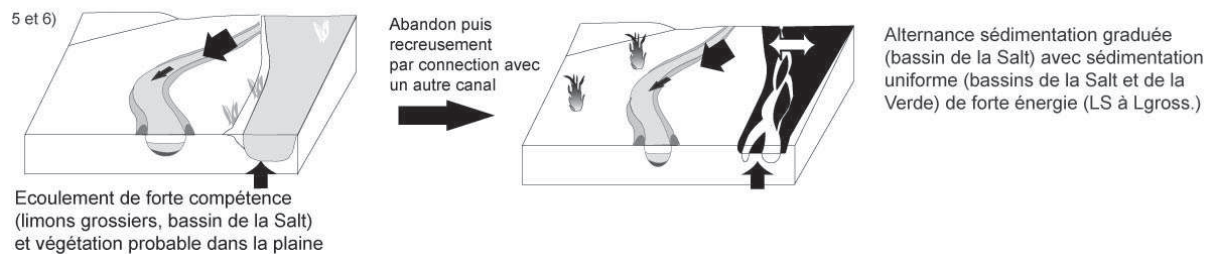


Fig. 208 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du canal système 12, période Coloniale à Classique (750-1300 apr. J.-C.)

1.5.1.2. Les aménagements hydrauliques

Nous avons mis en évidence certains niveaux discontinus de couleur blanche à beige en bordure du canal (US 19 dans T 887 et US 47 dans T 890), composés de caliche dans une matrice sableuse ou limoneuse. Ils sont indurés, présentent un aspect malaxé, et se situent à un niveau stratigraphique inférieur à l'apparition naturelle de caliche. Nous avons échantillonné ces dépôts, mais 2 des 3 échantillons ont été égarés au cours du transport. Le seul préservé provient de l'US 19, T 887. Il a mis en évidence certaines zones composées de nodules de caliche à limites distinctes, mais également des zones où les limites de ces nodules sont moins nettes et supposent un mélange. L'imprégnation des carbonates dans la matrice est partielle (Fig. 209). Il est connu que les Hohokam exploitaient les carbonates des horizons pétrocalciques à des fins architecturales. En effet, le mélange carbonate/sédiments présente une résistance à l'érosion très élevée.

Le caliche broyé était mélangé à des sédiments de texture fine pour les planchers des maisons en fosse, mais avec des sédiments de texture plus grossière pour construire les palissades en périphérie des villages. Il est donc tout à fait envisageable qu'il ait été décidé d'exploiter ponctuellement cette technique pour la protection des canaux.

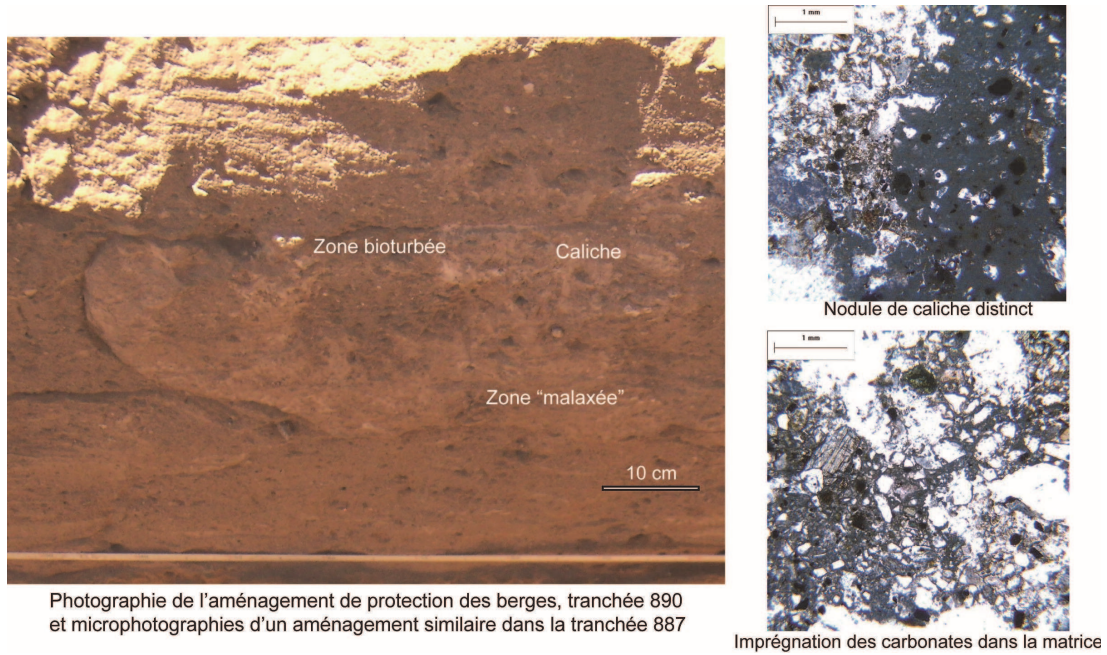


Fig. 209 : Aménagements hydrauliques sur le site de Cashion

2. Phasage des dynamiques pédo-sédimentaires et paléoenvironnementales

L'étude géoarchéologique et micromorphologique du remplissage de 9 structures hydrauliques et de dépôts dans le lit majeur de la basse vallée de la Salt (transect de 60 km) représente un corpus de 233 et 98 unités microstratigraphiques. Le nombre d'échantillons traités est supérieur à ces valeurs, mais ces derniers ne seront pas présentés dans la synthèse faute de calage chronologique. Nous avons affiné le premier phasage construit dans la partie II et nous avons distingué 11 tendances hydrosédimentaires qui regroupent à la fois des dynamiques fluviales et morphogéniques. Le Tab. 44 présente les sites étudiés, les phases déterminées lors de la présentation des résultats, ainsi que les tendances auxquelles ils se rattachent. La corrélation pédo-sédimentaire est présentée Fig. 210.

Une synthèse des données pédoclimatiques et écologiques obtenues par l'analyse micromorphologique est présentée Fig. 211.

2.1. Phase 1 : - 610 apr. J.-C. (Période Formative)

2.1.1. Phase 1 : Conditions sèches avec ripisylve peu marquée, puis crues

Les dépôts de la **phase 1** ont été observés sur la rive sud de la Salt, dans la zone amont et la zone aval, sur la terrasse Lehi (sites RAD et Vulcan). Le calage chronologique est inexistant mais ces dépôts ont été regroupés du fait de leur texture sableuse, de leur position géomorphologique et de leur profondeur (à environ 2 m). Des dunes de sable ont été identifiées à la base de la séquence étudiée (Vulcan). La matière organique humique en faible concentration pourrait indiquer l'absence d'une végétation de ripisylve, en relation avec les conditions sèches qui dominent.

Ces dunes sont couvertes par des limons et des sables en provenance du bassin de la Verde et de l'amont de la Salt qui indiquent une recrudescence des crues. Nous posons l'hypothèse d'une réactivation des dynamiques d'alluvionnement associées à un élargissement de la plaine alluviale, semblables aux dynamiques observées au cours des périodes historiques. Un style à méandre dans un système en tresse ou un système à chenaux mobiles est envisageable. Les charbons sont rares, mais leur grande taille > 125 µm peut être associée à la texture des sédiments (et donc à un tri granulométrique) ou résulte de feux d'origine locale, ce qui serait cohérent d'un point de vue culturel.

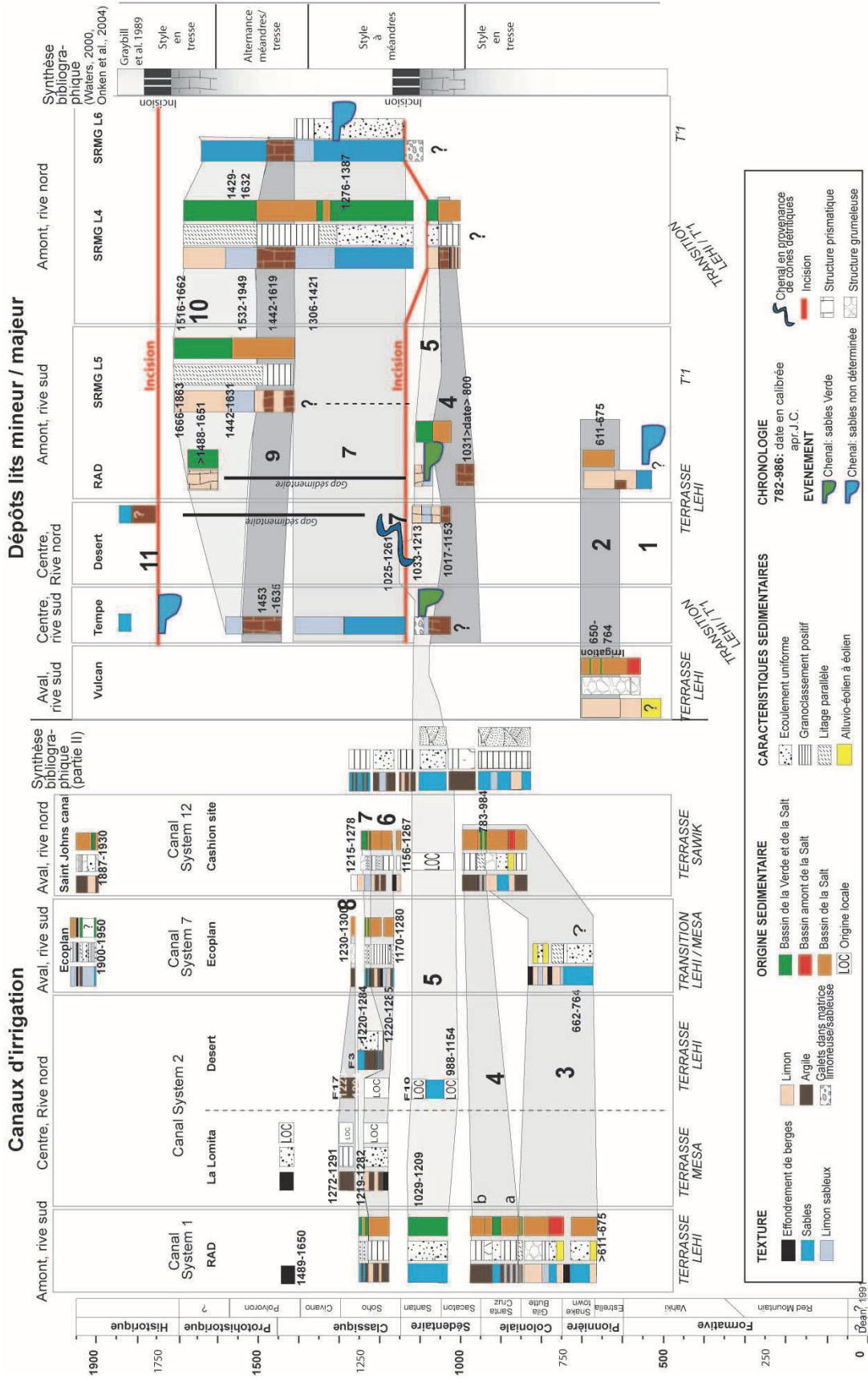


Fig. 210 : Phasage pédo-sédimentaire final dans le bassin vallée de la Salt, de la période Pionnière à la période Historique

2.2. Phases 2 et 3 : 610-850 apr. J.-C. (Période Pionnière/Coloniale)

2.2.1. Phase 2: Stabilisation temporaire des plaines, feux et irrigation

Un paléosol cumulique se développe sur la terrasse Lehi (plaine alluviale à cette époque) (611-675 apr. J.-C.). Il est caractérisé par des limons en provenance de la Salt. Ils montrent une structure bioturbée et sont surmontés par des limons des bassins de la Salt et de la Verde, à structure prismatique. Sur le site de Vulcan, des apports sédimentaires fréquents par les eaux d'irrigation expliquent le développement pédologique et l'épaisseur des dépôts (plus que l'occurrence naturelle d'un paléosol cumulique). Sur le site de RAD, le paléosol est plus fin et aucune trace d'occupation humaine n'est attestée dans ce secteur au cours de la période Pionnière. Les empreintes racinaires et les nombreux hyporevêtements observés suggèrent une végétation locale, probablement consommée par les organismes vivant du sol. De nombreuses coquilles de gastéropodes ont été retrouvées dans ces facies, de même que dans le paléosol observé sur le site RAD. En parallèle, le % de macrocharbons augmente. Ils peuvent résulter de feux locaux (rive sud de la Salt) pour éclaircir la végétation à des fins agricoles. Les conditions pédoclimatiques indiquent des cycles d'humectation-dessiccation répétés.

2.2.2. Phase 3 : Arrivée d'eau optimale, augmentation des feux dans le bassin versant, ripisylve toujours présente

La **phase 3** a été identifiée uniquement dans les canaux, qui sont colmatés par des limons sableux granoclassés, qui ont pour origine le bassin de la Salt, et des sables massifs à suspension uniforme. Des limons alluvio-éoliens en provenance du bassin amont de la Salt ont également été identifiés. 68% des dépôts présentent une microstructure particulière à massive, indiquant des taux de sédimentation élevés à quasi-permanents. Par ailleurs, l'écoulement turbulent et l'absence de particules fines transportées en suspension dans les sables massifs confirme la forte compétence du courant et l'absence d'épisodes de décrue. Ces signatures permettent de poser l'hypothèse d'une *sédimentation saisonnière à continue*, avec un chenal large. Ce système est en voie d'exhaussement, comme le suggère la présence de sables à stratifications entrecroisées (chenal naturel) dans les structures hydrauliques et témoigne en faveur d'un haut plancher alluvial qui favorise la destruction régulière des barrages et vannes d'entrée, de même que le colmatage accéléré des canaux. Il est important de noter que la dynamique est identique sur le site de Cashion en aval. En revanche, le degré de bioturbation est plus marqué ce qui suppose que les phases d'exondation sont plus fréquentes, peut-être en réponse à la destruction des vannes d'entrée ou à un meilleur contrôle de l'arrivée d'eau. L'hypothèse selon laquelle les zones en aval auraient été plus faiblement alimentées en eau par rapport aux zones en amont n'est donc que partiellement validée. Les traces de matière organique préservées indiquent un développement de la végétation dans les canaux.

Dans la plaine, la présence d'un bosquet de mesquite sur la rive nord et l'exploitation de massettes témoignent d'une ripisylve toujours présente. En parallèle, le % de microcharbons arrondis à semi-allongés augmente en réponse à des feux dans le bassin versant amont.

Puis, des microlamines de taille inférieure au cm, de texture argileuse à sableuse (origine bassin de la Salt ou Verde) et à litage parallèle sont observées, probablement entre 750/800 à 850 apr. J.-C. La texture légèrement plus fine traduit une diminution de la compétence, mais la sédimentation semble saisonnière à continue.

2.3. Phases 4 et 5: 850-1150 apr. J.-C. (Période Coloniale/Sédentaire)

2.3.1. Phase 4 : Développement pédologique dans la plaine, réduction de la végétation, augmentation de l'érosion, feux locaux et régionaux

Un paléosol se met en place entre le 8^{ème} s. et le 11^{ème} siècle. Ce paléosol est de texture argilo-sableuse et les sédiments proviennent du bassin de la Salt. La bioturbation efface partiellement un granoclassement syn-sédimentaire. La texture de ces dépôts indique un milieu humide à marécageux en bordure du cours d'eau associée à une sédimentation de crue occasionnelle de très faible intensité.

La phase 4 a été découpée en deux épisodes dans les structures hydrauliques. Les lamines argilo-sableuses identifiées à la fin de la phase 3 s'épaississent progressivement (> 1 cm) (phase 4a) et s'interstratifient avec des épisodes d'effondrement des berges. Cette dynamique pourrait indiquer la persistance d'un chenal large et facilement dérivable, avec un haut niveau saisonnier de l'eau (phase 4b). Puis, des limons-argileux bruns terrigènes en provenance du bassin de la Salt signent ensuite une augmentation des débits solides relativement aux débits liquides en réponse à une augmentation de l'érosion des sols, et une diminution progressive de la compétence fluviale. La structure prismatique des dépôts témoigne d'exondations peut-être saisonnières. Nous posons l'hypothèse d'un chenal principal étroit et peut-être profond. Les canaux sont abandonnés après cette phase.

La matière organique est fragmentée et humifiée dans les canaux, et la végétation se raréfie. En revanche, la proportion en agrégats de sols organiques signe une augmentation de l'érosion des sols, favorisée par les incendies et la réduction du couvert végétal enregistrés au cours de la phase 3. Ces incendies se poursuivent et il est possible de suggérer des épisodes de brûlis dans le bassin amont, et de feux locaux dans la plaine et/ou le long des canaux, comme le suggère l'augmentation presque exponentielle des macrocharbons. Les conditions sont humides et l'eau percole régulièrement dans le sol (traits texturaux et les traits d'oxydation).

2.3.2. Phase 5 : Forte érosion des sols, crues majeures, incision

La phase 5 correspond à une phase de *recrudescence des crues* entre 1030 et 1150 apr. J.-C. Les dépôts de crue sont composés de limons à limons sableux à écoulement

uniforme en provenance du bassin de la Verde. L'augmentation des débits liquides est confirmée par l'érosion du bassin versant de la Verde, peut-être suite à des pluies hivernales. L'augmentation des débits solides est favorisée par un stock sédimentaire important, accumulé dès la période Coloniale.

L'incision observée dans la zone centrale et amont de la vallée associée à ce système tressé est probablement contrôlée par le schéma $Ql^+ > Qs^+$ (Starkel, 1983).

Le taux de matière organique est élevé, principalement sous forme d'agrégats de sols érodés et remaniés. La *végétation de ripisylve semble éparse* dans la vallée mais se développe rapidement et partiellement après chaque épisode de crue. La concentration en microcharbons est très élevée dans les dépôts de crue. Elle est imputable à la fréquence des feux.

En parallèle, des sables fins à grossiers en provenance du bassin de la Verde, à écoulement uniforme, colmatent les canaux des systèmes 1, 2 et Scottsdale, qui sont alors abandonnés. Les sédiments dans les canaux sont riches en charbons. Les traits d'oxydation indiquent des conditions humides temporaires que les traits texturaux confirment (intercalations et revêtements, puis croûte pédologique). Cette phase d'instabilité fluviale pourrait expliquer la diminution de l'activité agraire dans la plaine alluviale (Cable et Doyel, 1984; Greenwald et al., 1994; Henderson et Clark, 2004).

2.4. Phases 6, 7, 8: 1150-1450 apr. J.-C. (Période Classique)

2.4.1. *Phase 6 : Revégétalisation partielle de la plaine*

La phase 6 a été observée dans les structures hydrauliques à l'échelle de la basse vallée. Elle correspond à la construction de nouveaux canaux entre 1150 et 1250 apr. J.-C. Ces canaux sont colmatés par des limons argileux granoclassés ou à litage parallèle en provenance du bassin de la Salt. Cette dynamique fait suite à l'encaissement des cours d'eau. Elle traduit un haut niveau saisonnier de l'eau.

La matière organique fraîche réapparaît dans le comblement des canaux et indique le développement de la végétation. Ceci pourrait signer une *revégétalisation progressive de la plaine* bien que l'érosion se poursuive, comme le montre la matière organique contenue dans les agrégats de sols. En parallèle, le taux de charbons est variable avec quelques facies contenant plus de 10% de charbons. Les facies d'oxydation et les traits texturaux indiquent une circulation d'eau réduite, excepté dans les facies très fins où la structure cavitaire témoigne de phases d'engorgement temporaire.

2.4.2. *Phase 7: Végétation dans la plaine, retour des feux anthropiques*

La phase 7 correspond à un intervalle culturel entre 1250 et 1350 apr. J.-C., soit la fin de la période Classique Soho. Des chenaux multiples observés dans la plaine sont colmatés par des sables basaltiques à écoulement uniforme en provenance du bassin de la Verde. *La ripisylve se redéveloppe* dans le lit majeur de la Salt, comme le suggère la microstructure bioturbée des dépôts dans la plaine. La matière organique en agrégats est moins présente et suppose une diminution de l'érosion des sols.

A l'opposé, la concentration en charbons augmente très nettement quel que soit le contexte et indique une *recrudescence des incendies*.

Les traits texturaux et d'oxydation sont réduits, marquant ainsi une plus faible concentration en matière en suspension. Les canaux sont quant à eux colmatés par des limons sableux à litage parallèle ou granoclassés en provenance de l'amont de la Salt en alternance avec des limons sableux à facies uniforme en provenance du bassin de la Verde. Ces dépôts sont plus grossiers (sables massifs) dans les canaux des systèmes d'irrigation en amont, comme Scottsdale. L'épaisseur des lamines fluctue entre 1 et 2 cm. L'ensemble traduit un schéma où Ql est en équilibre avec Qs, mais le facies Ql>Qs domine. La structure subangulaire observée dans la majorité des dépôts témoigne de phases d'assèchement saisonnier après chaque événement sédimentaire. Dans les structures hydrauliques utilisées jusqu'à la fin de la période Classique, cette dynamique hydrosédimentaire est suivie par la sédimentation de sables et d'argiles granoclassés qui suggèrent des *conditions d'irrigation optimale à la fin de la période Classique*, et ce dans l'ensemble de la vallée. Cette alimentation en eau réfute le modèle de gestion de l'eau régulée où les systèmes en aval reçoivent moins d'eau et sont abandonnés plus rapidement.

2.4.3. Phase 8: Stagnation d'eau, abandon des canaux

Il s'agit de la phase finale de fonctionnement de certains canaux associée à leur eutrophisation progressive (entre 1220 et 1300 apr. J.-C.). Les argiles dominent dans les remplissages et la microstructure dominante est celle en chenaux. Le taux de matière organique humique élevé est cohérent avec une forte accumulation de débris végétaux associés à *l'enfrichement des canaux*. Les charbons sont rares et seuls quelques macrocharbons sont observés localement. Leur présence pourrait témoigner d'une activité agricole toujours présente dans la vallée, malgré une efficacité décroissante des structures hydrauliques et une dynamique d'entretien réduite. Les facies d'oxydation confirment les conditions humides locales. L'absence de traits texturaux peut être imputable à la réduction importante des débits solides dans les canaux et à la protection de leur surface par la végétation.

2.5. Phase 9 : 1450-1600/1650 apr. J.-C. (Période Protohistorique)

La phase 9 a été identifiée dans les formations alluviales uniquement (Terrasse T'1/Lehi), car les canaux ne sont plus en fonctionnement au cours de la période Protohistorique. Elle caractérise la déposition de limons argileux, qui ont préservé partiellement des lamines, en provenance du bassin amont de la Salt entre 1450 et 1620 apr. J.-C.

Ce *paléosol* est de type *cumulique*, comme celui de la période Sédentaire. Le taux de matière organique humique préservée est important. Cette dernière piège probablement les sédiments de texture fine et contribue à la stabilité de la plaine.

2.6. Phases 10 et 11 : 1600/1650 à 1930 apr. J.-C. (Périodes Protohistorique et Historique)

2.6.1. *Phase 10: Reprise de l'aggradation*

Au cours de la **phase 10** (>1600 apr. J.-C.), des limons sableux (origine bassin de la Salt et de la Verde) à litages parallèles se déposent dans le lit majeur de la Salt. Le litage parallèle indique un équilibre temporaire entre débits liquides et solides, avec des crues d'intensité intermédiaire.

Un ralentissement temporaire des dynamiques est observé au cours des 17^{ème} et 18^{ème} s. La concentration en matière organique est importante et atteste d'une végétation de ripisylve bien marquée. La concentration en microcharbons est élevée. Ils proviennent probablement de l'érosion du bassin versant de la Salt associée à une recrudescence des incendies naturels au cours du 17-18^{ème} siècle (Allen et al., 2002). Les rares traits d'oxydation et la structure prismatique des dépôts indiquent des conditions plus sèches.

2.6.2. *Phase 11 : les référentiels historiques*

Les dépôts de la **phase 11** sont caractérisés par les sédiments du remplissage des canaux historiques Ecoplan et Saint John's Canal ainsi que par des dépôts de crues historiques. Dans les canaux, la période de sécheresse pré 1891 est caractérisée par la sédimentation de limons argileux à structure prismatique fine et la crue de 1891 par des limons grossiers à écoulement uniforme en provenance des rivières Salt/Verde. Les dépôts contiennent quelques microparticules organiques, des microcharbons et quelques macrocharbons qui proviennent probablement d'une activité anthropique locale car ils dépassent très largement la taille du grain moyen.

Puis, des sédiments limono-sableux à sableux, à litages parallèles/granoclassés en alternance avec des limons argileux bioturbés (provenance bassin de la Salt) se déposent. Ils contiennent de la matière organique préservée et humique qui témoigne du développement de la végétation dans les canaux. La concentration en microcharbons augmente, en relation avec l'activité humaine croissante dans le bassin versant. Cette phase a été placée entre 1900 et 1920, période au cours de laquelle la décharge moyenne annuelle est supérieure à la moyenne des 400 dernières années d'après les données dendroclimatiques (Smith et Stockton, 1981) et mesures directes (Fuller, 2008).

Enfin la dernière phase correspond à l'eutrophisation des canaux. Elle est caractérisée par des écoulements diffus et la sédimentation d'argiles. L'abandon final des canaux est caractérisé par une très faible teneur en charbons et en matière organique, à l'opposé des canaux abandonnés de la période Classique. Cette différence repose peut-être sur l'anthropisation de plus en plus accélérée, associée au développement de la mécanisation.

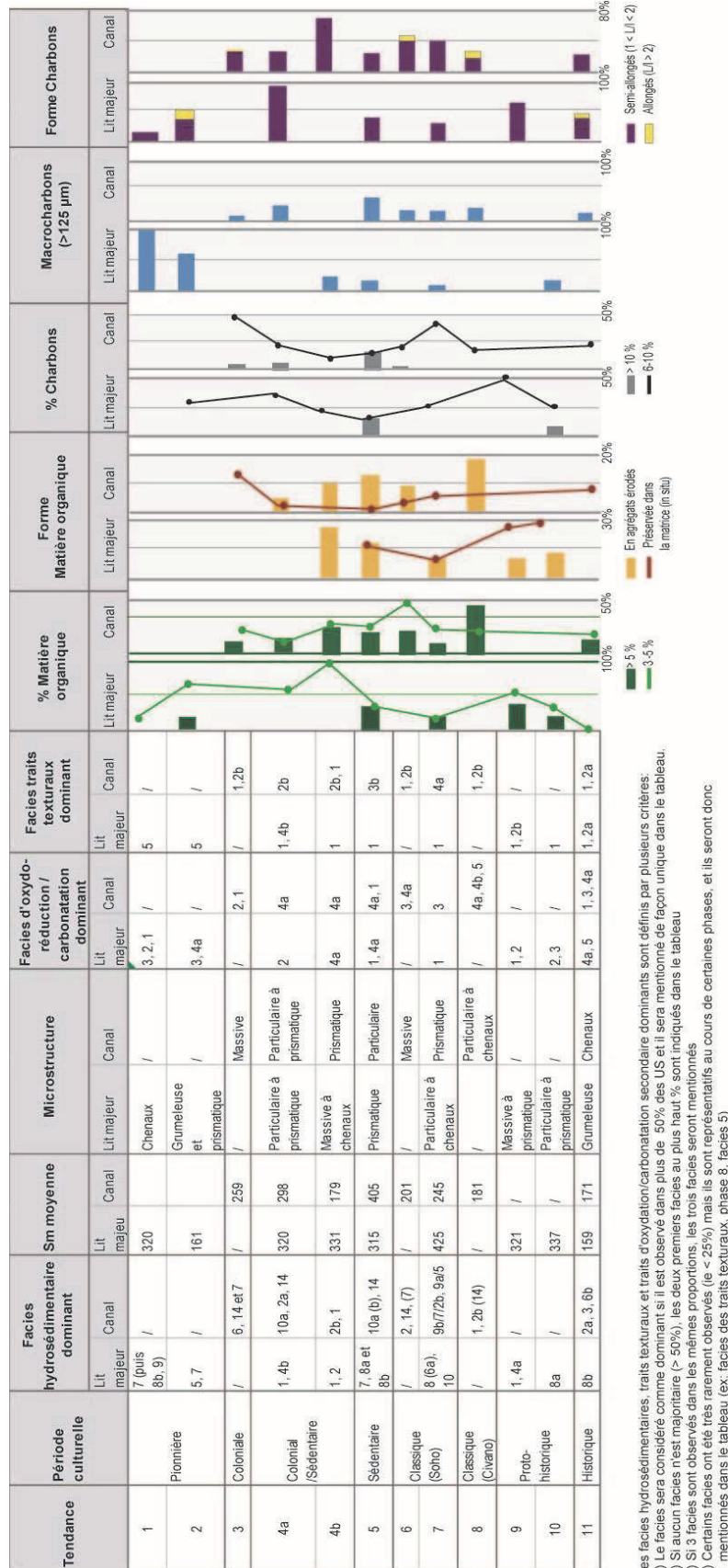


Fig. 211 : Synthèse des données pédoclimatiques et écologiques obtenues par l'analyse micromorphologique des remplissages de canaux et dépôts de lit majeur

CHAPITRE 2

Evolution des paysages de la moyenne vallée de la Gila

1.	Résultats micromorphologiques et paléoenvironnementaux	450
1.1.	Un système préhistorique fragile et peu maîtrisé : Le Casa Blanca System	450
1.2.	Un système préhistorique central résilient: le Santan System	457
1.3.	Les systèmes Casa Grande/Poston	467
2.	Une histoire des dynamiques paysagères	472
2.1.	Phases 1 à 4 : 250 apr. J.-C. à ? (Période Formative à ?)	472
2.2.	Phases 5 et 6 : de 950-1050 apr. J.-C. (Période Sédentaire)	477
2.3.	Phases 7 à 11 : de 1050 à 1450 apr. J.-C. (Période Classique)	478
2.4.	Phases 12, 13, 14 : de 1450 à 1900 apr. J.-C. (Périodes Protohistorique et Historique)	480

1. Résultats micromorphologiques et paléoenvironnementaux

1.1. Un système préhistorique fragile et peu maîtrisé : Le Casa Blanca System

1.1.1. Résultats et phasage pédo-sédimentaire

Les descriptions et résultats de l'analyse micromorphologique réalisée dans les trois structures hydrauliques présentées en partie II (F2, F8 et F6) sont détaillés en Annexe 5H. Les trois figures ci-dessous (Fig. 212, Fig. 213, Fig. 214) mettent en évidence et synthétisent les principales caractéristiques pédo-sédimentaires et écologiques des dépôts étudiés et le phasage final proposé. Les faciès mentionnés sont décrits dans la partie III, Tab. 31 ainsi qu'en Annexe 4. Une proposition de corrélation pédo-sédimentaire entre les trois canaux est présentée Fig. 215. Une visualisation en blocs diagrammes des dynamiques environnementales est proposée Fig. 216. Cette corrélation repose sur les deux dates obtenues, sur des relations stratigraphiques et suppose un fonctionnement simultané des canaux. Nous avons pris en considération l'érosion des canaux 8.03, 2.04 et 2.03.

PERIODE 1 (F2.04/US 1-7) : La date de construction initiale des canaux n'est pas connue, mais remonte probablement à la période Formative (< 350 apr. J.-C.). D'autres canaux construits entre 190 et 380 apr. J.-C. ont été mis en évidence dans ce secteur (Waters et Ravesloot, 2000). Le canal principal F 2 est rempli de sédiments argileux à limono-argileux en provenance du bassin versant amont. Ils caractérisent une phase de faible circulation d'eau, voire de stagnation d'eau dans les canaux. Les dépôts ont une structure en chenaux à grumeleuse qui témoigne d'une activité biologique prononcée, associée à des épisodes d'exondation et d'assèchement que confirment les croûtes pédologiques de surface. Les traits d'hydromorphie indiquent des conditions humides suivies par des phases finales d'assèchement. *L'alimentation en eau faible* et l'irrigation avec de l'eau *salée* (identification de cristaux de gypse) témoignent de fortes contraintes agricoles dans ce secteur. Cette première phase de fonctionnement n'a pas été observée dans le canal F 6 mais pourrait correspondre à une première phase de fonctionnement du canal F 8 qui aurait été érodée lors de ses curages.

PERIODE 2 (F 6/US1-5, F 8/US 7 à 21a) : La seconde phase de fonctionnement a été mise en évidence dans les canaux F 8 et F 6, mais est absente du canal F 2, en raison d'une érosion de la partie sommitale du canal ou de son effacement suite à un épisode de curage. Cette seconde phase est composée de *dépôts éoliens* et de *dépôts alluviaux locaux*. Elle traduit une diminution de l'apport fluvial, associée soit à l'encaissement du cours d'eau ou son éloignement. Les sables éoliens indiquent également des conditions sèches et une activation des vents à une période indéterminée.

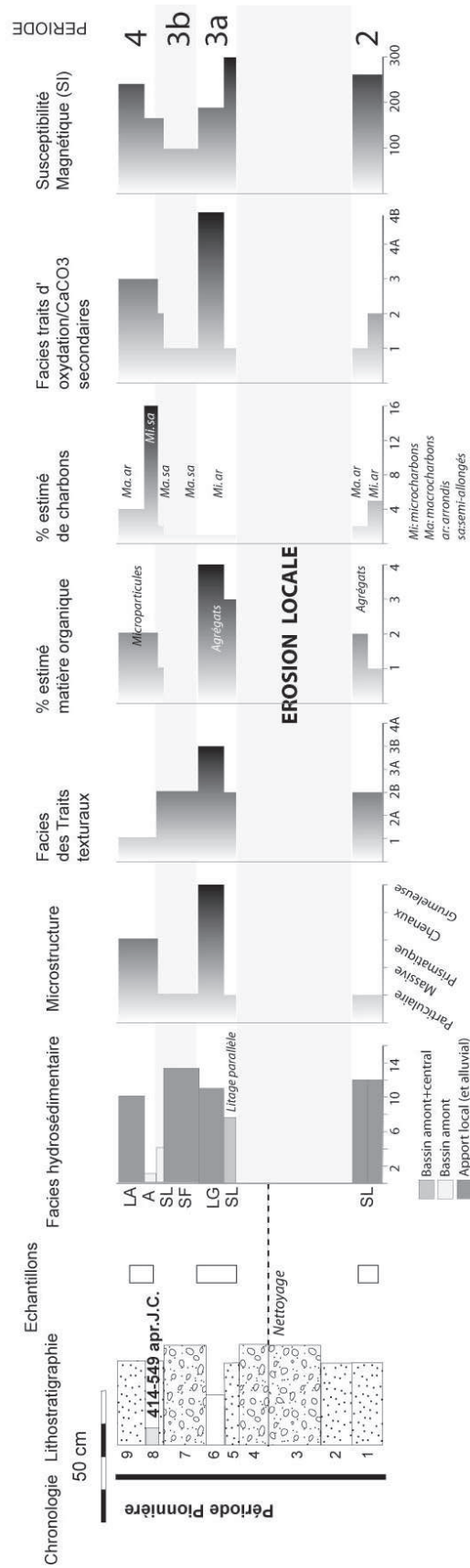


Fig. 212 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, projet GR 886, Casa Blanca Canal System, Canal 6

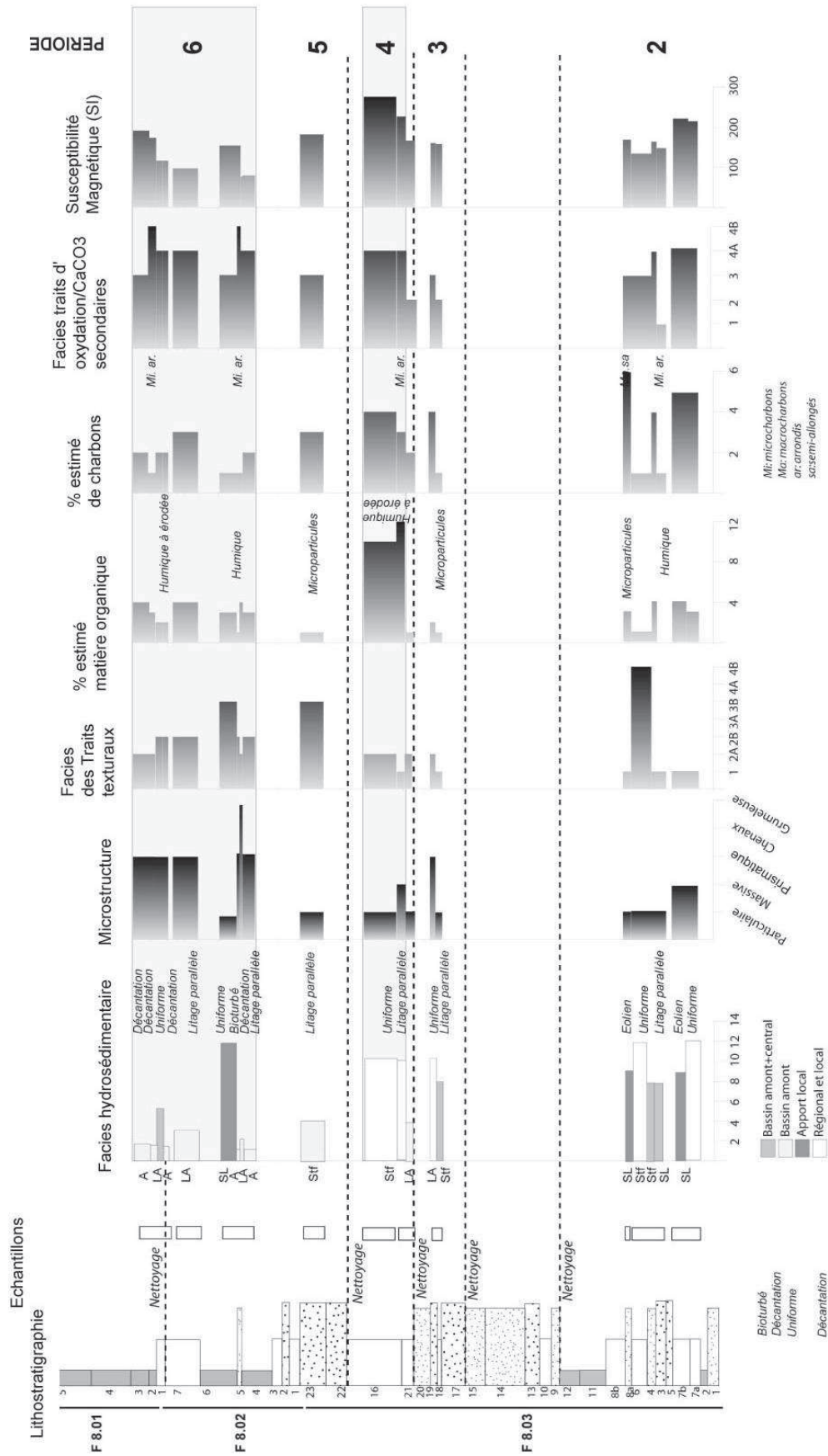


Fig. 214 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, projet GR 886, Casa Blanca Canal System, Canal 8

Les sables d'origine locale, faiblement triés et à écoulement uniforme résultent d'épisodes d'érosion type *slopeswash*, qui charrient des agrégats de sols et des macrocharbons, témoins d'une activité agricole sur les piémonts des Sacaton Mountains. *Les canaux sont alors alimentés par des eaux de ruissellement* latérales, peut-être à dessein, pour pallier la faiblesse des apports longitudinaux de la Gila.

PERIODE 3 (F 2.03/US 1-6, F 6/US 5-8a): Cette troisième phase témoigne de conditions très différentes. La sédimentation est *dynamique et rythmée* (sédiments limoneux grossiers à sableux à litage parallèle et riches en charbons). Les remplissages des canaux F 8 et F6 proviennent de la rivière Gila, mais la présence de sédiments locaux mélangés à cette matrice indique également des pluies locales sur les Sacaton Mountains et la possible dérivation des rigoles de ruissellement. Les conditions semblent dans l'ensemble plus humides avec la mise en place d'une *végétation en bordure du canal* F 2. Cette période signe une probable *efficacité des canaux*, quand ils sont bien entretenus, ainsi qu'une augmentation des débits et donc du niveau de l'eau dans la rivière.

PERIODE 4 (F2.03/US7-9, F 6/US 8b-9, F8/US 21b-16): La sédimentation rythmée se poursuit, mais les sédiments argileux observés dans les canaux indiquent *une diminution de la compétence* et une réduction des précipitations à l'échelle du bassin versant. Le signal incendie augmente. Cette dynamique est active entre 400-550 apr. J.-C. (Période Formative Vahki) Le canal F 6 est abandonné à la fin de cet épisode.

PERIODE 5 (F 2.02 et 2.01/US 1-2, F8/US 23): La cinquième phase de fonctionnement est caractérisée par une *sédimentation rythmée de très forte compétence*, composée de limons grossiers à sableux alluviaux granoclassés, à litage parallèle ou à écoulement uniforme. Les particules basaltiques et micacées sont nombreuses, certaines d'entre-elles présentant une orientation horizontale. Elles témoignent d'une origine sédimentaire régionale (bassin amont et central) associée à une forte érosion des sols. Les traits d'oxydation témoignent de conditions humides. Charbons et matière organique sont absents.

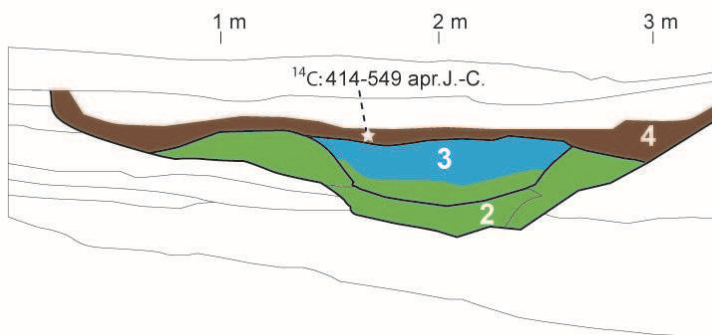
PERIODE 6 (F 2.02 et 2.01/US 3-5, 1-6 ; F 8.02 et 8.01/US 5-7, 2-3): La sixième phase est caractérisée par une compétence très élevée dans le canal F2 avec des *sables à stratifications entrecroisées*, associés à de nombreux agrégats de sols. Ils révèlent des *conditions humides*. Dans le canal F 8, aucune trace de ces sables n'est visible, mais le canal est colmaté par des sédiments fins qui traduisent des écoulements diffus. Un épisode de *sheetwash* est observé dans les deux canaux et nous a permis de proposer une corrélation dans leur fonctionnement. Il semblerait que le canal F 2 ait été repris par un chenal de la Little Gila ce qui indiquerait un niveau de base de la Gila élevé pour cette période et une tendance à l'instabilité latérale de son cours. Ce chenal a probablement érodé les bermes et modifié l'alignement initial du canal, et a ainsi empêché la dérivation d'eau dans le canal F 8. Il est probable que des tentatives d'aménagement aient été effectuées, car le canal F 8 est curé au cours de cette phase. Cette dynamique semble de courte durée comme le suggère la diminution progressive

de la taille des chenaux naturels, colmatés par des particules fines limoneuses ou argileuses.

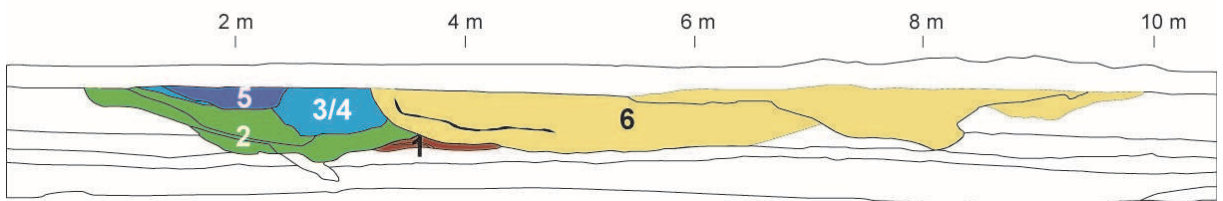
La période d'abandon n'est pas connue, mais pourrait correspondre à l'intervalle chronologique 650-850 apr. J.-C., au cours duquel une dynamique très identique a été observée (vallée de la Salt).

Il est fortement probable qu'un nouveau système ait été construit et exploité au cours de la période Classique, comme l'indiquent les nombreux canaux mis au jour dans ce secteur datant de cette période (Woodson, 2002).

Phasage final, Casa Blanca Canals, Canal de distribution F 6



Phasage final, Casa Blanca Canals, Canal de distribution F8



Phasage final, Casa Blanca Canals, Canal principal F 2

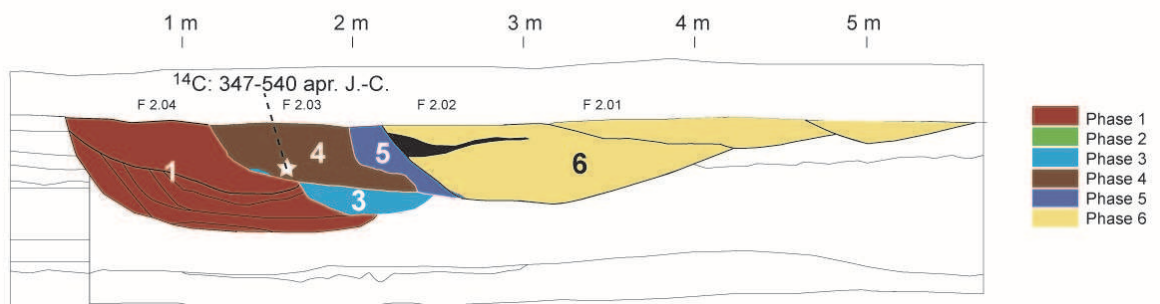
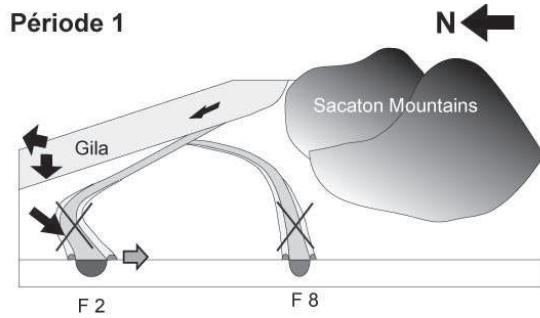
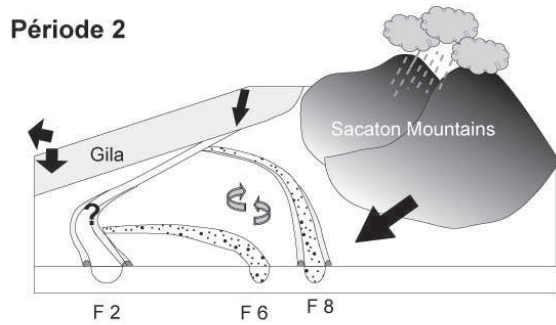


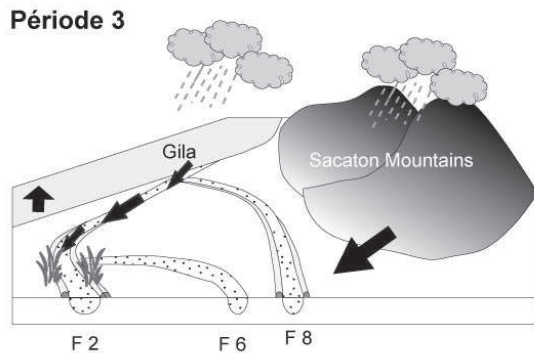
Fig. 215 : Proposition de corrélations pédo-stratigraphiques des canaux du Casa Blanca System. La description des 6 phases obtenues repose sur le phasage proposé au sein de chaque canal



Faible dynamique hydrique à stagnation de l'eau, limons argileux et argiles en provenance du bassin amont, activité biologique, cycles humectation/dessiccation, gypse, absence de végétation et de feux. *Nettoyage des canaux*

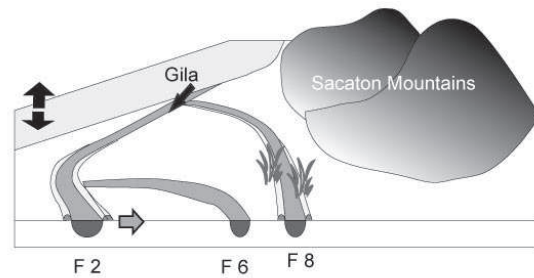


Sédimentation de forte compétence: locale, éolienne, et fluviale. Conditions sèches, absence de végétation, charbons peut-être locaux, érosion des sols. Aucun enregistrement dans le canal F 2. Possible dérivation volontaire des eaux de ruissellement. *Ravinement dans F 6, nettoyage de F 8*

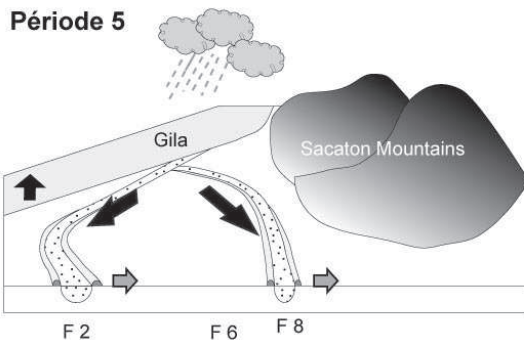


Sédimentation de forte compétence: sables et limons grossiers du bassin amont et central, laminés à hétérogènes. Sédiments locaux des Sacaton Mountains dans F6 et F8. Conditions contrastées, mais humides. Feux dans le bassin amont.

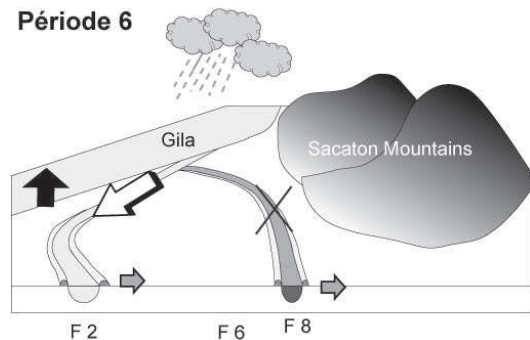
Période 4: Période Formative-Vahki (5^{ème}-6^{ème} s.)



Sédimentation de forte puis de faible compétence: argiles et limons argileux du bassin amont et central, laminés à hétérogènes. Conditions contrastées avec stagnation de l'eau puis assèchements répétés. Nombreux charbons et traces de végétation locale dans F 8. *Abandon de F 6, nettoyage de F 2 et F 8*



Sédimentation de forte compétence: sables et limons grossiers du bassin amont et central à litage parallèle. Equilibre temporaire entre débit liquides et solides. Absence de matière organique, rares charbons. *Nettoyage des canaux F2 et F8, migration vers le sud*



Sédimentation de forte compétence: sables et limons grossiers du bassin amont et central à stratifications entrecroisées. Forte réduction des débits liquides dans F 8 mais entretien *Nettoyage des canaux F 2 et F8, migration vers le sud*

Fig. 216 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du Casa Blanca System, période Formative à ?

1.2. Un système préhistorique central résilient: le Santan System

1.2.1. *Résultats et phasage pédo-sédimentaire*

L'analyse micromorphologique de 5 structures hydrauliques le long du Santan System utilisées de la période Sédentaire à la période Classique a permis de mettre en évidence **12 phases pédosédimentaires**. Les résultats détaillés de l'analyse sont en Annexe 5 I mais les courbes de résultats (Fig. 217, Fig. 218, Fig. 219) mettent en évidence les principales caractéristiques des dépôts étudiés. Les faciès mentionnés (hydrosédimentaires, traits texturaux, traits d'oxydation) sont décrits dans la partie III, Tab. 31 et en Annexe 4. Les dynamiques environnementales sont schématisées en blocs diagrammes dans la Fig. 221.

Dans le canal principal F 698 en utilisation au cours de la **période Sédentaire et au début de la période Classique (950-1300 apr. J.-C.)**, 4 dynamiques ont été enregistrées.

PERIODE 1 : Les sédiments sont limono-argileux à limoneux grossiers, granoclassés ou à litage parallèle. Ils proviennent du bassin amont et central. La sédimentation est rythmée mais des phases d'exondation sont observées, qui favorisent l'activité biologique. Cette dynamique semble saisonnière.

PERIODE 2 : Des argiles à limons argileux se déposent. Le taux de sédimentation est faible, et l'activité biologique dans le canal est développée, comme le suggère la microstructure en chenaux à grumeleuse. L'identification de gypse dans ces dépôts traduit des conditions chaudes et des *épisodes de stagnation d'eau*. De nombreux *feux dans le bassin amont* sont enregistrés par la présence de microcharbons arrondis. Cette dynamique témoigne d'un apport d'eau réduit et de conflits potentiels entre agriculteurs.

PERIODE 3 : Le canal est colmaté suite à un épisode *d'effondrement des berges*. Les sédiments sont grossiers, d'origine locale et fluviale, et signent une intensification de l'érosion. Le canal est curé après cette phase.

PERIODE 4 : Une sédimentation rapide de moyenne compétence caractérise cette dernière dynamique (limons grossiers massifs granoclassés, à litage parallèle ou à écoulement uniforme) et indique une augmentation des précipitations à l'échelle du bassin versant. La présence de charbons indique des feux toujours importants.

Les dépôts adjacents aux canaux F 779/F 786 sont composés d'argile à structure cavitaire qui témoigne de conditions humides. Ceci permet d'affirmer que le secteur est relativement protégé des crues de la Gila et un environnement humide se met en place au cours de la période Sédentaire, au pied des cônes détritiques holocènes.

Dans le réservoir d'eau, exploité au début de la **période Classique (1150-1300 apr. J.-C.)**, quatre phases ont été enregistrées.

PERIODE 5/6 : La première indique une phase de *faible circulation d'eau* avec des épisodes d'exondation (limons argileux locaux bioturbés). L'hypothèse d'un contrôle de l'arrivée d'eau à des fins domestiques est envisageable (e.g. Dart, 1983 ; Scarborough, 1988 ; Bayman et al., 2004). En effet, la construction du *platform mound* du village de l'Upper Santan aurait nécessité la matière première et l'eau que le réservoir aurait pu fournir.

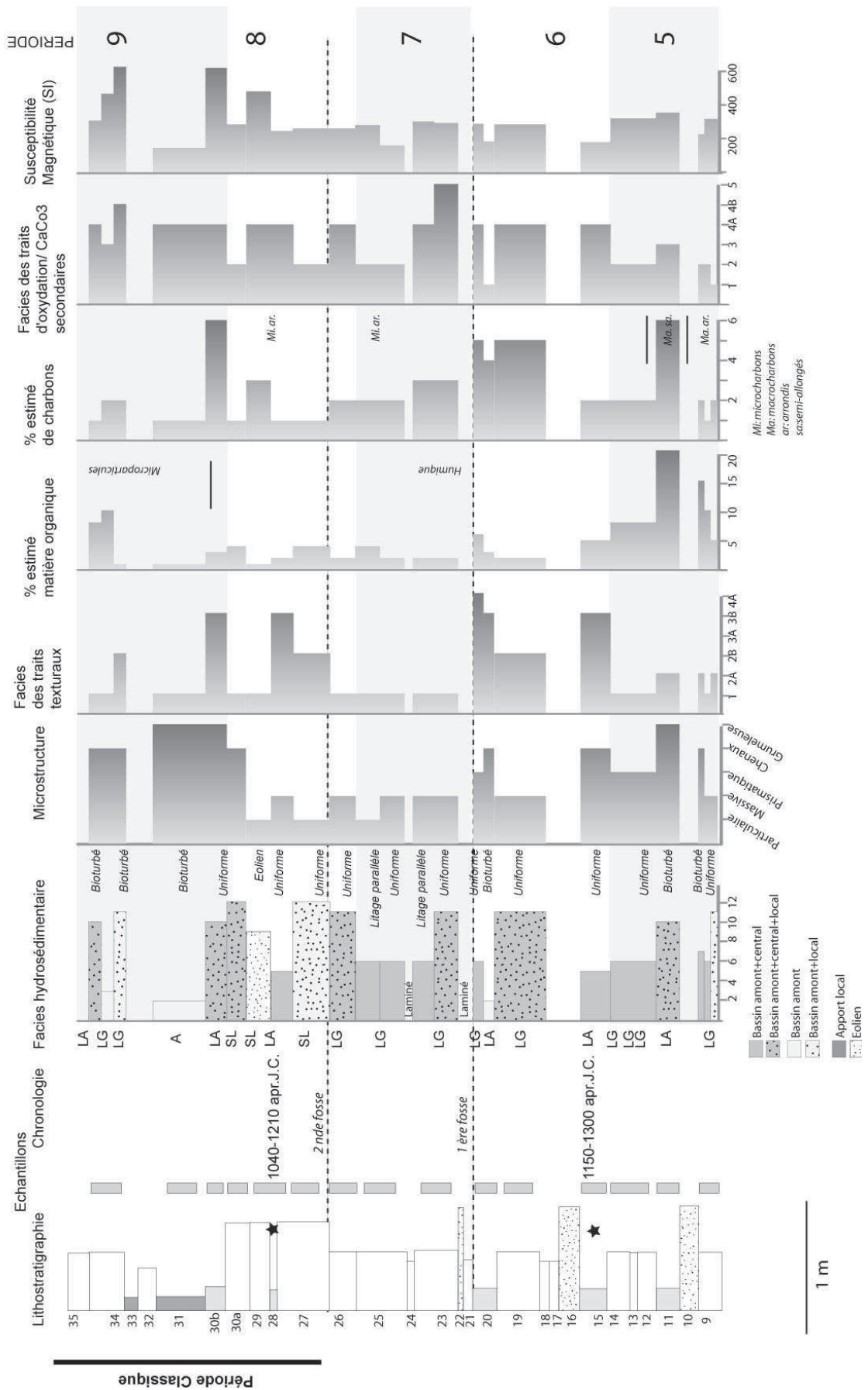


Fig. 218 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, Projet GR 441, Santan Canal System, réservoir d'eau

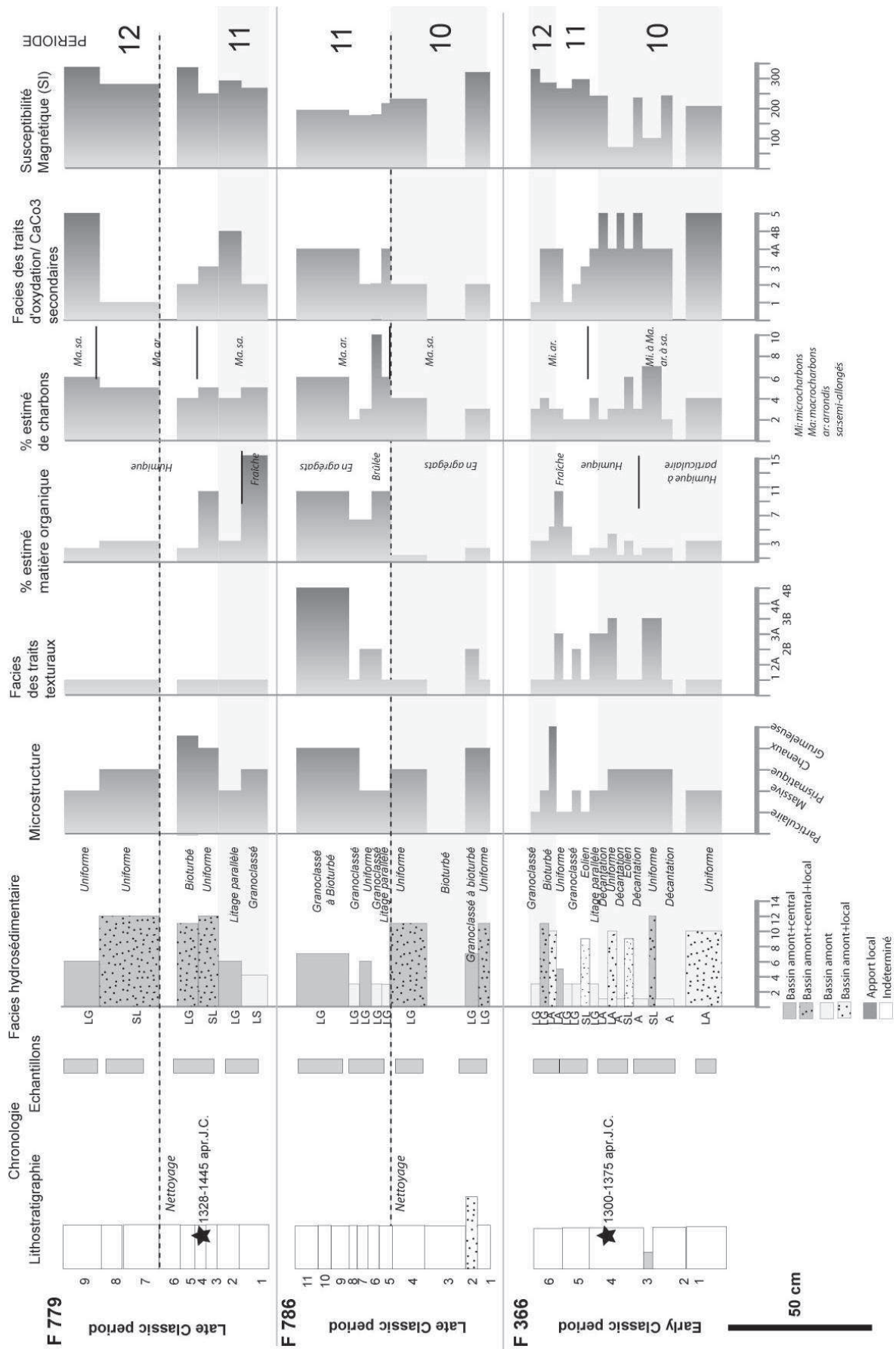


Fig. 219 : Lithostratigraphies et résultats micromorphologiques/magnétiques, Projet GR 441, Santan Canal System, canaux F 779, F 786, F 366

L'argile contenue dans ce réservoir aurait pu également servir de matière première à la confection de céramiques (Nials et Fish, 1988). Dans cette configuration, l'enregistrement sédimentaire dans le réservoir ne peut servir d'indicateur environnemental excepté en ce qui concerne l'occurrence de feux à proximité.

PERIODE 7/8: Cette tendance est associée à la construction des deux fosses du réservoir. Les limons grossiers et sables limoneux laminés, puis faiblement triés, indiquent une *augmentation des taux de sédimentation* en provenance de la Gila River et des cours d'eau intermittents sur les piémonts des Santan. Le rapide colmatage du réservoir et des fosses suggère un faible contrôle de l'arrivée d'eau.

PERIODE 9 : La dernière dynamique enregistrée dans le réservoir indique un épisode de *stagnation d'eau* avec des épisodes d'assèchements réguliers (argile bioturbée), d'accumulation de matière organique et de *végétation* dans le réservoir associé à un faible apport fluvial. Il s'agit de l'eutrophisation naturelle de cette cuvette anthropique. Les sédiments auraient pu également être exploités à des fins domestiques.

Les résultats obtenus pour la **fin de la période Classique (1300-1450 apr. J.-C.)** ont permis de distinguer 3 phases :

PERIODE 10 : Dans le canal principal, des limons argileux alternent avec des limons grossiers en provenance de l'amont et de la zone centrale du bassin versant (écoulement uniforme et à litage parallèle). Dans le canal F 366, la compétence est plus faible et la *végétation* se développe. La construction de canaux qui canalisent l'eau sur les piémonts (F 779 et 786) pourrait répondre à un besoin croissant en eau.

PERIODE 11 : La tendance enregistre une augmentation de la compétence et une *arrivée d'eau rythmée* dans l'ensemble des canaux (limons granoclassés en provenance de l'amont du bassin versant). Les conditions semblent chaudes et le niveau de l'eau est élevé, ce qui confirme l'idée d'un système efficace, malgré l'abandon d'un des canaux. Sur les piémonts, des pratiques de brûlis, associées à l'érosion de la couverture pédologique, sont toujours attestées, comme le montrent la présence de charbons et d'agrégats de sols.

PERIODE 12 : Des dépôts d'origine locale et régionale sont observés en partie sommitale des canaux, sur les 20 derniers centimètres de leur remplissage. Ils sont de texture limoneuse grossière et faiblement triés. Du fait du colmatage des canaux, leur pente diminue progressivement, ce qui limite le débit dans le canal et réduit la superficie irrigable en aval. Ces dépôts résultent probablement d'épisodes de crues post-abandon. L'abandon ne semble pas résulter de conditions environnementales, du moins dans ce secteur. La dynamique sédimentaire dans le canal F 779 suppose toutefois une alimentation en eau par les cours d'eau intermittents, une fois les canaux d'irrigation abandonnés.

1.2.2. Espèces cultivées dans les champs Hohokam

Les résultats des analyses paléoenvironnementales (Miles et Woodson, 2008) réalisées dans les parcelles agricoles identifiées à proximité des canaux et présentées dans la partie II ont mis en évidence plusieurs points :

- Les analyses granulométriques ont révélé que les zones cultivées présentent une teneur en matière fine plus importante que les zones non cultivées.

- Les analyses polliniques indiquent une exploitation du maïs et du coton dans ce secteur, de même que de la courge et des chenopodiacées.
- Les analyses anthracologiques indiquent la présence d'*Atriplex*, *Larrea tridentata*, *Olneya tesota* et de *Prosopis*. Les données historiques attestent de pratiques de brûlis à partir de ces espèces pour fertiliser les parcelles agricoles.

Les *fieldhouses* avoisinantes aux parcelles agricoles étaient riches en charbons de cheno-am, haricots tepary, prosopis, maïs, cactus ocotillo, et *Populus fremontii*.

- Le taux de matière organique est plus important dans les parcelles cultivées, de même que la concentration en sels solubles.
- La teneur en nitrates et en phosphates dans les champs et les canaux associés est très importante et suppose une fertilisation naturelle par les eaux d'irrigation.
- L'analyse micromorphologique a permis d'identifier la présence de microlaminations (1 mm) qui traduisent une irrigation par inondation. Des croûtes structurales ont été observées en partie sommitale des champs, lorsque le degré de bioturbation n'a pas homogénéisé l'ensemble de la matrice. Les revêtements ne sont pas ici des marqueurs d'agriculture car ils sont très rares, mais des colmatages de vides grossiers ont été identifiés. De nombreux cristaux de calcite aciculaire ont été observés en partie sommitale des horizons cultivés. Ils sont généralement associés à de la matière organique en décomposition dans des horizons Ap (Pang et al., 2006) bien aérés (Becze-Deak et al., 1997).

1.2.3. Evolution de la plaine alluviale et des cônes détritiques de la période Sédentaire à protohistorique

1.2.3.1. Sur la terrasse T2

L'US 2 (10 YR 5/3.5) au sommet de laquelle les canaux F 698 et F 366 sont construits (période Sédentaire attestée) (Partie III, Tab. 30) est de texture limono-argileuse et présente une microstructure prismatique. Les sédiments ont une origine fluviale dans le bassin versant amont et local. Ils résultent probablement d'une période de crue dans la plaine. Le taux de matière organique altérée atteint 6% et la concentration en charbons est très faible (2%). Les traits texturaux sont absents (facies 1) mais les traits d'oxydation et les nodules carbonatés secondaires (facies 5) témoignent de conditions humides puis de phases d'évaporation intense. Cette US contient également des fragments de coquilles, du gypse dans la porosité et autour des racines, de même que des pseudomorphoses racinaires et des revêtements carbonatés. Ces caractéristiques rappellent les champs historiques observés dans la GRIC (cf Partie III, Chapitre 3). Les canaux sont enterrés sous l'US 2.1, de texture limono-sableuse à structure grumeleuse. Ces sédiments sont d'origine fluviale et résultent de crues sur la terrasse suivis d'une altération en surface associée à une phase d'activité biologique.

1.2.3.2. Sur les cônes holocènes

Les canaux F 779 et F 786 sont situés sur des cônes détritiques holocènes et sont alimentés par un cours d'eau temporaire. Deux échantillons micromorphologiques ont été prélevés dans les US 1b et 1c de F 779, et 1 dans l'US 1b/c de F 786 (Partie III, Tab.

30). Une occupation Sédentaire est attestée dans ce secteur, associée à l'US 1b, dans laquelle des fragments de céramique et de la faune ont été retrouvés. Cette dernière est composée d'argile limoneuse à structure cavitaire qui témoigne de conditions humides suivies par une phase d'activité biologique et d'assèchement que la structure polyédrique confirme. La concentration en matière organique est faible et quelques macrocharbons ont été observés. Des nodules de caliche, visibles à l'œil nu ont également été observés à proximité de F 779. Par ailleurs, la texture argileuse des sédiments justifie la présence d'un atelier de production de « ciment » (caliche+argile) dans ce secteur, à des fins architecturales et domestiques.

L'US 1c correspond à la surface de la plaine alluviale au cours de la période Classique tardive. Elle présente des caractéristiques nettement différentes. De texture limoneuse, elle résulte d'une période de crue sur la terrasse T2 (plaine alluviale Hohokam), associée à une augmentation de l'érosion locale. Ceci confirme la forte activité sédimentaire enregistrée entre les périodes Sédentaire et Classique dans ce secteur. Les sédiments ont une structure cavitaire et polyédrique fine (2-4 cm), ne contiennent aucune trace de matière organique, mais des traces racinaires sont présentes. Aucun trait d'oxydation n'est visible, mais quelques colmatages de vides ont été observés. Leur formation provient d'une arrivée d'eau brutale sur un sol dénudé. Le taux de macrocharbons de forme allongée est élevé (presque 10%) et témoigne d'épisodes d'incendies, peut-être locaux.

1.2.3.3. Sur la terrasse T1

Gila Sand and Gravel Corporation : Santan Plant

Les résultats de l'analyse micromorphologique de la séquence stratigraphique Santan sont détaillés en Annexe 5 J, et synthétisés dans la Fig. 220. Les faciès mentionnés sont décrits en Partie II., Fig X et en Annexe 4.

5 dynamiques hydrosédimentaires ont été identifiées :

PERIODE 1/2 (US 2-5) : Une succession de dépôts argileux en provenance du bassin amont de la Gila se déposent à la base de la séquence Santan. Ces dépôts ont une structure prismatique qui atteste de cycles humectation-dessiccation répétés. La matière organique fraîche indique le développement de la végétation in situ. Nous posons l'hypothèse que ce paléosol cumulique s'est mis en place à la fin de la période Classique/début de la période Protohistorique. Nous avons observé son équivalent dans la basse vallée de la Salt. Par ailleurs, il pourrait correspondre aux US 4 et 5 de la tranchée 5b (Huckleberry, 1992) (Cf partie II, section 2.2.3.1). Ces dépôts fins superposent des sédiments grossiers du lit majeur de la Gila qui pourraient dater de la période Classique, suite à la reprise de l'aggradation après l'épisode d'incision entre 1050-1150 apr. J.-C. (Waters et Ravesloot, 2001).

PERIODE 3 (US 6-11a) : Au cours de la **période Protohistorique-** avant 1644-, malgré une *ripisylve bien exprimée*, *l'aggradation de la plaine s'accélère et le lit de la Gila s'élargit*. La sédimentation de limons sableux granoclassés est observée sur les rives nord et sud. Cette forte dynamique hydro-sédimentaire peut être corrélée aux données historiques, à partir de 1697, qui enregistrent une Gila River large et facilement dérivable.

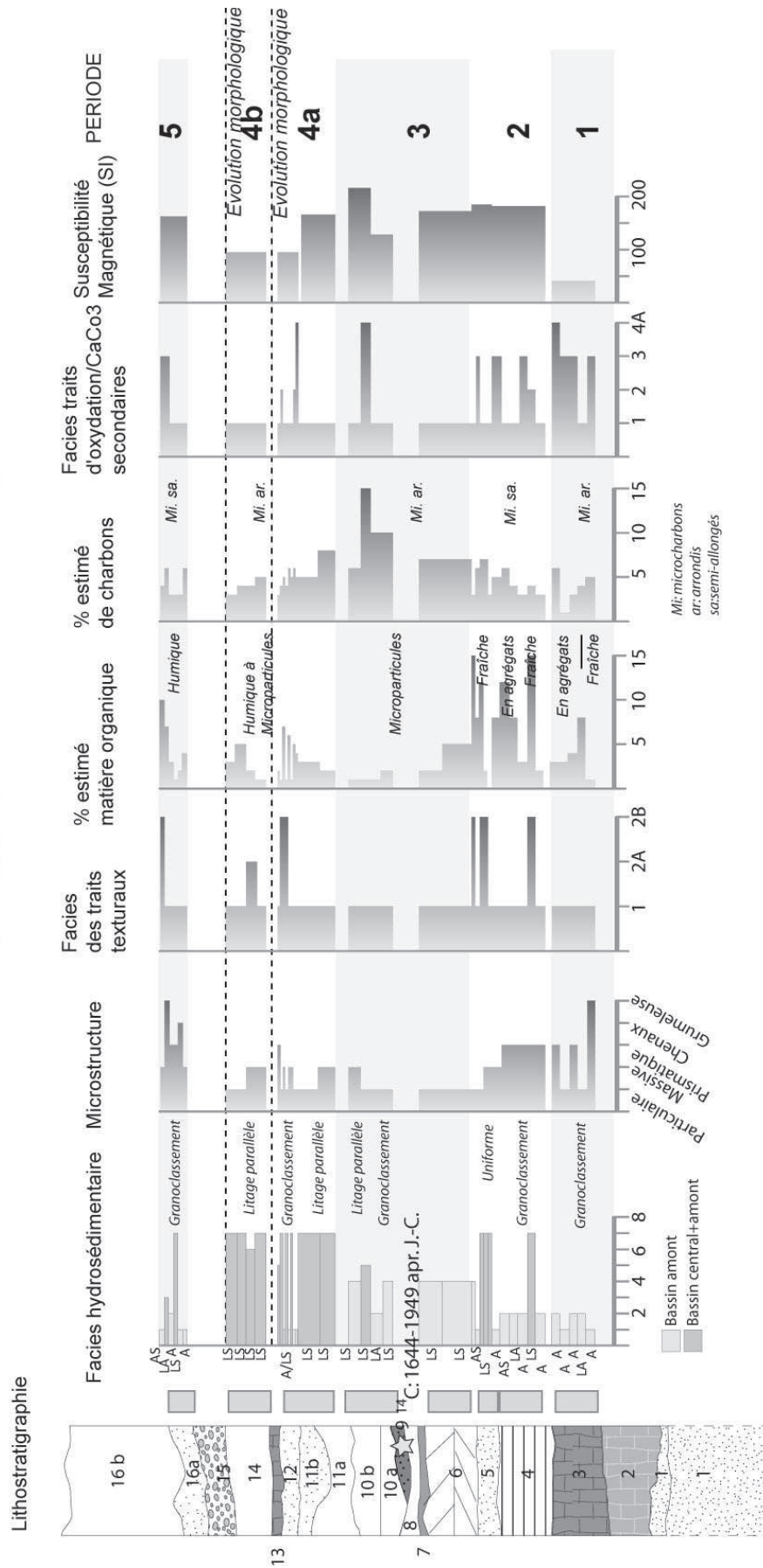


Fig. 220 : Lithostratigraphique, résultats micromorphologiques/magnétiques, Gila Sand and Gravel Corporation, Santan Plant

L'enregistrement de nombreux feux dans le bassin versant pourraient correspondre à l'augmentation des feux attestée entre 1600 et 1870 (ex : Allen, 2002).

PERIODE 4 (US 11b-15) : Probablement au cours de la **période Historique**, une sédimentation de forte compétence caractérisée par des limons sableux à litages parallèles (origine du bassin amont et central) ont été mis en évidence (période 4a). Une réduction temporaire de la compétence (argile/limons sableux granoclassés, US 12) est associée à une évolution morphologique de la Gila vers un système à chenaux multiples étroits colmatés par des dépôts argileux et limoneux fins (cf. Partie II) (phase 4b). La création de ces nouveaux chenaux est favorisée par la phase active à crues fortes (phase 4a), mais la charge fine qui les colmate pourrait traduire la mise en place d'un *système anastomosé*.

A l'échelle du bassin versant, cela implique une charge alluviale abondante, mais une capacité de transport et d'érosion limitée, ainsi qu'une réduction des pentes. Dans la plaine alluviale, cette dynamique indique la mise en place d'îles et d'une ripisylve bien développée. A l'arrière des levées naturelles qui se mettent en place, des zones humides se développent (Malavoi et Bravard, 2010). Nous posons l'hypothèse que cette période correspond à des conditions chaudes et humides entre 1700 et 1800 apr. J.-C (Salzer et Kipfmüller, 2005). L'augmentation de la dynamique hydrique entre 1830 et 1860 favorise l'inondation des rives nord et sud de ce secteur (Huckleberry, 1992).

PERIODE 5 : Une nouvelle *phase d'aggradation* par des limons sableux à litage parallèle (origine bassin amont et central, US 14) est identifiée. Elle est associée à *l'élargissement ou la migration du cours d'eau* puis par une incision finale historique qui date probablement de la fin du 19^{ème} s., entre 1870 et 1890.

1.2.4. Conclusion

Une synthèse des résultats obtenus dans le secteur de Santan est présentée Fig. 221.

Le début de la **période Sédentaire** (après 950 apr. J.-C.) est caractérisé par des écoulements réduits dans les canaux, où la végétation se développe. Des épisodes de ruissellement en provenance des Santan mountains témoignent de pluies locales torrentielles, peut-être estivales. La dynamique fluviale semble de faible intensité (bas niveau des nappes, chenal étroit et profond ?) mais elle est associée une érosion des sols accrue et à de nombreux incendies à l'échelle du bassin versant. A la fin de la période Sédentaire (circa 1000-1050 apr. J.-C.), cette dynamique évolue et s'intensifie, en réponse à une augmentation du niveau de base de la Gila.

Après 1150 apr. J.-C. (début de la période **Classique Soho**) des écoulements réduits sont à nouveau enregistrés dans le réservoir d'eau exploité à Santan, dans lequel des fosses sont creusées. Elles sont colmatées par des sédiments grossiers fluviaux et d'origine locale dont la présence simultanée traduit des conditions environnementales humides (pluies érosives locales et régionales). Le réservoir est abandonné à la fin de la période Classique.

Entre 1300 et 1450 apr. J.-C. (période **Classique Civano**), de nouveaux canaux de petite taille sont construits. Une sédimentation rythmée est enregistrée, associée au dépôt de limons grossiers et d'argile granoclassée. Cette situation s'observe dans l'ensemble des bassins de la Salt et de la Gila à cette période. Malgré ces conditions favorables pour l'irrigation, l'ensemble des structures sont abandonnées à la fin de la période Classique.

Une fois les basses terres abandonnées, la ripisylve se développe probablement dans la plaine au cours de la **période Protohistorique**, dès 1450 apr. J.-C. Elle piège les particules fines et favorise la sédimentation d'argiles, qu'une dynamique fluviale de plus faible intensité explique également. Enfin, au cours de la **période historique**, une intensification des dynamiques est observée, avec une reprise de l'accrétion sédimentaire, et l'évolution de la Gila vers un système à chenaux multiples.

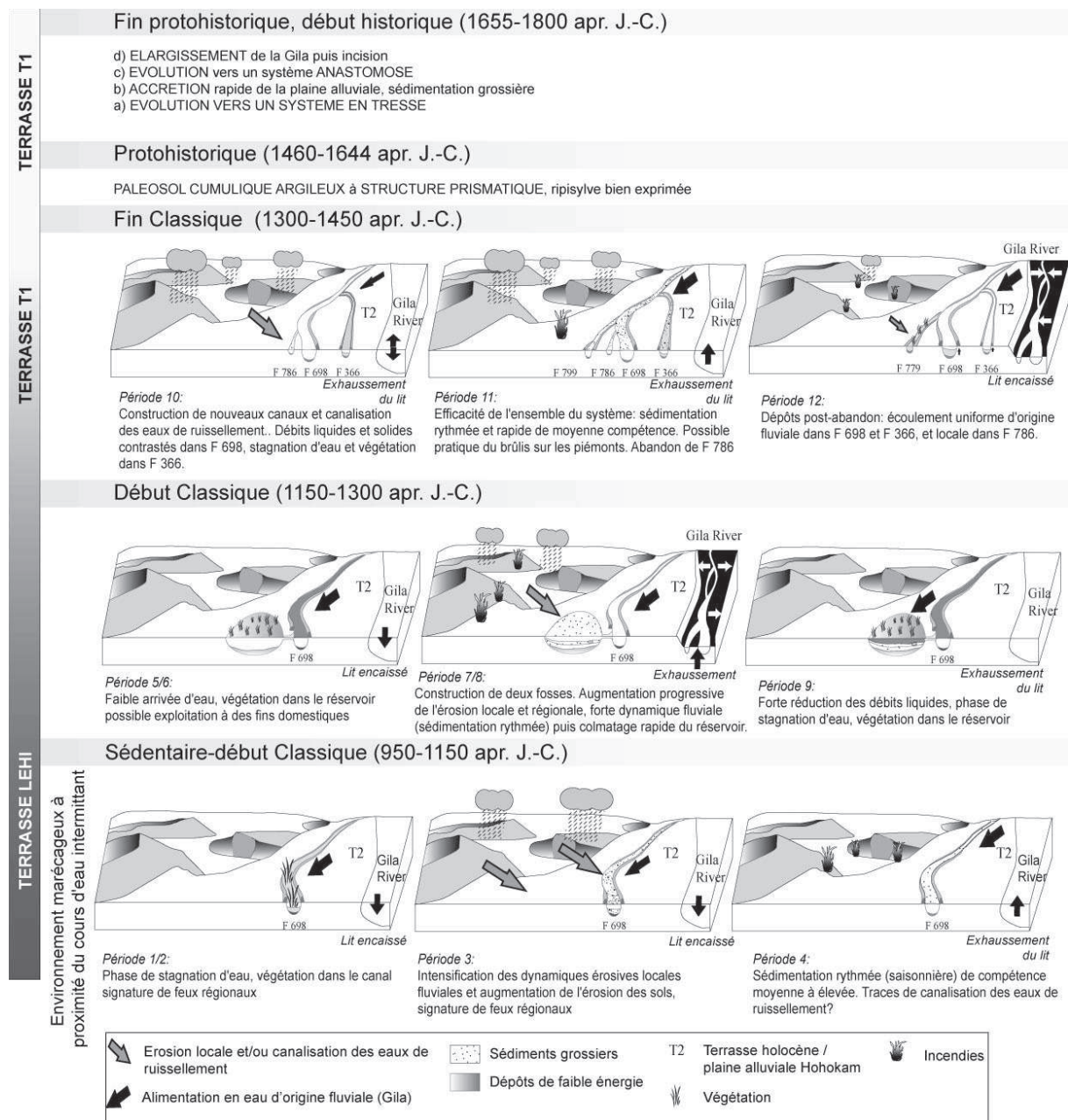


Fig. 221 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du Santan System, période Sédentaire à Historique (950-1800 apr. J.-C.)

1.3. Les systèmes Casa Grande/Poston

1.3.1. Exploitation du milieu et moyens de subsistance

1.3.1.1. Un cadre environnemental contraignant

Les travaux de recherches relatifs aux moyens de subsistance et aux pratiques agraires dans le secteur de Casa Grande/Poston sont parmi les plus riches et les plus complets (Fig. 222) car ce secteur pourrait représenter une des dernières zones occupées dans la moyenne vallée de la Gila (Hill et al., 2004).

Des traces d'occupation de la période Coloniale et Sédentaire ont été mises en évidence sur la rive nord à proximité des bajadas. L'ensemble des villages et *platform mounds* sont situés sur la terrasse T2, à l'abri des crues, à moins d'1 km des canaux. Aucune habitation n'a été mise au jour entre les canaux et la rivière. Des parcelles agricoles irriguées ont été découvertes sur la rive sud, sur la terrasse T2. Toutefois, la superficie irrigable est très faible et les hautes terrasses et les bajadas ont contraint les agriculteurs à diversifier leurs pratiques, et ce dès la période Coloniale. (Eighmy et Doyel, 1987 ; Foster et al., 1996). C'est probablement la raison pour laquelle des structures liées à l'agriculture sèche ont été identifiées sur la terrasse T3 (Fish et Fish, 1994) (Fig. 222).

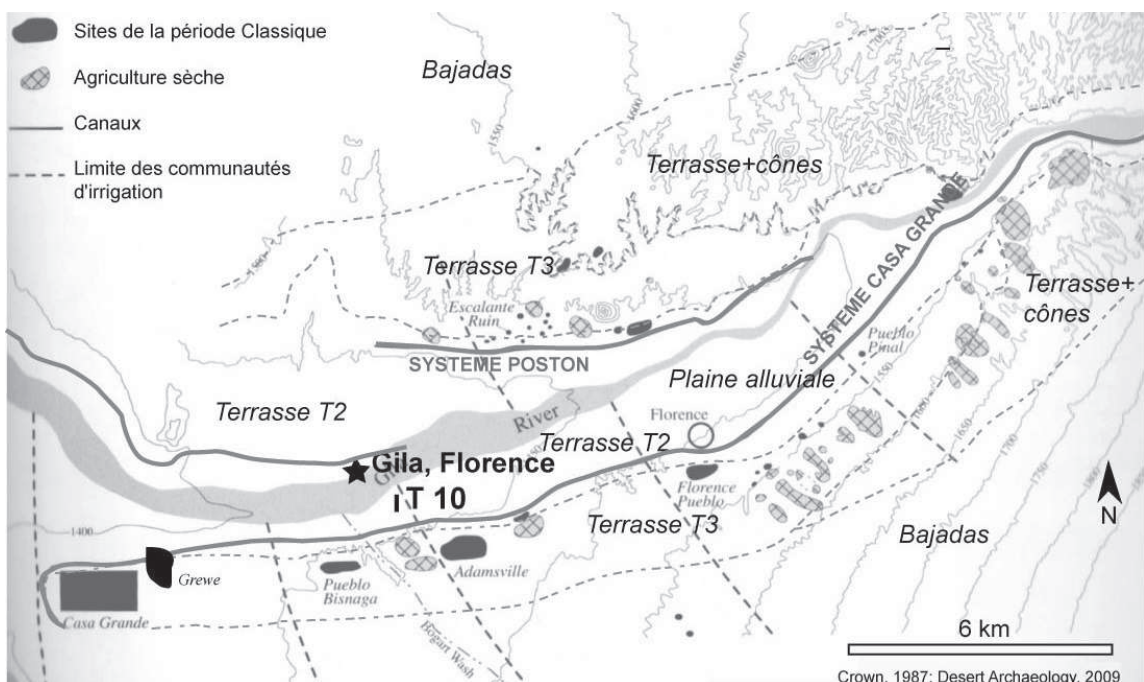


Fig. 222 : Pratiques agraires le long du Casa grande et Poston System

1.3.1.2. Exploitation végétale des zones hautes

Les ressources exploitées dans les hautes terres sont rares, excepté pour le bois de conifère, genévrier et sapin servant à la construction des villages (ex : Casa Grande) comme le suggèrent les données ethnologiques (Bahr et al., 1994).

1.3.1.3. Exploitation végétale des zones basses

A l'opposé des sites occupés le long de la Salt, les sites de la période Classique en amont de la moyenne vallée de la Gila (Escalante Ruin, Los Fosas et Junkyard) ont mis en évidence des proportions de maïs et d'agave très importantes (Miksicek et Gasser, 1989) (Tab. 45). Par ailleurs, la diminution des espèces cultivées à la fin de la période Classique le long de la Salt semble avoir une signification spatiale limitée à la zone centrale des Hohokam. En effet, les sites de la période Classique dans le secteur de Casa Grande contiennent une teneur en coton, maïs, agave supérieure à certains des villages les plus prolifiques de la Salt (Micksicek, 1984b) comme La Ciudad (Micksicek et Gasser, 1989) et Las Colinas (Bohrer, 1987). Ceci a permis de poser l'hypothèse d'une spécialisation régionale dans le textile.

Nom du site	Période d'occupation	Localisation	Espèces déterminées (pollen et graines)	Remarque	Références bibliographiques
Casa grande Complex	Classique	Terrasse, plaine alluviale, bajadas	Plaine alluviale: peuplier, saule, chénopodiacées/amarantacées Première terrasse: mesquite et chénopodiacées/amarantacées; Seconde terrasse: saguaro et <i>cercidium</i> ; Bajadas: creosote et ambroisie; Espèces cultivées/favorisées: maïs, haricots, courge, coton, tabac, orge, agave, plantain; Espèces récoltées/rudérales: chénopodiacées/amarantacée, cactus raquette, onagre, Malvacées, Aizoaceae	Nombreux charbons	Fish; 1983, 1984 a, b; Miksicek, 1983a, b, c, d, 1984a, b; Fewkes, 1912; Crown, 1987
Escalante Ruins AZ U:15:3		1ère terrasse	Coton (43%), maïs, mesquite, Cholla	Espèces importées	Debowski, 1974 ; Gasser, 1981 ; Hall, 1974 ; Magers, 1974 ; Robinson et Doyel, 1974 ; Spaulding, 1974
Los Fosas AZ U:15:19		1ère terrasse	Coton (30%)		Miksicek, 1983a
Junkyard site AZ U:15:83		1ère terrasse	Coton (44%)		Miksicek, 1984 b

Tab. 45 : Synthèse partielle des données botaniques sur les principaux sites archéologiques le long de la Gila River (partiellement adapté de Adams, 2002)

1.3.2. Evolution de la plaine alluviale de la Période Formative à Historique

1.3.2.1. La séquence Gila Florence

Les résultats de l'analyse micromorphologique réalisée sur la séquence Gila Florence mettent en évidence 4 phases de fonctionnement détaillées en Annexe 5 K. Les faciès mentionnés sont décrits dans la partie III, Tab. 31 et en Annexe 4. Le phasage et les faciès identifiés sont présentés Fig. 223.

PERIODE 1 (US 14-17): Des argiles sableuses granoclassées en provenance de l'amont du bassin versant attestent d'une sédimentation rythmée, mais le pendage des lamines suggère un cortège de rides qui progradent sous l'action de courants dans des eaux peu profondes (Harms et al., 1975 ; Lopez-Gomez et Arches, 1993). Les sédiments bioturbés et les traces de matière organique fraîche indiquent une ripisylve bien exprimée et des conditions humides. La date de mise en place de ces dépôts n'est pas connue.

PERIODE 2 (US 18-23): Des argiles sableuses granoclassées, en provenance de l'amont du bassin versant, indiquent une sédimentation toujours rythmée mais de faible compétence. La structure cavitaire et subangulaire des dépôts traduit des épisodes d'hydromorphie temporaire suivis par des phases d'assèchement. La concentration en microcharbons arrondis augmente et quelques macrocharbons ont été identifiés. Leur présence peut être liée à l'augmentation de l'activité humaine localement et dans le bassin versant amont.

PERIODE 3 (US 24-26): Cette troisième phase correspond à un paléosol brun cumulique limono-argileux observé sur le terrain. Il se développe entre 256 et 413 apr. J.-C. (Période Formative-Vahki) et atteste d'une phase de stabilité des plaines alluviales. Les sédiments brun foncé à structure prismatique fine, fortement bioturbés, attestent d'une altération en surface de longue durée. Des traces racinaires ont été observées, mais ces dernières proviennent de l'US sus-jacente, caractérisée par la succession de microlamines limono-argileuses à limono-sableuses et de zones bioturbées à agrégats de sols (Fig. 224). Les traits texturaux sont nombreux, les cristaux de microsparite et les vésicules indiquent un état boueux et des conditions humides, marquées par des épisodes d'évaporation lente. Nous posons l'hypothèse que ces sols aient pu être irrigués, ce que la présence d'un canal d'irrigation au nord, construit au cours de la période Pionnière, pourrait confirmer (Fig. 222).

PERIODE 4 (US 27-29): Les sédiments de texture limono-argileuse à argileuse et à microstructure grumeleuse signent des phases d'exondation répétées et des taux de sédimentation réduits après la période Formative. Des fragments de croûte de battance indiquent des horizons d'altération ainsi que des épisodes pluvieux sur des sols asséchés et dénudés. Les coquilles de mollusques, les carbonates secondaires, les intercalations et les revêtements gravitaires sont les signatures d'une percolation verticale de l'eau et de processus pédologiques bien développés. Il est possible que l'environnement restitué dans la partie supérieure de la coupe soit le témoin de conditions actuelles, et non pas passées.

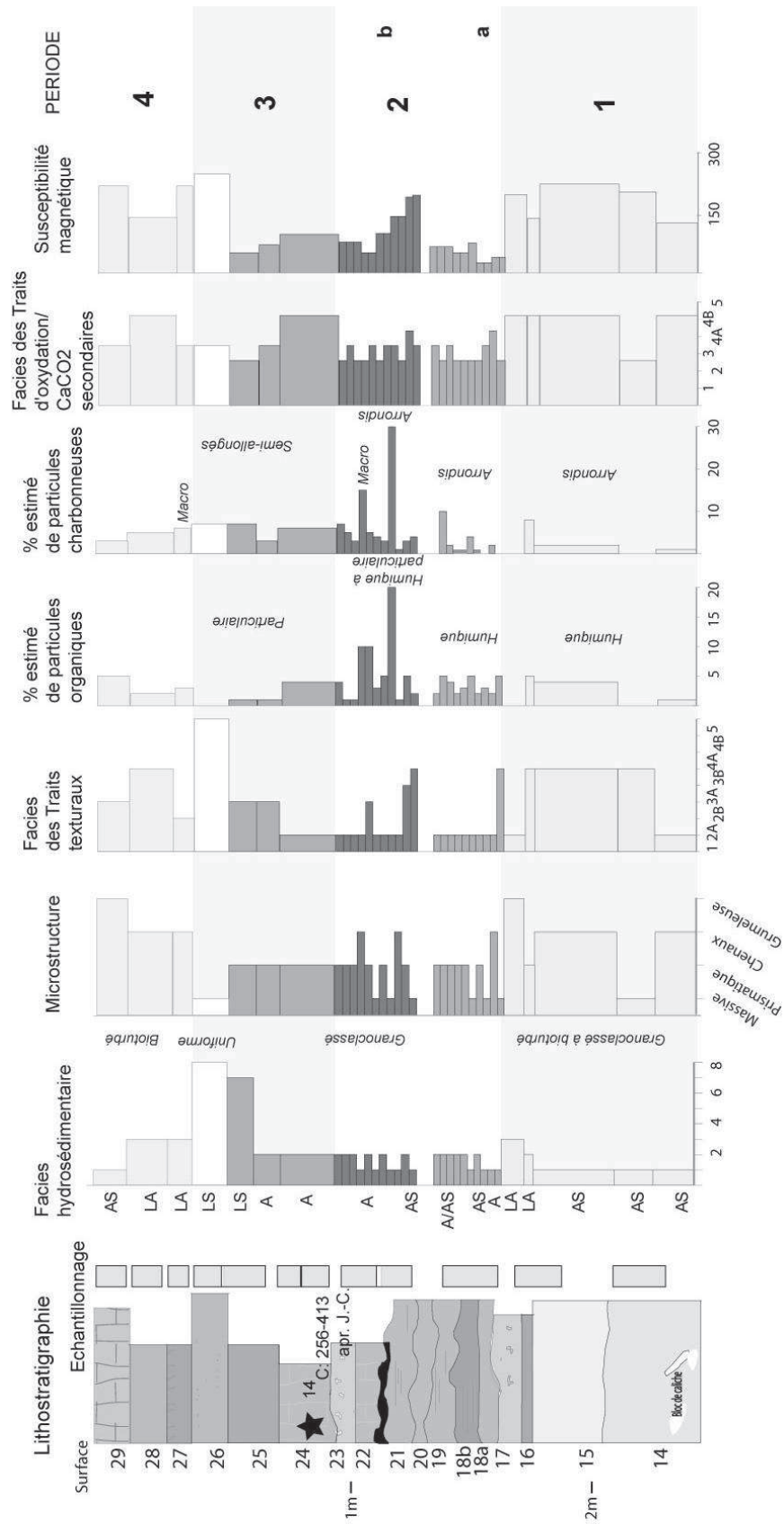


Fig. 223 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques sur le site de Gila Florence

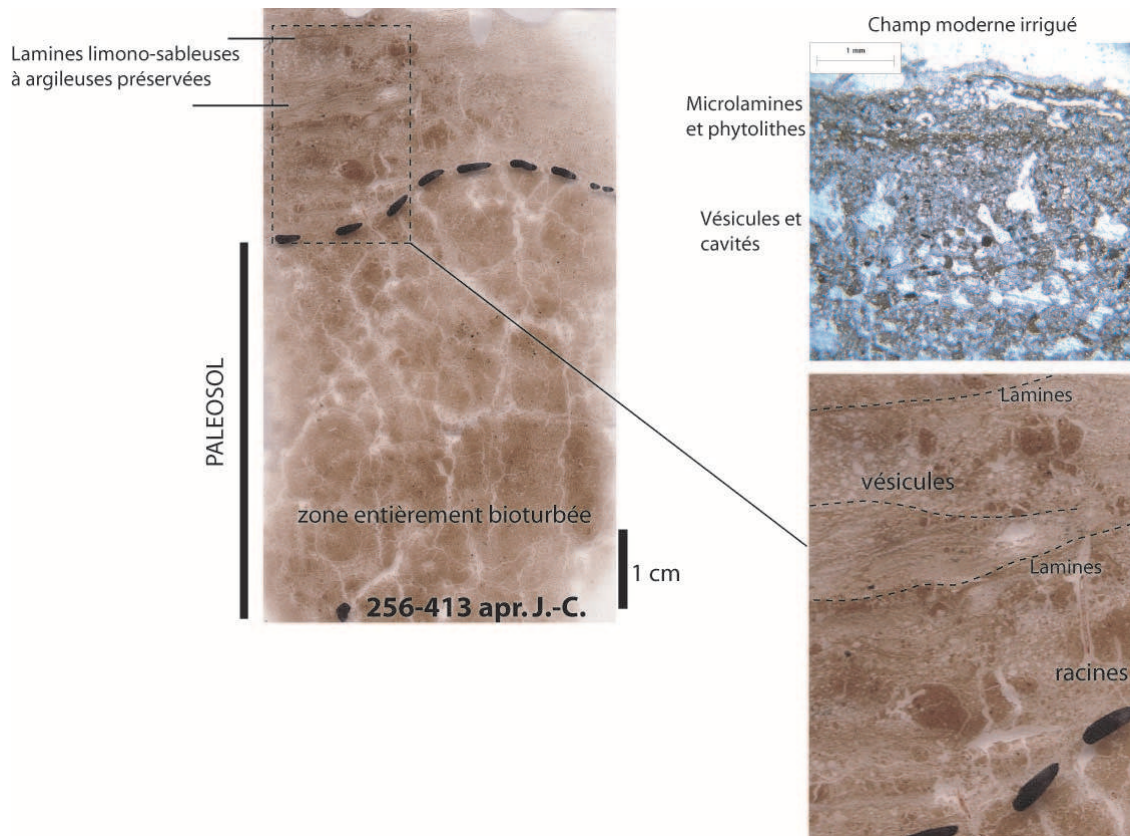


Fig. 224 : Micromorphologie de potentielles zones irriguées, secteur de Gila Florence

1.3.2.2. Conclusion

Les résultats obtenus mettent en évidence un milieu humide à hydromorphe sur la rive nord, puis une stabilisation des paysages entre le 3^{ème} et le 5^{ème} s. apr. J.-C. (période Formative). Cet environnement aurait pu favoriser l'installation de communautés agricoles, ainsi que la construction de canaux malgré des sols lourds et argileux. La plaine alluviale (future terrasse T2) semble irriguée à cette période. Un gap sédimentaire est observé à la fin de la période Sédentaire et contribue au développement pédologique sur la terrasse T2. L'élargissement et l'incision du cours d'eau érodent de nombreuses parcelles irrigables, et le colmatage progressif de la Gila conduit à des crues répétées dans le secteur de Casa Grande, sur la rive sud. Ces phénomènes coïncident avec l'augmentation des zones dédiées à l'agriculture sèche, la consolidation du système Casa Grande avec le système Grewe (Phillips et Craig, 2001 ; Crown, 1987 ; Gregory, 1994) et l'abandon de certains villages. L'ensemble du secteur reste toutefois occupé jusqu'à la fin de la période Classique.

2. Une histoire des dynamiques paysagères

L'étude géoarchéologique et micromorphologique conduite dans la moyenne vallée de la Gila a permis d'étudier 157 micro-unités stratigraphiques dans 8 structures hydrauliques, et 119 dépôts dans les lits majeur et mineur de la Gila.

14 phases ont été identifiées en fonction des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales. Le Tab. 46 et la Fig. 225 présentent les sites étudiés, les phases déterminées lors de la présentation des résultats. Les tendances environnementales auxquelles ils se rattachent sont présentées dans le Tab. 47.

2.1. Phases 1 à 4 : 250 apr. J.-C. à ? (Période Formative à ?)

2.1.1. Phase 1 : Dynamique fluviale réduite, ripisylve, feux locaux

Cette première phase a été observée dans la plaine d'inondation (site Gila Florence) et dans des remplissages de canaux (site Casa Blanca) sous forme de dépôts argileux de décantation à structure prismatique qui se déposent entre 256 et 41 apr. J.-C.. Ils indiquent des taux de sédimentation réduits ainsi que des cycles d'humectation-dessiccation répétés. Le chenal est peut-être étroit et encaissé. Les charbons de forme variable sont nombreux et certains d'entre eux, dont la taille dépasse 125 μm , attestent de feux locaux dans le secteur de Florence, probablement à des fins agricoles. En parallèle, le taux de matière organique élevé, bien que de forme humique ou ingérée par la faune du sol, témoigne d'une ripisylve toujours bien marquée.

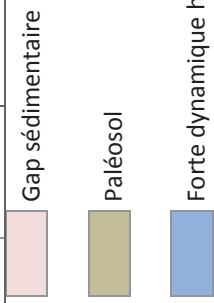
Dans les canaux, les charbons sont rares et la matière organique subsiste sous forme particulière :1) soit parce que ces éléments organiques ont été digérés par l'activité biologique, 2) soit parce que les canaux sont bien entretenus (ce qui semble attesté dans le secteur de la Gila) et la végétation régulièrement détruite, 3) soit l'activité dans le bassin versant amont est limitée, ce qui expliquerait le faible taux d'érosion et l'absence d'incendies.

2.1.2. Phase 2 : Ravinement, canalisation des eaux de ruissellement, incendies de graminées

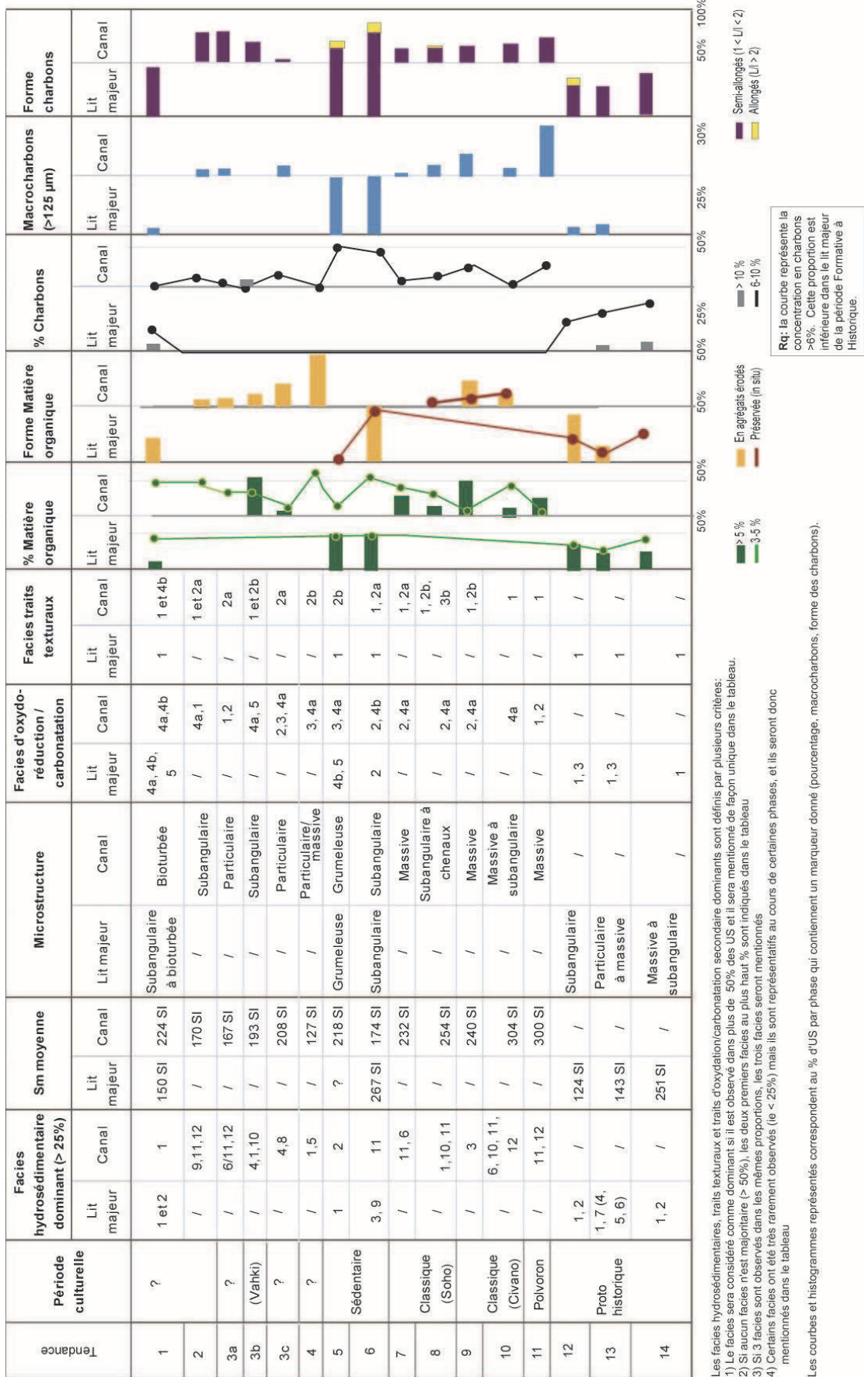
Des sables colluviaux et alluviaux-éoliens à écoulement uniforme colmatent les canaux. Cet ensemble suggère une alimentation des canaux, volontaire ou non, par des eaux de ruissellement afin d'optimiser l'exploitation des précipitations estivales locales élevées. La faible dynamique observée au cours de la phase 1 nous permet en effet de poser l'hypothèse d'une dérivation des eaux de pluies, en complément lors de période de faible compétence fluviale, avec un chenal principal toujours étroit et encaissé. En effet, ce type d'adaptation aux événements à haute fréquence a été observé chez les Akimel O'Odham au cours du 19^{ème} s.

IV.2 Evolution des paysages de la moyenne vallée de la Gila

Tendance	Période culturelle	Nombre d'US étudiées	Contexte, sites, et périodes/Canal/US															
			Canal d'irrigation						Lit mineur, lit majeur									
			Casa Blanca System			Santan System			Réservoir	Santan Plant	Gila Florence	F 779	F366					
F2	F6	F8	F 698	F 366	F 786	F 779												
1	Formative (Vahki)	6	1															
2		8	/	2	2													
3a	?	6	3	3a,b	3													
3b	?	7	4	4	4													
3c	?	15	5	/	5													
4	?	14	6	/	6													
5	Sédentaire	9				1, 2												
6		5				3												US 1 b US 1 c
7	Classique (Soho)	18				4												
8		24				10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11		
9	Classique (Civano)	12				11												
10		8				12	12	12	12	12	12	12	12	12	12			
11	Polvoron	4																
12		14																
13	Protohistorique	43																
14		13																



Tab. 46 : Synthèse chronostratigraphique : construction du phasage pédo-sédimentaire et identification de 14 phases. Les numéros dans le tableau font référence aux phases décrites dans le texte et en Annexe 5



Tab. 47 : Synthèse des données microstructurales, des dynamiques pédo-climatiques et écologiques.

Les conditions sont contrastées (saisonnnières), avec des phases d'humidification suivies par une évaporation complète. Les traits texturaux sont rares, en réponse à la dynamique érosive et la texture grossière des sédiments (facies 1 et 2a). Le pourcentage de matière organique est faible, et les agrégats de matière organique indiquent une érosion des sols. Les charbons sont rares, mais ceux présents ont une taille qui dépasse 125µm (tri granulométrique ou feux locaux sur les bajadas) et une forme clairement allongée qui rappelle les graminées (fréquemment observées sur les cônes détritiques).

Dans un second temps, des épisodes de forte dynamique hydrologique sont également identifiés, en association avec des écoulements d'origine locale. La microstructure particulière de ces dépôts conduit au colmatage très rapide des canaux et à leur abandon ou leur reconstruction, car ils sont bien entretenus.

2.1.3. Phase 3a: Forte dynamique hydrosédimentaire, diminution de la végétation

La **phase 3** a été bien calée chronologiquement avec deux dates AMS : 347-540 apr. J.-C., et 414-549 apr. J.-C. Dans les canaux, trois sous-phases ont été observées.

La phase 3a correspond à la sédimentation de limons sableux à litages parallèles ou à facies uniforme, d'origine régionale, dans le canal principal et de distribution de Casa Blanca. La microstructure particulière, les traits ferrugineux et les traits texturaux sont absents, peut-être à cause de la texture grossière des dépôts. La sédimentation rapide de forte compétence témoigne de l'exhaussement du niveau de base de la Gila. La concentration en matière organique dégradée augmente légèrement, mais le taux de matière organique décroît à l'échelle du bassin versant. Le taux de charbons est très faible (réduction de la biomasse végétale ?).

2.1.4. Phase 3b: Stagnation de l'eau et végétation dans les canaux, incendies

Cette phase correspond à la sédimentation de dépôts argilo-sableux granoclassés ou de décantation en provenance de l'amont du bassin versant, dans le canal principal et de distribution de Casa Blanca. La structure prismatique atteste de cycles humectation/dessiccation répétés. Si les techniques de dérivation des eaux de ruissellement prévalaient au cours de la phase 2, celles-ci sont abandonnées au cours de la phase 3a. L'efficacité des canaux est très réduite et a probablement limité la superficie irrigable en aval. La concentration en macrorestes organiques dégradés augmente. L'hypothèse de végétation dans les canaux ou sur les levées latérales est posée. Le taux moyen de charbons est très faible, mais des concentrations supérieures à 10% ont été identifiées. Ces flux de charbons semblent signer des incendies à l'amont du bassin versant. On assiste peut-être à la mise en place d'un système à chenaux multiples à forte mobilité latérale car la phase 3c atteste d'une augmentation, à nouveau, des dynamiques hydrosédimentaires.

2.1.5. Phase 3c : Dynamique fluviale intense, augmentation de l'érosion

Cette dynamique observée dans les canaux est caractérisée par la sédimentation de limons sableux basaltiques à stratifications entrecroisées et à litage parallèle qui correspondent à la rechenalisation des canaux sous l'effet d'une hydrologie plus intense. Les traits texturaux sont absents, peut-être en raison de la texture grossière des sédiments. Le taux de matière organique diminue fortement, mais le nombre d'agrégats humiques érodés augmente, de même que les macrocharbons arrondis. Leur taille résulte sans doute d'un tri granulométrique, mais leur présence indique également des incendies dans le bassin versant et leur transport par les eaux de crue.

2.1.6. Phase 4 : Ecoulement réduits, érosion des sols

Les sédiments de la **phase 4**, dont la date de mise en place n'est pas connue, sont composés de limons argileux laminés et d'argiles de décantation. Ces sédiments indiquent une compétence faible et signent l'eutrophisation des canaux, du moins dans le secteur de Casa Blanca. Le niveau des aquifères fluctue comme le suggère la microstructure cavitaire et prismatique des sédiments, ainsi que les traits d'oxydation. Les traits texturaux sont absents. Le taux moyen de matière organique augmente, mais 50 % de cette dernière est observée sous forme humique et érodée, ce qui témoigne de l'érosion d'horizons superficiels. Les charbons sont absents et signent la disparition temporaire des incendies. Des tentatives d'aménagements et de nettoyage sont observées mais le système Casa Blanca est abandonné à une date indéterminée.

2.2. Phases 5 et 6 : de 950-1050 apr. J.-C. (Période Sédentaire)

2.2.1. Phase 5 : Conditions chaudes et humides, végétation dans les canaux, feux régionaux et brûlis locaux

Les sédiments de la phase 5 sont composés de limons argileux et grossiers bioturbés en provenance de l'amont du bassin versant. Les terroirs se stabilisent. Le fort développement de l'activité biologique dans le remplissage des canaux et les formations de surface de la plaine traduit une période de rémission des crues, associée à un chenal plus étroit et en voie d'encaissement. Le taux de matière organique est très important dans la plaine d'inondation et le remplissage des canaux, ce qui permet de poser l'hypothèse d'une végétation locale bien exprimée. Les traits d'oxydation et les traits texturaux témoignent de conditions humides locales, mais aussi d'épisodes d'exondation et d'assèchement temporaire. Les nombreux microcharbons observés dans les canaux suggèrent soit des épisodes de feux dans le bassin versant amont ou une fragmentation suite à l'activité biologique. Dans la plaine et les piémonts des Santan, les charbons sont très peu nombreux, mais presque la moitié d'entre eux ont une taille supérieure à 125 µm et sont de forme semi-allongée. Ils permettent de poser l'hypothèse de brûlis sur les piémonts ou dans la plaine.

2.2.2. Phase 6 : Erosion des sols, végétation réduite, brûlis locaux

Cette phase regroupe des limons grossiers à facies uniforme, d'origine régionale, dans la plaine d'inondation. Ils scellent le paléosol et les canaux, et correspondent à une phase d'intensification des dynamiques hydriques et à une recrudescence des crues rapides et brutales dans la plaine. Une intensification des pluies, ici à l'échelle régionale, va favoriser l'érosion et l'aggradation de la plaine avec $Q_{s+} > Q_{l+}$.

Dans la plaine d'inondation, le taux de matière organique est faible et présent sous forme d'agrégats de sols érodés. L'absence de traits texturaux traduit une circulation réduite de particules fines dans les sols, et les traits d'oxydation (facies 2 et 4a) indiquent un assèchement rapide que la microstructure prismatique confirme.

Quelques macrocharbons ont été observés et témoignent de pratiques agraires toujours actives dans le secteur de Santan, qui contribuent à la réduction de la ripisylve dans la plaine, et fragilise d'autant plus le système. La forte concentration en microcharbons semi-allongés et allongés dans les canaux suggère des épisodes de feux dans le bassin amont. Cette dynamique conduit directement au colmatage et au recouvrement des canaux dans la plaine alluviale, de même qu'à la destruction des vannes d'entrée, facilitée par un couvert végétal réduit.

2.3. Phases 7 à 11 : de 1050 à 1450 apr. J.-C. (Période Classique)

2.3.1. Phase 7 : Réduction des feux, érosion locale des sols, conditions contrastées

La **phase 7** a été datée entre 1040 et 1210 apr. J.-C. (^{14}C) ou entre 1150 et 1300 apr. J.-C. (typhochronologie). Elle est caractérisée par la sédimentation de limons grossiers colluviaux et alluviaux dans le réservoir d'eau Santan. L'écoulement est à la fois uniforme, à litage parallèle et granoclassé, et l'hypothèse d'un contrôle de l'arrivée d'eau et d'un filtrage par le biais d'une vanne d'entrée est posée, suite à la construction de fosses dans le réservoir.

Les pics de matière organiques sont observés 1) dans les sédiments en provenance des Santan Mountains, ce qui atteste d'une érosion des horizons superficiels humiques, 2) dans certains facies des canaux, ce qui permet de poser l'hypothèse d'un développement de la végétation in situ. La concentration en charbons diminue fortement et traduit soit une réduction des brûlis locaux et feux régionaux, soit une mise en culture continue dans les parcelles adjacentes aux canaux, réduisant la biomasse ligneuse.

2.3.2. Phase 8 : Stagnation d'eau, conditions humides et chaudes, végétation

La **phase 8** correspond aux dynamiques sédimentaires enregistrées entre 1150 et 1300 apr. J.-C. dans l'ensemble des structures du système Santan. Les sédiments sont majoritairement de texture argileuse, peut-être suite à l'encaissement du cours d'eau (Waters, 2000). Des limons grossiers polygéniques ont été observés et traduisent des épisodes temporaires d'intensification des dynamiques locales ou une dérivation

volontaire des eaux de ruissellement. La végétation se développe dans les canaux et les écoulements sont diffus.

La présence de cristaux de gypse signe des conditions humides et chaudes. Les traits d'oxydation confirment ces phases d'hydromorphie temporaire. De rares macrocharbons ont été observés et ils signent peut-être un retour aux pratiques de brûlis sur les piémonts et dans la plaine.

2.3.3. Phase 9 : Brûlis locaux, érosion des sols, sédimentation rythmée

La **phase 9** s'est mise en place entre 1300 et 1375 apr. J.-C. Les sédiments qui colmatent les canaux sont limoneux grossiers, massifs et granoclassés, en provenance du bassin amont de la Gila. Cette sédimentation rythmée indique un haut niveau saisonnier de l'eau dans le chenal principal, associé à son exhaussement. Les canaux principaux/de distribution sont dépourvus de matière organique, mais les canaux collecteurs d'eau en contiennent une forte proportion sous forme fraîche, brûlée et en agrégats, associée à des macrocharbons. La pratique du brûlis est confirmée localement sur les piémonts et l'érosion des dépôts terrigènes toujours active (agrégats de sol). Dans les canaux, le développement de la végétation signe des épisodes d'exondation. Les traits texturaux sont très rares du fait de la texture grossière des sédiments.

2.3.4. Phase 10 : Conditions contrastées, forte érosion, diminution de l'activité humaine

La **phase 10** correspond à l'abandon progressif de l'ensemble des canaux. Le faciès d'abandon observé dans le secteur de Santan est composé de limons alluviaux et colluviaux, qui correspondent à des épisodes de crue, d'érosion locale voire d'effondrement des buttes post-abandon dans la dépression créée par les canaux.

De la matière organique fraîche souvent authigène est observée dans le canal principal (suite à son abandon), mais de la matière organique érodée et agrégée est également observée et témoigne d'une érosion de dépôts terrigènes toujours active dans le bassin versant. En parallèle, la concentration en charbon diminue dans les dépôts.

2.3.5. Phase 11 : Faible couvert végétal, érosion, pluies locales

La dernière phase de fonctionnement des canaux correspond aux dynamiques hydrosédimentaires enregistrées entre 1328 et 1445 apr. J.-C. Les sédiments observés dans les canaux collecteurs d'eau à Santan sont sableux et charbonneux, à faciès uniforme, et indiquent une érosion locale importante. Le taux de matière organique diminue mais quelques faciès en contiennent beaucoup. Cette dernière est observée sous forme humique, en agrégats, souvent sous forme bien préservée, en parallèle à une forte concentration en macrocharbons. Il est difficile de proposer une origine anthropique à la présence de ces charbons en raison de la déprise agraire observée à la fin de la période Classique. Leur présence peut être liée à l'érosion de certaines zones anciennement brûlées, voire à des feux naturels.

2.4. Phases 12, 13, 14 : de 1450 à 1900 apr. J.-C. (Périodes Protohistorique et Historique)

2.4.1. Phase 12 : Reconquête de la ripisylve, incendies naturels, stabilisation temporaire de la plaine

Les sédiments de la phase 12 caractérisent le paléosol cumulique, composé de limons argileux granoclassés en provenance de l'amont du bassin versant, qui se développe après la phase de déprise agricole de la période Classique. Le chenal est peut-être à méandres. Le taux de matière organique sous forme fraîche, humique et érodée est élevé. Il témoigne d'une reconquête de la végétation dans le lit majeur de la Gila. Les charbons sont plus nombreux mais leur origine pourrait être naturelle comme le suggère la recrudescence de ce type d'incendie dès le 17^{ème} s. (ex: Allen, 2003).

2.4.2. Phase 13 : Végétation dans le lit majeur, aggradation, système anastomosé, incendies

Les conditions qui prévalent au cours de la phase 13 sont très différentes de celles de la phase 12. Les sédiments sableux granoclassés et à litage parallèle, d'origine régionale, témoignent d'une phase d'aggradation de la plaine. Le taux de matière organique humique augmente, mais la concentration en matière organique fraîche diminue, ce qui suggère une probable recolonisation du couvert végétal dans le bassin amont, mais un couvert végétal épars dans la plaine. Le taux de charbons augmente très nettement, peut-être en réponse à la recrudescence des incendies naturels. Une réduction temporaire de la compétence est associée à une évolution morphologique de la Gila vers un *système anastomosé*. Dans la plaine alluviale, cette dynamique indique la mise en place d'îles et d'une ripisylve bien développée.

2.4.3. Phase 14 : Augmentation des incendies, végétation dans le bassin versant amont

Une nouvelle phase d'aggradation par des limons sableux à litage parallèle est identifiée. Elle est associée à *l'élargissement ou la migration* du cours d'eau. La dernière phase de fonctionnement est composée d'argile et de limons argileux granoclassés, en provenance de l'amont du bassin versant, observés dans le lit majeur de la Gila avant son incision au 19^{ème} s.

Le taux de matière organique est important et cette dernière est bien préservée. Elle témoigne d'une végétalisation du lit majeur, ce qui pourrait expliquer les particules fines observées et piégées par la végétation. Le chenal est peut-être à méandres. Le taux de charbons augmente toujours, mais leur origine est peut-être anthropique, suite à la déforestation massive dans le bassin amont (Bahre, 1991 ; Hackenberg, 1983). Les traits texturaux et les traits d'oxydation sont inexistantes.

Partie V

Synthèse et discussion



Dessin de Paul Coze, Photographie couleur de Bob Petley.

CONTENU DE LA PARTIE V

CHAPITRE 1 :

Histoire et dynamique des paysages fluviaux de la préhistoire au 19^{ème} siècle dans le bassin de Phoenix

Le premier chapitre propose une synthèse du fonctionnement de l'hydrosystème dans le bassin de Phoenix sur la longue durée. Le problème de la représentativité des résultats, de l'échelle locale à régionale, est évoqué et alimenté par des corrélations régionales dans les bassins amont et dans le bassin de la Colorado River, dont la Salt et la Gila sont des affluents. Cette approche vise également à comparer les transferts sédimentaires entre l'amont et l'aval et d'estimer le synchronisme morphogénique à l'échelle du bassin de Phoenix. Nous proposons à partir de nos résultats un modèle d'évolution des paysages fluviaux.

CHAPITRE 2 :

La construction et l'évolution des systèmes agraires : entre vulnérabilité, adaptations, conflits et crises

Le second chapitre se penche sur le fonctionnement des agrosystèmes Hohokam et Akimel O'Odham sur la longue durée. Une brève synthèse des pratiques agraires identifiées est proposée. Afin de voir dans quelle mesure les dynamiques hydrosédimentaires ont influencé l'évolution de ces pratiques, nous proposons différents modèles de fonctionnement des agrosystèmes, en discutant de leur vulnérabilité au risque hydrologique et de leurs adaptations, de la diversification des moyens de subsistance en réponse au stress, aux épisodes d'abandon des terroirs.

Chapitre 1

Histoire et dynamique des paysages fluviaux de la préhistoire au 19^{ème} siècle dans le bassin de Phoenix

1. Représentativité et comparaison des résultats de l'échelle locale à régionale	486
1.1. Périodes Formative, Pionnière et Coloniale: une information fragmentée	486
1.2. Période Sédentaire à Historique: des observations régionales	490
2. Rythmicité des dynamiques hydrosédimentaires sur la longue durée et modalités de la morphogénèse	497
2.1. Identification des relations entre dynamiques hydrosédimentaires, climatiques et humaines au cours des deux derniers millénaires	497
2.2. Modélisation de l'évolution des paysages fluviaux	504

1. Représentativité et comparaison des résultats de l'échelle locale à régionale

Afin de tester la possibilité de créer un phasage unique dans l'ensemble du bassin de Phoenix (Fig. 226) et d'estimer la représentativité régionale des résultats, nous avons corrélé chronologiquement les dynamiques morphogéniques des bassins de la Gila, de la Colorado, de la Little Colorado et de la San Juan (Fig. 227 et Fig. 228) le long desquels d'autres groupes d'agriculteurs se sont également implantés. Nous posons l'hypothèse que ces dynamiques sont directement comparables, en raison d'un milieu de sédimentation identique.

1.1. Périodes Formative, Pionnière et Coloniale: une information fragmentée

Les formations étudiées dans le bassin de la Gila se sont mises en place entre le 3^{ème} et le 19^{ème} s. (période Formative à Historique). Dans la basse vallée de la Salt, les premières dates obtenues correspondent à la période Pionnière (600 apr. J.-C.). Par conséquent, il n'a pas été possible de corréler les phases 1, 2, 3a, 3b et 4 distinguées dans le bassin de la Gila avec les formations sédimentaires de la Salt (Fig. 226).

De même, les phases 1 à 4a dans le bassin de la Salt n'ont pas leur équivalent chronologique dans le bassin de la Gila. Il convient toutefois d'insister sur le fait que les dynamiques 3b et 4 observées dans des canaux d'irrigation de la Gila n'ont pas été datées. En s'appuyant sur l'hypothèse d'une continuité dans l'utilisation de structures hydrauliques jusqu'à leur abandon, il est possible que ces dépôts se soient mis en place entre 650 et 950 apr. J.-C. (Période Pionnière à Coloniale).

1.1.1. Exploitation des milieux et début de l'irrigation de 250 à 550 apr. J.-C. (période Formative à Pionnière)

1.1.1.1. Dans le bassin de la Gila

Des **sols bruns alluviaux** ont été identifiés sur le site de Gila Florence (phase 1). Ils témoignent d'une plaine alluviale stable localement entre 250 et 400 apr. J.-C. (période Formative). Les premiers agriculteurs irriguent probablement ces zones entre 250 et 400 apr. J.-C. La ripisylve semble bien exprimée localement, mais le signal incendie augmente, peut-être en réponse à des brûlis locaux et au défrichement des plaines. Les canaux étudiés (secteur de Casa Blanca) sont colmatés par des argiles fluviales bioturbées qui traduisent des **écoulements diffus** jusqu'entre 415 et 550 apr. J.-C. L'origine de cette faible dynamique n'est pas connue- lit mineur encaissé, problème dans l'ingénierie, chenal principal mobile- car nos résultats n'ont qu'une valeur locale et ne sont pas extrapolables à l'échelle du bassin versant.

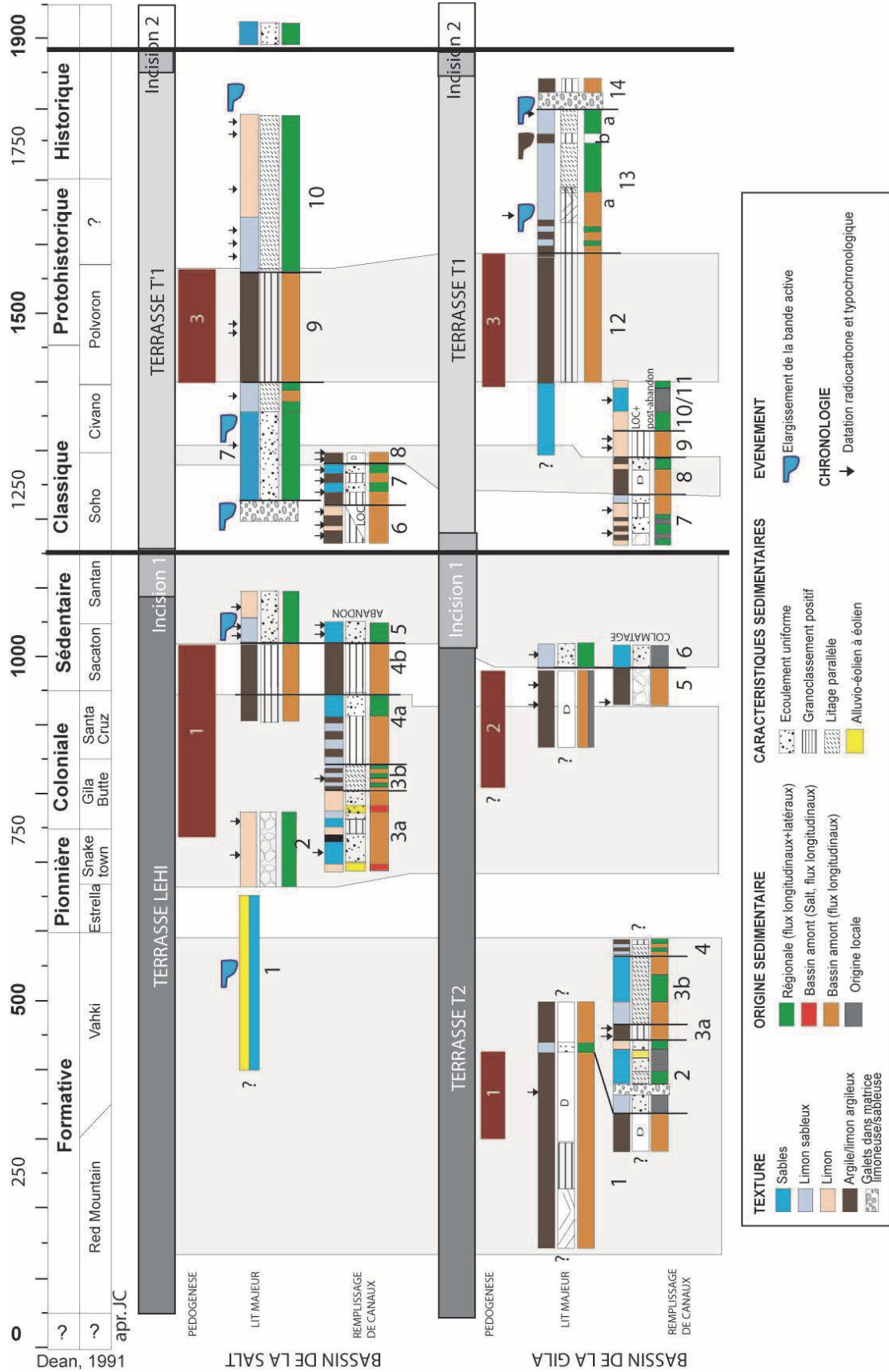


Fig. 226 : Comparaison des phases sédimentaires obtenus dans les bassins de la Salt et de la Gila

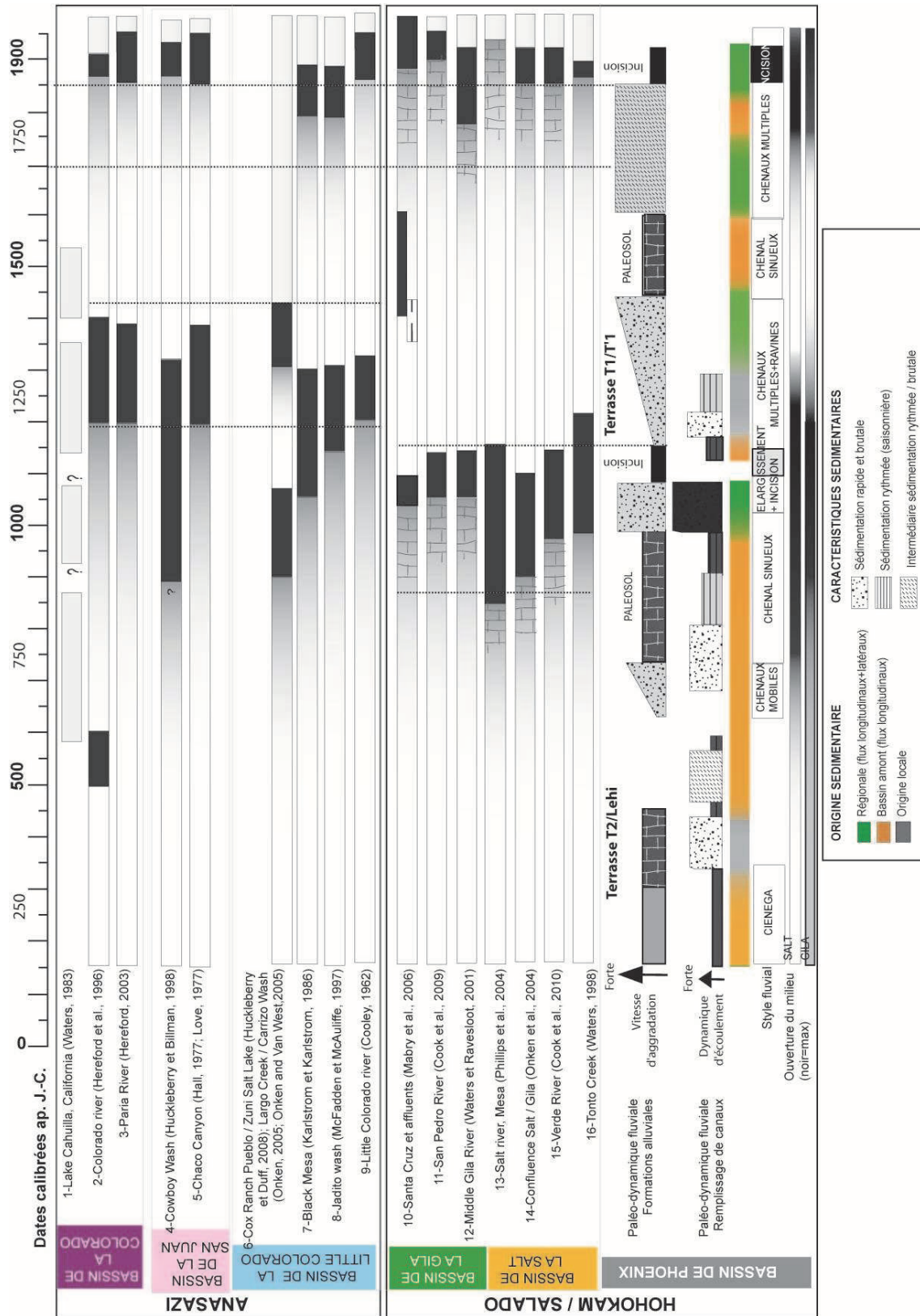


Fig. 227 : Dynamiques hydrosédimentaires et comparaison avec les dynamiques morphogéniques dans les bassins de la Gila, Little Colorado, San Juan et Colorado. La localisation des sites numérotés est présentée dans la figure suivante.

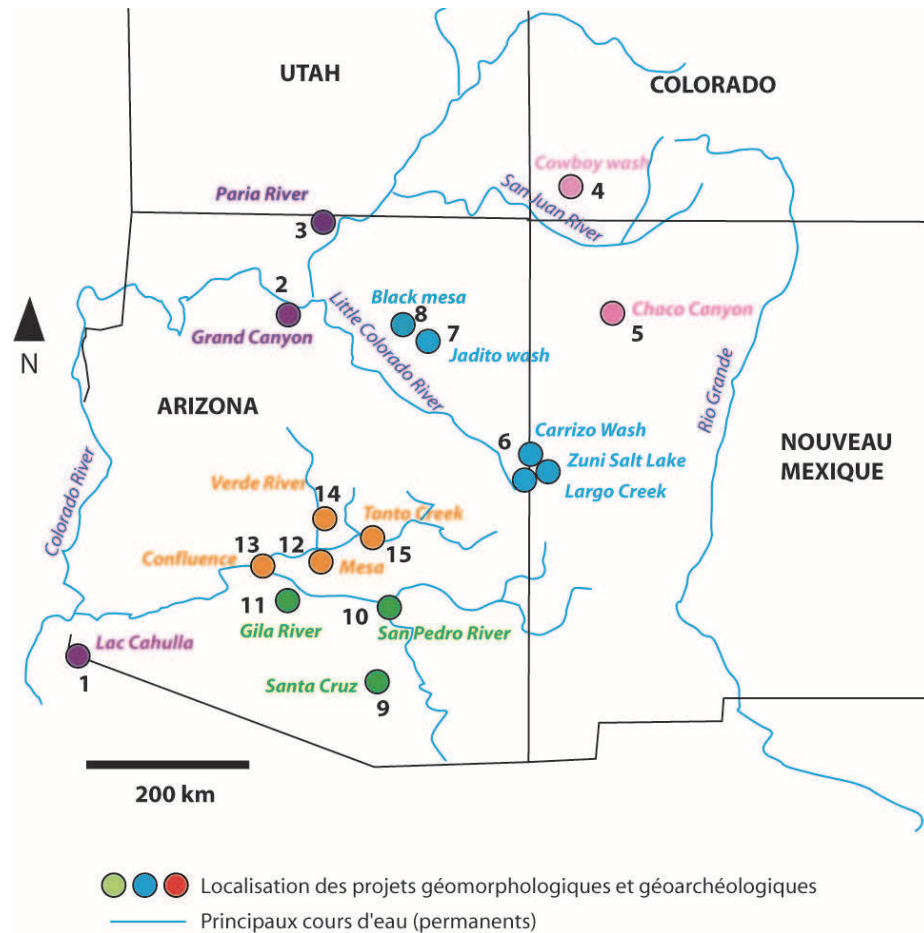


Fig. 228 : Localisation des projets géomorphologiques et géoarchéologiques présentés dans la Fig. 227

Dans le secteur de Casa Blanca, ces conditions évoluent avec la possible dérivation d'eaux de ruissellement en provenance des Sacaton Mountains qui charrient des sables charbonneux riches en agrégats de sols. Cette dynamique suggère un couvert végétal local discontinu et exploité (brûlis de graminées sur les piémonts ?) et pourrait indiquer des conditions sèches (absence d'apport fluvial, compensation par un apport local ?) (phase 2). Une corrélation est proposée avec la phase 1 dans le bassin de la Salt, où l'unique site étudié (Vulcan) est une dune qui traduit également des conditions sèches. Aucune donnée de terrain n'a été datée entre 550 et 610 apr. J.-C.

1.1.1.2. Dans les bassins amont et tributaires

Les données disponibles sont réduites. L'ensemble du Sud-Ouest américain est caractérisé par le remblaiement et l'exhaussement des vallées, dont le rythme et les dynamiques ne sont pas connus (Fig. 227) (ex : Cook, 2009 ; Cook, 2010 ; Cooley, 1962 ; Hereford, 2003 ; Hall, 1977 ; Huckleberry et Billman, 1998 ; Huckleberry et Duff, 2008 ; Karlstrom et Karlstrom, 1986 ; Love, 1977 ; McFadden et McAuliffe, 1997 ; Mabry, 2006 ; Onken et al., 2004 ; Onken, 2005 ; Onken et Van West, 2005 ; Phillips et al., 2004 ; Freeman, 2000 ; Waters, 1983, 1988, 1998 ; Waters et Haynes, 2001 ; Waters et Ravesloot, 2001). Un bref épisode d'incision de la rivière Colorado River et de la rivière San Juan est enregistré entre 500 et 600 apr. J.-C. (Hereford et al., 1996 ; Christensen, 1985 ; Oviatt, 1985).

1.1.2. Aggradation accélérée de la plaine, forte érosion puis chenalisation des structures hydrauliques de 610 à 850 apr. J.-C. (période Pionnière/Coloniale)

1.1.2.1. Dans le bassin de la Salt

Les sédiments déposés entre 610 et 800 apr. J.-C. ont été identifiés sur la plaine Lehi (phase 3a) (rive sud, site RAD). Ils caractérisent une **phase d'aggradation** qui atteint une puissance de 40 cm, composée de limons grossiers en provenance du bassin amont de la Salt (Fig. 226).

Ces dépôts scellent les sites de la période Formative. Dans des secteurs éloignés de la bande active du cours d'eau (transition plaine alluviale/terrasse), les sédiments bioturbés attestent d'une **phase de stabilité temporaire qui favorise le développement agricole** (brûlis et irrigation). Les champs sont alimentés par des sédiments de texture fine. Le remplissage des structures hydrauliques atteint plus d'1m par endroit (amont, rive sud). Les sédiments de texture limoneuse grossière à sableuse (facies granoclassé ou uniforme à l'échelle microscopique, à stratifications entrecroisées sur le terrain) témoignent d'une **forte dynamique hydrique, rythmée à brutale, qui érode les berges des canaux**. La présence de sables alluvio-éoliens indique peut-être la remobilisation hydrique de dépôts éoliens. La ripisylve semble toujours bien marquée dans la plaine. Les résultats obtenus ne nous permettent pas de restituer le style fluvial mais nous posons l'hypothèse d'une **bande active large associée à des chenaux mobiles** et un haut niveau des aquifères.

La dynamique évolue légèrement probablement entre 750/800 et 850 apr. J.-C. (phase 3b). Cette phase est représentée uniquement dans le bassin de la Salt (Fig. 226). L'étude des remplissages de 16 canaux des systèmes CS1, CS2, Scottsdale, CS12, CS7 a permis de reconstruire des dynamiques secondaires de façon relativement complète. Des microlamines de sédiments sableux et limoneux à litage parallèle traduisent des débits solides importants en provenance des bassins de la Salt et de la Verde et attestent d'écoulements rythmés à permanents.

1.1.2.2. Dans les bassins amont et tributaires

La période entre 650 et 850 apr. J.-C. est caractérisée par l'aggradation de l'ensemble des cours d'eau du bassin de la Colorado et des bassins versants amont (Freeman, 2000 ; Haynes et Huckell, 1986 ; Waters, 1988 ; Waters et Haynes, 2001 ; Cook et al., 2010) (Fig. 227 et Fig. 228).

1.2. Période Sédentaire à Historique: des observations régionales

1.2.1. Stabilisation des plaines à l'échelle régionale de circa 850 à 1030 apr. J.-C. (période Coloniale/début sédentaire)

1.2.1.1. Dans le bassin de la Salt et de la Gila

Dans l'ensemble du bassin de Phoenix (sources amont et aval bien représentées), des argiles limoneuses granoclassées se déposent dans la plaine entre 850 et 1030 apr. J.-C.

(fin de la période Coloniale/début sédentaire) (phase 4a pour la Salt et 5 pour la Gila) (Fig. 226). Ces dépôts forment un **paléosol cumulique**, dont le développement ne dépasse par le siècle. Nous posons l'hypothèse d'une période de stabilisation des plaines dès cette période. La compétence des débits de crue est réduite, mais les **conditions sont humides** avec des précipitations longues qui permettent une montée et une descente progressive du niveau de l'eau. Ces conditions sont favorables au développement des pratiques agraires, et ce malgré la compaction des sols et leur teneur en gypse. Le cours d'eau est probablement encaissé et sinueux mais aucune observation géomorphologique ne permet de l'affirmer.

Cette stabilisation des plaines est complétée par l'information secondaire obtenue dans les canaux. Entre 850 et 1020-30 apr. J.-C., ces derniers sont colmatés par des limons-argileux à granoclassement positif puis des argiles laminées en provenance des bassins amont (Salt et Gila) (observation dans les systèmes CS1, CS2, CS12). Leur occurrence signe une sédimentation rythmée mais de faible compétence. L'absence de sédiments du bassin de la Verde nous permet de poser l'hypothèse de pluies estivales dominantes, associées à un transport longitudinal réduit. Les débits solides importants sont favorisés par des feux locaux régionaux (feux de graminées).

1.2.1.2. Dans les bassins amont et les tributaires

Le paléosol cumulique de la période Sédentaire est mentionné brièvement par Waters et Ravesloot (2001) et Onken et al. (2004) qui observent des sédiments pédogénéisés dans la moyenne vallée de la Gila (*Orchard Soil*) et à la confluence Salt/Gila. Dans le bassin de la Verde, des sédiments structurés sont décrits brièvement et calés chronologiquement entre 900 et 1300 apr. J.-C. (Johnson et al., 1997). Aucune autre information n'est disponible sur cette phase de stabilité.

1.2.2. Élargissement, évolution morphologique et incision de 1030 à 1150 apr. J.-C. (période Sédentaire)

1.2.2.1. Dans le bassin de la Salt et de la Gila

Deux dynamiques hydrosédimentaires très contrastées ont été identifiées (Fig. 226). Entre 1030 et 1100 apr.-C, une **aggradation des plaines** avec 4 **périodes de crues majeures** est enregistrée dans la plaine de la Salt, soit une puissance de sédimentation d'environ 60 cm en un peu plus d'un siècle (phase 5 pour la Salt, 6 pour la Gila, Fig. 226). La bande active de la Salt s'élargit, érode les vannes d'entrée des structures hydrauliques sur les deux rives, le lit majeur étant très mobile. La majorité des canaux d'irrigation en utilisation au cours de cette période sont colmatés par des sédiments limono-sableux à sableux à facies uniforme qui proviennent d'une érosion des bassins versants amont et des affluents. L'augmentation des débits solides est favorisée par un stock érodable important qui s'est accumulé à l'échelle régionale depuis presque 200 ans. Cet élargissement n'a pas été observé dans la moyenne vallée de la Gila au cours de ce travail mais des travaux antérieurs ont déjà montré une dynamique identique à la même période (Waters et Ravesloot, 2001). La charge solide se dépose dans la plaine en moins d'un demi-siècle. Le chenal principal s'incise alors, en réponse à l'augmentation

du ratio Ql/Qs. Ceci conduit à la formation de la terrasse Lehi sur laquelle les processus pédologiques se développent alors. L'érosion généralisée des bassins versants permet alors de poser l'hypothèse d'une **crise environnementale** à caractère régional et non pas uniquement d'un évènement exceptionnel.

1.2.2.2. Dans les bassins amont et tributaires

L'épisode d'incision est antérieur à 1100 apr. J.-C. dans le bassin amont de la San Pedro River (Haynes, 1987 ; Waters et Haynes 2001 ; Cook, 2009), Verde River (Cook, 2010), Santa Cruz River et ses affluents (Haynes et Huckell, 1986; Waters, 1985, 1987 ; Mabry, 2006 ; Eddy et Cooley, 1983), la confluence Salt / Gila (Onken et al., 2004), Salt River (Phillips et al., 2004), Gila River (Waters et Ravesloot, 2001 ; Huckleberry, 1995) et le cours d'eau intermittent Tonto (Waters, 1998) dans lequel l'incision ne dépasse pas 2 m (Waters, 1998) (Fig. 227).

Dans le nord de l'Arizona, l'aggradation rapide de la plaine est identifiée dès 1000 apr. J.-C. (Ely, 1997), se poursuit jusqu'en 1150 à 1200 apr. J.-C. La phase d'incision quant à elle est plus tardive (Karlstrom, 1988 ; Hall, 1977 ; Love, 1979 ; Cook et al., 2009 ; Cook et al., 2010 ; Cooley, 1962 ; Hereford, 2003 ; Hereford et al., 1996; Huckleberry et Billman, 1998 ; Huckleberry et Duff, 2008 ; Karlstrom et Karlstrom, 1986 ; McFadden et McAuliffe, 1997 ; Christensen, 1985 ; Oviatt, 1985). La réponse complexe d'un système fluvial lorsqu'il dépasse les seuils géomorphologiques (Mabry, 1999 ; Eddy et Cooley, 1983 ; Patton et Schumm, 1981) conduit à un manque de synchronisme entre les épisodes d'aggradation et d'incision en contexte semi-aride. En conséquence une section d'une plaine alluviale peut être en voie d'exhaussement et une autre en voie d'incision (Bull, 1997 ; Huckleberry, 1993 ; Packard, 1974 ; Schumm et Hadley, 1957 ; Water, 1991 ; Waters et Field, 1986 ; Betancourt, 1990 ; Cooke et Reeves, 1976).

Une hypothèse peut toutefois être posée pour expliquer le décalage chronologique entre les deux incisions. L'incision étant plus tardive dans les bassins situés en amont (bassins de la Colorado, Little Colorado et San Juan (Fig. 228)), elle pourrait résulter d'une érosion régressive qui débiterait d'abord dans les parties basses des grands réseaux hydrographiques et remonterait vers les bassins supérieurs.

1.2.3. *Sédimentation rythmée de faible compétence, lit mineur encaissé (1150-1250 apr. J.-C.)*

1.2.3.1. Dans le bassin de la Salt et de la Gila

Les dynamiques hydrosédimentaires qui correspondent à la période 1150-1250 apr. J.-C. (période Classique Soho) n'ont été mises en évidence qu'en position secondaire (CS1, CS2, CS7, CS12, Santan System, Scottsdale) (Salt : phase 6 et 7 ; Gila, phase 7, Fig. 226). Les données sont les plus nombreuses et sont homogènes à l'échelle des deux bassins versants. De nouveaux canaux sont construits dans les plaines alluviales et sont colmatés par des limons argileux laminés en provenance de l'amont des bassins versants. La **dynamique d'écoulement est de faible compétence**, mais rythmée, suite à des précipitations régulières et **un haut niveau saisonnier de l'eau**. La végétation pousse dans les canaux et la ripisylve semble mieux exprimée dans la plaine.

Sur la rive nord de la Salt, le long du Canal System 2, une **dynamique de ravinement** d'axe NE-SO est observée. Deux hypothèses peuvent être posées : 1) l'incision qui affecte les cours d'eau permanents touche également les cours d'eau temporaires par le biais d'une incision régressive, 2) suite à l'incision du chenal principal, les Hohokam s'adaptent temporairement et canalisent les eaux de ruissellement. Des contraintes dans l'ingénierie et/ou des pluies torrentielles conduisent à l'érosion des canaux par ces ravines. La construction d'un réservoir d'eau le long de la Gila, colmaté par des sédiments d'origine locale, peut également avoir un lien direct avec une alimentation en eau difficile suite à l'incision du 11^{ème}-12^{ème} s.. Aucune donnée n'est disponible pour cette période dans la plaine d'inondation, mais l'hypothèse d'un remblaiement du chenal incisé est envisageable, associée à une revégétalisation de la plaine.

1.2.3.2. Dans les bassins amont et tributaires

L'aggradation des plaines alluviales est attestée autour de 1215-1280 apr. J.-C. le long de la rivière Tonto (Waters, 1988), dès 1270 apr. J.-C. dans le bassin de la Salt, mais autour de 1300 apr. J.-C. dans le bassin de la Verde (Cook et al., 2010). La durée de l'incision et du remblaiement est donc inférieure à 200 ans. L'incision des affluents de la rivière Colorado a eu lieu entre 1200 et 1300 apr. J.-C., soit presque 1 siècle après celle observée dans le bassin de la Gila (Fig. 227). Le début du remplissage de la vallée de la Colorado est plus tardif et débute entre 1265 et 1400 apr. J.-C. (Huckleberry et Billman, 1998).

1.2.4. Reprise de l'aggradation entre 1200/1250 et 1450 apr. J.-C. (fin de la phase Soho et Civano)

1.2.4.1. Dans le bassin de la Salt et de la Gila

La fin de la **période Classique Soho** (1200/1250-1300 apr. J.-C.) est caractérisée par une dynamique hydrique contrastée. Dans le lit majeur de la Salt, 1m de sables en provenance du bassin de la Verde se déposent en moins de 150 ans et contribuent à l'édification de la terrasse T'1 (phase 7, Fig. 226). Le long de la Gila, une dynamique hydrosédimentaire identique est observée, avec l'édification de la terrasse T1. Ces dynamiques peuvent être expliquées par la morphologie et l'instabilité d'un **système à chenaux multiples** dont l'origine est liée à une augmentation des débits liquides et solides. Les variations latérales du cours d'eau et sa profondeur ne permettent qu'une dérivation temporaire de l'eau. Lors de phases de forte pluviométrie, le niveau de l'eau s'élève, le cours d'eau s'élargit et occupe une bonne partie du lit majeur. A proximité des vannes d'entrée, les canaux sont alors colmatés par des sédiments grossiers à facies uniforme en alternance avec des limons sableux granoclassés. Cette forte dynamique nécessite la reconstruction régulière des vannes d'entrée et des barrages de dérivation. Plus en aval, les canaux sont colmatés par ces mêmes dépôts sableux, en alternance avec des limons argileux granoclassés en provenance du bassin de la Salt. Malgré cela, c'est au cours de cette période que les canaux sont efficacement alimentés en eau. Entre 1220 et 1300 apr. J.-C., certaines structures hydrauliques sont abandonnées dans la basse vallée de la Salt et la moyenne vallée de la Gila (phase 8). La texture fine, la

forte concentration en matière organique, les cristaux de gypse et l'activité biologique sont cohérentes avec leur **abandon et leur eutrophisation** qui succède à l'arrêt de l'alimentation en eaux turbides.

Entre 1300 et 1450 apr. J.-C. (période Classique Civano), l'aggradation se poursuit dans la plaine alluviale de la Salt (phase 7). Aucun dépôt de crue n'est observé sur la terrasse Lehi, mais l'accumulation de sédiments grossiers (limons sableux à litage parallèle d'origine multiple) est rapide sur les terrasses T'1 (Salt) et T1 (Gila). Des variations latérales fréquentes des cours d'eau sont observées. La végétation est toujours présente dans le lit majeur. Aucun canal n'a été étudié dans la basse vallée de la Salt, mais l'analyse du catalogue des structures hydrauliques a mis en évidence une sédimentation de moyenne compétence et rythmée. Dans la moyenne vallée de la Gila, les canaux toujours en fonctionnement au cours de la période Civano présentent un remplissage limoneux granoclassé. Les taux de sédimentation élevés favorisent toutefois le colmatage rapide de ces structures, avant leur abandon.

1.2.4.2. Dans les bassins amont et tributaires

Le 14^{ème} et le 15^{ème} s. sont caractérisés par une reprise de l'aggradation à l'échelle régionale (Fig. 227) excepté pour certains cours d'eau (Santa Cruz et San Pedro) où une phase d'incision isolée est identifiée autour de 1400 apr. J.-C. (Waters and Ravesloot, 2001).

1.2.5. Paléosol cumulique et revégétalisation des plaines (1450-1600/1650 apr. J.-C.) (Salt et Gila)

1.2.5.1. Dans le bassin de la Salt et de la Gila

Entre 1450 et 1600 apr. J.-C. (date la plus probable entre 1450-1550 apr. J.-C.) (Période Protohistorique), un ralentissement des flux est identifié dans l'ensemble du bassin de Phoenix (Salt : phase 9 ; Gila : phase 12, Fig. 226). Des limons argileux granoclassés en provenance de l'amont des bassins versants, d'une puissance moyenne de 20 cm dans la Salt et de 40 cm dans la Gila, présentent une **évolution pédologique modérée, de type cumulique**, avec une microstructure subangulaire à bioturbée et des fragments de matière organique préservée. Cette stabilisation résulte soit 1) d'un retour à des conditions hydrologiques et hydroclimatiques stables, associées à un rétrécissement du cours d'eau avec un chenal unique, 2) d'une déprise agricole et de la reconquête de la ripisylve dans la plaine qui piège les sédiments fins, et/ou 3) d'une concordance des deux processus. L'unique source écrite atteste en 1538 d'une Gila River profonde bordée par de nombreux roseaux (Juan de l'Asunción dans Hartmann et Hartmann, 1972).

1.2.5.2. Dans les bassins amont et tributaires

Aucune donnée relative à la présence d'un paléosol et d'une stabilisation des paysages n'est mentionnée pour cette période, sur laquelle peu de chercheurs se sont penchés (Fig. 227).

1.2.6. Reprise de l'aggradation, évolutions morphologiques répétées (1600/1650-1900 apr. J.-C.)

1.2.6.1. Dans le bassin de la Salt et de la Gila

Une reprise de l'exhaussement des plaines de la Salt et de la Gila est observée entre **1600/1650 apr. J.-C.** et se poursuit jusqu'au **19^{ème} siècle**. La comparaison des données hydrosédimentaires permet de mettre en évidence une dynamique relativement similaire dans le bassin de la Salt (phase 10) et de la Gila (phase 13) (Fig. 226) avec la sédimentation de presque 1 m de limons sableux massifs à litage parallèle d'origine régionale. Les facies texturaux moins grossiers le long de la Gila peuvent être expliqués par un débit moyen qui ne représente que 28% de celui de la Salt (Graybill et al., 1989). Les évolutions morphologiques y sont toutefois mieux exprimées (Fig. 226) mais sont localisées à la partie centrale de la moyenne vallée.

Peu avant 1664 apr. J.-C. (date maximale probable), un **système à chenaux multiples** se met en place dans la vallée de la Gila (phase 13a). Le cours d'eau évolue ensuite vers un **système anastomosé** au cours des 17-18^{ème} s. probablement sur les marges de l'axe du chenal principal (phase 13b). Les sédiments fins qui colmatent alors les chenaux témoignent d'une dynamique réduite, associée à un développement de la végétation qui fixe ces particules fines. Les textes attestent de conditions chaudes et humides entre 1750 et 1800 apr. J.-C., avec un cours d'eau intermittent colonisé par des saules et peupliers (Fray Diego Bringas, 1797 d'après Brewer W.H., 1977). Une intensification des dynamiques hydrosédimentaires est ensuite observée, associée à **l'élargissement de la Gila** (dépôts grossiers, en provenance de l'amont et du centre du bassin versant). Nous posons l'hypothèse que cette période correspond à l'inondation des rives nord et sud de la zone centrale de la basse vallée autour de 1830 (Huckleberry, 1992). Enfin, des argiles granoclassées en provenance de l'amont du bassin versant traduisent une stabilisation temporaire de la plaine, probablement associée la migration latérale du chenal (phase 14), mais ces résultats sont très localisés. Leur mise en place date probablement du 19^{ème} s. Cette dynamique s'intensifie avec la sédimentation de sables finement laminés suivie par **l'enfoncement du lit mineur**. Ces conditions semblent se corréliser avec les sources écrites relatées entre 1856 et 1890, observant une phase d'incision à l'échelle régionale (Emory, 1857 ; Griffin, 1846 d'après Ames, 1942 ; Evans, 1849 d'après Fletcher et al., 1999 ; Norris, 1869 ; White, 1876). En remarque, il convient d'ajouter que les basses terrasses de la Salt sont couvertes, en aval, par d'épais sables issus des crues de 1891-1905 et que l'incision historique n'est pas attestée dans cette zone. Elle est plus marquée à l'amont de la basse vallée. Malgré un biais d'échantillonnage, le bassin de la Salt, à l'opposé de la Gila, est faiblement anthropisés au début de la période Historique, ce qui pourrait expliquer sa plus grande stabilité morphologique.

1.2.6.2. Dans les bassins amont et tributaires

Comme dans le bassin de Phoenix, une poursuite de l'aggradation est observée le long des rivières Colorado, Little Colorado et San Juan. Cette aggradation s'achève avec une

incision historique observée dans l'ensemble du Sud-Ouest américain (Fig. 227 et Fig. 228) (Cook, 2009 ; Cook, 2010 ; Cooley, 1962 ; Hereford et al., 1996 ; Hereford, 2002 ; Hall, 1977 ; Huckleberry et Billman, 1998 ; Huckleberry et Duff, 2008 ; Karlstrom et Karlstrom, 1986 ; Love, 1977 ; McFadden et McAuliffe, 1997 ; Mabry, 2006 ; Onken et al., 2004 ; Onken, 2005 ; Onken and Van West, 2005 ; Phillips et al., 2004 ; Waters et Ravesloot, 2001 ; Waters, 1998 ; Waters, 1983). Cette incision pousse des groupes d'agriculteurs à déplacer leurs villages, voire même à migrer, mais aucun secteur n'est abandonné dans sa totalité (Bradfield, 1971 ; Waters, 1992).

1.2.7. *Conclusion*

La dynamique fluviale a été reconstruite principalement à l'échelle du bassin de la Gila entre 250 et 550 apr. J.-C. (**période Formative**), grâce à des enregistrements primaires et secondaires. Aucune donnée n'est disponible dans le bassin de la Salt et les données sont éparpillées à l'échelle du bassin de la Colorado.

Les dynamiques hydrosédimentaires enregistrées entre 610 et 850 apr. J.-C. (**période Pionnière/Coloniale**) dans les canaux d'irrigation et les plaines des bassins de la Salt/Gila attestent d'une très forte dynamique fluviale associée à la rechenalisation des canaux. Entre 850 et 1000 apr. J.-C. (**période Coloniale/début Sédentaire**), un paléosol se développe dans la vallée de la Salt et la sédimentation dans les canaux est rythmée mais de faible compétence. Une recrudescence des crues est enregistrée au 11^{ème} s.; elle est associée au colmatage accéléré des canaux puis leur abandon. Nous posons l'hypothèse d'une dynamique régionale entre le 9^{ème} et le 11^{ème} s. qui se confirme avec l'épisode d'élargissement puis l'incision entre 1050 et 1150 apr. J.-C., très marqués dans l'ensemble des bassins versants, mais avec un léger décalage chronologique dans le bassin de la Colorado.

L'aggradation des plaines reprend au cours du 13^{ème} s. (**période Classique**) où la représentativité primaire et secondaire dans le bassin de Phoenix est la mieux exprimée. L'ensemble des dynamiques sont synchrones.

La période de stabilité des sols entre 1450 et 1600/1650 apr. J.-C. (**période Protohistorique**) puis la réactivation des dynamiques hydrosédimentaires au cours du 17^{ème} s. (**période Historique**) ont été estimées grâce à l'étude de séquences stratigraphiques dans les bassins de la Salt et de la Gila, avec une bonne représentativité et un synchronisme amont-aval, bien que la compétence fluviale soit plus réduite dans la Gila. La reprise de l'aggradation puis l'épisode d'incision observé au cours de la période Historique a été bien identifié dans le bassin de Gila, mais également à l'échelle régionale (bassin de la Colorado, Little Colorado et San Juan) et dans un intervalle chronologique très étroit, peut-être en réponse à un forçage anthropique très marqué (Fig. 227 et Fig. 228).

2. Rythmicité des dynamiques hydrosédimentaires sur la longue durée et modalités de la morphogénèse

2.1. Identification des relations entre dynamiques hydrosédimentaires, climatiques et humaines au cours des deux derniers millénaires

Afin de mieux comprendre les dynamiques sédimentaires, depuis leur occurrence jusqu'à leur contrôle, nous avons corrélé le phasage obtenu de la période Pionnière à Protohistorique dans le bassin de la Salt (Fig. 226) avec les dynamiques climatiques régionales (Fig. 230). Pour les périodes Formative et Historique, nous avons sélectionné les résultats obtenus dans le bassin de la Gila (phase 1, 13 a, b et 14) (Fig. 226).

Pour mieux visualiser ces corrélations et leur rythmicité, une AFC a été réalisée en intégrant 5 variables: la texture des sédiments, la période chronologique (correspondant au phasage sédimentaire établi), les caractéristiques de l'écoulement (granoclassement, uniforme, litage parallèle), les sources sédimentaires et les conditions climatiques générales (chaud/frais, sec/humide) obtenues grâce aux données dendroclimatiques régionales de Salzer et Kipfmüller (2005). L'AFC réalisée (Fig. 229) montre une bonne représentativité selon l'axe F1 et F2. Elle permet de caractériser les dynamiques géomorphologiques en diachronie. Les phases de pédogénèse s'opposent clairement aux épisodes d'élargissement et d'incision, et des conditions climatiques propres contrôlent ces dynamiques. La part de l'activité humaine ne doit toutefois pas être négligée et nous discuterons de l'impact de l'occupation des sols dans les bassins amont lors de la présentation des 4 groupes individualisés.

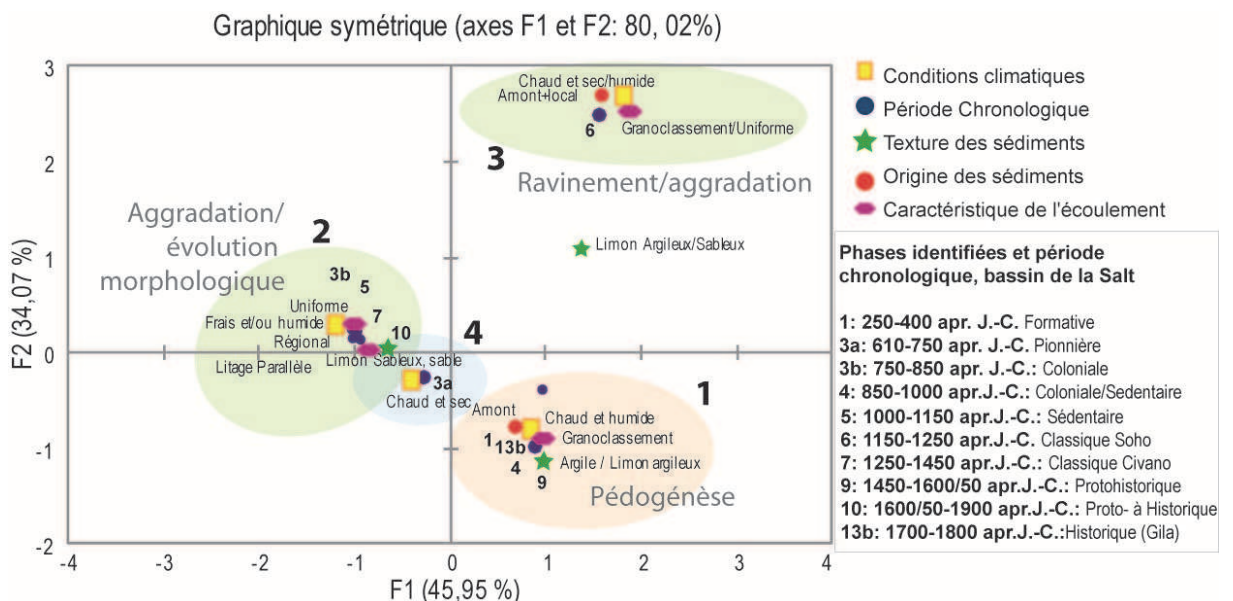


Fig. 229 : AFC sur données quantitatives pour mesurer le lien entre dynamique hydrosédimentaire et climat sur la longue durée. La codification pour décrire les épisodes culturels fait référence à un phasage décrit dans la Fig. 226

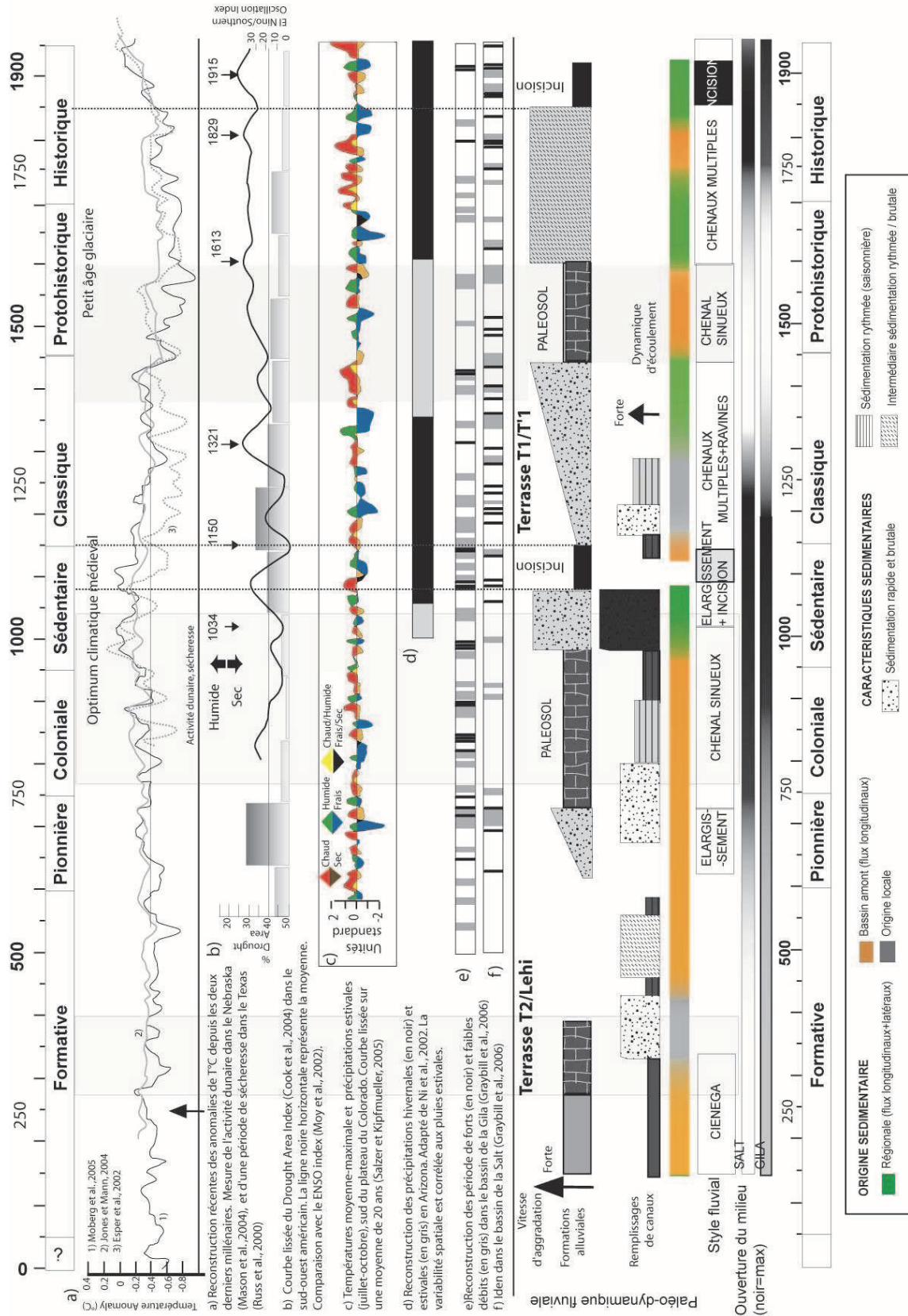


Fig. 230 : Dynamiques hydrosédimentaires et comparaison avec les dynamiques climatiques régionales et globales

2.1.1. *Classe 1 : Stabilité du paysage et pédogénèse*

Une sédimentation de type granoclassée positivement composée de sédiments de texture fine, argileux à limono-argileux, caractérise les périodes entre :

- 1) 250-400 apr. J.-C. (Période Formative) (phase 1) ;
- 2) 850 et 1000 apr. J.-C. (Période Coloniale-Sédentaire) (phase 4) ;
- 3) 1450-1600/1650 apr. J.-C. (Période Protohistorique) (phase 9) ;
- 4) 1700-1800 apr. J.-C. (Période Historique) (phase 13b) (Fig. 226) ;

Ces épisodes correspondent à des phases de pédogénèse et de stabilisation temporaire du territoire, associés à un cours d'eau encaissé, et des conditions chaudes et humides.

1) La période comprise entre **250 et 400 apr. J.-C. (période Formative)** est caractérisée par le développement d'un paléosol à l'amont de la moyenne vallée de la Gila. Les données dendroclimatiques ne sont pas accessibles pour cette période, mais les données climatiques attestent de conditions chaudes (Moberg et al., 2005). Les activités humaines sont réduites et nous posons l'hypothèse d'une dynamique sous **contrôle climatique**.

2) Entre **850 et 1000 apr. J.-C. (période Coloniale/Sédentaire)**, la réduction progressive de la compétence des cours d'eau est en accord avec l'augmentation des températures, attestée à partir de 820 apr. J.-C. dans l'ensemble de l'Amérique du Nord (Brush, 1994, Whitlock et al., 2003, Meyer et al., 1992, 1995) et du Sud-Ouest américain (Fig. 230) (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004). Ces conditions chaudes sont associées au premier maximum thermique du Petit Optimum Climatique que de nombreux marqueurs indépendants ont calé chronologiquement entre 900 et 1300 apr. J.-C. (Fig. 230), l'étude de l'augmentation des cicatrices liées au feu sur les arbres en Californie (Swetnam, 1993), l'augmentation de la concentration en charbons dans les lacs (Californie, Idaho, Wyoming, Arizona) (Millsbaugh et al., 2000 ; Mohr et al., 2000 ; Brunelle et al., 2003), l'étude de leur salinité dans le Dakota du nord (Laird et al., 1996) et des variations de leur niveau d'eau (Mehring et Warren, 1976 ; Smith, 1979 ; Oviatt, 1988 ; Benson et Klieforth, 1989 ; Enzel et al., 1989, 1992 ; Waters, 1989 ; Stine, 1990), l'activité dunaire dans le Nebraska (Mason et al., 2004), l'évolution du ratio $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ dans les lacs du Nevada (Benson et al., 2002), et l'étude des oxalates du lichen au Texas (Russ et al., 2000). L'intégration du Petit Optimum Climatique dans des dynamiques climatiques de plus longue durée est débattue. Stine (1994) suppose que ce réchauffement climatique est un événement ponctuel et bref. A l'opposé, des travaux plus récents (Kennett, 2005) semblent montrer des conditions sèches entre 450 et 1350 apr. J.-C., avec un maximum entre 950 et 1150 apr. J.-C. et 1250-1350 apr. J.-C. En parallèle, l'activité humaine s'intensifie dans le bassin amont de la Gila (Herrington, 1979 ; LeBlanc, 1983 ; Minnis, 1985 ; Gregory, 1995); dans la basse vallée de la Verde (Deaver, 1997 ; Hackbarth, 1992) et dans le bassin de la Tonto (Ciolek-Torrello et al., 1994 ; Elson et Gregory, 1995; Crown, 1991) (Fig. 240).

Cette pression anthropique favorise l'érosion des sols et l'accumulation de matériel érodable, à l'origine de l'augmentation des dépôts terrigènes aux cours de la période Sédentaire.

Toutefois, au cours de la période Coloniale, l'emprise humaine n'atteint pas son maximum (Fig. 240). Par conséquent, nous proposons un modèle d'évolution régionale des hydrosystèmes principalement sous **contrôle climatique, à faible empreinte anthropique**.

3) A partir de 1450 apr. J.-C. (**période Protohistorique**), le Sud-Ouest américain entre dans le Petit Age Glaciaire (Moberg et al., 2005) (Fig. 230). Toutefois, les données climatiques sont contrastées à l'échelle du Sud-Ouest américain. Esper et al. (2002) ont identifié une légère augmentation des températures et de l'humidité entre **1450 et 1550 apr. J.-C.** (Fig. 230), ce que les analyses dendroclimatiques confirment (Graybill et al., 2006). Il est possible que le développement du paléosol, identifié dans la basse vallée de la Salt et la moyenne vallée de la Gila, corresponde à cette période. Les activités humaines dans les bassins amont ne sont plus attestées après 1400/1450 apr. J.-C., et si elles existent, n'ont qu'un impact mineur sur les dynamiques hydrosédimentaires. La diminution du signal incendie et la revégétalisation des bassins versants amont et du bassin de Phoenix supportent cette hypothèse. Par ailleurs, la diminution des feux à également une origine climatique au cours du Petit Age Glaciaire (Clarke, 1988). Par conséquent, les dynamiques morphogéniques observées sont probablement sous **contrôle climatique**.

4) Enfin, une seconde remontée notable des températures et de l'humidité est identifiée entre **1700 et 1800 apr. J.-C. (période Historique)** (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004 ; Esper et al., 2002). Les sédiments de texture fine sont très charbonneux, mais les longs intervalles de récurrence, la faible fréquence des incendies et le changements dans leur saisonnalité traduit des feux sous l'influence du climat (Swetnam et al., 2001). Les activités humaines ont alors un impact limité sur le territoire, ce qui suggère des dynamiques hydrosédimentaires toujours sous **contrôle climatique**.

2.1.2. Classe 2 : Augmentation de la dynamique hydrique : crues majeures et évolutions morphologiques

Au cours des périodes comprises entre :

- 1) 750-850 apr. J.-C. (Période Coloniale) (phase 3b, Fig. 226) ;
- 2) 1000-1150 apr. J.-C. (Période Sédentaire) (phase 5) ;
- 3) 1200-1450 apr. J.-C., (Période Classique Civano) (phase 7) ;
- 4) 1600/1650-1900 apr. J.-C. (période Proto- à Historique) (phase 10) (Fig. 226) des sédiments grossiers d'origine régionale, à facies uniforme ou litage parallèle, ont été identifiés en position primaire ou secondaire dans les canaux. Ces dynamiques hydrosédimentaires sont associées à des dynamiques géomorphologiques comme l'élargissement du lit puis son incision.

1) Entre **750 et 850 apr. J.-C. (période Coloniale)** les conditions climatiques dans le bassin de Phoenix sont caractérisées par des cycles chaud-sec/frais-humide restitués par la dendroclimatologie (Fig. 230). Entre 740 et 800 apr. J.-C., les conditions sont chaudes et humides (Salzer et Kipfmüller, 2005 ; Graybill et al., 1989) puis plus fraîches entre 800 et 820 apr. J.-C (Graybill et al., 2006).

L'observation de sédiments en provenance du bassin de la Verde sensible aux pluies hivernales pourrait résulter de cette évolution climatique de courte durée. La pression démographique encore réduite (Fig. 240) suggère un contrôle **climatique** des dynamiques hydrosédimentaires et une **faible empreinte anthropique**.

2) La période comprise entre **1000 et 1150 apr. J.-C. (période Sédentaire)** se situe dans l'épisode sec du Petit Optimum Climatique. *Deux épisodes plus humides* et très ponctuels ont été observés entre 1030-1060 apr. J.-C. (Fig. 231) puis entre 1120 et 1150 apr. J.-C. Ils sont contemporains des avancées glaciaires observées dans les Sierras et les Rocheuses (Curry, 1969 ; Scuderi, 1984 ; Davis, 1988 ; Swetnam et al., 1991), des larges éruptions volcaniques enregistrées dans les carottes glaciaires et les archives historiques (Salzer et Hughes, 2007), et sont confirmés par d'autres analyses entomologiques et palynologiques (Van Devender, 1987 ; Van Devender et al., 1987 ; Hall et al., 1990 ; Davis et Shafer, 1992). Ces épisodes humides résultent d'anomalies climatiques du type *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) (Waters et Haynes, 2001) (Fig. 231). Elles augmentent la fréquence des orages frontaux hivernaux et tropicaux qui conduisent à une augmentation notable des crues (Hirschboeck, 1987, 1988 ; Webb et Betancourt, 1992 ; Enzel et al., 1989 ; Ely et al., 1994 ; Enzel et Wells, 1997). L'effet de l'Oscillation Décennale du Pacifique, qui a un intervalle de récurrence tous les 50 ans, reste ambiguë (Barlow et al., 2001 ; McCabe et al., 2004 dans Cook et al., 2004). Ces événements brefs et intenses ont eu un impact indéniable sur les dynamiques hydrosédimentaires dans le bassin de la Colorado. L'étude de 251 dépôts de crues le long de 19 cours d'eau en Arizona et Utah montre une augmentation des crues entre 1000 et 1100 apr. J.-C. (Ely et al., 1992 ; 1993 ; 1997 ; O'Connor et al., 1994). A l'échelle du bassin de la Gila, les travaux de Huckleberry (1993) et Waters et Ravesloot (2001) mettent en évidence une augmentation des crues, une évolution morphologique du cours d'eau qui s'élargit de 0.5 à 2.3 km (moyenne de 1 km), puis son incision au 11^{ème} s. Quelles sont donc les causes de ce mécanisme ?

Trois modèles ont été proposés pour tenter d'expliquer l'incision:

1) Les premières hypothèses (Waters, 1987, 1991) suggèrent que ces changements sont intrinsèques au fonctionnement d'un bassin versant et notamment les évolutions de pente dans les chenaux principaux au cours des phases d'aggradation des plaines.

2) Une autre théorie montre que des conditions sèches favorisent une diminution du niveau des nappes et la mise en place d'un chenal étroit et encaissé, en réponse à une dynamique fluviale de faible intensité (Schlesinger et al., 1990).

3) La sensibilité des bassins versants aux changements climatiques à court terme peut également conduire à l'incision des cours d'eau. La transition rapide entre des conditions sèches à des conditions humides favorise l'érosion des dépôts accumulés dans les bassins versants de rang inférieur au cours de la période sèche (ex : Fontugne et al., 1999; Keefer et al., 1998; Rodbell et al., 1999 d'après Waters et Haynes, 2001).

Des périodes de crues régionales, associées à l'élargissement du chenal principal, notamment au cours d'évènements El Niño (Fig. 231), sont alors observées dans l'ensemble des bassins versants (Mehring, 1967; Mehringer et al., 1967; Spaulding et al., 1983; Hall, 1985; Van Devender et al., 1987; Waters, 1989; Haynes et Huckell, 1986; Van Devender, 1990; Davis et Shafer, 1992; Baker et al., 1995; Ely, 1997; McFadden et McAuliffe, 1997).

Une fois la charge solide déposée, les cours d'eau s'incisent (Parker, 1995; Webb et al., 1991; Hereford, 2002; Mann et Meltzer, 2007; Huckleberry et Duff, 2008; Waters et Haynes, 2001). Ce schéma de fonctionnement n'est pas généralisable aux régions arides (Patton, 1977; Kochel, 1980, 1988; Patton et Dibble, 1982).

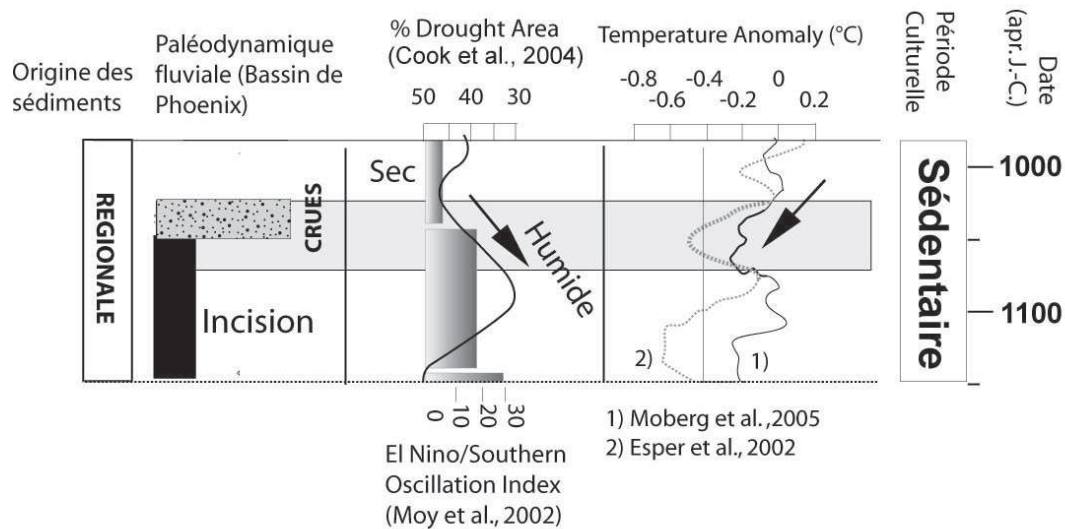


Fig. 231 : Zoom sur les conditions climatiques, l'occurrence d'évènements El Niño et les dynamiques fluviales au cours du 11^{ème} s.

Les résultats obtenus dans cette thèse confirment la sensibilité du bassin de Phoenix aux changements climatiques à cours terme, mais soulignent également l'effet de la saisonnalité des précipitations sur l'occurrence des crues, comme le montrent l'évolution des sources sédimentaires et les dépôts grossiers en provenance d'un bassin versant plus sensible aux pluies hivernales (bassin de la Verde). Le remblaiement des vallées après 1150 apr. J.-C reste sous le contrôle de ces précipitations.

Ainsi le troisième modèle proposé est valide, mais les facteurs internes au fonctionnement des bassins versants, comme l'accumulation du stock érodable sur la durée et l'activité anthropique dans les bassins amont, ne doivent pas être négligés. En effet, la dominance des dépôts terrigènes riches en charbons dans les sédiments datés du 11^{ème}-12^{ème} s. est en accord avec une augmentation de l'occupation des sols et de l'agriculture dans les bassins versants amont (Fig. 240) (bassin de la Tonto, de la Salt, de la Gila, de la Verde) (Swanson et Diehl, 2003; Swanson, 2009; Anyon et al., 1981; LeBlanc, 1983; Hegmon, 2002; Blake et al., 1986; Nelson, 1999; Deaver, 1997; Hackbarth, 1992). Des défrichements/brûlis répétés à des fins agricoles (fertilisation et/ou éclaircissement) sont clairement attestés à Mesa Verde (Wyckoff, 1977) dans le sud-ouest du Colorado (Kohler et Matthews, 1988) et à Chaco Canyon (Samuels et Betancourt, 1982; Betancourt et al., 1986).

Toutefois, cette augmentation de la charge solide est concomitante à une augmentation des températures au cours du Petit Optimum Climatique Médiéval qui pourrait favoriser une réduction du couvert végétal, une augmentation des incendies naturels, et l'érosion des sols.

3) *Un épisode frais et humide* est enregistré **entre 1200 et 1300 apr. J.-C.** (Période Soho) (phase 7) (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004 ; Esper et al., 2002 ; Salzer et Kipfmüller, 2005). En parallèle, les signatures de l'activité humaine et de l'ouverture du milieu s'intensifient (Bayham et Hatch, 1985 ; Legler, 1970) avec l'installation des Salado dans le bassin de la Tonto au cours du 13^{ème} s (Doyel, 1976 ; Haury, 1945 ; Fish et Fish, 1994 ; Rice, 1992) et des Sinagua dans le bassin de la Verde, de 1125 à 1220 apr. J.-C. (Fig. 234 et Fig. 240). L'analyse du signal incendie dans le bassin de la Salt met en évidence une recrudescence des feux entre 1200 et 1300 apr. J.-C., peut-être en réponse à des défrichements. **Ce forçage climato-anthropique** pourrait expliquer l'exhaussement très rapide de la plaine alluviale en aval et de migrations latérales répétées des chenaux. Le signal incendie est moins marqué dans le bassin de la Gila, mais des travaux antérieurs attestent de feux anthropiques dans ce secteur au cours de la période Classique Soho (Roos, 2008).

L'Optimum Climatique Médiéval s'achève au autour de 1300 apr. J.-C. (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004 ; Esper et al., 2002) et jusqu'à 1360 apr. J.-C., des *conditions fraîches et humides* sont enregistrées (Fig. 230) puis des conditions chaudes et contrastées (pluies hivernales et estivales) prévalent jusqu'à la fin de cette période (1450 apr. J.-C.) (Salzer et Kipfmüller, 2005). L'activité humaine dans les bassins amont est réduite avec un abandon presque généralisé des sites dans le bassin de la Tonto et de la Verde respectivement autour de 1320 et 1450 apr. J.-C. (Rice, 1992 ; Clark, 2001 ; Elson et al., 2000), mais également dans la haute vallée de la Gila.

Cette réduction de l'activité humaine est associée à une diminution du signal incendie dans les dépôts de débordement et les sédiments post-abandon. Ceci traduit une reprise des dynamiques hydrosédimentaires **sous contrôle climatique**.

4) De façon identique, des *conditions fraîches et humides* sont observées de **1500 à 1700 apr. J.-C.**, puis de **1800 à 1870 apr. J.-C.** au cours des périodes Protohistorique et Historique (Salzer et Kipfmüller, 2005 ; Ni et al., 2002 ; Curry, 1969 ; Cole et Webb, 1985 ; Davis, 1988 ; Grove, 1988 ; Enzel et al., 1992) (Fig. 230). Elles sont associées à une augmentation des pluies hivernales (Ni et al., 2002), que confirme la modélisation des décharges de la Salt, nettement plus élevées que celles de la Gila (Graybill et al., 2006), et à une phase d'aggradation avec des évolutions morphologiques bien marquées dans le bassin de Phoenix. L'absence d'activité humaine dans les bassins amont atteste d'un **contrôle climatique** des dynamiques sédimentaires à la fin de la période Protohistorique/début historique, mais principalement **anthropique** dès le début du 19^{ème} siècle.

2.1.3. Classe 3 : Écoulements réduits, fortes dynamiques locales de ravinement

Cette dynamique a été identifiée dans le bassin de la Salt entre 1150 et 1250 apr. J.-C. (phase 6) (période Classique Soho) (Fig. 229). Elle fait suite ou est contemporaine de l'épisode d'incision de la période Sédentaire. Des *conditions chaudes et humides à sèches* associées à des pluies estivales (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004 ; Esper et al., 2002 ; Salzer et Kipfmüller, 2005) (Fig. 230) réduisent les écoulements et favorisent le ravinement des formations superficielles (Salt River, rive nord).

Malgré le pic d'activité humaine dans les bassins amont (Fig. 240), l'activité anthropique ne contribue pas ici aux dynamiques de ravinement qui touchent le bassin de Phoenix, sauf si les ravines ont été creusées volontairement à des fins agricoles et faiblement entretenues.

Bien que non intégrée dans l'AFC, la phase 2 identifiée le long de la Gila entre 400 et 550 apr. J.-C. (période Formative Vahki) présente des caractéristiques très similaires. Des écoulements réduits, identifiés dans les canaux du système Casa Blanca (Gila River), sont intercalés avec des sédiments grossiers qui proviennent des Sacaton Mountains.

2.1.4. Classe 4 : Écoulements intenses, crues éclair estivales

Les résultats obtenus pour la période comprise entre **610 et 750 apr. J.-C.** (phase 3a) (**Pionnière**) révèlent une forte dynamique hydrosédimentaire. Les sédiments grossiers à faciès uniforme proviennent en majorité du bassin médian-inférieur et amont de la Salt. Or, des conditions plutôt chaudes et sèches prévalent au cours de cette période (Moberg et al., 2005 ; Jones et Mann, 2004). Elles favorisent une réduction de la végétation, une diminution des nappes et une érosion accentuée. L'évacuation des sédiments en aval est possible grâce à des précipitations intenses qui donnent naissance à une dynamique de crue-éclair en aval. Les données concernant l'anthropisation des bassins versants sont éparpillées, mais c'est au cours de cette période que s'implantent de petits villages sur les formations pléistocènes et les piémonts du bassin de la Tonto (Ciolek-Torrello et al., 1994 ; Elson et al., 1995 ; Clark, 1995 ; Deaver et Ciolek-Torrello, 1995 ; Elson et al., 1995 ; Mabry, 2000). Cette dynamique, qui ne contribue que dans une très faible mesure à l'érosion accélérée du bassin amont de la Salt, nous permet de poser l'hypothèse d'une dynamique des paysages fluviaux **sous contrôle climatique** au cours de la période Pionnière.

2.2. Modélisation de l'évolution des paysages fluviaux

La corrélation entre les résultats de l'AFC et les données hydroclimatiques nous permet de proposer un modèle de fonctionnement des dynamiques hydrosédimentaires et de l'évolution des paysages fluviaux en contexte désertique (Fig. 232).

Lorsque les pluies estivales dominent, les flux latéraux sont plus importants. Plus que l'intensité des pluies, c'est leur régularité et leur répartition spatiale qui permet l'évacuation des sédiments en aval. Si les conditions sont trop sèches, les sédiments

s'accumulent sous forme de cônes détritiques dans les bassins versants de rang inférieur. Si les précipitations estivales sont plus importantes, une partie de ces sédiments peut être évacuée sous forme de crues éclair à écoulement uniforme, avec des sédiments originaires des bassins versants plus sensibles aux pluies estivales.

Lorsque les conditions sont plus humides, mais les pluies estivales toujours dominantes, le transport d'une partie de ces particules dans les basses plaines est alors possible avec le dépôt de limons argileux à argiles granoclassées, lorsque la charge solide est légèrement inférieure à la charge liquide. Les dépôts de débordement sont peu épais et rares, ce que confirment des dynamiques similaires observées en contexte semi-aride (Devilleers, 2005). Le cours d'eau est alors étroit et légèrement encaissé.

Les conditions fraîches, à pluies hivernales dominantes, s'expriment soit par l'érosion privilégiée des bassins versants plus sensibles aux pluies hivernales, soit par une érosion régionale généralisée (flux latéraux et longitudinaux). Les conditions fraîches et humides favorisent une dynamique du type $Q_l > Q_s$ alimentée par la fonte des neiges (régime pluvio-nival). Les sédiments transportés par ces eaux présentent un faciès d'écoulement à litage parallèle ou granoclassé.

En revanche, une dynamique particulière est observée lors de la transition rapide entre des conditions chaudes à humidité variable et des conditions fraîches. En effet, les conditions chaudes favorisent la création d'un stock sédimentaire important dans les cours d'eau intermittents, avec des flux latéraux dominants. Ces sédiments accumulés sur une durée variable sont facilement érodés et transportés en aval au cours de la transition vers un régime de pluies hivernales dominantes (Etheredge et al., 2004). Cette augmentation de la charge solide (observée notamment à la fin de la période Sédentaire), est responsable de crues rapides à écoulement uniforme. Le taux de sédimentation est relativement important. Cette charge solide se dépose rapidement, et une dynamique caractérisée par $Q_l \gg Q_s$ conduit à l'incision du cours d'eau. Ainsi, plus que l'aridité comme facteur responsable de l'incision (ex : Butzer, 1982 ; Devilleers, 2005), c'est le passage à des conditions fraîches et humides qui favorise le creusement des cours d'eau, comme le suggèrent d'autres études dans le Sud-Ouest américain (Webb et Hasbargen, 1997; Webb et al., 1991; Hereford, 2003; Mann et Meltzer, 2007; Huckleberry et Duff, 2008).

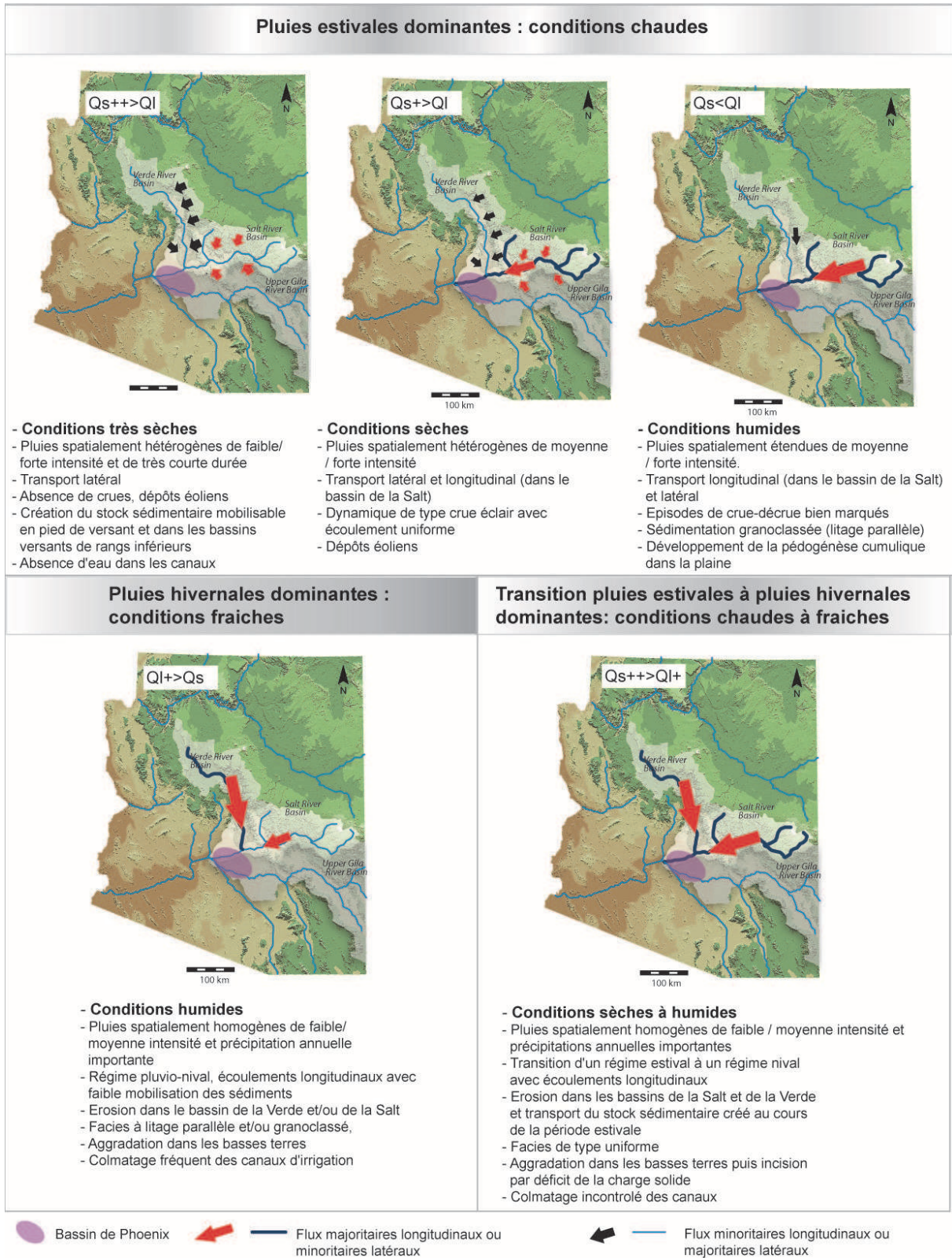


Fig. 232 : Modélisation des dynamiques hydrosédimentaires et climatiques en Arizona

Chapitre 2

La construction et l'évolution des systèmes agraires : entre vulnérabilité, adaptations, conflits et crises

1. Exploitation et transformation des paysages par l'homme	508
1.1. Détermination des pratiques culturelles	508
1.2. Choix des parcelles et pratiques associées	508
1.3. Feux anthropiques ou climatiques ?	509
2. Discussion autour d'une modélisation des agrosystèmes en réponse aux variabilités hydroclimatiques et humaines	511
2.1. MODELE 1 : Stabilité du territoire	511
2.2. MODELE 2 : Crues majeures hivernales et évolutions morphologiques	516
2.3. MODELE 3 : Ecoulements réduits, dynamiques locales de ravinement (post-incision)	521
2.4. MODELE 4 : Conditions chaudes et sèches, crues éclair	524
2.5. Conclusion	527

1. Exploitation et transformation des paysages par l'homme

1.1. Détermination des pratiques culturelles

Sur le terrain, les sols exploités et irrigués ne présentent pas de critères de reconnaissance spécifiques. Ce sont généralement des dépôts bruns à structure prismatique fine à polyédrique. Ils contiennent épisodiquement des fragments de tessons pluri-centimétriques. Des traces et des empreintes de matière organique sur les agrégats de sols ont été observées, de même que des traces de malacofaune et de bioturbation.

En revanche, nous avons déterminé de nombreux marqueurs diagnostiques des pratiques culturelles à l'échelle microscopique :

- Les sols cultivés ont une microstructure subangulaire plus que bioturbée, avec quelques chenaux. Cette microstructure résulte probablement d'épisodes d'assèchements qui suivent une application d'eau par submersion et limitent le développement de l'activité biologique sur la longue durée. L'activité partielle de la faune homogénéise également des fragments de croûtes de battance peu épais qui témoignent d'une pédogénèse active.

L'irrigation est attestée par la présence de microlamines qui résultent d'épisodes d'inondation répétés dans un secteur protégé des crues, mais également par des revêtements fins gravitaires et occasionnellement lités, qui témoignent d'une circulation d'eau chargée de particules en suspension.

- La présence de croûtes de battance indique des phases d'assèchements et de réduction du couvert végétal en surface.

- Sous les croûtes de battance, les parcelles agricoles modernes présentent une microstructure vésiculaire sur les 5 premiers centimètres, puis une microstructure en chenaux plus en profondeur. Cette microstructure vésiculaire n'a été observée que partiellement dans les anciens sols cultivés.

- La matière organique préservée dans les champs est rare. Elle est le plus souvent observée sous forme humique. Sa faible concentration peut résulter d'une ingestion par l'activité biologique et sa minéralisation naturelle par oxydation. Aucune trace de fertilisation autre que des charbons de bois associés à des cendres (dont l'utilisation en tant que fertilisant plus que pour des brûlis n'est pas attestée) n'a été mise en évidence. En revanche, des cristaux de calcite aciculaire ont été identifiés en partie sommitale des champs agricoles.

1.2. Choix des parcelles et pratiques associées

Les phases de stabilité du paysage ont permis le développement de l'irrigation dans les basses plaines de la Salt et de la Gila. Les Hohokam ont cultivé des sols très variés et de textures contrastées. Au cours de la période Formative, ils s'installent le long des axes d'écoulement dans les zones basses humides. Ces sols argileux préservent l'humidité mais ils asphyxient les racines. Aucun fossé de drainage n'a été mis en évidence.

Toutefois, les cours d'eau temporaires, avec des axes d'écoulement perpendiculaires aux canaux (ex : Cave Creek et Indian Wash bend sur la rive nord de la Salt River), auraient pu servir de drain naturel, en récoltant le surplus d'eau dans les canaux et en l'évacuant dans le chenal principal.

Au cours de la période Pionnière, les Hohokam exploitent des limons grossiers sur la terrasse Lehi à moins d'1km de la Salt River. Ces sols fertiles sont très propices à l'agriculture car ils préservent l'aération des racines et la rétention des éléments nutritifs. Ils sont également plus faciles à exploiter. Les revêtements par des particules très fines indiquent que les eaux d'irrigation sont généralement stagnantes, ce qui permet de proposer un modèle d'irrigation de surface par submersion.

Les sols à forte stabilité structurale de la période Sédentaire et de la période Protohistorique ne présentent pas de traces d'irrigation. Toutefois, une étude sur des sols irrigués de la période Classique dans la moyenne vallée de la Gila (Purdue, en cours), confirme la texture plus fine des champs irrigués, de même que des taux de nitrates et de phosphates bien supérieurs aux valeurs normales. Ces fertilisants sont apportés par les eaux d'irrigation.

La question de la salinisation et de l'alcalinisation des sols cultivés doit également être posée. Des cristaux de gypse ont été observés dans des parcelles agricoles historiques le long de la Gila et dans des canaux d'irrigation préhistoriques. Leur présence est moins contraignante que l'halite et le sodium. Des sols salins et alcalins ont été identifiés dans la moyenne vallée de la Gila au sein d'un même ensemble de champs (Purdue, en cours). Ces zones ne sont pas exploitées, peut-être volontairement.

1.3. Feux anthropiques ou climatiques ?

Nos résultats mettent en relief la pratique du feu tout au long de l'occupation Hohokam, de la période Formative à la période Protohistorique¹⁴. Dans la vallée de la Gila, le signal incendie augmente clairement au cours de la période Sédentaire, diminue au début de la période Classique, puis une recrudescence des incendies est observée entre 1200-1300 apr. J.-C. et ensuite au cours du 17^{ème} s. (Fig. 233). Dans la vallée de la Salt, les premières traces de feux dans les basses plaines sont mises en évidence au cours de la période Pionnière. Le signal incendie augmente au cours de la période Coloniale jusqu'à la période Soho (de 800 à 1300 apr. J.-C.), diminue au cours de la période Civano (1300-1450 apr. J.-C), pour connaître ensuite un regain au cours de la période Protohistorique (> 1600 apr. J.-C.) (Fig. 227).

Deux pics d'occupation humaine sont enregistrés dans le Sud-Ouest américain, entre 1000-1100 apr. J.-C. et 1200-1300 apr. J.-C. (Fig. 233). Entre 1000 et 1100 apr. J.-C., le bassin de Phoenix est occupé, mais les données dans le bassin amont de la Gila et de la Salt indiquent une occupation humaine réduite. Ceci s'oppose au 13^{ème}-14^{ème} s., où des

¹⁴ Plusieurs utilisations du feu par les Amérindiens ont été proposées (Dobyns, 1981; Bahre, 1991; Pyne, 1997,

Williams, 2003) : la chasse, le défrichage, la fertilisation des sols, comme coupe feu, pour la capture des herbivores à des fins alimentaires, pour décimer les ravageurs des cultures, insectes comme rongeurs, comme moyen de communication, pour la création de routes, ou même pour favoriser le développement d'espèces de ripisylve bien spécifiques.

défrichements répétés à des fins agricoles (fertilisation et/ou éclaircissement) sont attestés à l'échelle régionale et sont favorisés par les déplacements et les migrations fréquentes.

Toutefois, cette augmentation des incendies est concomitante à des températures élevées au cours du Petit Optimum Climatique Médiéval (Fig. 233). Ces dernières pourraient avoir un impact sur le niveau des nappes, réduisant le couvert végétal et favorisant une augmentation des incendies naturels. Il est fortement probable que ces deux dynamiques aient contribué à l'augmentation des incendies, principalement entre 1200-1300 apr. J.-C. Ces résultats corroborent l'idée que les pratiques agraires amérindiennes ont modifié le paysage par l'utilisation de la pyrotechnologie depuis maintenant plusieurs millénaires, en parallèle à des conditions environnementales favorables aux incendies naturels.

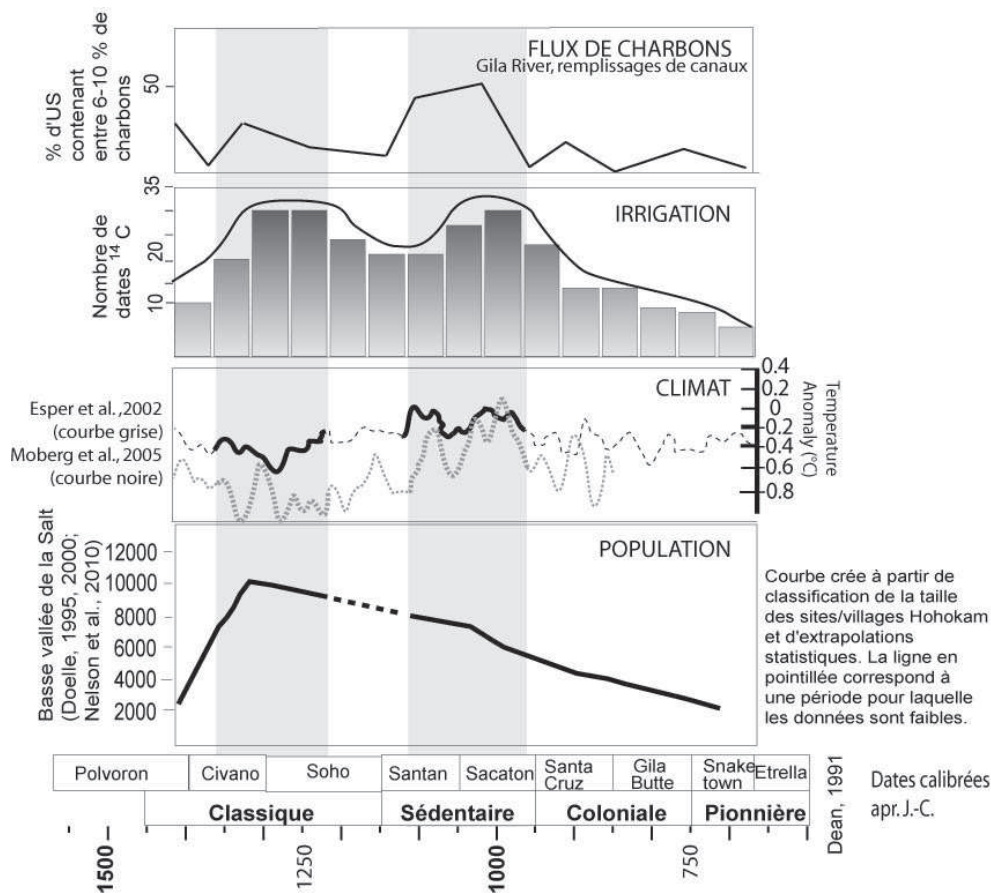


Fig. 233 : Comparaison entre les flux de charbons, l'exploitation du territoire, l'évolution de la population et le climat

A l'opposé, le signal incendie diminue au cours de la période Protohistorique. Les longs intervalles de récurrence, la faible fréquence des incendies et le changements dans leur saisonnalité traduit une dynamique sous l'influence du climat (Swetnam et al., 2000). Les feux d'ampleur régionale tendent à survenir au cours d'années sèches, souvent associées aux événements La Niña, et après des années humides (El Niño) qui permettent l'accumulation de biomasse (Kaye et Swetnam, 1999 ; Brown et al., 2001).

2. Discussion autour d'une modélisation des agrosystèmes en réponse aux variabilités hydroclimatiques et humaines

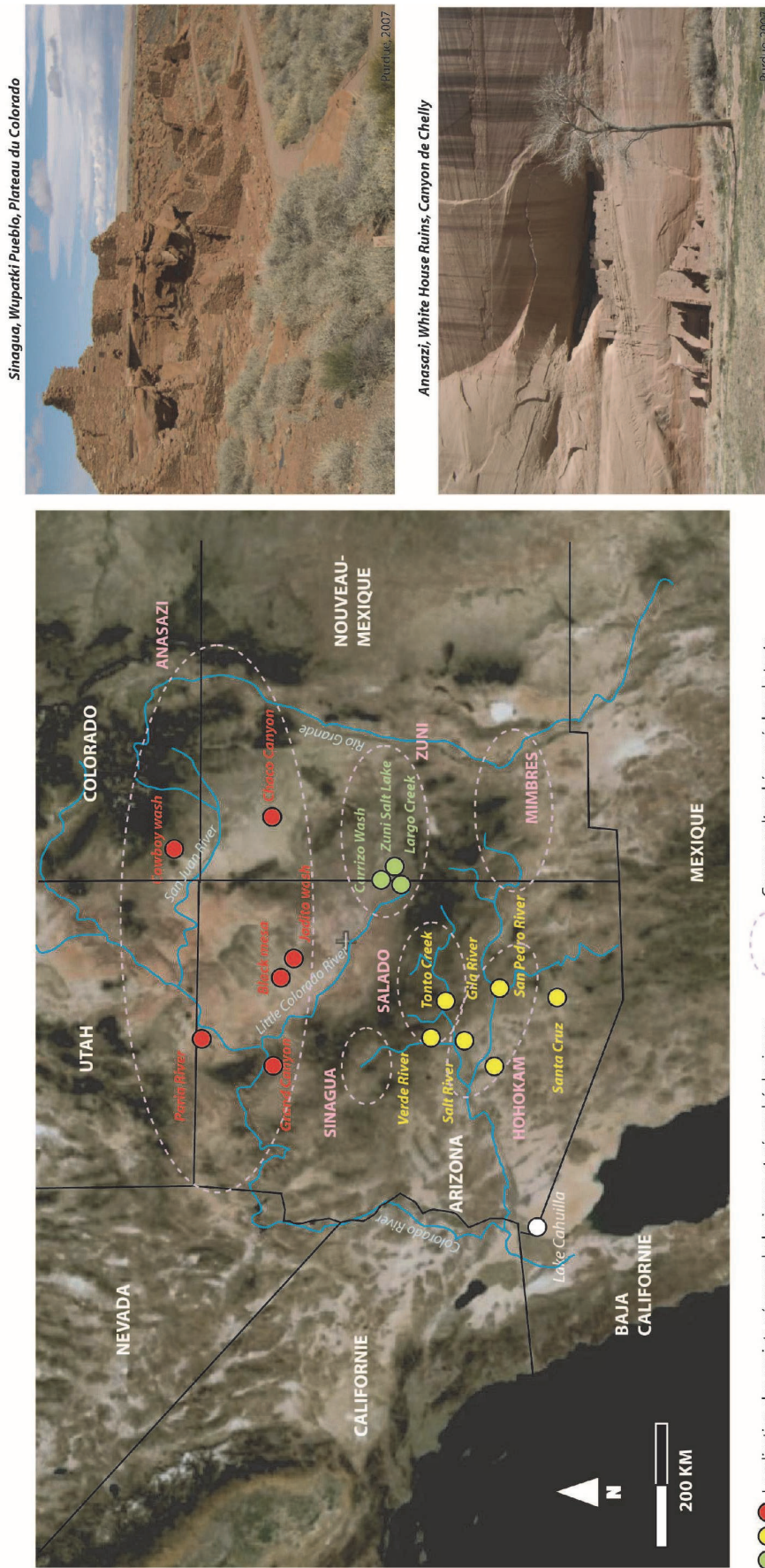
L'analyse statistique conduite dans le Chapitre 1, section 2.1 (Fig. 230) a permis d'identifier quatre dynamiques morphogéniques dans la longue durée. Ces dernières sont caractérisées par 1) des épisodes de stabilité des paysages, 2) l'exhaussement du plancher alluvial associé à l'élargissement des cours d'eau, voire son incision, 3) des dynamiques locales de ravinement, 4) l'aggradation des plaines (crues éclair) en conditions sèches.

Ces quatre signatures géomorphologiques résultent d'un forçage climatique et/ou anthropique dans les bassins amont (Tonto, Verde, amont de la Salt River, Gila River et San Pedro) et conduisent à une organisation spécifique de l'agrosystème, duquel dépend la stabilité à cours et long terme des communautés agricoles dans une région donnée. Les composantes de ce système anthropisé intègrent les techniques agraires et le savoir-faire, mais doivent prendre en compte les dynamiques humaines à l'échelle régionale. En effet, la pression anthropique s'exprime dans le Sud-Ouest américain par des épisodes répétés de déplacement / migration / abandon / réoccupation par des communautés d'agriculteurs (Zuni et Anasazi dans le bassin de la Colorado, Salado dans le bassin de la Tonto, Mimbres dans la haute vallée de la Gila) qui interagissent et fragilisent ces agrosystèmes (Fig. 234). L'histoire de ces groupes est intimement liée et nous présenterons en diachronie l'évolution de leurs pratiques en réponse aux changements environnementaux et leur impact sur l'agrosystème des Hohokam.

Nous tenterons de montrer que des signatures géomorphologiques identiques peuvent donner naissance à des systèmes agraires variés, mais également que des marqueurs anthropiques similaires peuvent être indépendants des dynamiques morphogéniques.

2.1. MODELE 1 : Stabilité du territoire

Plusieurs périodes culturelles associées à des épisodes de stabilité du territoire ont été identifiées dans notre étude (Fig. 227) (période Formative Vahki, période Coloniale /Sédentaire, Protohistorique et Historique). Nous avons intégré à ce modèle la période Formative (phase 1), bien que les données de terrain soient réduites. Ces périodes sont caractérisées par une pression anthropique réduite en amont des bassins versants. Une discussion et une modélisation de l'impact et de l'adaptation des systèmes agricoles à ces conditions, en fonction de la pression anthropique, est proposée dans la Fig. 235.



2.1.1. Fonctionnement de l'agrosystème: emprise ou déprise agricole ?

2.1.1.1. **Pression anthropique faible à absente dans le bassin de Phoenix**

Au cours de la période Protohistorique, le développement des sols favorise la reconquête de la ripisylve sur les basses terres, qui piège les particules fines et stabilise la plaine. Ces zones humides sont des ressources naturelles facilement exploitables (pêche, cueillette, chasse) mais entre 1500 et 1694, jusqu'à l'arrivée des missionnaires puis des colons, l'histoire du Sud-Ouest est une page blanche (Wilson, 1999). Cette période de déprise agricole semble durer environ presque deux siècles, car à l'arrivée des Espagnols (Coronado en 1540-1542) des groupes isolés rattachés aux Pimas (Hammond et Rey, 1953 ; Milich, 1966 ; Miller, 1983) sont implantés en bordure des bassins de la San Pedro et de la Santa Cruz et la vallée de la Gila était occupée par endroits par les Lower et Upper Pimas (1604-1605, Don Juan de Onate). Des conflits et guerres constantes entre tribus sont mentionnés (Wilson, 1999 ; Hammond et Rey, 1940).

2.1.1.2. **Pression anthropique réduite dans le bassin de Phoenix**

La diversité floristique et faunistique du désert du Sonora a pu favoriser l'établissement de communautés sédentaires à semi-sédentaires à proximité des ressources naturelles dès la **période Formative** (3^{ème} s.) (Huckell, 1995). Les zones basses humides de la Gila constituent des secteurs privilégiés de cueillette d'ambrosie, de mesquite et de massettes (Bayham et al., 1986 ; Gish, 1986) qui témoignent d'une ripisylve présente et exploitée, mais également de zones ouvertes. Dès la période Formative, des groupes s'installent et irriguent ces zones humides difficilement cultivables (Henderson, 1989 ; Marmaduke et Henderson, 1995) qui préservent l'excès d'eau au cours des périodes sèches. Ces zones humides sont souvent associées à des maladies comme la malaria, l'encéphalite et la fièvre jaune.

Le **début de la période Historique** est marqué par des différenciations ethniques dans le bassin de Phoenix (Doelle et Wallace, 1990). Deux groupes linguistiques sont identifiés: les Athabascan (Apache et Navajo) (Plateau du Colorado à partir de 1672 apr. J.-C.) et les non-Athabascan (Hohokam-Pima, Sobaipuri, etc..) (Seymour, 2004 ; Johnson, 2006). Chez les non-Athabascan, dans le *Pimeria Alta* (hautes terres des Pimas qui regroupent le sud de l'Arizona et le nord du Mexique), les habitants parlent le Piman (famille Uto-Aztèque) et appartiennent au groupe culturel des O'odham (Miller, 1983)¹⁵. Les Sobaipuri sont installés dans les bassins de Tucson et de la San Pedro (leur

¹⁵ La question du continuum entre les Hohokam et les O'Odham est toujours débattue car des différences génétiques ont été identifiées (Turner, 1993). Ces dernières pourraient être le résultat d'une dépopulation puis d'une repopulation par des groupes éloignés génétiquement, mais cette hypothèse n'est pas validée.

arrivée dans le Sud-Ouest pourrait coïncider avec la colonisation espagnole) (Masse, 1981), et les Hia C'ed O'odham le long de la Santa Cruz.

Ils pratiquent la chasse et la cueillette principalement (Masse, 1981 ; Erickson, 1994), bien que l'irrigation soit attestée dans certaines zones (Seymour, 1989 ; Fontana, 1983). Les Tohono O'odham (Papago) occupent les berges de la Santa Cruz, les Opa/Cocomaricopa l'aval de la confluence Salt-Gila (Gila Bend actuel) et les Akimel O'odham irriguent par eaux de crue et dérivent de l'eau dans des structures hydrauliques le long de la Gila River (Foster et al., 2002). Un épisode de stabilité a été identifié sous des conditions chaudes et humides autour de 1700-1800 apr. J.-C. dans le bassin de la Gila. Aucune donnée précise relative au fonctionnement de l'agrosystème n'est disponible pour cette période, mais ces conditions ont dû favoriser l'exploitation de la ripisylve et l'irrigation par eaux de crue dans les basses terres.

Les données pour la période Formative (entre 250 et 400 apr. J.-C.) sont rares, mais nos résultats mettent en évidence le développement de l'irrigation dans la moyenne vallée de la Gila, sur des sols pédogénéisés lourds et faiblement drainés.

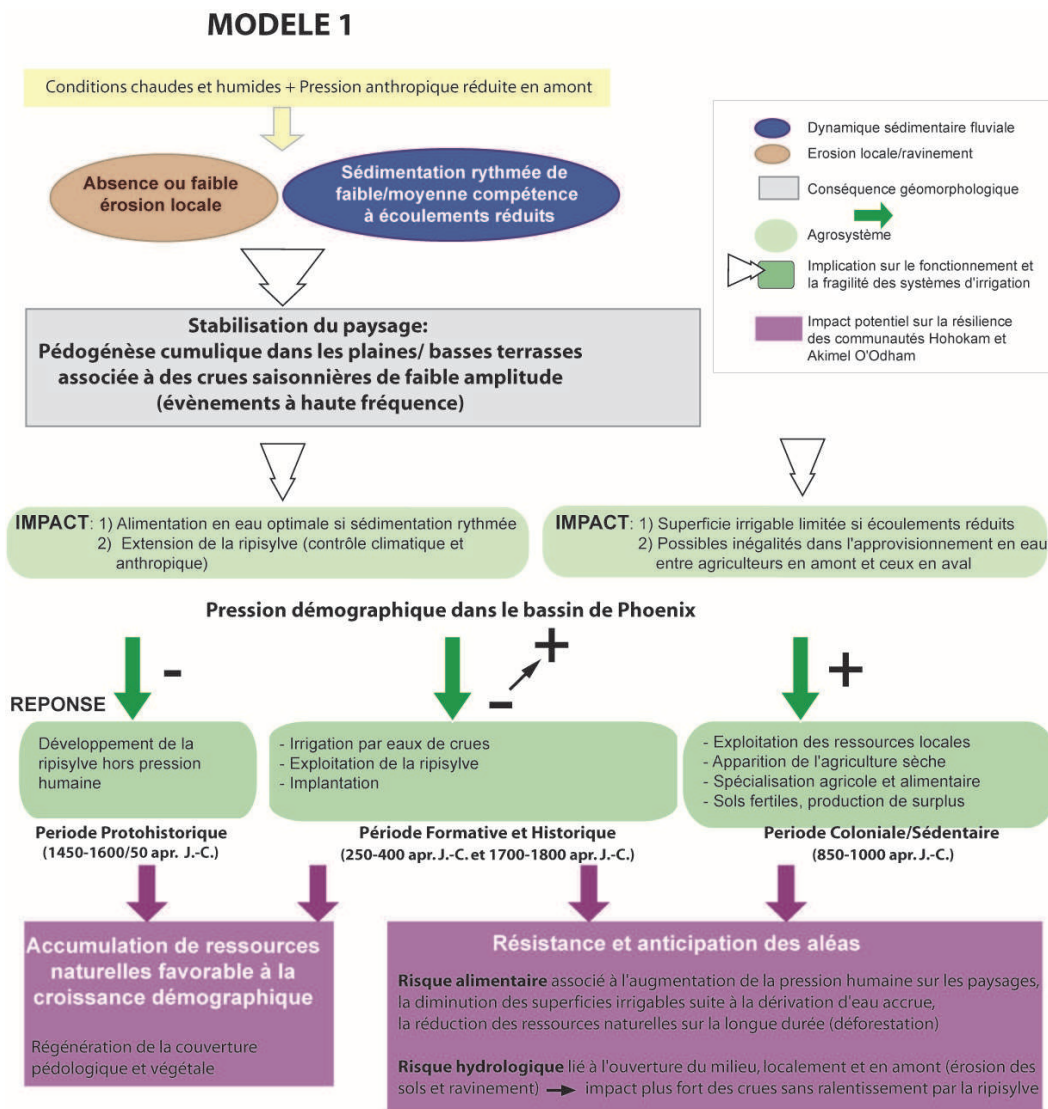


Fig. 235 : Proposition d'un modèle de fonctionnement de l'agrosystème dans un contexte de stabilité des paysages fluviaux (période Formative, Protohistorique, Historique et Coloniale/Sédentaire)

2.1.1.3. Pression anthropique intense dans le bassin de Phoenix

La fin de la période Coloniale/début de la période Sédentaire (850-1000 apr. J.-C.) est caractérisée par une **stabilité des plaines alluviales** et des conditions chaudes et humides. Les sédiments argileux pédogénésés fournissent un sol agricole fertile, bien que compact. L'irrigation repose sur des crues saisonnières de faible amplitude, anticipables par les agriculteurs. **Le fonctionnement des structures hydrauliques est optimal, avec un risque réduit et un aléa hydroclimatique faible.**

L'augmentation de la population permet la construction et l'entretien des structures hydrauliques (Fig. 240); la faible variabilité latérale du cours d'eau favorise la construction de barrages de dérivations stables, efficaces et rarement détruits.

Les basses plaines et les premières terrasses sont toujours occupées saisonnièrement à des fins agricoles (Greenwald et Ciolek-Torrello, 1988) et la totalité du corpus des espèces cultivées et exploitées peut-être observé: maïs, cheno-am, coton, agave, etc. Sur la rive nord de la Salt, les bosquets de mesquite alimentent l'ensemble du Canal System 2 en bois mais certaines zones sont défrichées à des fins agricoles. Dans les canaux et les zones humides, on trouve une grande variété de poissons, amphibiens, reptiles et oiseaux qui sont consommés (Van West et al. 2000). Autour de 1000 apr. J.-C., cette agriculture intensive résulte en un système agrégé le long des cours d'eau (LeBlanc, 1983 ; Blake et al., 1986 ; Nelson, 1999 ; Hegmon, 2002) et ce à l'échelle régionale : bassin de la Tonto (Wood et McAllister, 1980), amont de la Salt, haute vallée de la Gila (Swanson et Diehl, 2003 ; Swanson, 2009).

Toutefois, l'agriculture sèche se développe autour de 1000 apr. J.-C., avec la construction de réservoirs d'eau éloignés des cours d'eau et qui alimentent des villages à des fins domestiques et agricoles (Bayman et Fish, 1992). Dans la moyenne vallée de la Gila, cette pratique alternative est d'autant plus marquée que la superficie irrigable est réduite. En parallèle, on assiste à une spécialisation agricole et alimentaire en fonction de l'emplacement géographique des villages. L'analyse archéozoologique de restes fauniques (Glass, 1984) dans des villages éloignés de la zone centrale d'occupation suggère la chasse exclusive d'animaux de grandes tailles à des fins commerciales. L'évolution des moyens de subsistance est également perceptible par la disparition des espèces cueillies dans le spectre pollinique et la dominance des cheno-am qui traduisent une perturbation maximale de la végétation du territoire (Dean, 2005). A l'échelle régionale, des pratiques similaires ont été observées. Entre 750 et 900 apr. J.-C. les **Anasazi** se déplacent sur les piémonts et formations montagneuses plus fraîches du nord de l'Arizona (Huckleberry et Billman, 1998 ; Petersen, 1988 ; Schlanger, 1988 ; Burns, 1983 ; Euler et al., 1979) où deux centres culturels, politiques et idéologiques émergent : Mesa Verde et Chaco Canyon. A la même période, les **Sinagua** s'étendent géographiquement, pratiquent l'Ak-Chin farming, l'irrigation par eaux de crues et construisent des *fieldhouses* (maisons des champs). De même, les **Zuni** (groupe des Mogollon), dans le bassin de la Little Colorado (Fig. 234) (Gregory et Wilcox, 2007) pratiquent l'irrigation à petite échelle, développent l'agriculture sèche et cultivent sur des terrasses (Damp et al., 2002 ; Damp, 2007 ; Nelson et al., 2010).

2.1.2. *Risques et vulnérabilité*

Cette stabilité de l'agrosystème, qui structure les sociétés, permet le développement social, culturel et idéologique des communautés agricoles. Toutefois l'intensification des activités humaines à l'échelle régionale, les conditions climatiques chaudes qui prévalent, la pression démographique (Doelle, 1995, 2000 ; Nelson et al., 2010) et la faible dynamique de circulation de l'eau dans les structures hydrauliques favorisent **une augmentation du risque alimentaire**. Ce risque peut conduire à la perte d'une ou plusieurs cultures et touche la pratique de la chasse et de la cueillette.

C'est le cas à la fin de la période Coloniale/début de la période Sédentaire (circa 850-1000 apr. J.-C.) avec la disparition des animaux de taille plus grande (type archéodactyles) et la consommation exclusive de lapins et rongeurs sur certains sites dans la zone centrale d'occupation (Schroeder et Clark, 1999).

L'évolution des pratiques agraires et le développement de l'agriculture sèche peut être une réponse adaptative à une faible alimentation en eau dans les basses terres. A l'opposé, la spécialisation agricole et l'ouverture du milieu à plus large échelle augmente la vulnérabilité aux crues et à l'érosion.

2.2. **MODELE 2 : Crues majeures hivernales et évolutions morphologiques**

Cette seconde dynamique a été identifiée entre 750-850 apr. J.-C. (Période Coloniale), entre 1000-1150 apr. J.-C. (Période Sédentaire), entre 1250-1450 apr. J.-C. (Période Classique Soho/Civano), et entre 1550-1900 apr. J.-C. (période Proto-à Historique). Elle est caractérisée par une aggradation rapide des plaines alluviales, et est occasionnellement associée à des systèmes à chenaux multiples et des évolutions morphologiques. La pression démographique a eu un impact indéniable sur les pratiques agraires, fragilisant ainsi à l'extrême le système socio-environnemental Hohokam (Fig. 236).

2.2.1. *Fonctionnement de l'agrosystème*

2.2.1.1. **Pression anthropique réduite dans le bassin de Phoenix**

Le début de la **période Coloniale** (750-850 apr. J.-C.) est marqué par le développement de l'irrigation. Les canaux ont une forme parabolique, évasée et peu profonde, mais des crues éclair répétées dans la plaine les colmatent à plusieurs reprises (Fig. 240). Les canaux ne sont pas nettoyés plus de deux fois et ont donc une durée d'utilisation très courte, malgré une augmentation importante du nombre de structures en fonction (Fig. 240). La population croissante facilite la construction de nouvelles structures hydrauliques, dans un territoire dont la population n'a pas encore atteint son maximum. Il devait alors être possible d'exploiter directement les dépôts de crue, de faire varier l'emplacement du canal, d'exploiter les ressources locales et de diversifier les pratiques agraires. Par ailleurs, l'occupation est réduite dans la plaine (Fig. 240), et les villages permanents sont construits sur la terrasse Mesa.

Au début de la **période Historique** (pre 1700 apr. J.-C.), les Akimel O'Odham occupent la terrasse T2 sur la rive sud de la Gila, au centre de la GRIC, pour se protéger des crues et des Apaches. Les Akimel O'Odham pratiquaient l'Ak Chin farming et cultivaient la première terrasse ; les basses plaines envahies par les prosopis et trop alcalines/salines servant principalement de lieu de collecte (Spier, 1933). L'ensemble de cette période est caractérisé par un lit majeur très mobile et une aggradation rapide. Les Akimel O'Odham se sont adaptés à un **risque hydroclimatique bien présent en diversifiant leurs pratiques culturelles, en déplaçant leurs villages (rive nord ou sud, amont ou aval) ou en reconstruisant leurs systèmes d'irrigation** (Darling et al., 2004) dans un territoire faiblement anthropisé où le conflit aux terres est réduit (Fig. 236).

2.2.1.2. Pression anthropique maximale dans le bassin de Phoenix

Au cours de la **période Sédentaire** (1000-1150 apr. J.-C.), pendant l'optimum climatique médiéval, un événement soudain qui pourrait être défini comme une **crise hydrologique** ou événement à basse fréquence, non anticipé, perturbe l'ensemble du territoire. Des crues torrentielles répétées, liées à un rafraîchissement soudain du climat, conduisent à l'élargissement du cours d'eau puis à son incision (événement de portée régionale). Les barrages de dérivations sont détruits et les structures hydrauliques sont colmatées et abandonnées (Fig. 240). Les Hohokam remontent alors les prises d'eau de leurs systèmes d'irrigation dans la basse vallée de la Salt et adaptent la morphologie des structures hydrauliques. Dans la moyenne vallée de la Gila, de nouvelles connexions sont établies entre les réseaux situés en amont et ceux plus en aval, afin de les alimenter en eau. En parallèle à cette dynamique, **une réorganisation sociale à l'échelle régionale** est observée. Elle est marquée par la dispersion des communautés, la chute de l'organisation politique, l'augmentation des conflits et de la violence, la rupture des échanges et la réduction de l'espace occupé (Moratto et al., 1978). Ainsi, le bassin amont de la Gila, occupé par les **Mimbres** (Fig. 234), est dépeuplé pendant 50 ans au cours desquels les villages se dispersent (Nelson, 1999 ; Hegmon et al., 2000). Puis, la population locale, augmentée par les immigrants Anasazi, se réagrège dans de nouveaux villages à la fin du 12^{ème} siècle (Clark et al., 2004 ; Woodson, 1999 ; Lyons, 2003 ; DiPeso, 1958 ; Nelson et LeBlanc, 1986). Les **Anasazi** colonisent les plaines dès 1050 apr. J.-C. (Middle Late Pueblo II). Entre 1075 et 1125 apr. J.-C. (phase Early Pueblo III), ils se dispersent sur le plateau du Colorado (Cordell et Gumerman, 1989 ; Euler, 1988 ; Dean et al., 1994) puis occupent de petits bassins versants -Chaco Canyon, Black Mesa, Virgin River (Adler et al., 1996 ; Dean et al., 1994 ; Lipe, 1995 ; Schlanger, 1988) jusqu'en 1150 apr. J.-C. Le territoire des **Sinagua** (Fig. 234) subit une éruption volcanique entre 1060-1070 apr. J.-C. Des coulées de laves et des bombes volcaniques ont été retrouvées. Cette éruption est suivie par une forte augmentation de la population dans ce secteur, qui profite sans doute de ces nouveaux sols fertiles. La pratique de l'agriculture sèche est toutefois attestée à partir de cette période, et suppose un besoin croissant en nourriture et une diversification des pratiques.

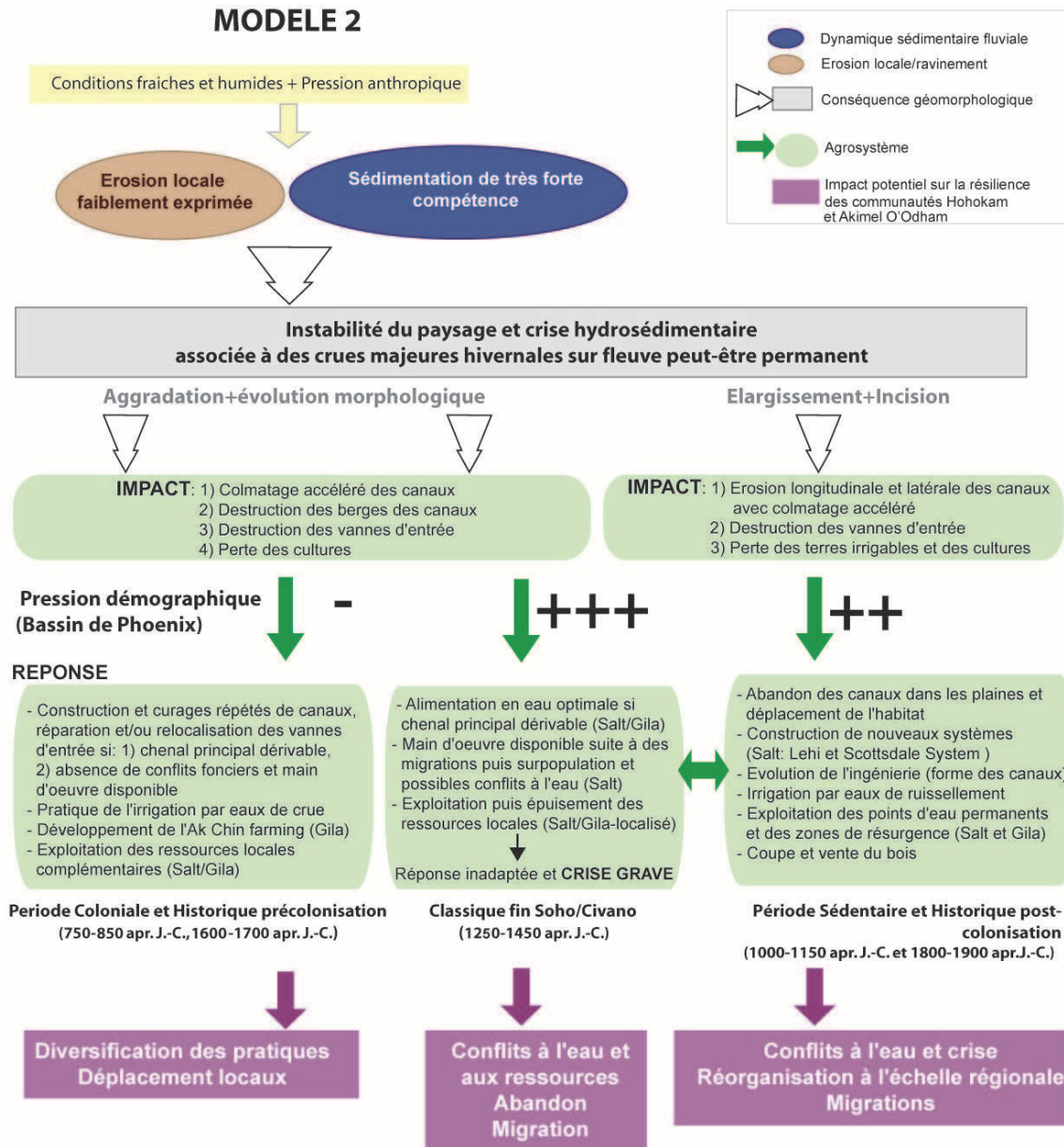


Fig. 236 : Proposition d'un modèle de fonctionnement de l'agrosystème dans un contexte géomorphologique d'instabilité fluviale (Période Coloniale, fin Sédentaire, fin Classique, Historique)

La **fin de la période Soho/période Civano** (1250-1450 apr. J.-C.) est caractérisée par une évolution maximale de la population dans le bassin de Phoenix, suite aux phases de migration entamées dès le début de la période Classique (Fig. 240). Cette période est caractérisée par une réoccupation permanente des anciennes plaines devenues terrasses (Henderson et Clark, 1995). L'aggradation est rapide dans les lits majeurs de la Salt et de la Gila, mais cela ne semble pas affecter les nouveaux systèmes d'irrigation construits en amont dans le bassin de la Salt ou les systèmes consolidés dans le bassin de la Gila dont l'alimentation en eau optimale suggère **une adaptation au risque hydroclimatique**. Le corpus des espèces cultivées est présent (maïs, courge, haricot, coton), mais en plus faible proportion qu'au cours de la période PréClassique (650-1150 apr. J.-C.). Le régime alimentaire repose notamment sur l'exploitation, puis la surexploitation des ressources locales préservées, notamment dans la ripisylve et en

bordure de canaux (collecte des graminées et des massettes). La pratique de l'agriculture sèche est également attestée. Puis, la basse vallée de la Salt est abandonnée autour de 1380 apr. J.-C. et plus tardivement la moyenne vallée de la Gila où l'agriculture est attestée jusqu'en 1450 apr. J.-C.

L'augmentation de la population à la fin de la **période Historique** (circa 1800-1900 apr. J.-C.) est caractérisée par un développement majeur de l'agriculture, qui fonctionne de façon optimale jusqu'en 1850. Mais à partir de cette date, les colons arrivent massivement et ils dérivent rapidement l'eau en amont des champs des Akimel O'Odham. Le bétail introduit par les Jésuites pâture de façon incontrôlée dans les cours d'eau, des arbres sont arrachés à des fins commerciales et minières en amont des bassins versants et des mesquites sont coupés dans les plaines alluviales par les Akimel O'Odham qui doivent abandonner leurs canaux faute d'eau dérivable.

Ces contraintes ont fortement modifié l'équilibre hydrosédimentaire et conduisent à l'élargissement de la Gila puis à son incision (Fig. 237).

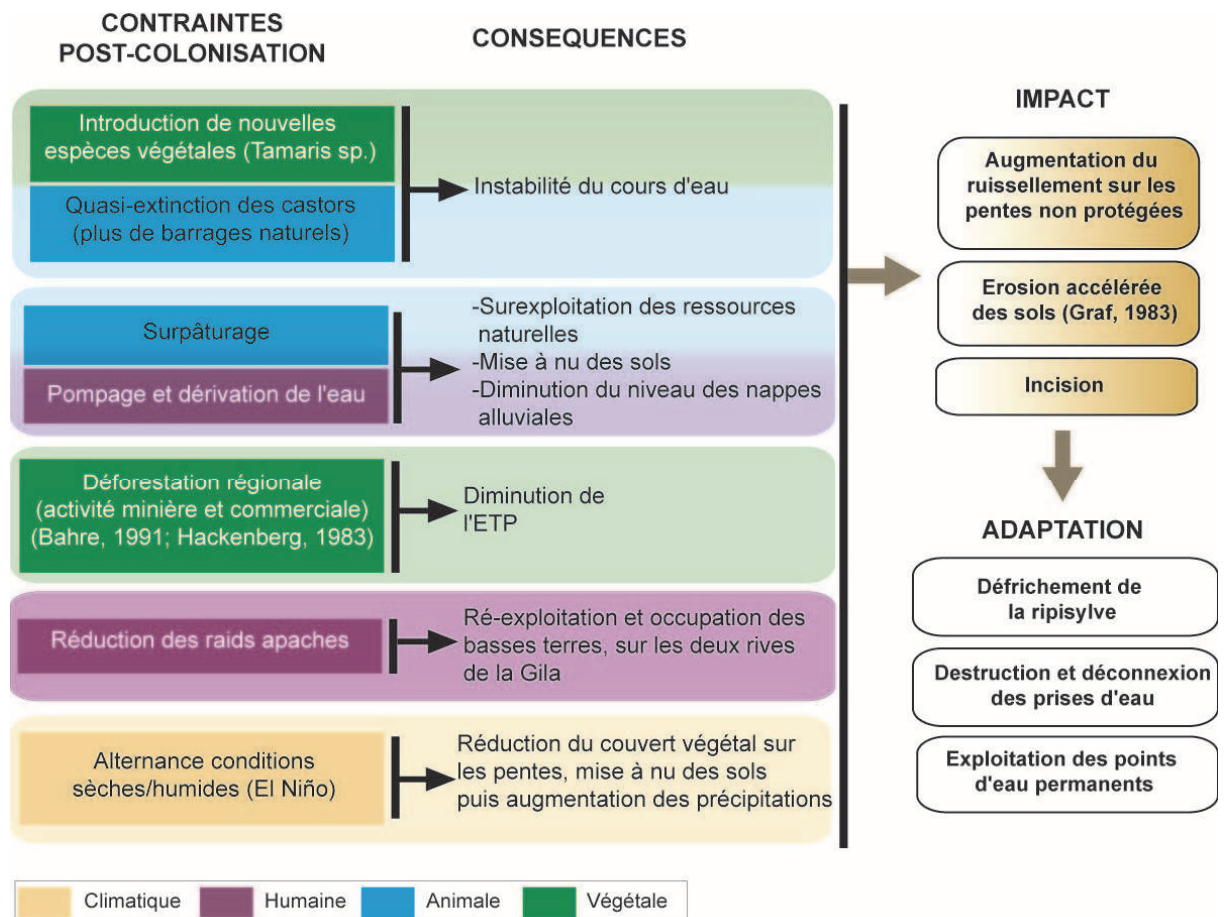


Fig. 237 : Cascade de contraintes environnementales et humaines subies par les Akimel O'Odham

2.2.2. Adaptations aux crises hydrologiques et aux phases d'incisions

En réponse à la crise hydrosédimentaire de la période Sédentaire, quatre **réponses adaptatives** ont été identifiées :

1) Les canaux sont entretenus et les Hohokam s'adaptent à court terme en construisant de nouvelles structures : des **canaux trapézoïdaux profonds** (Fig. 240).

Ces derniers ont quatre avantages : le coût de construction est plus faible, l'entretien est plus facile, l'espace cultivable perdu est limité et le périmètre mouillé réduit.

2) En revanche, ils sont moins stables que les canaux paraboliques. Leur construction peut correspondre à une réponse adaptative à la descente rapide du niveau des nappes fluviales. Une limite est à mentionner. La forme d'un canal tend à devenir uniforme sur la longue durée. En effet, la sédimentation est accélérée dans un canal étroit et profond. Une fois une profondeur limite atteinte, les berges du canal vont s'effondrer et donner naissance à une configuration évasée et parabolique.

Ainsi l'identification de canaux trapézoïdaux à la fin de la période Sédentaire pourrait résulter d'une utilisation de courte durée.

La comparaison de l'entretien selon les systèmes d'irrigation a mis en évidence le fait que les communautés agraires entretiennent leurs canaux lors de crises hydrosédimentaires. Le long de la Salt, le Canal System 1 préserve la forme et la configuration de ses canaux, et ce quelles que soient les conditions hydrosédimentaires.

Le Canal System 2 construit rapidement des canaux trapézoïdaux profonds. Ce système semble abandonné avant les autres au cours de la période Classique Soho, peut-être en réponse à la dynamique de ravinement enregistrée.

Le Scottsdale System adapte la configuration et la forme de ses canaux aux conditions hydrosédimentaires et aux besoins immédiats.

Ces premiers résultats semblent témoigner d'une gestion des systèmes indépendants, notamment pour le Canal System 2, mais d'une vulnérabilité identique et de techniques d'adaptation similaires.

3) La végétation se développe rapidement sur les dépôts de crue. Il est possible que les agriculteurs aient profité des conditions humides et fertiles offertes par ces limons sableux **en cultivant à même les dépôts de crue.**

4) De **nouvelles prises d'eau doivent être construites en amont pour** dériver l'eau. Le long de la Salt, la construction du nouveau système Lehi (Howard, 1987) et la réutilisation du système Scottsdale est probablement une réponse à cette crise. Le long de la Gila, les systèmes amont sont consolidés avec les systèmes en aval dès la fin de la période Sédentaire. La faible superficie irrigable dans ce secteur ne permet pas la construction de nouveaux systèmes. Les hypothèses posées par Henderson (1995) et Upham et Rice (1980) sur l'exploitation de systèmes d'irrigation en amont suite à un besoin d'eau croissant sont ici confirmées. La cause est donc d'ordre environnemental. En revanche, les conséquences humaines sont majeures. L'absence d'eau induit ici une individualisation des groupes plus qu'une collaboration entre agriculteurs. L'émergence d'un système politique centralisé, de la construction de palissades et de canaux de petite taille implique une main d'œuvre fragmentée qui ne peut construire des systèmes d'irrigations majeurs. L'eau se gère à l'échelle du foyer, et les conflits sont récurrents.

5) **Les Hohokam réorganisent leur territoire agricole.** Dans la Salt, les indices d'anthropisation disparaissent de la plaine alluviale élargie et des zones périphériques. Cette perte des basses terres fertiles crée des problèmes fonciers, économiques et sociaux, notamment pour les villages implantés dans la plaine qui doivent être relocalisés. Dans d'autres secteurs, à plus faible densité de population, les Hohokam ont pu déplacer leurs villages. Ainsi, le long de la Santa Cruz, les variations latérales du cours d'eau puis son incision érodent et détruisent des zones cultivables et cultivées,

mais créent indirectement de nouvelles zones irrigables sur l'autre rive. Une réorganisation des villages est clairement attestée, associée à une migration progressive puis complète des agriculteurs sur la rive nord du cours d'eau, qui se transforme progressivement en ciénega cultivée (Waters, 1988).

Le déclin des Hohokam à la **fin de la période Civano** (circa 1350-1450 apr. J.-C.) ne semble pas avoir une origine environnementale liée au manque d'eau. Le risque hydrologique faible sur les basses terrasses et l'efficacité de l'hydraulique (le long de la Salt et de la Gila) semblent indiquer un déclin interne sur plusieurs siècles, peut-être suite à la crise hydrologique de la période Sédentaire. **La spécialisation des communautés conduit à leur fragilisation et augmente leur vulnérabilité.**

Les phases de migrations massives (voir section ci-dessous), **dans un milieu aux ressources limitées dès la fin de la période Sédentaire ne permettent pas de reconstruire une stabilité sociale et agricole malgré des tentatives sur presque deux siècles**, ce qui témoigne néanmoins d'une incontestable résilience.

Le déclin des systèmes le long de la Gila est plus tardif. La topographie, qui limite la superficie irrigable, favorise la diversification des pratiques agraires et l'exploitation des ressources locales. Les systèmes les plus en amont (ex : Poston, Casa Grande) bénéficient d'un apport d'eau fluvial et local, ce qui pourrait expliquer la stabilité culturelle et commerciale de ce secteur bien après l'abandon de la basse vallée de la Salt.

En parallèle à la crise hydrosédimentaire de la période Sédentaire, trois **réponses adaptatives** ont été identifiées au cours de la **période Historique**. Afin d'irriguer et d'exploiter les sols fertiles en voie de pédogénéisation dans la réserve suite à l'épisode d'incision, des projets de grande envergure sont envisagés par les Pionniers, afin de construire des prises d'eau au niveau de Florence, en amont de la moyenne vallée de la Gila. Les Akimel O'Odham, au bord de la famine, migrent vers la Salt River, coupent une grande partie des prosopis dans les plaines à des fins commerciales, et creusent des puits au niveau des zones de résurgence d'eau (Fig. 237). Peu de temps après, ils sont consignés dans les réserves GRIC et SRPMIC.

2.3. MODELE 3 : Ecoulements réduits, dynamiques locales de ravinement (post-incision)

Le début de la période Classique Soho (1^{ère} phase) (1150-1250 apr. J.-C.) reste marqué par la crise hydrologique et l'incision régionale de la période Sédentaire. Elle correspond à une phase de réajustement social et agricole renforcée par une augmentation de la population maximale dans le bassin de Phoenix suite à l'agrégation des villages et le début des phases de migrations (Fig. 240). Les dynamiques enregistrées attestent d'épisodes de ravinement (Canal System 2, rive nord de la Salt) et d'écoulement fluviaux réduits associés à un bas niveau des nappes. Le modèle de fonctionnement de l'agrosystème est présenté Fig. 238.

2.3.1. Adaptations à l'échelle régionale

A l'échelle du Sud-Ouest américain, les changements environnementaux sont facteurs de migrations, qui répondent généralement à un changement social et économique et impliquent un risque (Clark, 2001).

Entre 1200 et 1350, ces migrations sont nombreuses dans le Sud-Ouest mais l'abandon n'est pas synchrone et l'on assiste à des phases d'abandon/agrégation/migration répétées (Hill et al., 2004). Les **Sinagua**, installés dans le bassin de la Verde depuis le début du 12^{ème} s, ont pratiqué l'agriculture sèche, la canalisation d'eau pluviale sur les piémonts et l'irrigation par eaux de crue (Downum, 1992). Leur population décline dès 1220 apr. J.-C. et de nombreux villages sont abandonnés. Dès 1210 un renouveau culturel et démographique est observé chez les **Anasazi**. A partir de 1250 apr. J.-C., des traces accrues de violence, de mauvaises conditions sanitaires (Lambert, 1997 ; Haas et Creamer, 1993) et un renforcement des défenses est observé (LeBlanc, 1999 ; Kuckelman et al., 2002 ; Wilcox et Haas, 1994). A partir de 1280 apr. J.-C., les grands centres culturels sont abandonnés (Lightfoot et Kuckelman, 2001 ; Lipe, 1995 ; Adler et al., 1996 ; Dean et al., 1994 ; Schlanger, 1988). Cette déprise agricole et ce déclin démographique ne sont pas associés à la disparition des Anasazi. Certains migrent dans les vallées de la Tonto, de la Salt et de la San Pedro. D'autres s'installent le long du Rio Grande au Nouveau Mexique (Fig. 234) (Adams et Duff, 2004 ; Lowell, 2007) et y vivent jusqu'à l'arrivée des Espagnols (Riley, 2005 ; Jones et al., 1999 ; Stuart, 2000 ; Vivian et Hilpert, 2002 ; Reed, 2004). Les **Salado** (mélange culturel entre les Mogollon, Hohokam et Anasazi) s'installent et cultivent (agriculture sèche, irrigation par eaux de crues) (Van West et Altschul, 1994) le bassin de la Tonto entre 1200 et 1300 apr. J.-C. (Doyel, 1976 ; Hauray, 1945 ; Fish et Fish, 1994 ; Rice, 1992). Un système agrégé, avec des *platform mounds* et des palissades, se met en place (Clark, 2001 ; Elson, 1998). L'ouverture du milieu est clairement attestée et confirmée par des études archéozoologiques (Bayman et Hatch, 1985 ; Legler, 1970) et la récurrence des incendies. Puis, ils migrent le long de la Salt et de la Verde (Ahlstrom and Roberts, 1995 ; Fiero et al., 1980 ; Gumerman et Weed, 1976) et contribuent alors à la surexploitation du territoire dans ce secteur.

2.3.2. Fonctionnement de l'agrosystème

Après l'incision de la période Sédentaire, autour de 1050-1150 apr. J.-C., et pendant presque 150 ans, les Hohokam s'adaptent en restructurant l'ensemble de la société (Howard, 1991 ; Nicholas et Neitzel, 1984 ; Wilcox, 1979). Les villages situés en aval de la Salt et de la Gila sont abandonnés et la population s'agrège dans les zones centrales et en amont jusqu'en 1300 apr. J.-C. (Dean et al., 1994 ; Doelle, 1995 ; Wilcox, 1979). L'espérance de vie diminue très nettement et les villages sont surpeuplés suite aux migrations répétées (Abbott, 2003). Le stress alimentaire, associé à la pression démographique, est clairement attesté au début de la période Classique avec la consommation d'espèces animales de petite taille et difficiles à chasser, absentes des corpus de la période Sédentaire (Dean, 2007).

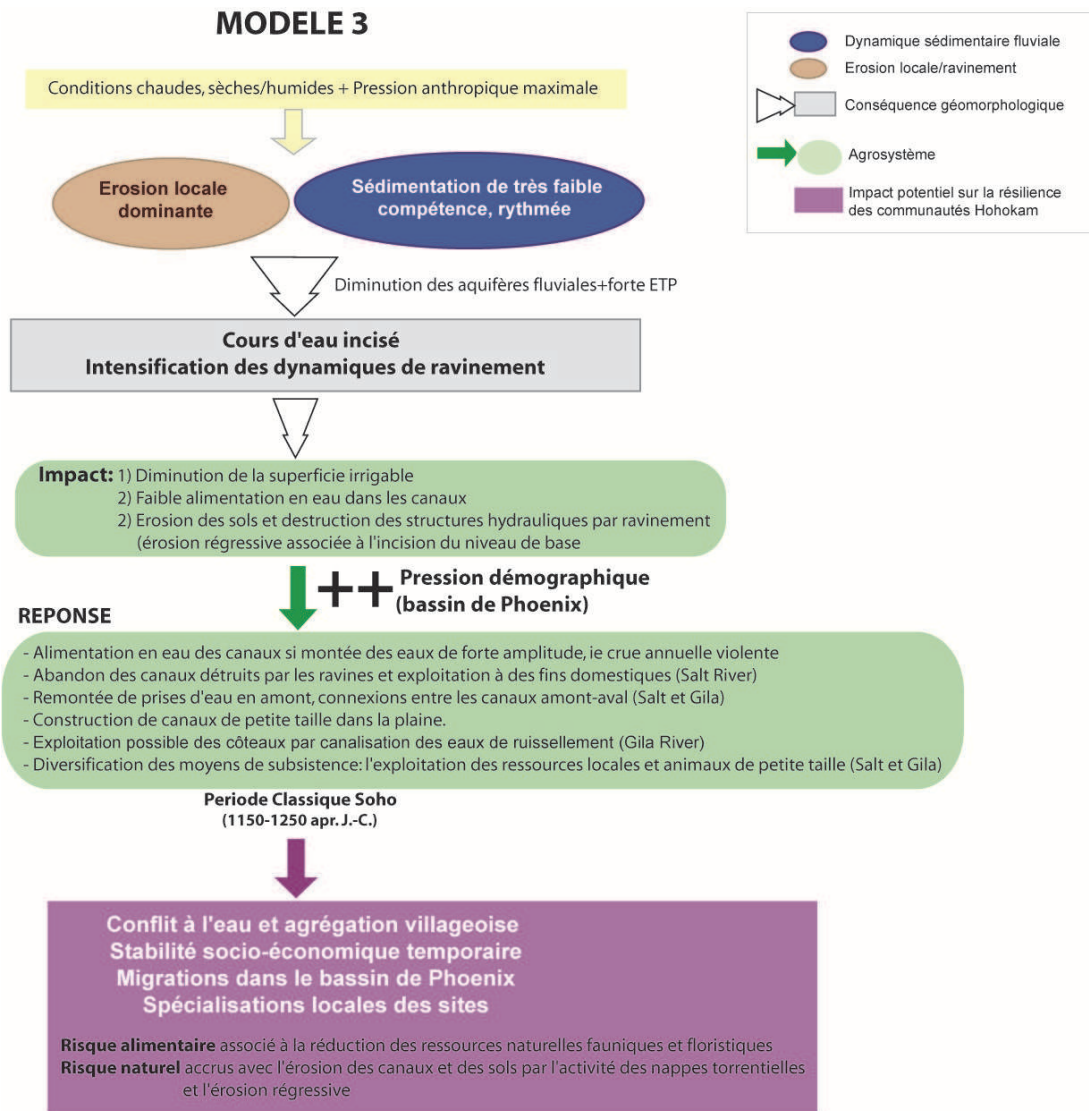


Fig. 238 : Proposition d'un modèle de fonctionnement de l'agrosystème dans un contexte d'absence d'eau et de cours d'eau incisé (Période début Classique Soho)

Les systèmes d'irrigation sont alors gérés de façon indépendante (Abbott, 2003), avec la mise en place d'une unité socio-politique unique et intégrée qui protège les parcelles agricoles et les structures hydrauliques associées (Abbott, 2000).

L'isolement politique des villages favorise l'individualisation des pratiques et les spécialisations locales (Gish, 1988). Certains villages servent de zone de production et de transformation des produits qui sont exportés vers d'autres villages, par exemple ceux qui ne bénéficient pas d'un apport en eau suffisant.

Les canaux reconstruits de petite taille ou ceux réaménagés dans la basse vallée de la Salt et le long de la Gila sont alimentés de façon rythmée, **mais la compétence réduite** résulte en un approvisionnement en eau limité dans les parties terminales des canaux.

Dans la basse vallée de la Salt, les structures hydrauliques sont bien entretenues le long du Canal System 1 et du Système Scottsdale, avec des canaux de forme parabolique et stable. A l'opposé, certaines structures du Canal System 2 sont totalement détruites par l'activation des cônes détritiques. Presque 50% des canaux sont abandonnés et faiblement entretenus. Le système semble totalement fragilisé, malgré la reconfiguration

et la consolidation répétées des alignements des canaux et leur exploitation à des fins domestiques et architecturales. La reconquête de la ripisylve favorise l'exploitation des ressources locales (Fish, 1995 ; Gasser et Kwiatkowski, 1991) et relativement, les céréales diminuent des corpus polliniques et carpologiques. Le long de la Gila, la topographie favorise la canalisation des eaux de ruissellement qui alimentent à la fois des canaux et des réservoirs d'eau au cours de cette période.

2.4. MODELE 4 : Conditions chaudes et sèches, crues éclair

Le modèle 4 est spécifique à la période Pionnière au cours de laquelle les conditions sont chaudes et sèches, mais l'aggradation de la plaine est bien marquée par des sédiments en provenance des bassins amont qui se déposent suite à des épisodes de crues éclair. La pression anthropique est réduite dans le bassin de Phoenix (Fig. 240) et les dynamiques hydrosédimentaires sont principalement sous contrôle climatique. Le modèle de fonctionnement de l'agrosystème est présenté Fig. 239.

2.4.1. *Fonctionnement de l'agrosystème*

C'est au cours de la période Pionnière que s'amorce la mise en place de l'agrosystème Hohokam. Les Hohokam tirent toujours profit d'une ripisylve bien exprimée mais en voie de réduction. En effet, les premiers indices de défrichements sont observés et les pratiques d'irrigation se développent au cours d'une phase de stabilité temporaire de la plaine. Les canaux construits sont de faible longueur, colmatés rapidement et sensibles aux effondrements de berges. Ces structures ont une forme parabolique optimale pour la plupart (rayon hydraulique constant) (Montañas, communication personnelle), avec des canaux larges et peu profonds. Toutefois, cette configuration favorise une évaporation plus rapide de l'eau (plus grande surface au contact de l'air).

Le maïs, coton et haricot sont cultivés, et le mesquite et les cactus exploités (Gladwin et al, 1937 ; Bohrer, 1970, 1971 ; Ravesloot et Lascaux, 1993 ; Donaldson, 1993), ce qui témoigne d'un impact sur l'environnement toujours limité. Aucune trace d'exploitation n'a été observée dans la basse vallée de la Salt où la végétation éparse, les dunes, et les crues éclair fréquentes à forte capacité érosive sont alors peu propices à une installation permanente. La chasse et la cueillette restent dominantes. Des corpus de lagomorphes, rongeurs, écureuils (Dean, 2005) et des artiodactyles dans les sites localisés plus en altitude dominant.

2.4.2. *Risques, vulnérabilité et adaptations*

Les premiers canaux construits attestent de contraintes techniques, bien que leur construction constitue déjà en soit une forte avancée technologique. Parmi les dynamiques identifiées, les eaux de ruissellement canalisées colmatent les canaux, des faibles débits limitent le volume d'eau dérivé et la chenalisation naturelle de certains canaux met en relief la **vulnérabilité de ces communautés aux aléas hydrologiques**. Ces derniers sont bien entretenus et attestent d'une **prise de conscience du risque hydrologique**.

L'implantation des sites à distance de la bande active du cours d'eau pourrait correspondre à une adaptation à une dynamique hydrologique intense à haute fréquence associée à des crues éclair érosives ou à un large lit majeur de la Salt (Fig. 240). Par ailleurs, la pression démographique peu exprimée permet aux agriculteurs de déplacer leurs structures hydrauliques, mais également de sélectionner les zones les plus fertiles, d'irriguer par eaux de crues, et de canaliser les eaux pluviales en complément sur les piémonts.

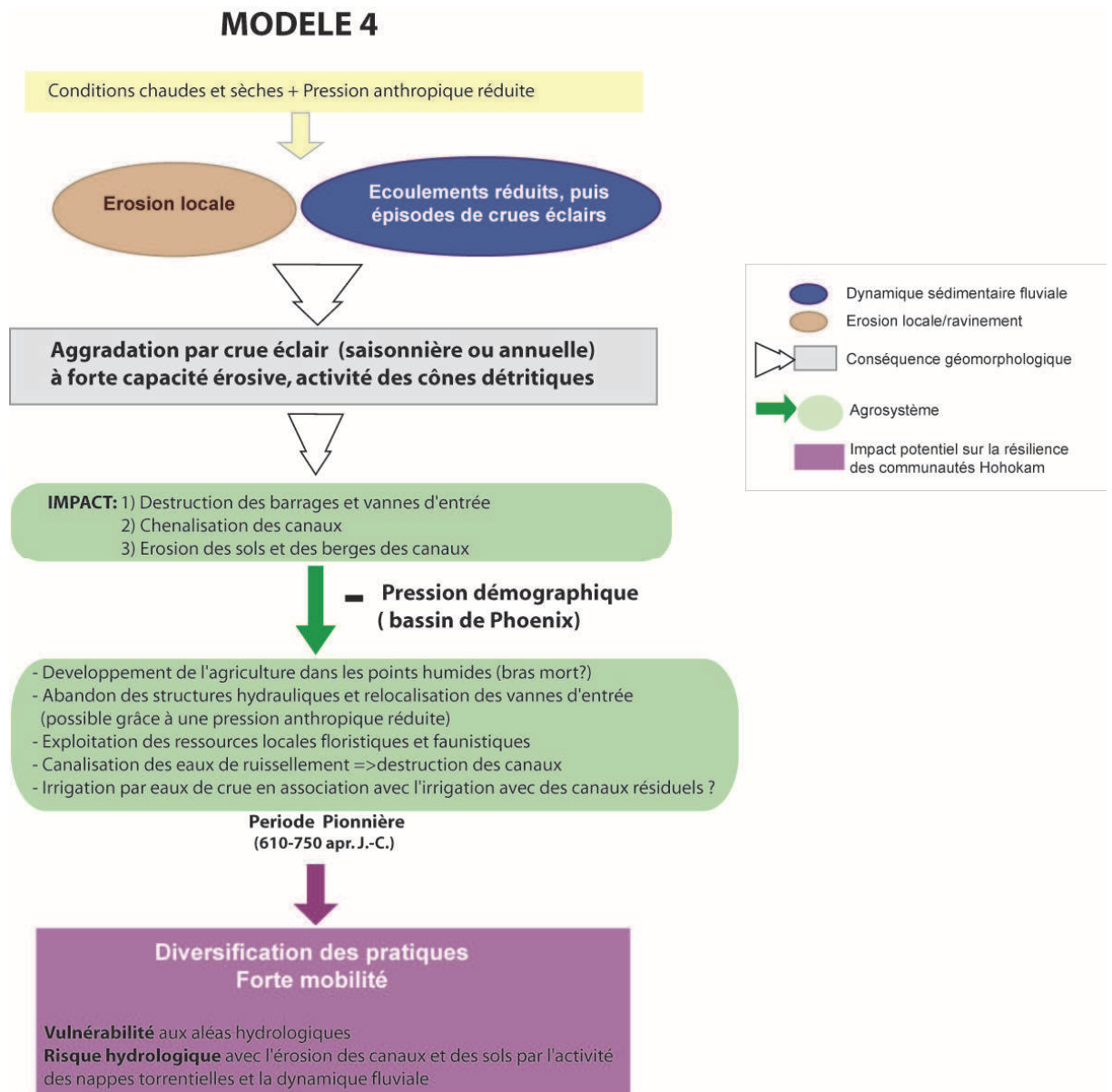


Fig. 239 : Proposition d'un modèle de fonctionnement de l'agrosystème dans un contexte de conditions chaudes et sèches (Période Pionnière)

2.5. Conclusion

Notre travail a permis de mettre en évidence des adaptations variables en fonction des dynamiques hydrosédimentaires, sous la dépendance d'activités humaines dans les bassins versants amont mais également des fluctuations climatiques à très court terme. Les communautés agricoles en milieu désertique doivent s'adapter aux contraintes environnementales à haute fréquence, qui ont lieu sur une courte période de temps (Dean, 1988b). A l'opposé, les événements à basse fréquence, dit catastrophiques, vont avoir un impact certain sur l'organisation, la gestion agricole, voire même la structuration sociale des sociétés. Ces impacts sont décuplés lorsque la population dépend d'une agriculture intensive, car les changements à haute et basse fréquence deviennent dangereux. Par ailleurs, l'absence d'eau ou des débits fluviaux de trop faible intensité peuvent se révéler fatals pour les communautés agricoles (ex : période Sédentaire). A l'opposé, des précipitations intenses dans des bassins versants fragilisés peuvent conduire à une dynamique hydrosédimentaire forte et un colmatage accéléré des canaux. **On considère que l'équilibre entre la dynamique sédimentaire et l'efficacité des systèmes est atteint dans le cadre d'une décharge fluviale rythmée de moyenne énergie (sédiments granoclassés) associée à une érosion localisée qui permet un apport supplémentaire d'eau, souvent indispensable au cours d'années à faible pluviométrie. C'est dans ce contexte que les communautés agraires peuvent s'adapter et anticiper les aléas fluviaux.** Cette dynamique environnementale a été observée à la fin de la période Coloniale/ début de la période Sédentaire et à la fin de la période Classique.

Les Hohokam se sont adaptés aux fortes contraintes environnementales de la période Pionnière au début de la période Sédentaire. La pression démographique, associée à des contraintes climatiques régionales, défavorables à la pratique de l'irrigation fragilisent le système de 1000 à 1100 apr. J.-C. Malgré une adaptation rapide de leur agrosystème, avec l'entretien, la remontée des prises d'eau, l'exploitation des ressources locales et la diversification des pratiques agraires, la réorganisation sociale des Hohokam qui s'exprime par des changements dans l'organisation de l'habitat, dans l'architecture (platform mound, palissades, grandes maisons, etc.), mais également par la chute du système économique régional spécialisé, à laquelle se greffent des phases d'immigration massives dans le bassin de Phoenix, ne favorise pas un retour à une gestion et une occupation durable du territoire.

Dans un milieu contraignant, une augmentation de la population va limiter les adaptations humaines aux facteurs de pressions extérieures, qu'ils soient sociaux ou environnementaux. Plus que les contraintes environnementales en elles-mêmes, c'est une surexploitation des ressources dans un milieu social non équilibré, voire trop spécialisé, qui fragilise le système (ex : van der Leeuw et Aschan-Leygonie, 2000 ; Redman et Kinzig, 2003 ; Nelson et al., 2010). La modification d'un paramètre de cet équilibre peut, à elle-seule, perturber l'ensemble du système par un effet cascade des pressions socio-environnementales.

L'abandon du bassin de Phoenix à la fin de la période Classique ne résulte pas de contraintes liées à l'eau, car les canaux en utilisation sont alors alimentés de façon optimale. En revanche, il est probable que cet abandon résulte d'une déprise entamée depuis plusieurs siècles, en réponse à des contraintes géomorphologiques des hydrosystèmes régionaux (élargissement/incision) et anthropiques (surpopulation, conflits fonciers) (ex : Abbott, 2003 ; Nelson et al., 2010). L'abandon plus précoce du bassin de la Salt résulte peut-être d'une spécialisation agricole trop rapide, favorisée par une superficie irrigable importante et des ressources naturelles réduites en réponse à la surexploitation du territoire. La morphologie du bassin de la Gila a, quant à elle, favorisé la diversification des pratiques agraires, notamment grâce à la canalisation des eaux de ruissellement et l'agriculture sèche, ce qui pourrait expliquer son abandon plus tardif. Le déclin des Akimel O'Odham suite à la colonisation massive au 19^{ème} siècle en est une illustration parfaite, sur une échelle de temps bien plus courte.

Conclusion générale

Notre travail de recherche a permis de reconstituer l'évolution des dynamiques hydro-sédimentaires et des paysages agraires depuis les deux derniers millénaires dans le bassin de Phoenix, Arizona. Cette recherche constitue un des premiers travaux de synthèse en géoarchéologie des systèmes hydrauliques dans le Sud-Ouest américain, et la première approche micromorphologique en contextes naturel et agricole dans ce secteur.

Afin de répondre aux objectifs fixés à l'origine de ce travail, qui étaient de comprendre la co-évolution société-environnement, nous avons restitué le fonctionnement et l'interaction entre l'hydrosystème et l'agrosystème dans la basse vallée de la Salt et la moyenne vallée de la Gila. Grâce à une approche systémique, notre étude s'est penchée sur la compréhension des dynamiques actuelles puis passées qui régissent l'évolution des paysages. Pour cela, nous avons élaboré un cadre géomorphologique, reconstruit les dynamiques hydrosédimentaires, morphogéniques et pédologiques dans les structures hydrauliques et les formations alluviales, et ce à différentes échelles spatiales (du local au régional) et temporelles (du saisonnier au siècle). Dans un second temps, nous avons estimé les dynamiques d'occupation et d'exploitation du territoire.

Au terme de cette étude, quatre résultats principaux peuvent être mis en valeur :

1) Nous proposons un cadre chronostratigraphique et une reconstruction des paysages agraires nouveaux au cours des deux derniers millénaires. L'évolution des paysages peut être décrite en 10 phases distinctes dans la basse vallée de la Salt, de 650 à 1900 apr. J.-C., et en 14 phases dans la vallée de la Gila, de 350 à 1900 apr. J.-C. Elles regroupent des épisodes de stabilité des paysages (250-400, 800-1000 et 1450-1600 apr. J.-C.), deux incisions (1000-1150 apr. J.-C., 1870) et des phases d'aggradation de rapidité variable (600-800, 1000-1150 et 1600-1900 apr. J.-C.). Nous réfutons l'hypothèse d'un déclin d'origine environnementale autour de 1450 apr. J.-C., mais identifions une crise environnementale autour de 1000-1150 apr. J.-C., associée à des conditions climatiques régionales contraignantes conduisant à des migrations massives et une surexploitation du territoire. L'ensemble de ces facteurs serait responsable du lent déclin de la communauté d'irrigation Hohokam, presque 150 à 200 ans plus tard. Le contexte socio-environnemental des Akimel O'Odham au 19^{ème} s. est une illustration parfaite d'un processus analogue sur un pas de temps séculaire.

2) Cette étude contribue également à la connaissance des dynamiques hydrologiques locales et régionales en précisant les modalités de la morphogénèse en contexte semi-aride, et notamment l'impact des changements climatiques à court terme sur les épisodes d'incision. L'accumulation du stock sédimentaire est favorisée par les pluies estivales intenses, mais de trop courte durée pour permettre le transit de la charge solide. Ce sont les pluies hivernales, de plus faible intensité, mais de plus longue durée qui conduisent à l'aggradation des plaines en aval.

La phase transitoire entre conditions chaudes/sèches puis fraîches/humides est le facteur de déclenchement de phases d'aggradation, puis d'élargissement, et enfin d'incision, une fois la charge solide évacuée.

3) Notre travail a favorisé l'élaboration d'un premier référentiel magnétique et micromorphologique sur les sources érodables, les dynamiques sédimentaires, les processus pédologiques et écologiques de surface, ainsi que les signatures des pratiques agraires et de l'irrigation dans les sols. Ce référentiel doit être affiné et complété par d'autres études sur les dynamiques environnementales actuelles et historiques.

4) Les paysages agraires résultent d'interactions permanentes entre l'homme et son milieu. Les périodes dites de stabilité peuvent in fine élever le risque alimentaire ; en effet, la spécialisation agricole, qui est permise par cette stabilité, augmente la vulnérabilité des communautés agraires aux crues et à l'érosion. Des épisodes de crues majeures perturbent l'ensemble du système, de sa structure à son fonctionnement : ainsi les Hohokam ont dû adapter leur ingénierie et réorganiser leur territoire agricole. L'évolution des pratiques agraires et le développement de l'agriculture sèche sont une réponse adaptative à la fois à des phases de sécheresse mais également à des contraintes dans la dérivation de l'eau fluviale. Dans l'ensemble, les Hohokam ont pris conscience du risque hydrologique très rapidement, dès la période Pionnière, mais ce sont des contraintes extérieures, environnementales et non prévisibles, notamment l'augmentation de la population au cours de la période Classique, qui ont contribué à la fragilisation de leur système. Berry (1981) disait avec beaucoup d'exactitude: « *It is better to sustain a small population indefinitely than to build up a large artificial population on an agricultural system of which the basic principle is a willingness to destroy itself* ».

Les résultats obtenus dans ce travail présentent toutefois quatre limites principales.

1) Tout d'abord, les enregistrements sédimentaires étudiés sont fragmentaires dans les deux bassins versants étudiés, du fait notamment des restrictions d'accès aux terres indiennes et à une urbanisation massive dans le secteur de Phoenix. Par conséquent il n'a pas été possible de sélectionner et choisir les zones permettant de répondre à des questions précises. Il a fallu comprendre des dynamiques à partir de sites d'observation très diversifiés. Le même nombre de structures hydrauliques a été étudié dans les deux bassins versants : elles sont dispersées dans la vallée de la Salt et concentrées dans deux secteurs dans la vallée de la Gila. La restitution des paysages agraires de la Gila est donc plus localisée mais plus complète. Pour limiter les contraintes liées à la représentativité de ces archives sédimentaires, nous avons multiplié autant que possible les séries étudiées et intégré des données bibliographiques qui étoffent le corpus disponible.

2) Une seconde limite est la restitution d'un cadre chronologique fin. Les entreprises privées qui nous ont fourni des données investissent rarement dans les datations radiocarbone, et encore moins dans les dates OSL. Nous avons obtenu une date par structure hydraulique, occasionnellement deux, mais rarement plus de trois. Par conséquent, il est difficile de corréliser des données archéologiques, hydrauliques et micromorphologiques à haute résolution lorsque l'ensemble des objets d'étude sont faiblement datés.

- 3) La troisième limite concerne l'absence d'études paléoenvironnementales systématiques dans cette région. Si certaines entreprises privées voient l'intérêt de cette approche, d'autres sont toujours réticentes ou bien ne peuvent investir dans ce type d'analyse. L'ambition de cette thèse était également de développer cette approche multiproxies mais le cadre de travail a limité cette ambition.
- 4) Enfin la dernière limite est l'absence de référentiel micromorphologique sur les dynamiques naturelles et agraires en contexte désertique dans le Sud-Ouest américain, ce qui a complexifié l'interprétation des données archéologiques.

Les principales perspectives de recherche qui s'ouvrent à l'issue de ce travail doivent être des réponses aux limites présentées. Il s'agirait tout d'abord de poursuivre l'étude géoarchéologique et l'échantillonnage des structures hydrauliques dans les deux bassins versants. C'est l'accumulation de données ponctuelles qui peut nous permettre de comprendre les dynamiques à l'échelle micro-régionale puis régionale. La compréhension des interactions sociétés-environnement passe par des analyses paléoenvironnementales (géoarchéologie, palynologie, ostracologie, anthracologie) et un cadre chronologique fin. A plus long terme, nous souhaitons développer cette approche dans différentes régions semi-arides afin d'établir des modèles de fonctionnement des systèmes agraires et de leurs interactions avec les dynamiques morphogéniques. Sur notre terrain d'étude à Phoenix, ce choix revient à l'archéologue de la ville qui peut exiger une homogénéisation des protocoles d'étude et d'échantillonnage, et une réduction de l'hétérogénéité des rapports de fouille.

D'un point de vue méthodologique, la constitution de référentiels micromorphologiques plus larges apportera de nouvelles clés de lecture. La collaboration se poursuit avec la Gila River Indian Community où un projet de recherche sur l'étude des propriétés actuelles et passées des sols est en cours d'élaboration avec des archéologues et des chimistes. Des prélèvements systématiques dans des contextes bien contrôlés (sols irrigué/non irrigué, cultivé/non cultivé, amendé/non amendé) seront effectués. Cette approche permet d'intégrer nos résultats à une gestion durable du territoire, de la gestion de l'eau à l'aménagement du territoire, et répond alors à un objectif sous-jacent de cette thèse. Le bassin de Phoenix offre un potentiel archéologique et environnemental exceptionnel. Mais le secteur est fragile : la surexploitation des ressources non renouvelables et l'expansion de la zone urbaine contribuent à la disparition des sites archéologiques mais favorisent également l'érosion et la disparition des sols. Contrairement aux Hohokam et aux Akimel O'Odham, nos capacités d'adaptation sont limitées et il n'est plus possible de migrer, d'abandonner les terres et de varier ses moyens de subsistance dans des contextes trop urbanisés. Ce n'est que par la compréhension des processus actuels et passés et des savoir-faire traditionnels qu'il sera possible de préserver le sol en tant que ressource en voie de disparition.

Références bibliographiques

A

- ABBOTT, D.R., 2000. *Ceramics and community organization among the Hohokam*. University of Arizona Press, Tucson, 280 pp.
- ABBOTT, D.R., 2003. *Centuries of decline during the Hohokam Classic Period at Pueblo Grande*. University of Arizona Press, Tucson, 265 pp.
- ABBOTT, D. R., 2008. The process, location, and history of Hohokam buff ware production: some experimental and analytical results. *Journal of Archaeological Science* 35(2) : 388-397.
- ABBOTT, D.R., FOSTER, M.S., 2003. Site structure, chronology, and population. In : Abbott, D.R. (Ed.) : *Centuries of decline during the Hohokam Classic Period at Pueblo Grande*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 24-47.
- ABBOTT, D.R., INGRAM, S., KOBER, B., 2006. Hohokam exchange and early Classic period organization in central Arizona: focal villages or linear communities?. *Journal of Field Archaeology* 31 : 285-305
- ADAMS, D.K., COMRIE, A.C., 1997. The North American monsoon. *Bulletin American Meteorological Society* 78 : 2197-2213.
- ADAMS, E.C., DUFF, A. (Eds.), 2004. *The Protohistoric Pueblo World, A.D.1250-1600*. University of Arizona Press, Tucson, 218 pp.
- ADAMS, I.H., 1976. *Agrarian landscape terms. A glossary for historical geography*. Institute of British Geographers Special Publication 9, London, 314 pp.
- ADAMS, K.R., 2002. *Archaeobotanical studies and paleoenvironmental reconstructions, Gila river Indian Community*. P-MIP Technical Report No. 2002-03, 48 pp.
- ADLER, M.A. (Ed.), 1996. *The Prehistoric Pueblo World, A.D. 1150-1350*. University of Arizona Press, Tucson, 278 pp.
- ADAMS, R.M., 1978. *Strategies of maximization, stability, and resilience in Mesopotamian society, settlement, and agriculture*. Proceedings of the American Philosophical Society 122 : 329-335.
- ADAMS, R.M., 1981. *Heartland of cities. Surveys of ancient settlement and land use on the central floodplain of the Euphrates*. University of Chicago Press, Chicago, 384 pp.
- AGUILAR, J., FERNANDEZ, J., DORRONSORO, C., STOOPS, G., DORRONSORO, B., 2003. *Hydromorphy in soils*. [Http://edafologia.ugr.es/hidro/indexw](http://edafologia.ugr.es/hidro/indexw).
- ACKERLY, N.W., 1982. Irrigation, water allocation strategies, and the Hohokam collapse. *The Kiva* 47 : 91-105.

- ACKERLY, N.W., 1988. False causality in the Hohokam collapse. *The Kiva* 53(4) : 305–319.
- ACKERLY, N.W., 1989. Paleohydrodynamic impacts on Hohokam irrigation systems. In : Ackerly, N.W., Henderson, T.K. (Eds.) : *Prehistoric agricultural activities on the Lehi-Mesa terrace. Perspectives on Hohokam irrigation cycles*. Northland Research Inc., Flagstaff, pp. 46-83.
- ACKERLY, N.W., 1991. *Using historic documents to develop analog models of processes affecting prehistoric Hohokam irrigation systems*. Soil Systems Publications in Archaeology 17, Phoenix, pp. 41-60.
- ACKERLY, N.W., HOWARD, J., MCGUIRE, R., 1987. *La Ciudad canals. A study of Hohokam irrigation systems at the community level*. Arizona State University Anthropological Field Studies 17, Tempe, 132 pp.
- ACKERLY, N.W., HENDERSON, T.K. (Eds.), 1989. *Prehistoric agricultural activities on the Lehi-Mesa terrace. Perspectives on Hohokam irrigation cycles*. Northland Research Inc, Tempe.
- AHLSTROM, R.V.N., ROBERTS, H., 1995. *Prehistory of Perry Mesa: the short-lived settlement of a Mesa-Canyon complex in Central Arizona, ca A.D. 1200-1450*. Arizona Archaeological Society 28, Phoenix, 177 pp.
- AHLSTROM, R.V.N., SLAUGHTER, M., 1996. Site chronology and dating method. In : Slaughter, M.C., Roberts, H. (Eds.) : *Excavation of the Gibbon Springs Site. Village in the north-eastern Tucson Basin*. SWCA Archaeological Report No. 94-87, Tucson, pp. 481–490.
- AITKEN, M.J., 1985. *Thermoluminescence dating*. Academic Press, London, 279 pp.
- ALLCHIN, B., ALLCHIN, R., 1982. *The rise of civilization in India and Pakistan*. Cambridge University Press, Cambridge, 396 pp.
- ALLEN, J.R.L., 1974. Sedimentology of the Old Red Sandstone (Siluro-Devonian) in the Clee Hills area, Shropshire, England. *Sedimentary Geology* 12 : 73-167.
- ALLEN, C.D., 2002. Lots of lightning and plenty of people : an ecological history of fire in the upland southwest. In : Vale, T.R. (Ed.) : *Fire, native peoples, and the natural landscape*. Island Press, pp. 142-193.
- ALONSO, P., DORRONSORO, C., EGIDO, J.A., 2004. Carbonatation in palaeosols formed on terraces of the Tormes river basin, Salamanca, Spain. *Geoderma* 118 : 261-276.
- AMAMI, S.E., BALDY, C., POUGET, M.J., 1967. *Rénovation d'une palmeraie littorale ancienne. Etude de remise en culture intensive*. Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie 40, 42 pp.
- AMES, G.W.JR. (Ed.), 1942. A doctor comes to California. The diary of John S. Griffin, assistant surgeon with Kearny's Dragoons, 1846-47. *California Historical Society Quarterly* 21(3) : 193-224.
- AMOROS, C., BRAVARD, J.P., REYGROBELLET, J.L., PAUTOU, G., ROUX, A.L., 1988. Les concepts d'hydrosystème et de secteur fonctionnel dans l'analyse des systèmes fluviaux à l'échelle des écosystèmes complexes. *Bulletin Ecology* 9(4) : 531-546.
- ANDERSON, R.S., SMITH, S.J., 1994. Pollen analysis. In : Kwiatkowski, S. (Ed.) : *The Pueblo Grande Project, Vol. 5. Environment and subsistence*. Soil Systems Publications in Archaeology 2, Phoenix, pp. 205-247.

- ANDRADE, E.R., SELLERS, W.D., 1988. El Niño and its effect on precipitation in Arizona and western New Mexico. *Journal of Climatology* 8: 403-410.
- ANDREWS, J.P., BOSTWICK, T.W., 2000. *Desert Farmers at the river's edge. The Hohokam and Pueblo Grande*. Pueblo Grande Museum and Archaeological Park, Phoenix, 80 pp.
- ANNING, D.W., THIROS, S.A, BEXFIELD, L.M., MCKINNEY, T.S., GREEN, J.M., 2005. *Southwest principal aquifers regional ground-water quality assessment*. USGS, 3pp.
<http://pubs.usgs.gov/fs/2009/3015/pdf/fs2009-3015.pdf>
- ANYON, R, GILMAN, P.A., LEBLANC, S.A., 1981. A reevaluation of the Mogollon-Mimbres archaeological sequence. *The Kiva* 46 : 209-225.
- ARIZONA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY, 1990. *State of Arizona Water Quality Assessment Report*, Office of Water Quality.
- ARIZONA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES. 2006. *Arizona Water Atlas. Vol. 1 : Introduction*.
<http://www.azwater.gov>.
- ARIZONA REPUBLICAN, 1891. *With a crash*, 20 février 1891, p. 1.
- ARNAUD, F., REVEL, M., CHAPRON, E., DESMET, M., TRIBOVILLARD, N., 2005. 7200 years of Rhône river flooding activity in lake Le Bourget, France. A high-resolution sediment record of NW Alps hydrology. *The Holocene* 15 (3) : 420-428.
- ARNAUD-FASSETTA, G., 2008. La géoarchéologie fluviale: concepts, attendus et méthodes d'étude rétrospectives appliqués à la caractérisation du risque hydrologique en domaine méditerranéen. *Échogéo* 4 : <http://echogeo.revues.org/2187>.
- ATWATER, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America, *Geol. Soc. Amer. Bull.* 81 : 3513-3535.
- AYRES, J.E., 1975. *Archaeological reconnaissance of the Gila River Indian Reservation, Final Report*. Ms, Arizona State Museum, University of Arizona, Tucson.

B

- BAHR, D., SMITH, J., ALLISON, W.S., HAYDEN, J. 1994. *The short swift time of gods on earth*. University of California Press, Berkeley, 352 pp.
- BAHRE, C.J., 1991. *A legacy of change: historic human impact on vegetation in the Arizona borderlands*. University of Arizona Press, Tucson, 231pp.
- BAIZE, D., GIRAUD, M.-C., 2009. *Référentiel pédologique*. Association française pour l'étude du sol (AFES), Quae, Versailles, 406 pp.
- BAKER, V.R., KOCHER, R.C., PATTON, P.C. (Eds.), 1988. *Flood Geomorphology*. John Wiley & Sons, New York, 528 pp.

- BAKER, V.R., BOWLER, J.M., ENGEL, Y., LANCASTER, N., 1995. Late Quaternary palaeohydrology of arid and semi-arid regions. In : Gregory, K.J., et al. (Eds.) : *Global continental palaeohydrology*. John Wiley & Sons, New York, pp. 203–231.
- BANDELIER, A.F., 1890. *Final report of investigations among the indians of the southwestern United States (Part I)*. Papers of the Archaeological Institute of America, American Series 3.
- BAL, L. 1973. *Micromorphological analysis of soil*. The Netherlands Soil Survey Institute, Soil Survey Papers 6, Wageningen, 164 pp.
- BAL, L., 1975. Carbonate in soil. A theoretical consideration on, and proposal for its fabric analysis. *Netherland Journal Agricultural Science* 23 : 163-176.
- BARLOW, M., NIGAM, S., BERBERY, E.H., 2001. ENSO, Pacific decadal variability, and U.S. summertime precipitation, drought, and stream flow. *Journal of Climatology* 14 : 2105–2128.
- BARRY, R.G., CHORLEY, R.J., 1998. *Atmosphere, weather and climate*. 7th ed. Routledge, London, 408 pp.
- BARTLEIN, P.J., EDWARDS, M.D., SHAFER, S.L., BARKER, E.D., 1995. Calibration of radiocarbon ages and the interpretation of paleoenvironmental records. *Quaternary Research* 44: 417–424.
- BARTLETT, J.R., 1854. *Personal narrative of explorations and incidents in Texas, New Mexico, California, Sonora, and Chihuahua*, 2 vol. Kessinger Publishing, London, New York, pp. 262-263.
- BARZ, D.D., 1998. *A cultural resources survey of approximately 40 miles of Interstate 10 right-of-way between Picacho and Casa Blanca road interchange, northwestern Pinal County, Arizona*. Archaeological Research Services Inc. Report No. 98:09, Tempe.
- BATHURST, R.C. 1971. *Carbonate sediments and their diagenesis*. Elsevier, Amsterdam, 620 pp.
- BAYHAM, F.E., HATCH, P., 1985. Hohokam and Salado animal utilization in the Tonto Basin. In : Rice, G. (Ed.) : *Studies in the Hohokam and Salado of the Tonto Basin*. Office of Cultural Resource Management 63, Arizona State University, Tempe, pp. 191-210.
- BAYHAM, F.E., MORRIS, D.H., SHACKLEY, M.S. (Eds.), 1986. *Prehistoric hunter gatherers of south-central Arizona: the Picacho reservoir Archaic project*. Arizona State University Anthropological Field Studies 13, Tempe, 527 pp.
- BAYMAN, J.M., 2001. The Hohokam of southwest North America. *Journal of World Prehistory* 15(3) : 257-311.
- BAYMAN, J.M., FISH, S.K., 1992. Reservoirs and locational shifts in Sonoran desert subsistence. In : Croes, D.R., Hawkins, R.A. (Eds.) : *Long-term subsistence change in prehistoric North America*. Research in Economic Anthropology, Supplement 6, JAI Press, Greenwich, pp. 267–306.
- BAYMAN, J.M., PALACIOS-FEST, M.R., HUCKELL, L.W., 1997. Botanical signatures of water storage duration in a Hohokam reservoir. *American Antiquity* 62 : 103-111.
- BAYMAN, J.M., PALACIOS-FEST, M.R., FISH, S.K., HUCKELL, L.W., 2004. The paleoecology and archaeology of long-term water storage in a Hohokam reservoir, Southwestern Arizona, U.S.A. *Geoarchaeology* 19(2) : 119-140.

- BECH, J., NAHON, D., PAQUET, H., RUELLAN, A., MILLOT, G., 1980. Sur l'extension géographique et climatique des phénomènes d'épigenie par la calcite dans les encroûtements calcaires. Exemple de la Catalogne. *C.R. Acad. Asi. Paris* 291 : 371-376.
- BEHRENSMEYER, A.K., TAUXE, L., 1982. Isochronous fluvial systems in Miocene deposits of northern Pakistan. *Sedimentology* 29 : 331-352.
- BENITO, G., SÁNCHEZ-MOYA, Y., SOPEÑA, A., 2003. Sedimentology of high-stage flood deposits of the Tagus River. *Sedimentary Geology* 157(1-2) : 107-132.
- BENNETT, K.D. 1994. Confidence intervals for age estimates and deposition times in late-Quaternary sediment sequences. *The Holocene* (4) : 337-348.
- BENSON, L., KLIEFORTH, H., 1989. Stable isotopes in precipitation and ground water in the Yucca Mountain region, southern Nevada: paleoclimatic implications. *American Geophysical Union Geophys. Monography* 55 : 41-59.
- BENSON, L., KASHGARIAN, M., RYE, R., LUND, S., PAILLET, F., SMOOT, J., KESTER, C., MENSING, S., MEKO, D., LINDSTROM, S., 2002. Holocene multidecadal and multicentennial droughts affecting northern California and Nevada. *Quaternary Science Reviews* 21 : 659-682.
- BERGER, J.-F., 1996. Climat et dynamique des agrosystèmes dans la moyenne vallée du Rhône. In : *APDCA* (Ed.) : *Le IIIème siècle en Gaule narbonnaise. Données régionales sur la crise de l'Empire*. Sophia Antipolis, pp. 299-332.
- BERGER, J.-F., 2000. Les fossés bordiers historiques et l'histoire agraire rhodanienne. *Etudes rurales. La très longue durée* 153-154 : 59-90.
- BERGER, J.-F., 2003. Les facteurs de l'érosion: modes d'analyse et conceptualisation des processus. In : van der Leeuw, S., Favory, F., Fiches, J.-L. (Eds.) : *Archéologie et systèmes socio-environnementaux. études multiscalaires sur la vallée du Rhône dans le programme Archaeomedes*. CNRS Editions, Sophia Antipolis, pp. 43-161.
- BERGER, J.-F., JUNG, C., 1996. Fonction, évolution et "taphonomie" des parcelles en moyenne vallée du Rhône. Un exemple d'approche intégrée en archéomorphologie et en géoarchéologie. In : Chouquer, G. (Ed.) : *Les formes du paysage, tome 2*. Errance, Paris, pp. 95-112.
- BERGER, J.-F., JUNG, C., 1999b. Developing a methodological approach to the evolution of mid-rhodanian agro-systems during historical periods. In : Leveau, P., Walsch, K., Barker, G., Trément, F. (Eds.) : *The archaeology of the Mediterranean landscape : environmental reconstruction in Mediterranean landscape archaeology*. Actes du colloque Populus, Aix en Provence, Octobre 1995, Oxbow books, pp.155-168.
- BERGER, J.-F., JUNG, C., 1999. *Rapport "Fossés et voirie", lots 11-12-13-21 du TGV Méditerranée*, SRA Rhône-Alpes et PACA, 351 pp.
- BERGER, G.W., 2003. Luminescence chronology of late Pleistocene loess-paleosoil and tephra sequences near Fairbanks, Alaska. *Quaternary Research* 60 : 70-83.
- BERGER, G.W., PEREZ-GONZALEZ, A., CARBONELL, E., ARSUAGA, J.L., DE CASTRO, J.M.B., KU, T.L., 2008. Luminescence chronology of cave sediments at the Atapuerca paleoanthropological site, Spain. *Journal Human Evolution* 55 : 300-311.

- BERGER, G.W., MURRAY, A.S., HAVHOLM, K.G., 2003. Photonic dating of Holocene back-barrier coastal dunes, northern North Carolina, USA. *Quaternary Science Reviews* 22 : 1043–1050.
- BERKES, F., FOLKE, C., 2002. Back to the future: ecosystem dynamics and local knowledge. In : Gunderson, H., Holling, C.S. (Eds.): *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington D.C., pp. 121-146.
- BERNIGAUD N., G. GAUCHER, PURDUE L., BERGER, J.-F., a paraître. *Pour une histoire de l'hydraulique agricole : méthodologie et études de cas (Etats-Unis, France)*. Actes du colloque « Au fil de l'eau », 11-14 mars 2009, MSH de Clermont-Ferrand.
- BERTRAND, G., 1968. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 39 : 249-271.
- BERTRAND, G., 1975. Pour une histoire écologique de la France rurale. In : Duby, G., Wallon, A. (Eds.) : *Histoire de la France rurale, T. 1*. Editions du Seuil, Paris, pp 34-113.
- BERTRAND, G., BEROUTCHACHVILI, N., 1978. *Le géosystème ou système territorial naturel*. Rev. Géogr. Pyrénées et du S. O., t. 49, fasc. 2, pp. 17-180.
- BECZE-DÉAK, J., LANGOHR, R., VERRECCHIA, E. P., 1997. Small scale secondary CaCO₃ accumulations in selected sections of the European loess belt. Morphological forms and potential for paleoenvironmental reconstruction. *Geoderma* 76 : 221–252.
- BETANCOURT, J.L., 1990. *Tucson's Santa Cruz river and the Arroyo legacy*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson.
- BETANCOURT, J.L., DEAN, J.S., HULL, H.M., 1986. Prehistoric long-distance transport of construction beams, Chaco Canyon, New Mexico. *American Antiquity* 51 : 370–375.
- BLAIR, T.C., 2000. Sedimentology and progressive tectonic unconformities of the sheetflood dominated Hell's Gate alluvial fan, Death Valley, California. *Sedimentary Geology* 132 : 233-262.
- BLAKE, T.M., LEBLANC, S.A., MINNIS, P.E., 1986. Changing settlement and population in the Mimbres Valley, SW New Mexico. *Journal of Field Archaeology* 13 : 439-464.
- BLAKE, W.P., 1902. The caliche of southern Arizona; an example of deposition by the vadose circulation. *Am. Inst. Min. Met. Engineers Trans.* 31 : 220-226.
- BLANCANEAUX, P., 1990. Encroûtements calcaires dans les altérations de matériaux marno-gréseux aptiens de la dorsale tunisienne (Cjebel Bargou). Mise en évidence des phénomènes d'épigénie. *Cahier ORSTOM, Série Pedologie*, Vol. XXV (3) : 213-230.
- BLANK, H.R., TYNES, E.W., 1965. Formation of caliche in situ. *Geological Society Bulletin America* 76 : 1387-1392.
- BLOOM, A.L., 1978. *Geomorphology. a systematic analysis of late Cenozoic landforms*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 510 pp.
- BODERGAT, A.M., 1983. Les ostracodes, témoins de leur environnement. Approche chimique et écologie en milieu lagunaire et océanique. *Document des Laboratoires de Géologie de Lyon* 88, Lyon, 246 pp.

- BODERGAT, A.M, CHARBONNEL, G., RIO, M., KEYSER, D., 1993. Chemical composition of *Leptocythere psammophila* (Crustacea Ostracoda) as influenced by winter metabolism and summer supplies. *Marine Biology* 117 : 53-62.
- BOHRER, V.L., 1971. Paleoeecology of Snaketown. *The Kiva* 36(3) : 11-19.
- BOHRER, V.L., 1970. Ethnobotanical aspects of Snaketown. A Hohokam village in Southern Arizona. *American Antiquity* 35 : 413-43.
- BOHRER, V.L., 1976. Review. In: Doelle, W.H. (Ed.) : *Desert resources and Hohokam subsistence. The CONOCO Florence Project*. Arizona State Museum Archaeological Series 103, Tucson , pp. 245-250.
- BOHRER, V.L., 1984. Domesticated and wild crops in the CAEP Area. In : Spoerl, P.M., Gumerman, G.J (Eds.): *Prehistoric cultural development in central Arizona. archaeology of the upper New River region*. Center for Archaeological Investigations Occasional Paper 5, Southern Illinois University, Carbondale, pp. 183- 259.
- BOHRER, V.L., 1987. The plant remains from La Ciudad, a Hohokam site in Phoenix. In : Kisselburg, R., Shears, B. (Eds): *Specialized studies in the economy, environment, and culture of La Ciudad, Part III. Environmental data*. Arizona State University Anthropological Field Papers 20, Tempe, pp 67-202.
- BOHRER, V.L., 1991. Recently recognized cultivated and encouraged plants among the Hohokam. *The Kiva* 56(3): 227-235.
- BOHRER, V.L., 1992. New life from ashes II. A tale of burnt brush. *Desert Plants* 10(3) : 122-125.
- BOHRER, V.L., 1997. Pieces of the landscape. Flotation analysis of plant remains from sites in the vicinity of Kitty Jo Canyon. In : Woodall, G.R., Barz, D.D., Neeley, M.P. (Eds.) : *Rocks, roaster, and ridgetops. Data recovery across the Pioneer road landscape, State route 87-segment F, Maricopa and Gila counties, Arizona*. A.R.S. Project Report 94.77B, Tempe, pp. 295-314.
- BOISSINOT, P., 1997. Archéologie des façons culturelles. In : APDCA (Ed.): *La dynamique des paysages protohistoriques, antiques, médiévaux et modernes, XVII Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes*, Sophia Antipolis, pp. 85-112.
- BOLTON, H.E., 1948. *Kino's historical memoir of Pimería Alta*. Copie de l'édition de 1919, 2 Vol. University of California Press, Berkeley.
- BOLTON, H.E., 1930. *Anza's California expedition. Font's complete diary. Vol 2: Opening a land route to California*. University of California Press, Berkeley, 303 pp.
- BOLTON, H.E., 1930. *Anza's California expedition. Font's complete diary. Vol 1: An Outpost of an Empire*. University of California Press, Berkeley, 260 pp.
- BONNY, A.P., 1976. Recruitment of pollen to the seston and sediment of some Lake District lakes. *Journal Ecology* 64 : 859-887.
- BONTRAGER, D., 1989. *Archaeological testing and data recovery at site Az U. 9. 75, a prehistoric canal segment located along the north side of Bell Butte in Tempe, Maricopa County, Arizona*. ARS Project IR-10-3 (198) 86-39, 88-21, Tempe, 29 pp.
- BOULET, R., 1964. *Etude pédologique du Niger Central*. Centre ORSTOM de Hann-Dakar, 215 pp.

- BOULIN, J., 1977. *Méthodes de la stratigraphie et géologie historique*. Edition Masson, Collections Sciences de la Terre, Paris, 226 pp.
- BONNEAU, M., 1979. La notion de pédoclimat. In: Bonneau, M., Souchier, B. (Eds.): *Pédologie, Tome 2*. Edition Masson, Paris, pp. 329-332.
- BONNEAU, M., SOUCHIER, B., 1994. *Pédologie : Constituants et propriété du sol. Tome 2*. Edition Masson, Paris, 665 pp.
- BOSERUP, E., 1965. *The conditions of agricultural growth. The economics of agrarian change under population pressure*. Allen and Unwin, London, 128 pp.
- BOSTWICK, T.W., 1993. *An archaeological survey of the Alvord park project*. City of Phoenix Archaeology Office Report No.PGM-93-19, Phoenix.
- BOYADGIEV, T.G., 1974. *Contribution to the knowledge of gypsiferous soils*. FAO AGON/SF/SYR/67/522, Rome.
- BRADFIELD, M., 1971. *The changing pattern of Hopi agriculture*. Royal Anthropological Institute of Great Britain and Ireland, London, 66 pp.
- BRADLEY, W.G., DEACON, J.E., 1967. The biotic communities of southern Nevada. In : Cheatham, N. H. (Ed.) : *An annotated list of California habitat types*. University of California Natural Land and Water Reserve System, pp 201-295.
- BRADLEY, B., 1999. A Soho phase canal adjacent to Pueblo Grande, Phoenix, Arizona. *The Kiva* 65(1) : 35-62.
- BRAVARD, J.-P., 1992. Les rythmes d'évolution géomorphologique des vallées françaises au Tardiglaciaire et à l'Holocène. *Bulletin Association Géographique Française* 3 : 207-226.
- BRAVARD, J.-P., PETIT, F., 2000. *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Collection U, Armand Colin, Paris, 220 pp.
- BRAVARD, J.-P., PRESTREAU, M. (Eds.), 1997. *Dynamique du paysage. Entretiens de géoarchéologie*. Documents d'Archéologie en Rhône-Alpes 15 (DARA), Lyon, 282 pp.
- BRAZEL, A., EVANS, K.E., 1984. Major storms and floods in Arizona, 1862-1983. Laboratory of Climatology. Climatological Publications, Precipitation series 6, Tempe, Arizona State University.
- BRENNER, I.S., 1974. A surge of maritime tropical air-Gulf of California to the southwestern United States. *Monthly Weather Review* 102 : 375-389.
- BRESSON, L.-M., VALENTIN, C., 1994. Soil surface crust formation . Contribution of micromorphology. In : Ringrose-Vaose, A.J., Humphreys, G.S. (Eds.) : *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Development in Soil Science 22, Elsevier Science, The Netherlands, pp. 737-762.
- BREWER, R., 1964. *Fabric and mineral analysis of soils*. J. Wiley and Sons, New York, 470 pp.
- BREWER, R., 1972. The basis of interpretation of soil micromorphological data. *Geoderma* 8 (2-3) : 81-94.

- BREWER, R., SLEEMAN, J.R., 1960. Soil structure and fabric. Their definition and description. *Journal of Soil Science* 11 : 172-185.
- BREWER, W.H., 1977. *Friar Bringas reports to the King. Methods of indoctrination on the Frontier of New Spain, 1796-1799*. University of Arizona Press, Tucson, 177 pp.
- BRIGGS, J.M., SPIELMANN, K.A., SCHAAFSMA, H., KINTIGH, K.W., KRUSE, M., MOREHOUSE, K., SCHOLLMAYER, K., 2006. Ecology needs archaeologists, archaeology needs ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4 : 180-188.
- BROCHIER, J.-E., 1991. Géoarchéologie du monde agropastoral. In : Guilaine, J. (Ed.): *Pour une archéologie agraire*. A. Colin, Paris, pp. 303-322.
- BROOKFIELD, H.C., 2001. *Exploring agrodiversity*. Columbia University Press, New York, 608 pp.
- BROWN, C.N., 1956. The origin of caliche on the northeastern Llano Estacada Texas. *Journal of Geology* 64 : 433-457.
- BRUNELLE, A., ANDERSON, R.S., 2003. Sedimentary charcoal as an indicator of late-Holocene drought in the Sierra Nevada, California, and its relevance to the future. *The Holocene* 13 : 21-28.
- BRUSH, G.S., 1994. The Chesapeake Bay estuary system. In: Roberts, N. (Ed.): *The changing global environment*. Blackwell, Oxford, UK, pp. 297-416.
- BRYAN, K., 1920. Origin of rock tanks and charcos. *American Journal of Science* 50 (4) : 188-206.
- BUDEL, J., 1982. *Climate geomorphology*. Princeton University press, Princeton, 443 pp.
- BULL, W.B., 1991, *Geomorphic response to climate change*. Oxford Press, New York, 326 pp.
- BULL, W.B., 1997. Discontinuous ephemeral streams. *Geomorphology* 19 : 227-276.
- BULLOCK, P., FEDOROFF, N., JONGERIUS, A., STOOPS, G., TURSINA, T., BABEL, U. , 1985. *Handbook for soil thin section description*. Waine Research Publications, Albrighton, Wolverhampton, U.K., 152 pp.
- BURNS, B.T., 1983. *Simulated Anasazi storage behavior using crop yields reconstructed from tree ring: Dates A.D. 652-1968*. Ph.D. Dissertation. Department of Anthropology, University of Arizona.
- BUREAU, P., ROEDERER, P., 1960. Contribution à l'étude des sols gypseux de la partie sud du Golfe de Gabès. *Bull. Assoc. France Etude Sol* 8 : 145-149.
- BURK, J.H., 1977. Sonoran desert vegetation. In : Barbour, M. C., Major, J. (Eds.): *Terrestrial vegetation of California*. John Wiley&Sons, New York, pp. 869-889.
- BURKHAM, D.E., 1970. *Precipitation, streamflow, and major floods at selected sites in the Gila River drainage basin above Coolidge Dam, Arizona*. Geological Survey Professional Paper 655-B, 33 pp.
- BURKHAM, D.E., 1972. *Channel changes of the Gila River in Safford Valley, Arizona, 1846-1970*. United States Geological Survey Professional Paper 655G, 24 pp.

- BURNOUF, J., CARCAUD, N., CUBIZOLLE, H., GARCIN, M., TRÉMENT, F., VISET, L., 2003. Interactions sociétés / milieux dans le bassin versant de la Loire depuis le Tardiglaciaire jusqu'à la période industrielle. In : Muxart, T. (Ed.) : *Des milieux et des hommes: fragments d'histoires croisées*. Elsevier, Paris, pp. 65-77.
- BUSCH, C., MARK RAAB, L., BUSCH, R., 1976. Q=A.V. Prehistoric water canals in southern Arizona. *American Antiquity* 41(4) : 531-553.
- BUTZER, K.W., 1971. *Environment and archaeology. An ecological approach to prehistory* (2^{ème} ed.). Aldine, Chicago, 703 pp.
- BUTZER, K.W., 1976. *Early irrigation in Egypt. A study in cultural ecology*. University of Chicago Press, Chicago, 149 pp.
- BUTZER, K.W., 1982. *Archaeology as human ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, 380 pp.
- BUTZER, K.W., 1996. Irrigation, raised fields, and state management. Wittfogel redux?. *Antiquity* 70 : 200-204.

C

- CABLE, J.S., HENRY, S.L., DOYEL, D.E. (Eds.), 1982. *City of Phoenix, archaeology of the original townsite. Blocks I and 2*. Soil Systems Publications in Archaeology 1, Phoenix.
- CABLE, J.S., HENRY, S.L., DOYEL, D.E. (Eds.), 1983. *City of Phoenix, archaeology of the original townsite. Block 28-North*. Soil Systems Publications in Archaeology 2, Phoenix.
- CABLE, J.S., HENRY, S.L., DOYEL, D.E. (Eds.), 1984. *City of Phoenix, archaeology of the original townsite. The Murphy's addition*. Soil Systems Publications in Archaeology 3, Phoenix.
- CABLE, J.S., DOYEL, D.E., 1984. The implications of field houses for modelling Hohokam agricultural systems. In : Cable, S., Henry, S.L., Doeyl, D.E. (Eds.) : *City of Phoenix, Archaeology of the Original Townsite. The Murphy's Addition*. Soil Systems Publications in Archaeology 8, Phoenix, pp 259-280.
- CABLE, J.S., DOYEL, D.E., 1985. Hohokam land-use patterns along the terraces of the lower Salt River Valley. In : Dittert, A.E., Dove, D.E. (Eds.) : *The Central Phoenix project. Proceedings of the 1983 Hohokam Symposium*. Arizona Archaeological Society Occasional Paper 2, Phoenix, pp. 263-310.
- CABLE, J.S., DOYEL, D.E., 1987. Pioneer Period village structure and settlement pattern in the Phoenix Basin. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *The Hohokam Village. Site structure and organization*. American Association for the Advancement of Science, Glenwood Springs, pp. 21-71.
- CABLE, J.S., MITCHELL, D., 1988. La Lomita Pequena in regional perspective. In : Mitchell, D. (Ed.) : *Excavations at La Lomita Pequena, a Santa Cruz/Sacaton hamlet in the Salt River Valley*. Soil System Publication in Archaeology 10, Phoenix, pp. 395-446.
- CADOT, H.M., KAESLER, R.L., 1977. *Magnesium content of calcite in carapaces of benthic marine Ostracoda*. University of Kansas Paleontological Contributions 87, Lawrence, Kansas, pp. 1-23.

- CALVIN, R. (Ed.), 1951. *Lieutenant Emory reports. Republication of 1848 edition entitled: Notes of a Military Reconnaissance, by Lieut. Col. W.H. Emory.* University of New Mexico Press, Albuquerque.
- CAMMAS, C., WATTEZ, J., 1999. Approche micromorphologique. Méthode et applications aux stratigraphies archéologiques. In : Ferdière, A. (Ed.) : *La géologie : les Sciences de la Terre.* Editions Errance, Paris, pp. 139-153.
- CAMPBELL, C.J., 1970. Ecological implications of riparian vegetation management. *Journal of Soil and Water Conservation* 25 : 49-52.
- CAMPBELL, R.E., BAKER, M.B., FOLLIOTT, P.F., LARSON, F.R., AVERY, C.C., 1977. *Wildfire effects on a ponderosa pine ecosystem: an Arizona case study.* USDA Forest Service Research Paper RM-191. Fort Collins, Colorado: Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station: 12 pp.
- CAMPY, M., MACAIRE, J.-J., 2003. *Géologie de la surface. Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux (2^{ème} ed.).* Dunod, Paris, 440 pp.
- CARLIN, G., 1981. Life on the Saint Johns Ditch. *Journal of Arizona History* 22 : 159-176.
- CASTETTER, E., BELL, W., 1942. *Pima and Papago agriculture.* University of New Mexico Press, Albuquerque, 244 pp.
- CAYAN, D.R., WEBB, R.H., 1992: El Niño/Southern Oscillation and streamflow in the western United States. In: Diaz, H.F., Markgraf, V. (Eds.): *Historical and paleoclimate aspects of the Southern Oscillation.* Cambridge University Press, pp. 29–68.
- CENTRAL ARIZONA WATER SURVEY, 1993. *Central Arizona water control survey.* Army Corps of Engineer, Phoenix.
- CHARLES, C.J., GREENE, R.S., FORD, G.W., RENGASAMY, P., 1985. The effet of gypsum on porosity and crusting of two red duplex soils. *Australian Journal Soil Research* 23 : 467-479.
- CHARPIN, D., 2002. La politique hydraulique des rois paléo-babyloniens. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 57e année, pp. 545-559.
- CHAUDHURI, K., 1990. *Asia before Europe. Economy and civilization of the Indian Ocean from the rise of islam to 1750.* Cambridge University Press, Cambridge, p. 261.
- CHAYANOV, A.V., 1966. *The theory of peasant economy.* Irwin, Homewood, IL, 517 pp.
- CHEATHAM, N.H., HALLER, J.R., 1975. *An annotated list of California habitat types.* University of California Natural Land and Water Reserve System, 80 pp.
- CHEN, Y., TARCHITZKY, J., BROUWER, J., MORIN, J., BANIN, A., 1980. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Science* 130 : 49-55.
- CHENAULT, M. L., 1993. The Hohokam Post-Classic Polvorón Phase. In: Greenwald, D.H., Ballagh, J.H. (Eds.): *Early desert farming and irrigation settlements: archaeological investigations in the phoenix sky harbor center. Vol. 4: Special Studies, synthesis and conclusions.* SWCA Environmental Consultants, Archaeological Report No. 93-17, Flagstaff, Arizona, pp. 117–140.
- CHENAULT, M.L., 1996. *The Polvorón phase and the Hohokam collapse.* Ph.D. Dissertation, University of Colorado, Department of Anthropology, Boulder.

- CHIN, E.H., ALDRIDGE, B.N., LONGFIELD, R.J., 1991. *Floods of February 1980 in southern California and central Arizona*. USGS, Washington D.C., 126 pp.
- CHOUQUER, G. (ED.), 1996-1997. *Les formes du paysage*, 3 volumes. Editions Errance, collection Archéologie Aujourd'hui, Paris.
- CHOUQUER, G., FAVORY, F., 1991. *Les Paysages de l'Antiquité, terres et cadastres de l'Occident romain IVe siècle avant J.-C.-IIIe siècle après J.-C.* Editions Errance, Paris, 243 pp.
- CHORLEY, R.J., SCHUMM, S.A., SUGDEN, D.E., 1984. *Geomorphology*, Methuen, London, 605 pp.
- CHRISTENSON, G.E., 1985. *Quaternary geology of the Montezuma creek-lower recapture creek area, San Juan county, Utah*. Utah Geological and Mineral Survey Special Studies 64, Salt Lake City, pp. 3-31.
- CIOLEK-TORRELLO, R., WILCOX, D., 1988. *Hohokam settlement along the slopes of the Picacho Mountains, Tucson aqueduc project. Vol.6: Synthesis and conclusions*. Museum of Northern Arizona Research Paper 35, Flagstaff.
- CIOLEK-TORRELLO, R., WHITTLESEY, S.M., WELCH, J.R., 1994. A synthetic model of prehistoric land use. In : Ciolek-Torrello, R., Welch, J.R. (Eds) : *The Roosevelt rural sites study. Vol. 3: Changing land use in the Tonto basin*. Statistical Research Technical Series 28, Tucson, pp. 437-472.
- CIOLEK-TORRELLO, R., HUBER, E.K., NEILY, R.B., 1999. *Investigations at Sunset Mesa Ruin: archaeology at the confluence of the Santa Cruz and Rillito Rivers*. Statistical Research, Tucson, 310 pp.
- CLARK, J.J., 1995. The role of migration in social change. In : Elson, M. D., Stark, M. T., Gregory, D. A. (Eds.) : *The Roosevelt Community Development Study. New Perspectives on Tonto Basin Prehistory*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 15, Tucson, pp. 369-384.
- CLARK, J.J., 2001. *Tracking prehistoric migration. Pueblo settlers among the Tonto Basin Hohokam*. Anthropological Papers of the University of Arizona 65, 124 pp.
- CLARK, J.S., 1988. Effect of climate change on fire regimes in northwestern Minnesota. *Nature* 334: 233-235.
- CLARK, T.C., HENDERSON, T.K., 2001. *Archaeological investigations along the sixty-seventh avenue and Baseline road watermains, Phoenix, Arizona*. Desert Archaeology Technical Report No. 2001-13, Phoenix, 32 pp.
- CLARK, J.J., WOODSON, M.K., SLAUGHTER, M.C., 2004. Those who went to the land of the sun : Puebloan migrations into southeastern Arizona. In : Wallace, H.D. (Ed.) : *The archaeology of a land between: regional dynamics in the history and prehistory of southeastern Arizona*. University of Mexico Press, Albuquerque.
- CLIFTON, H.E., 1982. Estuarine deposits. In : Scholle, P.A., Spearing, D. (Eds) : *Sandstone depositional environments*. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK, pp. 179-189.
- CODY, R.D., 1979. Lenticular gypsum: occurrences in nature and experimental determinations of effects of soluble green plant material on its formation. *Journal of Sedimentary Petrology* 49 : 1015-1028.

- CODY, R.D., CODY, A. M., 1988. Gypsum nucleation and crystal morphology in analog saline terrestrial environments. *Journal of Sedimentary Petrology* 58 : 247-255.
- COJAN, I., 1993. Alternating fluvial and lacustrine sedimentation. tectonic and climatic controls (Provence basin, S. France, Upper Cretaceous/Palaeocene). *Special Publications International Association Sedimentologists* 17 : 425-438.
- COLE, K.L., WEBB, R.H., 1985. Late Holocene vegetation changes in Greenwater valley Mojave desert, California. *Quaternary Research* 23 : 227-235.
- COOK, E.R., WOODHOUSE, C.A., EAKIN, C.M., MEKO, D.M., STAHL, D.W., 2004. Long-term aridity changes in the western United States. *Science* 306 : 1015-1018.
- COOK, J.P., PEARTHREE, P.A., ONKEN, J. YOUNBERG, A., BIGIO, E.R., 2009. *Mapping of Holocene river alluvium along the Verde River, Central Arizona*. Arizona Geological Survey, 54 pp.
- COOK, J.P., PEARTHREE, P.A., ONKEN, J. YOUNBERG, A., BIGIO, E.R., 2010. *Mapping of Holocene river alluvium along Oak creek, Wet Beaver creek, West Clear creek, Fossil creek, and the East Verde river, central Arizona*. Arizona Geological Survey, 40 pp.
- COOKE, R.U., REEVES, R.W., 1976. *Arroyos and environmental change in the American Southwest*. Clarendon Press, Oxford, 226 pp.
- COOLEY, M.E., 1962. *Late Pleistocene and recent erosion and alluviation in parts of the Colorado River system, Arizona and Utah*. U.S. Geological Survey Professional Paper 450-B, p. B48-B50.
- COOPERRIDER, C.K., SYKES, G.G., 1938. The relationship of streamflow to precipitation on the Salt River watershed above Roosevelt Dam. *Arizona Agricultural Experiment Station Technical Bulletin* 76, Tucson, 69 pp.
- CORDELL, L.S., GUMERMAN, G.J., 1989. Cultural interaction in the prehistoric Southwest. In : Cordell, L.S., Gumerman, G.J. (Eds.) : *Dynamics of Southwest Prehistory*. Smithsonian Institution Press, Washington D.C., pp.1-17.
- COSTANTINI, E.A.C., PELLEGRINI, S., VIGNOZZI, N., BARBETTI, R., 2005. Micromorphological characterization and monitoring of internal drainage in soils of vineyards and olive groves in central Italy. *Geoderma* 131 (3-4) : 288-403.
- COUDÉ-GAUSSEN, C. 2002. Les Formations superficielles des déserts chauds et de leurs marges. In : Miskovsky, J.-C. (Ed) : *Géologie de la Préhistoire : méthodes, techniques, applications*. GéoPré, Presses Universitaires de Perpignan, Perpignan, pp.125-151.
- COURTY, M.A., 1986. Morphology and genesis of soil surface crusts in semi-arid conditions (Hissar region, north-west India). In : Callebaut, F., Gabriels, D., De Boodt, M. (Eds.): *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Flanders Research Center for Soil erosion and Soil Conservation, Ghent, Pays-Bas, pp. 32-39.
- COURTY, M.A., 1990. *Environnements géologiques dans le nord-ouest de l'Inde. Contraintes géodynamiques au peuplement protohistorique*. Thèse d'Etat, Université de Bordeaux, 328 pp.
- COURTY, M.A., 1994. Le cadre paléogéographique des occupations humaines dans le bassin du Haut-Khabour, Syrie du Nord-Est. Premiers résultats. *Paléorient* 20 : 21-59.

- COURTY, M.A., FÉDOROFF, N., 1985. Micromorphology of recent and buried soils in a semi-arid region of Northwestern India. *Geoderma* 35 : 287-332.
- COURTY, M.A., FÉDOROFF, N., 1999. *L'Apport de la micromorphologie des sols à la reconstitution des paléopaysages (application au bassin méditerranéen pour la période 3000 av. J.C. - 1800 ap. J.C.)*. Environmental reconstruction in Mediterranean landscape archaeology. Oxford, pp 55-65.
- COURTY M.A., FEDOROFF N., 2002. Micromorphologie des sols et sédiments archéologiques. In: Miskovsky J.-C. (Ed.): *Géologie de la Préhistoire*. GEOPRE, Presses Universitaires de Perpignan, pp. 511-534.
- COURTY, M.A., GOLDBERG, P., MACPHAIL, R.I., 1989. *Soils and micromorphology in archaeology*. Cambridge Manuals in Archaeology, Cambridge University Press, Cambridge, 344 pp.
- COURTY, M.A., TRICHET, J., 1985. Application de la *micromorphologie à la caractérisation des sols anciens cultivés*. Deuxième colloque franco-soviétique sur l'archéologie de l'Asie centrale des origines à l'Age du Fer, 16-26 novembre 1985.
- COURTY, M.A., NORBERG, P., 1985. Comparison between buried uncultivated and cultivated Iron Age soils of the west coast of Jutland, Denmark. *Iskos* 5 : 57-69.
- CRAIG, D.B., 1995. The social consequences of irrigation agriculture. A perspective from Meddler Point. In : Elson, M D., Stark, M.T., Gregory, D.A. (Eds.) : *The Roosevelt community development study. New perspectives on Tonto basin prehistory*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 15, Tucson, pp. 227-249.
- CRAIG, D.B., 2000. The demographic implications of architectural change at the Grewe site (AZ AA:2:2(ASM)). In : Doyel, D., Fish, S., Fish, P. (Eds) : *The Hohokam village revisited*. Southwestern and Rocky Mountain Division of the American Association for the Advancement of Science, Glenwood Springs, CO, pp. 139-166.
- CRAIG, D.B., 2001. The demographic implications of architectural change at Grewe. In : Craig, D. (Ed.) : *The Grewe archaeological research project. Vol. 3: Synthesis*. Northland Research Anthropological Papers 99-1., Tempe, pp. 37-49.
- CROSSWHITE, F.S., 1981. Desert plants, habitat and agriculture in relation to the major pattern of cultural differentiation in the O'odham People of the Sonoran desert. *Desert Plants* 3(2) : 47-76.
- CROWDER, A., CUDDY, D., 1973. Pollen in a small river basin, Wilton Creek, Ontario. In : Birk, H., West, R.G. (Eds.) : *Quaternary plant ecology*. Oxford University Press, Oxford, U.K., pp. 61-77.
- CROWN, P.L., 1983. Introduction. Field houses and farmsteads in south-central Arizona. In : Teague, L., Crown, P. (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona project. Vol. 5: Small habitation sites on Queen creek*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, Tucson, pp. 3-22.
- CROWN, P.L., 1984. Hohokam subsistence and settlement in the Salt-Gila Basin. In : Teague, L., Crown, P. (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona project. Vol. 9: Synthesis and conclusions*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, Tucson, pp. 87-14.
- CROWN, P.L., 1987. Classic period Hohokam settlement and land use in the Casa Grande Ruins area, Arizona. *Journal of Field Archaeology* 14 : 147-162.

- CROWN, P.L., 1991. The role of exchange and interaction in Salt-Gila basin Hohokam prehistoric. In : Gummerman, G.J. (Ed.) : *Exploring the Hohokam. Prehistoric desert peoples of the american southwest*. University of Mexico Press, Albuquerque, pp. 383-416.
- CUMMINGS, L.S., 1988. Pollen analysis. In: Greenwald, D.H. (Ed.) : *Investigations of the Baccharis site and extension Arizona canal*. Museum of Northern Arizona Research Paper 40, Flagstaff, pp. 159-175.
- CURRY, R.R., 1969. Holocene climatic and glacial history of the central Sierra Nevada, California. In : Schumm, S.A., Bradley, W.C. (Eds.): *United States contribution to Quaternary research*. Geological Society of America Special Paper 123, pp 1-47.
- CUSHING, F., 1890. Preliminary notes on the origin, working hypothesis and primary researches of the Hemenway southwestern archaeological expedition. In : Kuhl, W. (Ed.) : *Congrès International des Americanistes*. Berlin, pp. 151-194.

D

- DAMP, J.E., HALL, S.A., SMITH, S., 2002. Early irrigation on the Colorado Plateau near Zuni Pueblo, New Mexico. *American Antiquity* 67 : 665-676.
- DAMP, J.E., 2007. Zuni emergent agriculture: economic strategies and the origins of Zuni. In : Gregory, D.A., Wilcox, D.R (Eds.) : *Zuni origins: toward a new synthesis of Southwestern archaeology*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 118-132.
- DAMON, P.E., BIKERMAN, M., 1964. Potassium- argon dating of post-Laramide plutonic and volcanic rocks within the Basin and Range Province of southeastern Arizona and adjacent areas. *Arizona Geological Society Digest* 7 : 63-78.
- DANIELS, J.M., 2003. Floodplain aggradation and pedogenesis in a semiarid environment. *Geomorphology* 56 (3-4) : 225-242.
- DARLING, J.A., RAVESLOOT, J.C., WATERS, M.R., 2002. *Village drift, riverine settlement, and the case for Hohokam-Piman continuity*. Paper presented at the symposium: Visible archaeology on the Gila River Indian Reservation, 67th Annual Meeting of the Society for American Archaeology, Denver.
- DARLING, J.A., RAVESLOOT, J.C., WATERS, M.R., 2004. Village drift and riverine settlement: modeling Akimel O'odham land use. *American Anthropologist* 106 : 282-295.
- DART, A., 1983. Agricultural features. In: Teague, L.S., Crown, P.L. (Eds.): *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct. Central Arizona project. Vol. III: Specialized activity sites*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, Tucson, pp. 345-655.
- DART, A., 1986. Sediments accumulation along Hohokam canals. *The Kiva* 51(2) : 63-84.
- DART, A., 1989. *Prehistoric irrigation in Arizona. A component of the Arizona historic preservation plan*. Center for Desert Archaeology Technical Report 89-7, Tucson, 73 pp.
- DAVIS, A.P., 1892. Irrigation near Phoenix. *Phoenix Daily Herald*, October 3 1892, Paver 2, 55.

- DAVIS, A.P., 1897. *Irrigation near Phoenix, Arizona*. US. Geological Survey Water-Supply Paper 2, 98 pp.
- DAVIS, A.P., 1902. *Water storage on the Salt River, Arizona*. US. Geological Survey Water Supply Paper 73, 54 pp.
- DAVIS, L., 2007. *Archaeological monitoring at 3932 W. Lynne Lane/Avenue, Phoenix, Maricopa County, Arizona*. Carter Burgess Report No. 2007-010, Phoenix.
- DAVIS, O.K., SHAFER, D.S., 1992. A Holocene climatic record for the Sonoran desert from pollen analysis of Montezuma Well, Arizona, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 92 : 107-119.
- DAVIS, O.K., 1994. The correlation of summer precipitation in the southwestern U.S.A. with isotopic records of solar activity during the Medieval warm period. *Climate change* 26 (2-3) : 271-287.
- DAVIS, P., 1988. Holocene glacier fluctuations in the American Cordillera. *Quaternary Science Reviews* 7 : 129-157.
- DAVIS, W.M., 1903. The mountain ranges of the Great Basin. *Harvard Museum of Comparative Zoology Bulletin* 42 : 129-177.
- DAVIDSON, D.A., CARTER, S.P., 1998. Micromorphological evidence of past agricultural practices in cultivated soils. The impact of a traditional agricultural system on soils in Papa Stour, Shetland. *Journal of Archaeological Science* 25 : 827-838.
- DIEHL, M.W., 2003. Prehistoric subsistence strategies and the macrobotanical assemblage. In : Henderson, T.K. (Ed.) : *Hohokam farming on the Salt River floodplain. Excavation at the Sky Harbor Airport north runway*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 42, Tucson.
- DEAN, J.S., 1988. Dendrochronology and paleoenvironmental reconstruction on the Colorado Plateaus. In: Gumerman, G.J. (Ed.): *The Anasazi in a changing environment*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 119-167.
- DEAN, J.S., 1988b. A model of Anasazi behavioral adaptation. In : Gumerman, G.J. (Ed.) : *The Anasazi in a changing environment*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 25-44.
- DEAN, J.S., 1991. Thoughts on Hohokam chronology. In : Gumerman, G.J. (Ed.) : *Exploring the Hohokam. Prehistoric desert peoples of the American southwest*. University of New Mexico, Albuquerque, pp. 231-278.
- DEAN, J.S., DOELLE, W.H., ORCUTT, J., 1994. Adaptive stress. Environment and demography. In : Gumerman, G.J. (Ed.) : *Themes in southwest prehistory*. School of American Research Press, Santa Fe, pp. 53-86.
- DEAN, J.S., SLAUGHTER, M., BOWDEN, D. I., 1996. Desert dendrochronology. Tree-ring dating prehistoric sites in the Tucson Basin. *The Kiva* 62 : 7-27.
- DEAN, R.M., 2005. Site use intensity, cultural modification of the environment, and the development of agricultural communities in Southern Arizona. *American Antiquity* 70 : 403-431.
- DEAN, R.M., 2007. Hunting intensification and the Hohokam "collapse". *Journal of Anthropological Archaeology* 26 : 109-132.

- DEARING, J., 1994. *Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 System*. Chi Publishing, Kenilworth, England, 54 pp.
- DEARING, J.A., DANN, R.J.L., LEES, J.A., LOVELAND, P.J., MAHER, B.A., O'GRADY, K., 1996. Frequency dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International* 124 : 228–240.
- DEAVER, W.L., 1997. Chronological issues of the LVAP. In: Whittlesey, S.M., Ciolek-Torrello, R.S., Altschul, J.H. (Eds.): *Vanishing river. Landscapes and lives of the lower Verde valley*. Statistical Research Inc., Tucson, pp. 447–490.
- DEAVER, W.L., CIOLEK-TORELLO, R., 1995. Early Formative period chronology for the Tucson Basin. *The Kiva* 60(4) : 481–530.
- DEBOWSKI, S.S., 1974. Appendix B. A preliminary report on the flotation analysis from the Escalante Ruin Group. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *Excavations in the Escalante Ruin group, Southern Arizona*, Arizona State Museum, Tucson.
- DEBOWSKI, S.S., GEORGE, A., GODDARD, R., MULLON, D., 1976. *An archaeological survey of the Buttes reservoir*. Arizona State Museum Archaeological Series 93, Tucson, 228 pp.
- DELORME, L.D., 1968. Pleistocene freshwater Ostracode from Yukon, Canada. *Canadian Journal of Zoology* 46 : 859-876.
- DELORME, L.D., 1971. Freshwater ostracodes of Canada. Part V. Families Limnocytheridae and Loxoconchidae. *Canadian Journal of Zoology* 49 : 43-64.
- DELORME, L.D., 1989. Methods in Quaternary Ecology 7. Freshwater Ostracodes. *Geoscience Canada* 16 : 85–90.
- DEMENOCAL, P.B., 2001. Cultural responses to climate change during the late Holocene. *Science*, 292 (5517) : 667–673.
- DENEVAN, W.M., 2001. *Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes*. Oxford University Press, Oxford, 432 pp.
- DEVILLERS, B., 2005. *Morphogénèse et anthropisation holocènes d'un bassin versant semi-aride*. Thèse de Géographie physique, Université Aix-Marseille I, 420 pp.
- DIAZ, H.F., QUAYLE, R.G., 1980. The climate of the United States since 1895. Spatial and temporal changes. *Monthly Weather Review* 108 : 249-266.
- DIEHL, M.W., 2003. Prehistoric subsistence strategies and the macrobotanical assemblage. In: Henderson, T.K. (Ed.): *Hohokam farming on the Salt River floodplain: excavations at the Sky Harbor Airport North Runway*. Center for Desert Archaeology Anthropological Paper 42, Pueblo Grande Museum Anthropological Paper 9, Phoenix, Arizona.
- DIETLER, M., HAYDEN, B. (Eds.), 2001. *Feasts. Archaeological and ethnographic perspectives on food, politics, and power*. Smithsonian Institution Press, Washington D.C., 432 pp.
- DI PESO, C.C., 1953. *The Sobaipuri indians of the upper San Pedro river valley, southeastern Arizona*. Amerind Foundation Publication 6, Dragoon, Arizona, 285 pp.

- DI PESO, C.C., 1956. *The Upper Pima of San Cayetano del Tumacacori. An archaeological reconstruction of the Ootam of Pimeria Alta.* Amerind Foundation Publication 7, Dragoon, Arizona, 586 pp.
- DI PESO, C.C., 1958. *The Reeve Ruin of southeastern Arizona: a study of a prehistoric western pueblo migration in the middle San Pedro Valley.* Amerind Foundation Publication 8, Dragoon Arizona, 189 pp.
- DITTERT, A.E.JR., FISH, P.R., SIMONIS, D.E., 1969. *A cultural inventory of the proposed Granite Reef and Salt-Gila aqueducts, Agua Fria River to Gila River, Arizona.* Arizona State University Anthropological Research Papers 1, Tempe, 26 pp.
- DOBYNS, H.F., 1981. *From fire to flood. Historic human destruction of Sonoran desert riverine oases.* Ballena Press Anthropological Papers 20, Socorro, New Mexico, 222 pp.
- DOBYNS, H.F., 1983. *Their number become thinned. Native American population dynamics in eastern North America.* University of Tennessee Press, Native American Historic Demographic Series, Knoxville, 378 pp.
- DOELLE, W.H., 1975. *Prehistoric resource exploitation within the CONOCO Florence Project.* Arizona State Museum Archaeological Series 62, Tucson, 95 pp.
- DOELLE, W.H., 1976. *Desert resources and Hohokam subsistence: the Cocono Florence project.* Arizona State Museum Archaeological Series 103, Tucson, 278 pp.
- DOELLE, W.H., 1981. The Gila Pima in the late seventeenth century. In : Wilcox, D.T., Mase, W.B. (Eds.) : *The Protohistoric period in the north American Southwest, AD 1450-1700.* Arizona State University Anthropological Research Papers 24, Tempe, pp. 57-70.
- DOELLE, W.H., 1995. Tonto Basin demography in a regional perspective. In : Elson, M.D., Stark, M.T., Gregory, D.A. (Eds.) : *The Roosevelt community development study. New perspectives on Tonto basin prehistory.* Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 15, Tucson, pp. 201-226.
- DOELLE, W.H., 2000. Tonto Basin demography in a regional perspective. In : Dean, J.S. (Ed.) : *Salado.* Amerind Foundation New World Studies Series 4, Dragoon, Az, pp. 81-105.
- DOELLE, W.H., WALLACE, H.D., 1990. The transition to history in Pimería Alta. In : Minnins, P.E., Redman, C. (Eds.) : *Perspectives on southwestern prehistory.* Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 239-257.
- DOOLITTLE, W.E., 1990. *Canal irrigation in prehistoric Mexico: the sequence of technological change.* University of Texas Press, Austin, 219 pp.
- DOOLITTLE, W.E., 2000. *Cultivated landscapes of native North America.* Oxford Geographical and Environmental Studies Series, Oxford, 574 pp.
- DONALDSON, M.L., 1993. Macrofloral remains. In : Ravesloot, J.C., Lascaux, A. (Eds.) : *The Maricopa road site: a pre-Classic Hohokam village-AZ T:16:13 ASU, Pinal county, Arizona.* Arizona State University Anthropological Field Studies 28, Tempe.
- DONKIN, R., 1979. *Agricultural terracing in the aboriginal New World.* University of Arizona Press, Tucson, 196 pp.
- DORRONSORO, C., 1994. Micromorphological index for the evaluation of soil evolution in central Spain. *Geoderma* 61 : 237-250.

- DORRONSORO, C., FERNANDEZ, J., AGUILAR, J., 1996. *Interactive computer program for demonstration of micromorphological aspects of the process of hydromorphy in soils*. 10th Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Moscow, Russia. <http://edafologia.ugr.es/english/index.htm>
- DOUGLAS, A.V., ENGLEHART, P.J., 1981. On a statistical relationship between rainfall in the central equatorial Pacific and subsequent winter precipitation in Florida. *Monthly Weather Review* 114 : 1716-1738.
- DOUGLAS, L.A. (Ed.), 1990. *Soil micromorphology. A basic and applied science*. Elsevier, Developments in Soil Science, New York, 716 pp.
- DOUGLAS, L.A., THOMPSON, M.L. (Eds), 1985. *Soil micromorphology and soil classification*. SSSA Special Publication 15. American Society of Agronomy, Madison, 216 pp.
- DOWNING, T.E., GIBSON, M.G. (Eds.), 1974. *Irrigation's impact on society*. University of Arizona Anthropological Papers 25, Tucson, 184 pp.
- DOWNUM, C.E., 1992. The Sinagua. *Plateau* 63(1) : 1-32.
- DOYEL, D.E., 1974. *Excavations at the Escalante Ruin group, southern Arizona*. Arizona State Museum Archaeological Series 37, Tucson, 342 pp.
- DOYEL, D.E., 1976. Salado cultural development in the Tonto Basin and Globe-Miami areas, Central Arizona. *The Kiva* 42(1) : 5-16.
- DOYEL, D.E., 1979. The Prehistoric Hohokam of the Arizona desert. *American Scientist* 67(5) : 544-554.
- DOYEL, D.E., 1980. Hohokam social organization and the Sedentary to Classic transition. In : Doyel, D.E., Plog, F. (Eds.) : *Current issues in Hohokam prehistory. Proceedings of a symposium*. Arizona State University Anthropological Research Papers 23, Tempe, pp. 23-40.
- DOYEL, D.E., 1981. *Late Hohokam prehistory in southern Arizona*. Contributions to Archaeology 2, Gila Press, Scottsdale.
- DOYEL, D.E., 1984. Sedentary period Hohokam paleo-economy in the New river drainage, central Arizona. In : Fish, S., Fish, P. (Eds.): *Prehistoric agricultural strategies in the southwest*. Arizona State University, Tempe, pp. 35-52.
- DOYEL, D.E., 1991. Hohokam cultural evolution in the Phoenix basin. In: Gumerman, G.J. (Ed.): *Exploring the Hohokam. Prehistoric desert peoples of the American Southwest*. University of New Mexico Press, Albuquerque, pp. 231-278.
- DOYEL, D.E., 2000. In pursuit of Salado in the Sonoran desert. In: Dean, J.S. (Ed.): *Salado*. University of New Mexico, Albuquerque, pp. 295-314.
- DOYEL, D.E., BLACK A., MACNIDER, B., 1995. A regional perspective on the Late Classic period in the Phoenix Basin. In : Doyel, D.E., Black, A.T., Macnider, B.S. (Eds.) : *Archaeological excavations at Pueblo Blanco. The MCDOT Alma School road project, Vol. 2*. Archaeological Consulting Services Cultural Resources Report 90, Tempe, pp. 483-495.
- DOYEL, D.E., CRARY, J.S., 1995. The Sawik community. In : Doyel, D.E., Black, A.T., Macnider, B.S. (Eds.) : *Archaeological excavations at Pueblo Blanco. The MCDOT Alma School Road Project, Vol. 2*. Archaeological Consulting Services Cultural Resources Report 90, Tempe, pp. 467-482.

- DOYEL, D.E., ELSON, M.D. (Eds.), 1985. *Hohokam settlement and economic systems in the Central New River Drainage, Arizona*. Soil Systems Publications in Archaeology 4, Phoenix.
- DUNNING, N.P., LUZZADDER-BEACH, S., BEACH, T., JONES, J.G., SCARBOROUGH, V., CULBERT, T.P., 2002. *Arising from the bajos: the evolution of a neotropical landscape and the rise of Maya civilization*. *Annals of the Association of American Geographers* 92(2) : 267-283.
- DURRENBERGER, R., INGRAM, R. (Eds.), 1978. *Major Storms and Floods in Arizona. 1862-1977*. State of Arizona Climatological Publications, Precipitation Series 4, 44 pp.
- DURIVAGE, J.E., 1937. Through Mexico to California, letters and journal of John E. Durivage. In : Bieber, R.P. (Ed.) : *Southern Trails to California in 1849*. Southwestern Historical Series 5, Porcupine Press Inc., Philadelphia, pp. 159-258.

E

- EARLE, T., 1997. *How chiefs come to power. The political economy of prehistory*. Stanford University Press, Palo Alto, 268 pp.
- EDDY, F.W., COOLEY, M.E., 1983. *Cultural and environmental history of Cienega Valley, Southeastern Arizona*. University of Arizona Anthropological Papers 43, Tucson, 62 pp.
- EIGHMY, J.L., DOYEL D.E., 1987. A reanalysis of first reported archeomagnetic dates from the Hohokam area, Southern Arizona. *Journal of Field Archaeology* 14(3) : 331-342.
- EIGHMY, J.L., MCGUIRE, R.H., 1989. Dating the Hohokam phase sequence: an analysis of archaeomagnetic dates. *Journal of Field Archaeology* 16 (2) : 215-231.
- EISELT, B.S., WOODSON, M.K., TOUCHIN, J., DAVIS, E., 2002. *A cultural resources assessment of the Casa Blanca management area, Pima Maricopa Irrigation Project (P-MIP), Gila River Indian Community, Arizona*. P-MIP report 8, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton.
- EISELT, B. S., WOODSON, M. K., 2002. *The organization of two Hohokam platform mound communities along the Casa Blanca canal system. An example from the Middle Gila Valley*. Paper Presented at the Symposium: Visible Archaeology on the Gila River Indian Reservation, 67th Annual Meeting of the Society for American Archaeology, Denver.
- EISELT, B.S., WELLS, E. C., 2003. *A chronology research context for archaeological materials on the Gila River Indian Community, Arizona*. P-MIP Report 2003-02, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton.
- ELBERSEN, G.W.W., 1982. *Mechanical replacement processes in mobile soft calcic horizons; their role in soil and landscape genesis in an area near Mérida, Spain*. Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 208 pp.
- ELSON, M.D., 1996. A revised chronology and phase sequence for the lower Tonto Basin of central Arizona. *The Kiva* 62 : 117-147.

- ELSON, M.D., 1998. *Expanding the view of Hohokam platform mounds: an ethnographic perspective*. Anthropological Papers of the University of Arizona 63, Tucson, 160 pp.
- ELSON, M.D., ABBOTT, D.R., 2000. Organizational variability in platform mound-building groups of the American Southwest. In : Mills, B.J. (Ed.) : *Alternative leadership strategies in the Prehispanic Southwest*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 117–135.
- ELSON, M.D., GREGORY, D.A., 1995. Tonto Basin chronology and phase sequence. In: Elson, M.D., Stark, M.T., Gregory, D.A. (Eds): *The Roosevelt community development study*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 15, Tucson, pp. 61-77.
- ELSON, M.D., LINDEMAN, M., 1994. *The Eagle Ridge site, AZ V.5.104/1045 (ASM/TNF)*. In : Elson, M.D., Swartz, D.L. (Eds.) : *The Roosevelt community development study. Vol. 1: Introduction and small sites*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 13, Tucson.
- ELSON, M.D., STARK, M.T., GREGORY, D.A. (Eds.), 1995. *The Roosevelt community development study: new perspectives on Tonto Basin Prehistory*. Center for Desert Archaeology Anthropological Paper 15, Tucson, 662 pp.
- ELSON, M.D., STARK, M.T., GREGORY, D.A., 2000. Tonto Basin local systems. Implications for cultural affiliation and migration. In : Dean, J.S. (Ed.) : *Salado*. University of New Mexico Press, Albuquerque, pp. 167–192.
- ELY, L.L., 1992. *Large floods in the Southwestern United States in relation to late-Holocene climate variations*. PhD. Dissertation, University of Arizona, Tucson, 326 pp.
- ELY, L.L., 1997. Response of extreme floods in the southwestern United States to climatic variations in the late Holocene. *Geomorphology* 19 : 175-201.
- ELY, L.L., ENZEL, Y., BAKER, V.R., CAYAN, D.R., 1993. A 5000 year record of extreme floods and climate change in the Southwestern United States. *Science* 262 : 410-412.
- ELY, L.L., ENZEL, Y., CAYAN, D.R., 1994. Anomalous North Pacific atmospheric circulation and large winter floods in the southwestern United States. *Journal of Climate* 7 : 977-987.
- EMORY, W.H., 1848. *Notes of a military reconnoissance from Fort Leavenworth, in Missouri, to San Diego, in California*. Senate Ex. Doc. No. 7, 3th Cong., 1st Scss. Washington.
- EMORY, W.H., 1857. *Report of the United States and Mexico boundary survey. 2 vols.* Nicholson, Washington, 1 (1857, 1859).
- ENACHE, M.D., CUMMING, B.F., 2006. Tracking recorded fires using charcoal morphology from the sedimentary sequence of Prosser Lake, British Columbia (Canada). *Quaternary Research* 65 : 282-292.
- ENSOR, B.E., ENSOR, M., DE VRIES, G.V., 2003. Hohokam political ecology and vulnerability: comments on Waters and Ravesloot. *American Antiquity* 68 : 169-181.
- ENZEL, Y., BROWN, W.J., ANDERSON, R.Y., MCFADDEN, L.D., WELLS S.G., 1992. Short duration Holocene lakes in the Mojave River drainage basin, southern California. *Quaternary Research* 38 : 60-73.
- ENZEL, Y., CAYAN, D.R., ANDERSON, R.Y., WELLS, S.G., 1989. Atmospheric circulation during Holocene lake stands in the Mojave Desert: evidence of regional climate change. *Nature* 341 : 44-48.

- ENZEL, Y., WELLS, S.G., 1997. Extracting Holocene paleohydrology and paleoclimatology information from modern extreme flood events. An example from southern California. *Geomorphology* 19 : 203-226.
- ERICKSON, J.R., BROCKMAN, C.R., TURNER, J.M., 1983. *Probable maximum flood : Salt and Verde River basins, first edition*. Water Resources Associates Inc., Phoenix, 105 pp.
- ERICKSON, C., 2006. Intensification, political economy, and the farming community in defense of a bottom up perspective of the past. In : Marcus, J., Stanish, C. (Eds.) : *Agricultural strategies*. University of California Los Angeles, Cotsen Institute of Archaeology, pp 334-363.
- ERICKSON, W.P., 1994. *Sharing the desert : the Tohono O'odham in history*. University of Arizona Press, Tucson, 182 pp.
- ESPER, J., COOK, E.R., SCHWEINGRUBER, F.H., 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* 295 : 2250–2253.
- ETHEREDGE, D., GUTZLER, D.S., PAZZAGLIA, F.J., 2004. Geomorphic response to seasonal variations in rainfall in the Southwest United States. *Geological Society of America Bulletin* 116 : 606–618.
- EVANS, A.C., 1948. Studies on the relationships between earthworms and soil fertility. *Applied Biology* 35 : 1-13.
- EULER, R.C., 1988. Demography and cultural dynamics on the Colorado Plateaus. In : Gumerman, G.J. (Ed.) : *The Anasazi in a changing environment*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 192–229.
- EULER, R.C., GUMERMAN, G.J., KARLSTROM, T.N.V., DEAN J.S., HEVLY, R.H., 1979. The Colorado Plateaus: cultural dynamics and paleoenvironment. *Science* 205 : 1089-1101.
- EVANS, D.D., BUOL, S.W., 1968. Micromorphological study of soil crusts. *Soil Sci. Soc.Am. Proc.* 32 : 19-22.
- EYRE, C.J., 1994. The water regime for orchards and plantations in Pharaonic Egypt. *Journal of Egyptian Archaeology* 80 : 57-80 .
- EZELL, P.H., 1961. The Hispanic acculturation of the Gila River Pimas. *American Anthropologist* 63 (5) Pt. 2; 71 pp.
- EZELL, P.H., 1983. History of the Pima. In: Ortiz, A. (Ed.): *Handbook of North American Indians. Vol. 10: Southwest*. Smithsonian Institution, Washington D.C., pp. 149-160.

F

- FAO/UNESCO, 1973. *Irrigation, drainage and salinity- an international source book*. Hutchinson, London, 510 pp.
- FAO, 1983. *Garder la terre en vie: l'érosion des sols, ses causes et ses remèdes*. Bulletin pédologique 50, 62 pp.

- FEDOROFF, N., COURTY, M.A., 1989. Indicateurs pédologiques d'aridification: exemples du Sahara. *Bulletin de la Société Géologique Française* 5 : 43-53.
- FEDOROFF, N., COURTY, M.A., 1999. Soil and soil forming processes under increasing aridity. In : Singhvi, A.K. ; Derbyshire, E. (Eds.) : *Paleoenvironmental reconstructions in arid lands*. Oxford et IBH publishing, Calcutta, pp. 72-108.
- FÉDOROFF, N., COURTY, M.A., 1994. Organisation du sol aux échelles microscopiques. In: Bonneau, M., Souchier, S. (Eds.): *Pédologie : constituants et propriétés du sol, 2^{ème} édition*. Edition Masson, Paris, pp. 349-375.
- FENNEMAN, N.M., 1931. *Physiography of western United States*. McGraw-Hill Book Company. New York, 534 pp.
- FERG, A., ROZEN, K.C., DEEVER, W.L., TAGG, M.D., PHILLIPS, D.A.JR., GREGORY, D.A., 1984. *Hohokam habitation sites in the northern Santa Rita mountains, 2 vol.* Arizona State Museum Archaeological Series 147, Tucson, 991 pp.
- FERRING, C.R., 1994. The role of geoarchaeology in paleoindian research. In : Bonnichsen, R., Steele, D.G. (Eds.) : *Method and theory for investigating the peopling of the America*. Oregon State University, Center for the Study of First Americans, Corvallis, Oregon, pp. 57-72.
- FETH, J., HEM, J., 1963. *Reconnaissance of headwater springs in the Gila River drainage basin, Arizona*. U.S. Department of the Interior, Geological Survey Water Supply Paper 1619-H, 54 pp.
- FEWKES, J.W., 1892. On the present condition of a ruin in arizona called Casa Grande. *Journal of American Ethnology and Archaeology* 2 : 176-192.
- FEWKES, J.W., 1907. *Excavations at Casa Grande, Arizona, in 1906-1907*. Smithsonian Miscellaneous Collections 50, Washington D.C., 130 pp.
- FEWKES, J.W., 1912. *Casa Grande, Arizona*. 28th Annual Report of the Bureau of American Ethnology, Washington, 179 pp.
- FIERO, D.C., MUNSON, R.W., MCCLAIN, M.T., WILSON, S.M., ZIER, A.H., 1980. *The Navajo project archaeological investigations: page to Phoenix 500KV southern transmission line*. Museum of Northern Arizona Research Paper 11, Flagstaff, 292 pp.
- FINK, T.M., MERBS, C.F., 1991. Paleonutrition and paleopathology of the Salt River Hohokam. A search for correlates. *The Kiva* 56 : 293-318.
- FISH, P.R., 1989. The Hohokam. 1000 years of prehistory in the Sonoran desert. In : Cordell, L.S., Gumerman, G.J. (Eds.) : *Dynamics of southwest prehistory*. The Smithsonian Institution, Washington D.C., pp. 19-64.
- FISH, P.R., FISH, S.K., 1992. Prehistoric landscapes of the Sonoran desert Hohokam. *Population and Environment* 13(4) : 269-283.
- FISH, S.K., 1983. Pollen from agricultural features. In : Teague, L.S., Crown, P.L. (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol. III: Specialized activity sites*. Arizona State Museum Archaeological Series 15, Tucson, pp. 575-603.

- FISH, S.K., 1984a. The modified environment of the Salt-Gila Aqueduct Project Sites: A palynological perspective. In : Teague, L.S., Crown, P.L. (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol. VII: Environment and subsistence*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, Tucson, pp. 39-51.
- FISH, S.K., 1984b. Agriculture and subsistence implications of the Salt-Gila aqueduct project pollen analyses. In : Teague, L.S., Crown, P.L. (Eds.) : *Hohokam Archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol. VII: Environment and subsistence*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, Tucson, pp. 111–138.
- FISH, S.K., 1987. Pollen results from the Las Acequias-Los Muertos irrigation system and related features. In : Masse, W.B. (Ed.) : *Archaeological investigations of portions of the Las Acequias-Los Muertos irrigation system*. Arizona State Museum Archaeological Series 176, Tucson, pp 159-167.
- FISH, S.K., 1988a. La Lomita Pequeña pollen analysis. In : Mitchell, D. R. (Ed.) : *Excavation at La Lomita Pequeña. A Santa Cruz Sacaton phase hamlet in the Salt River Valley*. Soil Systems Publications in Archaeology 10, Phoenix, pp. 271-289.
- FISH, S.K., 1988b. Pollen results from three small East Papago Freeway corridor sites. In : Landis, D.G. (Ed.) : *Arizona Department of Transportation archaeological testing Program, Part 2, East Papago references cited freeway*. Soil Systems Publications in Archaeology 13, Phoenix, pp. 233-243.
- FISH, S.K., 1990. The La Lomita pollen analysis. In : Mitchell, D. R. (Ed.) : *The La Lomita excavations . 10th century Hohokam occupation in South-Central Arizona*. Soil System Publications in Archaeology 15, Phoenix, pp 187-196.
- FISH, S.K., 1995. Mixed agricultural technologies in Southern Arizona and their implications. In : Toll, H.W. (Ed.) : *Soil, water, biology, and belief in prehistoric and traditional southwestern agriculture*. New Mexico Archaeological Council Special Publication 2, Albuquerque, pp. 101-116.
- FISH, S.K., 1996. Dynamics of scale in the southern deserts. In : Fish, P.R., Reid, J.J. (Eds.) : *Interpreting southwestern diversity. Understanding principles and overarching patterns*. Arizona State University Anthropological Research Papers 48, Tempe, pp. 107-114.
- FISH, S.K., FISH, P.R., 1994. Prehistoric desert farmers of the Southwest. *Annual Review of Anthropology* 23 : 83-108.
- FISH, S.K., FISH, P.R., MADSEN, J.H. (Eds.), 1992. *The Marana community in the Hohokam world*. University of Arizona Anthropological Papers 56, Tucson, 144 pp.
- FISH, S.K., FISH, P.R., 2000. The institutional contexts of Hohokam complexity and inequality. In : Mills, J.B. (Ed.) : *Alternative leadership strategies in the prehispanic southwest*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 154-167.
- FITZPATRICK, E.A., 1980. *The micromorphology of soils, a manual for the preparation and description of thin sections of soils*. University of Aberdeen, Aberdeen, U.K., 186 pp.
- FLETCHER, P.K.A., FLETCHER, J.A., WHITELEY, L., 1999. *Cherokee trail diaries: a new route to California gold fields*. Sequim, WA Fletcher Family Trust, 418 pp.
- FLOOD CONTROL DISTRICT MARICOPA COUNTY, 2010: www.fcd.maricopa.gov/

- FOGEL, M.M., 1975. Runoff agriculture: efficient use of rain fall. In : Thames, J.L, Fischer, J.N. (Eds.) : *Watershed Management in Arid Zones*. AID University of Arizona ,Tucson, pp. 130-146.
- FOLK, R.L., 1974. The natural history of crystalline calcium carbonate. Effect of magnesium content and salinity. *Journal Sedimentary Petrology* 44 (1) : 40-53.
- FONTANA, B.L., 1983. Pima and Papago. Introduction. In : Ortiz, A. (Ed.) : *Handbook of North American Indians*. Smithsonian Institution, Washington D.C., pp. 125-136.
- FONTUGNE, M., USSELMANN, P., LAVALLEE, D., JULIEN, M., HATTE, C., 1999. El Nino variability in the coastal desert of southern Peru during the mid-Holocene. *Quaternary Research* 52 : 171–179.
- FORBES, R.H., 1902. *Something worth knowing about mud*. University of Arizona Agricultural Experiment Station Bulletin 45, Tucson, pp. 215-217.
- FORBES, R.H., 1911. *Irrigation and agricultural practice in Arizona*. University of Arizona Agricultural Experiment Station 63, 83 pp.
- FOSTER, M.S., MITCHELL, D.R., BRETERNITZ, C.D, ROBINSON, C.K., 1996. Late Classic period Hohokam households: a preliminary view from Pueblo Grande. In : Coupland, G., Banning, E.B. (Eds.) : *People who lived in big houses*. Monographs in World Archaeology 27, Prehistory Press, Madison, pp. 27-45.
- FOSTER, M.S., WOODSON, M. K., HUCKLEBERRY, G., 2002. *Prehistoric water utilization and technology in Arizona*. SWCA, Tucson, 24 pp.
- FRANCFORT, H.-P., LECOMTE O., 2002. Irrigation et société en Asie centrale des origines à l'époque achéménide. *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 57e année, pp. 625-663.
- FREDRICKSON, E.L., ESTELL, R.E., LALIBERTE, A., ANDERSON, D.M., 2006. Mesquite recruitment in the Chihuahuan desert. Historic and prehistoric patterns with long-term impacts. *Journal of Arid Environments* 65 : 285-295.
- FRECKMAN, D.W., MANKAU. R., 1977. Distribution and trophic structure of nematodes in desert soils. *Ecology Bulletin* 25 : 511-514.
- FREEMAN, A.K.L., 1997. *Middle to late Holocene stream dynamics of the Santa Cruz River, Tucson, Arizona. Implications for human settlement, the transition to agriculture, and archaeological site preservation*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Department of Anthropology, Tucson.
- FREEMAN, A.K.L., 2000. Application of high-resolution alluvial stratigraphy in assessing the hunter-gatherer/ agricultural transition in the Santa Cruz River Valley, Southeastern Arizona. *Geoarchaeology: An International Journal* 15(6) : 559-589.
- FRITZ, H., 1965. Tree-ring evidence for climatic changes in western north America. *Monthly Weather Review* 93(7) : 421-443.
- FULLER, W.H., 1975. *Desert soils*. University of Arizona Press, Tucson, 102 pp.
- FULLER, J.E., 1987. *Paleoflood hydrology of the alluvial Salt River, Tempe, Arizona*. Report to the Salt River Project, Phoenix, 70 pp.
- FULLER, J.E., 2008. *Salt River Hydrology*, 27 pp.

G

- GARCIA, D., McDERMOTT, M., 2006. *A cultural resource survey of storm outfalls along the Salt River, city of Phoenix, Maricopa County, Arizona*. EcoPlan Associates, Cultural Resource Survey Report No. 06-674.4, Mesa.
- GARCÍA-RUIZ, J.-M., LASANTA, T., RUIZ-FLAÑO, P., ORTIGOSA, L., WHITE, S., GONZÁLEZ, C., MARTÍ, C., 1996. Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology* 11(5):267–277.
- GASSER, R.E., 1978. Exchange and the Hohokam archaeobotanical record. In : Doyel, D.E., Plog, F. (Eds.) : *Current issues in Hohokam prehistory*. Arizona State University Anthropological Research Papers 23, Tempe, pp. 72–77.
- GASSER, R.E., 1981. The plant remains from the Escalante Ruin group. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *Late Hohokam prehistory in southern Arizona*. Contributions to Archaeology 2, Gila Press, Scottsdale, pp 84-89.
- GASSER, R.E., 1982. Hohokam use of desert plant foods. *Desert Plants* 3 : 216-235.
- GASSER, R.E., 1984. Analysis of prehistoric flotation samples from the Murphy's addition. In : Cable, J.S., Henry, S.L., Doyel D.E. (Eds.) : *Archaeology of the original Town Site. The Murphy's Addition, City of Phoenix*. Soil Systems Publications in Archaeology 3, Phoenix, pp. 181-194.
- GASSER, R.E., 1987. Macrofloral analysis. In : Raveslout, J.C. (Ed.) : *The archaeology of the San Xavier Bridge Site (AZ BB.13.14) Tucson Basin, Southern Arizona*. Arizona State Museum Archaeological Series 171, Tucson, pp. 303-318.
- GASSER, R.E., 1988a. The Casa Buena flotation analysis. In : Howard, J.B. (Ed.) : *Casa Buena. changing Hohokam land use along the Squaw Peak parkway, Vol. 2*. Soil Systems Publications in Archaeology 11, Phoenix, pp. 561-586.
- GASSER, R.E., 1988b. Flotation studies. In : Weaver, D.J.Jr. (Ed.) : *Hohokam settlement along the slopes of the Picacho Mountains. Vol.5: Environment and subsistence*. Museum of Northern Arizona Research Paper 35, Flagstaff, pp. 143-235.
- GASSER, R.E., ADAMS, C.E., 1981. Aspects of deterioration of plant remains in archaeological sites. The Walpi archaeological project. *Journal of Ethnobiology* 1 : 182-192.
- GASSER, R.E., 1990. Farming, gathering, and hunting at Ak-Chin: evidence for change, seasonality and comparison. In: Gasser, R.E., Jackson J.B. (Eds.): *Archaeology of the Ak-Chin Indian Community West Side Farms project: subsistence studies and synthesis and interpretation*. Soil System Publication in Archaeology 9 (5), Phoenix, pp. 22.1-22.21.
- GASSER, R.E., KWIATKOWSKI, S.M., 1991. Food for thought. Recognizing patterns in Hohokam subsistence. In : Gumerman, G.J. (Ed.) : *Exploring the Hohokam. Prehistoric peoples of the American Southwest*. University of New Mexico Press, Amerind Foundation New World Series, Albuquerque, pp. 417-459.

- GASSER, R.E., MIKSICEK, C.H., 1985. The specialists. A reappraisal of Hohokam exchange in the archaeobotanical record. In : Dittert, A.E.Jr., Dove, D.E. (Eds.) : *Proceedings of the 1983 Hohokam Symposium, Part 2*. Arizona Archaeological Society Occasional Paper 2, Phoenix, pp. 483-498.
- GASSER, R.E., ROBINSON, C.K., BRETERNITZ, C.D. (Eds.), 1990. *Archaeology of the Ak-Chin Indian Community west side Farms Project. Vol. 5: Subsistence studies, synthesis and interpretations*. Soil Systems Publications in Archaeology 9, Phoenix.
- GEBHARDT, A., 1988. Evolution du paysage bocager sub-atlantique en Morbihan. Apport de la micromorphologie. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire* 4 : 197-203.
- GEBHARDT, A., 1992. Micromorphological analysis of soil structure modifications caused by different cultivation implements. In: Anderson, P. (Ed.) : *Préhistoire de l'agriculture. Nouvelles approches expérimentales et ethnographiques*. Monographie du CRA 6, CNRS, Paris, pp. 373-381.
- GEBHARDT, A., 1993. Soil micromorphological evidence of soil deterioration since the Mid-Holocene in Brittany, France. *The Holocene* 3(3) : 333-341.
- GEBHARDT, A., 1995. Soil micromorphological data from traditional and experimental agriculture. In : Barham, A.J., Macphail, R.I. (Eds) : *Archaeological sediments and soils. Analysis, interpretation and management*. Institute of Archaeology, London, pp. 25-39.
- GEBHARDT, A., 2000. Le rôle de la micromorphologie des sols dans la formation des paysages. *Études rurales, La très longue durée* 153-154 : 139-149.
- GELLES, P., 1995. Equilibrium and extraction. Dual organization in the Andes. *American Ethnologist* 22(4) : 710-742.
- GELLES, P., 2000. *Water and power in highland Peru. The cultural politics of irrigation and development*. Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey, 254 pp.
- GENTELLE, P., 1980. Le Croissant Fertile. *Le monde de la Bible et Terre Sainte* 15, 4-8.
- GERARD, B.M., 1967. Factors affecting earth worms in pastures. *Journal of Animal Ecology* 36 : 235-252.
- GERBA, C.P., 2007. *Occurrence of enteric pathogens in irrigation water and the use of risk assessment in setting standard*. GAP collaborators meeting, Orlando, Florida, 26 pp.
- GERSON, R., YAIR, A., 1975. Geomorphic evolution of some small desert watersheds and certain paleoclimatic implications, Santa Catherine area, southern Sinai. *Zeitschrift für Geomorphologie* 19 : 66-82.
- GEO-MAP INC, 1992. *Maricopa County, Arizona. Central Phoenix Basin, Archaeology Map*. Adapté de Howard et Huckleberry, 1991.
- GILBERT, G.K., 1875. Report of the geology of portions of Nevada, Utah, California and Arizona examined in the years 1871 and 1872. *U.S. Geographic Surveys West of the One-Hundredth Meridian* 3 : 17-187.
- GILE, L.H., PETERSON, F.F., GROSSMAN, R.B., 1966. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulations in desert soils. *Soil Science* 101 : 347-354.

- GILPIN, D., PHILLIPS, D.A. JR., 1998. *The prehistoric to historic transition period in Arizona, circa A.D. 1519 to 1692*. Arizona State Parks, SWCA, Phoenix, 210 pp.
- GISH, J.W., 1979. Palynological research at Pueblo Grande Ruin. *The Kiva* 44 : 159-172.
- GISH, J.W., 1984. *Pollen results from AZ T:12:42 (ASM)*. Phoenix Arizona. Report to Soil Systems, Inc., Phoenix, 12 p., 1 fig., 1 table.
- GISH, J.W., 1984. Pollen analysis of the Murphy's Addition. In : Cable, J.S., Henry, S.L., Doyel D.E. (Eds.) : *Archaeology of the original Town Site. The Murphy's Addition, City of Phoenix*. Soil Systems Publications in Archaeology 3, Phoenix, pp. 195-213.
- GISH, J.W., 1985. Pollen from the New River Projectm and a discussion of pollen sampling strategies for agricultural systems. In : Doyel, D.E., et Elson, M.D. (Eds.) : *Hohokam settlement and economic systems in the central New River Drainage. Soil System Publication in Archaeology* 4, Phoenix, pp. 343-404.
- GISH, J.W., 1986. Palynology of Picacho reservoir, Arizona. In: Bayham, E., Morris, D.H., Shackley, M.S. (Eds.): *Prehistoric hunter-gatherers of south central Arizona: the Picacho reservoir Archaic project*. Arizona State University Anthropological Field 13, Tempe, pp. 279-298.
- GISH, J.W., 1987. Structured diversity in the resource base of a Hohokam village. The pollen evidence from La Ciudad. In: Kisselburg, J.E., Rice, G.E., Shears, B.L. (Eds.): *Specialized studies in the economy, environment, and culture of La Ciudad*. Arizona State University Anthropological Field Studies 20, Tempe, pp. 1-66.
- GISH, J.W., 1988. Pollen studies. In: Donald, E. (Ed.): *Hohokam settlement along the slopes of the Picacho Mountains. Vol. 5: Environment and subsistence*. Museum of Northern Arizona Research Paper 35, Flagstaff, pp. 30-142.
- GISH, J.W., 1990. Ak-Chin pollen study, central Arizona. In: Gasser, R.E., Jackson, J.B. (Eds.): *Archaeology of the Ak-Chin Indian Community west side Farms project. Vol. 5: Subsistence studies, synthesis and interpretations*. Soil Systems Publications in Archaeology 9, Phoenix, pp. 20.1-20.20.
- GLADWIN, H.S., 1928. *Excavations at Casa Grande, Arizona*. Southwest Museum Papers 2, Los Angeles, 30 pp.
- GLADWIN, H.S., HAURY, E.W., SAYLES, E.B., GLADWIN, N., 1937. *Excavations at Snaketown. Material Culture*. Medallion Papers 25, Globe, Arizona, 305 pp.
- GLADWIN, H.S., HAURY, E.W., SAYLES, E.B., GLADWIN, N., 1965. *Excavations at Snaketown, Material culture*. Réimpression. University of Arizona Press, Tucson, 305 pp.
- GLADWIN, W., GLADWIN, H. S., 1935. *The eastern range of the Red-on-Buff Culture*. Medallion Papers 16, Globe, Arizona.
- GLASS, M., 1984. Faunal remains from Hohokam sites in the Rosemont area, northern Santa Rita Mountains. In : Ferg, A., Rozen, K.C., Deaver, W.L., Tagg, M.D., Phillips, D.A., Gregory, D.A. (Eds.) : *Hohokam habitation sites in the northern Santa Rita Mountains*. Arizona State Museum Archaeological Series 147, Tucson, pp. 823-916.
- GOLDBERG, P., MACPHAIL, R.I., 2006. *Practical and theoretical geoarchaeology*. Blackwell Science Ltd, 455 pp.

- GOODMAN-ELGAR, M., 2007. Evaluating soil resilience in long-term cultivation: a study of pre-Columbian terraces from the Paca Valley, Peru. *Journal of Archaeological Science* 35 : 3072-3086.
- GOODMAN-ELGAR, M., 2008. Agricultural fields. Identification and study. *Encyclopedia of Archaeology* 1: 110-115.
- GRADY, M.A., 1973. *An archaeological survey of the Salt-Gila Aqueduct*. Arizona State Museum Archaeological Series 23, Tucson, 98 pp.
- GRADY, M.A., 1976. *Aboriginal agrarian adaptation to the Sonoran desert. A regional synthesis and research design*. Unpublished Ph.D. dissertation, University of Arizona, Department of Anthropology, Tucson.
- GRAF, W.F., 1978. Fluvial adjustment to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region. *Geological Society of America Bulletin* 89: 1491-1501.
- GRAF, W.F., 1981. Channel instability in a sand bed river. *Water Resource Research* 17 : 1087-1094
- GRAF, W.L., 1983. The arroyo problem: paleohydrology and paleohydraulics in the short term. In: Gregory, K.E. (Ed.): *Background to paleohydrology*. Wiley, New York, pp. 279-302.
- GRAF, W.L. (Ed.), 1988a. *The Salt and Gila rivers in central Arizona. A geographic field trip guide*. Arizona State University, Department of Geography Publication 3, Tempe, 80 pp.
- GRAF, W.L., 1988b. *Fluvial processes in dryland rivers*. Springer, Verlag, 346 pp.
- GRAYBILL, D.A., 1989. The reconstruction of prehistoric Salt river streamflow. In : Graybill, D.A., Gregory, D.A., Nials, F.L., Fish, S.K., Gasser, R.E., Miksicek, C.H., Szuter, C.R. (Eds.) : *The 1982-1984 excavations at Las Colinas: environment and subsistence*. Arizona State Museum Archaeological Series 162, Tucson, pp. 25-38.
- GRAYBILL, D.A., GREGORY, D.A., FUNKHOUSER, G.S., NIALS, F.L., 2006. Long-term streamflow reconstructions, river channel morphology, and aboriginal irrigation systems along the Salt and Gila Rivers. In : Dean, J.S., Doyel, D.E. (Eds.) : *Environmental change and human adaptation in the ancient Southwest*. University of Utah Press, Salt Lake City, pp. 69-123.
- GREEN, C.R., 1963. *Summer rainy days in Arizona*. University of Arizona Technical Reports on the Meteorology and Climatology of Arid Regions 11, Tucson, 61 pp.
- GREEN, C.R., SELLERS, W.D. (Eds.), 1964. *Arizona Climate*. The University of Arizona Press, Tucson, 503pp.
- GREENWALD, D.H., CIOLEK-TORRELLO, R. (Eds), 1988. *Archaeological investigations at the Dutch Canal Ruin, Phoenix, Arizona*. Museum of Northern Arizona Research Paper 38, Flagstaff, 280 pp.
- GREENWALD, D.H., STEIN, P.H., 1992. Comparison of Prehistoric and Historic settlement in the Phoenix Basin. In: Greenwald, D.H., Chenault, M.L., Greenwald, D.M., Zyniecki, M., Ballagh, J.H. (Eds.): *Early desert farming and irrigation settlements: Archaeological investigation in the Phoenix Sky Harbor Center*. SWCA Anthropological Research Papers 4, Flagstaff and Tucson, pp 1-15.

- GREENWALD, D.H., ZYNIKI, M.D., GREENWALD, M. (Eds), 1994. *Early desert farming and irrigation settlements. Archaeological investigations in the Phoenix Sky Harbor Center. Vol. 2: Dutch Canal Ruin*. SWCA Anthropological Research Papers 4, Flagstaff and Tucson.
- GREGORY, D.A., 1984. Excavations at the Siphon Draw Site. In : Teague, L., Crown, P. (Eds.) : *Prehistoric occupation of the Queen creek delta. Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project, Vol. 4*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, Tempe, pp. 17-220.
- GREGORY, D.A., 1987. The morphology of platform mounds and the structure of Classic period Hohokam sites. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *The Hohokam village. Site organization and structure*. American Association for the Advancement of Science, Southwestern and Rocky Mountain Division, Colorado, pp. 183-210.
- GREGORY, D.A., 1991. Form and variation in Hohokam settlement pattern. In : Crown, P.L., Judge, W.J. (Eds.) : *Chaco and Hohokam: prehistoric regional systems in the American Southwest*. School of American Research Press, Santa Fe, pp. 159-193.
- GREGORY, D.A., 1994. Previous research, culture history and project research orientation. In: Gregory, D.A., Huckleberry, G. (Eds.): *An archaeological survey in the Blackwater Area. Vol. 1: the history of human settlement in the Blackwater area*. Archaeological Consulting Services Cultural Resources Report 86, Tempe.
- GREGORY, D.A., 1995. Prehistoric settlement patterns in the RCD study area. In : Elson, M.D., Stark, M.T., Gregory, D.A. (Eds.) : *The Roosevelt community development study : new perspectives on Tonto basin prehistory*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 15, Tucson, Arizona.
- GREGORY, D.A., DEAVER, W.L., FISH, S.K., GARDINER, R., LAYHE, R.W., NIALS, F.L., TEAGUE, L. S. (Eds.), 1988. *The 1982-1984 excavations at Las Colinas. The site and its features*. Arizona State Museum Archaeological Series 162, Tucson, 387 pp.
- GREGORY, D.A., HUCKLEBERRY, G., 1994. *An archaeological survey of the Black Water area, Vol. I. The history of human settlement in the Black Water area*. Archaeological Consulting Services Cultural Resources Report 86, Tempe.
- GREGORY, D.A., NIALS, F.L., 1985. Observations concerning the distribution of Classic Period Hohokam platform mounds. In : Dittert, A.E., Dove, D.E. (Eds.) : *Proceedings of the 1983 Hohokam Symposium, Part I*. Arizona Archaeological Society Occasional Papers 2, Phoenix, pp. 373-388.
- GREGORY, D.A., WILCOX, D.R., 2007. *Zuni origins: toward a new synthesis of southwestern archaeology*. University of Arizona Press, Tucson, 544 pp.
- GREGORY, K.J., PARK, C., 1974. Adjustment of river channel capacity downstream from a reservoir. *Water Resources Research* 10: 363-374.
- GROSSMANN, F.E., 1871. *The Pima indians of Arizona*. Annual Report of the Smithsonian Institution, Washington D.C., pp. 407-419.
- GROVE, J.M., 1988. *The Little Ice Age*. Methuen, London, 498 pp.
- GUIDO, Z., 2010. *El Niño Southern Oscillation*. Ressource électronique, consultée en juillet 2011. <http://www.southwestclimatechange.org/climate/global/enso>

- GUILLORE, P., 1983. *Méthode de fabrication mécanique et en série de lames minces*. Institut National Agronomique Paris Grignon, Département des sols, Grignon, 22 pp.
- GUMERMAN, G., 1991. Understanding the Hohokam. In : Gumerman, G.J. (Ed.) : *Exploring the Hohokam. Prehistoric desert peoples of the American Southwest*. University of New Mexico Press, Albuquerque, pp. 1-27.
- GUMERMAN, G.J., WEED, C.S., 1976. The question of Salado in the Agua Fria and New River drainages of Central Arizona. *The Kiva* 42(1) : 105-112.
- GUNDERSON, L.H., HOLLING, C.S. (Eds.), 2002. *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington D.C., 508 pp.

H

- HAAS, J., CREAMER, W.M., 1993. *Stress and warfare among the Kayenta Anasazi of the 13th century A.D.* Fieldiana-New series 21, Chicago, 211 pp.
- HACK, J.T., 1942. The changing physical environment of the Hopi Indians of Arizona. Reports of the Awatovi expedition 1. *Papers of the Peabody Museum of American Archaeology and Ethnology* 35(1) : 1-140.
- HACKBARTH, M.R., 1992. *Archaeological testing at Verde park, City of Phoenix*. Northland Research Archaeology Series 3, Phoenix, 127 pp.
- HACKBARTH, M.R., HENDERSON, T.K., CRAIG, D., HUCKLEBERRY, G., MIKSICEK, C., PALACIOS-FEST, M., SMITH, S., 1995. *Archaeology at the head of the Scottsdale Canal System. Vol. 3 : Canal and synthetic studies*. Northland Research Anthropological papers of the University of Arizona, No. 95-1.
- HACKENBERG, R.A., 1974. Ecosystemic channeling : cultural ecology from the viewpoint of aerial photography in anthropological. In : Vogt, E.Z. (Ed.) : *Aerial photography in anthropological field research*. Harvard University Press, Cambridge, pp. 28-39.
- HACKENBERG, R.A., 1983. Pima and Papago ecological adaptations. In : Sturtevant, W.C. (Ed.) : *Handbook of North American Indians*. Smithsonian Institution Vol. 10, Washington D.C., pp. 161-177.
- HALES, J.E.JR., 1972. Surges of maritime tropical air northward over the Gulf of California. *Monthly Weather Review* 100 : 298-306.
- HALLAIRE, V., HACHICHA, M., CHEVERRY, 1998. Evolution structurale d'un horizon de surface argileux sous irrigation. *Etude et gestion des sols* 5(2): 107-116.
- HALL, J.S., MOZLEY, P., DAVIS, M.J., ROY, D.N., 2004. Environments of formation and controls on spatial distribution of calcite cementation in Plio-Pleistocene fluvial deposits, New Mexico, U.S.A. *Journal Sedimentary Research* 74 : 643-653.
- HALL, R.L., 1974. Appendix C. Plant remains from the Escalante Ruin group. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *Excavations in the Escalante Ruin group, southern Arizona*. Arizona State Museum, University of Arizona, Tucson.

- HALL, S.A., 1977. Late Quaternary sedimentation and paleoecologic history of Chaco Canyon, New Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 88 : 1593-1618.
- HALL, S.A., 1985. Quaternary pollen analysis and vegetational history of the Southwest. In : Bryant, V.B.Jr., Holloway, R.G., (Eds.) : *Pollen records of late Quaternary north American sediments*. American Association of Stratigraphic Palynologists, Dallas, Texas, pp. 95-123.
- HALL, W.E., VAN DEVENDER, T.R., OLSON, C.A., 1990. Arthropod history of the Puerto Blanco mountains, Organ Pipe National Monument, southwestern Arizona. In : Betancourt, J.L., Van Devender, T.R., Martin, P.S. (Eds.) : *Packrat middens, the last 40 000 years of biotic change*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 363-379.
- HAMMOND, G.P., REY, A., 1940. *Narratives of the Coronado Expedition 1540-1542*. University of New Mexico Press, Albuquerque, 413 pp.
- HAMMOND, G.P., REY, A., 1953. *Don Juan de Oñate : colonizer of New Mexico 1595-1628, Part 2*. University of New Mexico Press, Albuquerque, 584 pp.
- HALSETH, O., 1932. *Prehistoric irrigation in the Central Arizona*. The Masterkey 5(1) : 65-175.
- HALSETH, O., 1936. *Prehistoric irrigation in the Salt River Valley*. University of New Mexico Bulletin 296, Anthropological Series 15, pp. 42-47.
- HANNA, F.S., STOOPS, G.J., 1976. Contribution to the micromorphology of some saline soils of the north Nile Delta in Egypt. *Pedologie*, XXXVI (1) : 55-73.
- HARD, R., RONEY, J., 1998. A massive terraced village complex in Chihuahua, Mexico, 3000 years before present. *Science* 279 : 1661-1664.
- HARDEN, J., 1982. A quantitative index of soil development from field descriptions : examples from a chronosequence in central California. *Geoderma* 28 : 1-28.
- HARMS, J.C., SOUTHARD, J.B., SPEARING, D.R., WALKER, R.G., 1975. *Depositional environments as interpreted from primary structures and stratification sequences*. Soc. Econ. Palaeont. Min., Short Course 2, 161 pp.
- HARRINGTON, J.A.JR., CERVENY, R., BALLING, R. JR., 1992. Impact of the southern oscillation on the North American Southwest monsoon. *Physical Geographer* 13 : 318-330.
- HARRINGTON, H.D., 1967. *Edible native plants of the Rocky Mountains*. University of New Mexico Press, Albuquerque, 392 pp.
- HARRISON, P.D., 1977. The rise of the Bajos and the fall of the Maya. In : Hammond, N. (Ed.) : *Social process in Maya prehistory : studies in honour of Sir Eric Thompson*. Academic Press, New York, pp. 469-508.
- HARRY, K.G., BAYMAN, J.M., 2000. Leadership among the Classic period Hohokam : a case study. In : Mills, B. J. (Ed.) : *Alternative leadership strategies in the prehispanic southwest*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 136-153.
- HARTMANN, W.K., HARTMANN, G.H., 1972. Juan de la Asuncion, 1538: First Spanish explorer of Arizona? *The Kiva* 37: 93-101.

- HASSE, E.F., 1972. Survey of floodplain vegetation along the lower Gila River in southwestern Arizona. *Journal of the Arizona Academy of Science* 7 : 75-81.
- HASTINGS, R., 1934. *Report of archaeological excavations at Casa Grande National Monument under C.W.A. Program*. Southwestern Monuments Monthly Report Supplement, Globe, Arizona.
- HASTINGS, J.R., TURNER, R., 1965. Seasonal precipitation regimes in Baja California. *Geografiska Annaler* 47A : 204-223.
- HAURY, E.W., 1932. *Roosevelt 9:6, a Hohokam site of the Colonial period*. Medallion Papers No. XI, Globe, 134 pp.
- HAURY, E.W., 1945. *The excavation of Los Muertos and neighboring ruins in the Salt River valley, southern Arizona*. Peabody Museum of American Archaeology and Ethnology 24 (1), Harvard University Press, Cambridge, 223 pp.
- HAURY, E.W., 1976. *The Hohokam, desert farmers and craftsmen. Excavations at Snaketown, 1964–1965*. University of Arizona Press, Tucson, 412 pp.
- HAYDEN, J.D., 1945. Salt erosion. *American Antiquity* 10 : 373-378.
- HAYDEN, J.D., 1957. *Excavations, 1940, at University Indian Ruin, Tucson, Arizona*. Southwestern Monuments Association Technical Series 5, Gila Pueblo, Globe.
- HAYNES, C.V. JR., 1964. The geologist's role in Pleistocene paleoecology and archaeology. In: Hester, J.J., et Schoenwetter, J. (Eds.) : *The reconstruction of past environments*. Taos, New Mexico, Fort Burgwin Research Center, pp. 61–66.
- HAYNES, C.V. JR., 1968. Geochronology of late-Quaternary alluvium. In: Morrison, R.B., et Wright, H.E (Eds.): *Means of correlation of Quaternary successions*. University of Utah Press, Salt Lake City, pp. 591-631.
- HAYNES, C.V. JR., 1987. Curry Draw, Cochise County, Arizona : a late Quaternary stratigraphic record of Pleistocene extinction and Paleo-Indian activities. In : Hill, M.L. (Ed.) : *Cordilleran section of the Geological Society of America. Vol.1*. Geological Society of America Centennial Field Guide, Boulder, Colorado, pp. 23-28.
- HAYNES, C.V. JR., 1981. Geochronology and paleoenvironments of the Murray Springs Clovis site, Arizona. *National Geographic Society Research Reports* 13: 243– 251
- HAYNES, C.V. JR., 1990. The Antevs-Bryan years and the legacy for Paleoindian geochronology. In : Laporte, L.F. (Ed.) : *Establishment of a geologic framework for paleoanthropology*. Geological Society of America Special Paper 242, Boulder, Colorado, pp. 55-68.
- HAYNES, C.V. JR., HUCKELL, B.B., 1986. Sedimentary successions of the prehistoric Santa Cruz River, Tucson, Arizona. *Arizona Geological Survey Open-File Report* 86 (15) : 1-47.
- HEGMON, M., ORTMAN, S.G., MOBLEY TANAKA, J.L., 2000. Women, men, and the organization of space. In : Crown, P.L. (Ed.) : *Women and men in the prehispanic southwest : labor, power, and prestige*. School of American Research Press, Santa Fe, pp. 43-90.
- HEGMON, M., 2002. Recent issues in the archaeology of the Mimbres region of the North American Southwest. *Journal of Archaeological Research* 10(4) : 307-357.

- HEILMAN, J., 2007. *Archaeological monitoring report for a city of Phoenix road widening in conjunction with a proposed bridge on 35th Avenue south of lower Buckeye road, Maricopa County, Arizona*. EcoPlan Associates Inc. Monitoring Report No. 06-970 :36, Mesa, Arizona.
- HELLER, F., LIU, T.S., 1984. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 77 : 125-141.
- HENDERSON, T.K., 1987a. Ceramics, dates, and the growth of the Marana community. In : Rice, G.E. (Ed.) : *Studies in the Hohokam Community of Marana*. Arizona State University, Tempe, pp. 49-78.
- HENDERSON, T.K., 1987b. *Structure and organization of La Ciudad*. Arizona State University Field Studies 18, Tempe, 232 pp.
- HENDERSON, T.K., 1989. The chronology of the Las Acequias canals. In : Ackerly, N.W., Henderson, T.K. (Eds.) : *Prehistoric agricultural activities on the Lehi-Mesa Terrace : perspectives on Hohokam irrigation cycles*. Northland Research Inc, Flagstaff, pp. 184-199.
- HENDERSON, T.K., 1995. *The prehistoric archaeology of heritage*. Pueblo Grande Museum Anthropological Papers 3, Phoenix, 316 pp.
- HENDERSON, T.K., 2003. Ceramic analysis and feature chronology, In : Henderson, T.K. (Ed.) : *Hohokam farming on the Salt River floodplain : excavation at the Sky Harbor airport north runway*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 42, Tucson, pp. 139-171.
- HENDERSON, T.K., CLARK, T.C., 2004. Changing perspectives : considerations of past agricultural use of the Salt River floodplain. In : Henderson, T.K. (Ed.) : *Hohokam farming on the Salt River floodplain : refining models and analytical methods*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 43, Tucson, pp. 169-186.
- HENDRICKS, D.M., 1974. A micromorphological study of soil formation in sandy loam alluvium in southern Arizona. In : Rutherford, G.K. (Ed.) : *Soil microscopy*. Limestone Press, Kingston, Ontario, Canada, pp. 408-427.
- HENDRICKS, D.M., KRAUSMAN, P.R., MANNAN, R.W., HOLE, F.D., 1985. Animals and soils in Arizona. In: Hendricks, D.M. (Ed.). *Arizona Soils*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 55-62.
- HEREFORD, R., 1993. *Entrenchment and widening of the upper San Pedro River, Arizona*. Geological Society of America Special Paper 282, 46 pp.
- HEREFORD, R., 2003. Valley-fill alluviation during the Little Ice Age (ca. A.D. 1400–1880), Paria River basin and southern Colorado Plateau, United States. *Geological Society of America Bulletin* 114 : 1550–1563.
- HEREFORD, R., BETANCOURT, J.L., 1993. Historic geomorphology of the San Pedro River: archival and physical evidence. In : Haynes, C.V., Huckell, B. (Eds.) : *The First Arizonans: Clovis Occupation of the San Pedro Valley*. Manuscript sorti en 2009.
- HEREFORD, R., THOMPSON, K.S., BURKE, K.J., FAIRLEY, H.C., 1996. Tributary debris fans and the late Holocene alluvial chronology of the Colorado River, eastern Grand Canyon, Arizona. *Geological Society of America Bulletin* 108 : 3-19.

- HEREFORD, R., WEBB, R.H., 1992. Historic variation in warm-season rainfall, southern Colorado Plateau, southwestern USA. *Climate Change* 22: 239–256.
- HERRERO, J., PORTA, J., FEDOROFF, N., 1992. *Hypergyptic soil micromorphology and landscape relationships in northeastern Spain*. Soil Science Society of America Journal 56 (4) : 1188-1194.
- HERRINGTON, L., 1979. *Settlement patterns and water control features of the Mimbres Classic phase, Grant County, New Mexico*. Ph.D. dissertation, University of Texas at Austin.
- HERSKOVITZ, R.M., 1974. *The Superstition Freeway project : a preliminary report on the salvage excavation of a dual component Hohokam site in Tempe, Arizona*. Ms. on file, Arizona.
- HERSKOVITZ, R.M., 1981. Arizona U:9:46 (ASM) : a dual component Hohokam site in Tempe, Arizona. *The Kiva* 47 (1-2), 79 pp.
- HIGGINS, R.W., CHEN, Y., DOUGLAS, A.V., 1999. Interannual variability of the north-american warm season precipitation regime. *Journal of Climatology* 12 : 653-680.
- HIGGITT, S.R., OLDFIELD, F., APPLEBY, P.G., 1991. The record of land use change and soil erosion in the late Holocene sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France. *Holocene* 1 : 16-30.
- HILL, J.B., CLARK, J.J., DOELLE, W.H., LYON, P.D., 2004. Prehistoric demography in the southwest : migration, coalescence, and Hohokam population decline. *American Antiquity* 69 : 689-716.
- HIRSCHBOECK, K.K., 1987. Catastrophic flooding and atmospheric circulation anomalies. In : Mayer, L., Nash, D. (Eds.) : *Catastrophic flooding*. Allen and Unwin, Concord, Massachusetts, pp. 23-56.
- HIRSCHBOECK, K.K., 1988. Flood hydroclimatology. In : Baker, V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C. (Eds.) : *Flood geomorphology*. John Wiley & Sons, New York, pp. 27-49.
- HIRSCHBOECK, K.K., MEKO, D.M., 2005. *A tree-ring based assessment of synchronous extreme streamflow episodes in the Upper Colorado and Salt-Verde-Tonto river basins*. University of Arizona, Laboratory of Tree-Ring Research, Tucson. <http://fp.arizona.edu/kkh/srp.htm>
- HODDER, I., ORTON, C., 1976. *Spatial analysis in archaeology*. Cambridge University Press, New Studies in Archaeology, Cambridge, 270 pp.
- HODGE, F., 1893. Prehistoric irrigation in Arizona. *American Anthropologist* 6 : 323-330.
- HODGSON, W.C., 2001. *Food plants of the Sonoran desert*. University of Arizona Press, Tucson, 313 pp.
- HOFFMAN, C.M., 1991. *A cultural resources survey for a proposed 4.7 mile sewer line construction project in Avondale, Maricopa County, Arizona*. Archaeological Research Services, Tempe.
- HOLLAND, R.F. 1986. *Preliminary descriptions of the terrestrial natural communities of California*. State of California Department of Fish and Game, Nongame-Heritage Program, Sacramento, California.
- HOLLIDAY, V.T., 1997. *Paleoindian geoarchaeology of the Southern High Plains*. University of Texas Press, Austin, 297 pp.
- HOLLING, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4 : 1-23.

- HOLLING, C.S., 1976. Resilience and stability of ecosystems. In : Jantsch, E., Waddington, C.H. (Eds.) : *Evolution and consciousness : human systems in transition*. Addison Wesley, Reading, Massachusetts, pp. 73-92.
- HOLLING, C.S., 2001. Understanding the complexity of economic, ecological and social systems. *Ecosystems* 4 : 390-405.
- HONKER, A.M., 2002. *A river sometimes runs through it : a history of Salt River flooding and Phoenix*. Ph.D. dissertation, Arizona State University, Tempe, 307 pp.
- HOUSE, P.K., HIRSCHBOECK, K.K., 1997. Hydroclimatological and paleohydrological context of extreme winter flooding in Arizona, 1993. Storm-induced geologic hazards. In : Larson, E.R., Slosson, J.E. (Eds.) : *Case histories from the 1992-1993 winter in southern California and Arizona*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, pp. 1-24.
- HOWARD, J.B., 1982. *Hohokam community organization at La Ciudad de Los Hornos*. Ms on file, Arizona State University, Department of anthropology, Tempe.
- HOWARD, J.B., 1985. Courtyard groups and domestic cycling : a hypothetical model of growth. In : Ditter, A.D., Dove, D. (Eds.) : *Proceedings of the 1983 Hohokam Symposium*. Arizona Archaeological Society Occasional Paper 2, Phoenix, pp. 311-326.
- HOWARD, J.B., 1987. The Lehi Canal System : organization of a Classic Period community. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *The Hohokam village : site structure and organization*. Southwestern and Rocky Mountain Division of the American Association for the Advancement of Science, pp. 211-222.
- HOWARD, J.B., 1990. *Paleohydraulics : techniques for modeling the operations and growth of prehistoric canal systems*. M.A. Thesis, Arizona State University, Tempe.
- HOWARD, J.B., 1993. A paleohydroaulic approach to examining agricultural intensification in Hohokam irrigation systems. *Research in Economic Anthropology* 7 : 263-324.
- HOWARD, J.B., 1996. Measuring complexity in irrigation societies. In : Meyer, D.A., Dawson, P.C., Hanna, D.T. (Eds.) : *Debating complexity : proceedings of the 26th Annual Chaco conference*. The Archaeological Association of the University of Calgary, Canada, pp. 297-302.
- HOWARD, J.B., 2006. *Hohokam irrigation communities : a study of internal structure, external relationships and sociopolitical complexity*. Unpublished Ph.D. Dissertation, Arizona State University, Tempe, 313 pp.
- HOWARD, J.B., HUCKLEBERRY, G., 1991. *The operation and evolution of an irrigation system : the East Papago Canal study*. Soil Systems Publication in Archaeology 18, Phoenix, 214 pp.
- HOWARD, J.B., WILCOX, D.R., 1988. The place of Casa Buena and Locus 2 in the evolution of Canal System 2. In : Howard, J.B. (Ed.) : *Excavations at Casa Buena : changing Hohokam land use along the Squaw Peak parkway, Vol. 2*. Soil Systems Publications in Archaeology 11, Phoenix, pp. 903-936.
- HSU, C.-Y., 1980. *Han agriculture : the dormation of early chinese agrarian economy (206 b.c.- a.d. 220)*. University of Washington Press, Seattle, 350 pp.
- HUCKELL, B.B., 1995. *Of marshes and maize : preceramic agricultural settlements in the Cienega Valley, Southeastern Arizona*. Anthropological Papers of the University of Arizona 59, Tucson, 166 pp.

- HUCKLEBERRY, G., 1987. *Paleoflood impact to prehistoric agriculturalists in the Sonoran Desert*. Geological Society of America, abstract Annual Meetings, Salt Lake City 29 (6) : 242.
- HUCKLEBERRY, G., 1991. The geoarchaeology of Canal System 2. In : Howard, J.B., Huckleberry, G. (Eds.) : *The operation and evolution of an irrigation system : the east Papago canal study*. Soil Systems Publications in Archaeology 18, Phoenix, pp 3.1-3.75.
- HUCKLEBERRY, G., 1992. Soil evidence of Hohokam irrigation in the Salt River valley, Arizona. *The Kiva* 57 : 237-249.
- HUCKLEBERRY, G., 1993. *Late Holocene stream dynamics on the middle Gila River, Pinal County, Arizona*. Unpublished Ph.D. dissertation, University of Arizona, Department of Geosciences, Tucson, 135 pp.
- HUCKLEBERRY, G., 1994. Contrasting channel response to floods on the Middle Gila River, Arizona. *Geology* 22 : 1083-1086.
- HUCKLEBERRY, G., 1995. Archaeological implications of late-Holocene channel change on the Middle Gila River, Arizona. *Geoarchaeology* 10(3) : 159-182.
- HUCKLEBERRY, G., BILLMAN, B.R., 1998. Floodwater farming, discontinuous ephemeral streams, and puebloan abandonment in southwestern Colorado. *American Antiquity* 64 : 595-616.
- HUCKLEBERRY, G., 1999a. Stratigraphic identification of destructive floods in relict canals : a case study from the Middle Gila River, Arizona. *The Kiva* 65 : 7-33.
- HUCKLEBERRY, G., 1999b. Assessing Hohokam canal stability through stratigraphy. *Journal of Field Archaeology* 26 : 1-18.
- HUCKLEBERRY, G., DUFF, A.I., 2008. Alluvial cycles, climate, and Puebloan settlement shifts near Zuni Salt Lake, New Mexico, USA. *Geoarchaeology* 23(1) : 107-130.
- HUNT, E., HUNT, R.C., 1973. Irrigation, conflict, and politics : a Mexican case. In : Downing, T., MacGuire, G. (Eds.) : *Irrigation's impact on Society*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 129-157.
- HUNT, R.C., 1988. Size and structure of authority in canal irrigation systems. *Journal of Anthropological Research* 44(4) : 335-355.
- HUNT, R.C., 1989. Appropriate social organization? Water user associations in bureaucratic canal irrigation systems. *Human Organization* 48(1) : 79-90.
- HUNT, R.C., 1994. Response to Price. *Journal of Anthropological Research* 50 : 205.
- HUNT, R.C., 2000. Labor productivity and agricultural development : Boserup revisited. *Human Ecology* 28(3) : 251-277.
- HUNT, R.C., GUILLET, D., ABBOTT, D.R., BAYMAN, J., FISH, P., FISH, S., KINTIGH, K., NEELY, J.A., 2005. Plausible ethnographic analogies for the social organization of Hohokam canal irrigation. *American Antiquity* 70 : 433-456.
- HUNT, R.C., HUNT, E., 1976. Canal irrigation and local social organization. *Current Anthropology* 17(3) : 389-411.

- HUNTER, R.E., 1977. Basic types of stratification in small eolian dunes. *Sedimentology* 24 : 361-387.
- HUNTER, R.E., 1981. Stratification styles in eolian sandstones : some Pennsylvanian to Jurassic examples from the Western Interior, U.S.A. In : Ethridge, F.G., Flores, R.M. (Eds.) : *Recent and ancient non-marine depositional environments : models for exploration*. SEPM Special Publications, pp. 315-329
- HUSSEIN, J., ADEY, M.A., 1998. Changes in microstructure, voids and b-fabric of surface samples of a Vertisol caused by wet/dry cycles. *Geoderma* 85 : 63-82.

I

- ISHII, Y., 1992. Needle crystal of calcium oxalate monohydrate found in plant. *Journal of Electron Microscopy* 41(1) : 53-56.

J

- JACKSON, A.H., 1884. *Report to commissioner of Indian Affairs*. Pima and Maricopa Agency, 24 August 1883, pp. 5-7.
- JACOB, J.S., 1995. Archaeological pedology in the Maya lowlands. In : Collins, M.E. (Ed.) : *Pedological perspectives in archaeological research*. Soil Science Society of America Special Publication 44, Madison, Wisconsin, pp. 51-79.
- JAILLARD, B., GUYON, A., MAURIN, A.F., 1991. Structure and composition of calcified roots, and their identification in calcareous soils. *Geoderma* 50 : 197-210.
- JENKS, G., CASPALL, F.C., 1971. *Error on choropleth maps : definition, measurement, reduction*. Annals of the Association of American Geographers 61 : 217-244.
- JOHNSON, A.W., EARLE, T.K., 1987. *The evolution of human societies : from foraging group to agrarian state*. Stanford University Press, Palo Alto, California, 374 pp.
- JOHNSON, C.D., 2006. *Critical natural resources in the Mesa Verde region, A.D. 600-1300. Distribution, use, and influence of the Puebloan settlements*. Ph.D. dissertation. Washington State University, Pullman.
- JOHNSON, J.K., 2000. *Geology of the Phoenix Mountains, central Arizona*. M.S. Thesis, Arizona State University, Tempe, 140 pp.
- JOHNSON, N., 2006. *Tohono O'odham community action. Food systems and rural development*. W.K. Kellogg Foundation. Interview de Nolan Johnson, le 6/1/2006 à Sells, Arizona.
- JOHNSON, W.C., ARBOGAST, A.F., HOMBURG, J.A., 1997. Alluvial geomorphology and geoarchaeology of the lower Verde. In : Homburg, J.A, Ciolek-Torrello, R. (Eds.) : *Vanishing river, landscapes and lives of the lower Verde Valley*. Statistical Research Inc, University of Arizona press, pp.17-33.

- JONES, D.A., 1996. *Proterozoic structural geology and stratigraphy of the Squaw Peak area, Phoenix Mountain, Arizona*. M.S. Thesis, Arizona State University, Tempe, 56 pp.
- JONES, E.L., 2005. Critique de l'ouvrage : *Prehistoric native americans and ecological change : human ecosystems in eastern north America since the Pleistocene* par Delcourt, P.A. et Delcourt, H.R., Cambridge University Press, New York, 2004, 214 pp. dans *PaleoAnthropology 2005(1)* : 10-12.
- JONES, P.D., MANN, M.E., 2004. Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics* 42 (2) : 1-42.
- JONES, P.D., WIGLEY, T.M.L., KELLY, P.M., 1982. Variations in surface air temperatures : Part1. Northern Hemisphere, 1881-1980. *Monthly Weather Review* 110 : 59-72.
- JONES, S.J., FROSTICK, L.E., ASTIN, T.R., 2001. Braided stream and floodplain architecture : the Rio Vero formation, Spanish Pyrenees. *Sedimentary Geology* 139 : 229-260.
- JONES, T.L., BROWN, G.M., RAAB, L.M., MCVICKAR, J.L., SPAULDING, W.G., KENNETT, D.J, YORK, A., WALKER, P.L., 1999. Environmental imperatives reconsidered : demographic crises in western north America during the Medieval Climatic Anomaly. *Current Anthropology* 40(2) : 137-170.
- JONGERIUS, A., 1970. Some morphological aspects of regrouping phenomena in Dutch soils. *Geoderma* 4 : 311-331.
- JUDD, N., 1931. *Arizona's prehistoric canals from the air*. Exploration and field work of the Smithsonian Institution in 1930, Washington D.C., pp. 157-168.
- JUDGE, W.J., 1984. New light on Chaco Canyon. In : Noble, D.G. (Ed.) : *New light on Chaco Canyon*. School of American Research Press, Santa Fe, pp 1-12.
- JUNG, C., 1998. La photo-et la carto-interprétation. In: Ferdière, A. (Ed.): *La prospection*. Editions Errance, Paris, pp.129-160.
- JUNG, J., 1969. *Précis de pétrographie*. Masson, Paris, 332 pp.
- JURWITZ, L., 1953. Arizona's two season rainfall pattern. *Weatherwise* 6 : 96-99.

K

- KAEMMERER, M., REVEL, J.C., 1991. Calcium carbonate accumulation in deep strata and calcrete in Quaternary alluvial formations of Morocco. *Geoderma* 48 : 43-57.
- KARLIN, R., 1990. Magnetic mineral diagenesis in suboxic sediments at Bettis Site W-N, NE Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research* 95 (B4) : 4421-4436.
- KARLIN, R., LEVI, S., 1983. Diagenesis of magnetic materials in recent hemipelagic sediments. *Nature* 303 : 327-330.
- KARLSTROM, E., KARLSTROM, T.N.V., 1986. Late Quaternary alluvial stratigraphy and soils of the Black Mesa-Little Colorado River areas, Northern Arizona. In : Nations, J.D., Conway, C.M., Swann, G.A. (Eds.) : *Geology of central and northern Arizona*. Geological Society of America, Rocky Mountain Section Guidebook, Flagstaff, pp. 71-92.

- KARLSTROM, T.N.V., 1988. Alluvial chronology and hydrologic change of Black Mesa and nearby regions. In : Gumerman, G.J. (Ed.) : *The Anasazi in a changing environment*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 45-91.
- KASPERSON, J.X., KASPERSON, R.E. (EDS.), 2001. *Global environmental risk*. United Nations University Press, Earthscan, London, 574 pp.
- KAYED, D., 2004. *Microbial quality of irrigation water used in the production of fresh produce in Arizona*. Ph.D. Dissertation, University of Arizona, Tucson, AZ.
- KAYSER, D.W., FIERO, D., 1969. *An archaeological survey of the Tucson aqueducts, Central Arizona Project*. Manuscript on file, Arizona State Museum Library, University of Arizona, Tucson.
- KEEFER, D.K., DEFRANCE, S., MOSELEY, M., RICHARDSON, J., SATTERLEE, D., DAY-LEWIS, A., 1998. Early maritime economy and El Nino events at Quebrada Tacahuay, Peru. *Science* 281 : 1833-1835.
- KELLY, S.B., OLSEN, H., 1993. Terminal fans- a review with references to devonian examples. *Sedimentary Geology* 85: 339-374.
- KEMP, R.A., 1995. Distribution and genesis of calcitic pedofeatures within a rapidly aggradating loess-paleosol sequence in China. *Geoderma* 65 : 303-316.
- KEMP, R.A., WHITEMAN, C.A., ROSE, J., 1993. Palaeoenvironmental and stratigraphic significance of the valley farm and Barham soils in eastern England. *Quaternary Science Reviews* 12 : 833-848.
- KENNETT, D.J., 2005. *The island Chumash : behavioral ecology of a maritime society*. University of California Press, Berkeley, 310 pp.
- KEVAN, D.K., 1962. *Soil animals*. Philosophical Library Inc., New York, 237 pp.
- KIDDER, A.V., 1924. *An introduction to the study of southwestern archaeology*, rev. ed. 1962. Yale University Press, New Haven, 400 pp.
- KILADIS, G.N., DIAZ, H.F., 1989. Global climate anomalies associated with extremes of the Southern Oscillation. *Journal of Climatology* 2 : 1069-1090.
- KIMBROUGH, D.L., ABBOTT, P.L., GASTIL, R.G. AND HAMNER, P.J.W., 1997. Provenance investigations using magnetic susceptibility. *Journal of Sedimentary Research* 67 : 879-883.
- KING, J.H., 1985. *Las Ruinitas: results of the data recovery program at AZ U:9:65 (ASM) [AZ U:9:38(ASU)], a prehistoric Hohokam site located northeast of Mesa, Maricopa, Arizona*. Ms. county, on file, Archaeological Research Services, Tempe.
- KLETETSCHKA, G., BANERJEE, S.K., 1995. Magnetic stratigraphy of Chinese loess as a record of natural fires. *Geophysical Research Letter* 22 : 1341-1343.
- KOCHEL, R.C., 1980. *Interpretation of flood paleohydrology using slackwater deposits, Lower Pecos and Devils rivers, southwestern Texas*. PhD dissertation, University of Texas, Austin, 364 pp.
- KOCHEL, R.C., 1988. Geomorphic impact of large floods-review and new perspectives on magnitude and frequency. In : Baker, V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C. (Eds.) : *Flood geomorphology*. John Wiley & Sons, New York, pp. 169-187.

- KOCHEL, R.C., MILLER, J.R., RITTER, D.F., 1997. Geomorphic response to minor cyclic climate changes, San Diego County, California. *Geomorphology* 19 : 277-302.
- KOCUREK, G., 1991. Interpretation of ancient eolian sand dunes. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 19 : 43-75.
- KOCUREK, G., DOTT, R.H. JR., 1981. Distinctions and uses of stratification types in the interpretation of eolian sand. *Journal of Sedimentary Petrology* 51 (2) : 579-595.
- KOHLER, T.A., MATTHEWS, M.H., 1988. Long-term Anasazi land use and forest reduction : a case study from southwest Colorado. *American Antiquity* 53(3) : 537-564.
- KOKALIS, P., 1971. *Terraces of the lower Salt River Valley, Arizona*. M.S. Thesis, Arizona State University.
- KOLATA, A.L., 1993. *The Tiwanaku : portrait of an Andean civilization*. Blackwell, Cambridge, UK, 256 pp.
- KOVDA, V.A., 1954. *La Géochimie des déserts de l'URSS*. Communication au 5me Congrès International de la Science du Sol, Académie des Sciences, Moscou.
- KRAUS, M.J., ASLAN, A., 1993. Eocene hydromorphic paleosols : significance for interpreting ancient floodplain processes. *Journal of Sedimentary Petrology* 63 : 453-463.
- KUBIENA, W.L., 1938. *Micropedology*. Collegiate Press, Ames, Iowa, 242 pp.
- KUCKELMAN, K.A., LIGHTFOOT, R.R., MARTIN, D.L., 2002. The bioarchaeology and taphonomy of violence at Castle Rock and Sand Canyon Pueblos, southwestern Colorado. *American Antiquity* 67 : 486-513.
- KUHNELT, W., 1976. *Soil biology with special reference to the animal kingdom*. English edition translated from German by N. Walker. Faber and Faber, London, 483 pp.
- KWIATKOWSKI, S.M., 1988. Flotation, macrobotanical, and charcoal analysis. In : Mitchell, D.R. (Ed.) : *Excavations at La Lomita Pequena : a Santa Cruz/Sacaton phase hamlet in the Salt River Valley*. Soil Systems Publications in Archaeology 10, Phoenix, pp. 231-269.
- KWIATKOWSKI, S.M., 1989a. El Caserio flotation and wood charcoal studies. In : Mitchell, D.R. (Ed.) : *El Caserio : Colonial period settlement along the east Papago freeway*. Soil Systems Publications in Archaeology 14, Phoenix, pp. 143-178.
- KWIATKOWSKI, S.M., 1989b. The paleoethnobotany of the Grand Canal ruins : results from flotation, macrobotanical, and wood charcoal analyses. In : Mitchell, D.R. (Ed.) : *Archaeological investigations at the Grand Canal ruins : a Classic period site in central Arizona*. Soil Systems Publications in Archaeology 12, Phoenix, pp. 497-557.
- KWIATKOWSKI, S.M., 1990. La Lomita flotation, macrobotanical, and wood charcoal results. In : Mitchell, D.R. (Ed.) : *The La Lomita excavations : 10th century Hohokam occupation in south-central Arizona*. Soil Systems Publications in Archaeology 15, Phoenix, pp. 169-186.
- KWIATKOWSKI, S.M., 1994. *The Pueblo Grande project. Vol.5 : Environment and subsistence*. Soil Systems Publications in Archaeology 20, Phoenix, 412 pp.

KWIATKOWSKI, S.M., 2003. Evidence for subsistence problems. In : Abbott, D.R. (Ed.) : *Centuries of decline during the Hohokam Classic period at Pueblo Grande*. University of Arizona Press, Tucson, pp 48-69.

L

LABELLE, J., EIGHMY, J., 1995. A reanalysis of archaeomagnetic samples from Pueblo Patricio. In : Henderson, T.K. (Ed.) : *The prehistoric archaeology of Heritage square*. Pueblo Grande Museum Anthropological Papers 3, Phoenix, pp. 179-192.

LAIRD, K.R., FRITZ, S.C., MAASCH, K.A., CUMMING, B.F., 1996. Greater drought intensity and frequency before A.D. 1200 in the northern Great Plains, U.S.A. *Nature* 384 : 552-554.

LAMBERT, J.B., 1997. *Traces of the past : unraveling the secrets of archaeology through chemistry*. Helix Books, 336 pp.

LANGAN, J.S., REHAR, C.C., 2008. *Class III cultural resources survey for the Avenida Rio Salado/Broadway road widening project, Phoenix, Maricopa County, Arizona*. HDR Engineering, Gerald A Doyle and Associates, Aztec Engineering, Phoenix, Arizona.

LANGBEIN, W.B., 1949. *Annual runoff in the United States*. US Geological Survey Circular 52, Washington D.C., 14 pp.

LANGBEIN, W.B., ET SCHUMM, S.A., 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Transactions of the American Geophysical Union* 39 : 1076-1084.

LANSING, S., 1991. *Priests and programmers : technologies of power in the engineered landscape of Bali*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 200 pp.

LEACH, E.R., 1959. Hydraulic society in Ceylon. *Past and Present* 15 : 2-26.

LEBEDEVA-VERBA, M.P., GERASIMOVA, M.I., 2009. Micromorphology of diagnostic horizons in aridic soils (complementary to the new classification system of soils of Russia). *Eurasian Soil Science* 42 (13) : 1427-1434.

LEBLANC, S.A., 1983. *The Mimbres people, ancient pueblo painters of the American southwest*. Thames and Hudson, New York, 184 pp.

LEBLANC, S.A., 1999. *Prehistoric warfare in the American Southwest*. University of Utah Press, Salt Lake City, 400 pp.

LEBORGNE, E. 1960. The influence of fire on the magnetic properties of soil overlying schist and granite. *Annales Geophysicae* 16 : 159-195.

LEE, W. T., 1904. *Underground waters of Gila Valley, Arizona*. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 104, 71 pp.

LEE, W.T., 1905. *Underground waters of the Salt River Valley, Arizona*. US. Geological Survey Water Supply Paper 136, 196 pp.

- LEES, S., 1973. *Sociopolitical aspects of canal irrigation in the Valley of Oaxaca*. University of Michigan, Memoirs of the Museum of Anthropology, Ann Harbor, 141 pp.
- LEGLER, R., 1970. *Habitat preference of the desert cottontail with additional notes on the black-tailed Jackrabbit*. New Mexico State University, Unpublished Master's thesis, Department of Anthropology, Las Cruces.
- LEOPOLD, L.B., 1951. Rainfall frequency: an aspect of climatic variation. *Amer. Geophys. Union* 32: 347-357
- LEOPOLD, L.B., MADDOCK, T.JR., 1953. *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*. U.S. Geological Survey Professional Paper 252, 56 pp.
- LEROYER, C., KRIER, V., 1991. Etudes environnementales des remplissages de fossés : premiers résultats micromorphologiques et palynologiques expérimentaux. In : *Archéologie expérimentale, Tome 2 - La Terre : l'os et la pierre, la maison et les champs*. Editions Errance, Paris, pp. 228-235.
- LEVEAU, P., LIVET, E., PROVANSAL, M., 1997. Temporalité résultante et temporalité émergente potentielle dans les temps de l'environnement. In : *Les temps de l'environnement, communications des Journées du Programme Environnement, Vie et Sociétés*. PIREVS CNRS, Centre des Congrès, Toulouse, 5-7 novembre 1997, sessions 1&2 : 97-106.
- LÉVÊQUE, C., MUXART, T., ABBADIE, L., WEIL, A., VAN DER LEEUW, S., 2003. L'anthroposystème : entité structurelle et fonctionnelle des interactions sociétés-milieus. In : Lévêque, C., van Der Leeuw, S. (Eds.) : *Quelles natures soulons-nous?*. Elsevier, Paris, pp. 110-129.
- LIGHTFOOT, R.R., KUCKELMAN, K.A., 2001. A case of warfare in the Mesa Verde region. In : Rice, G.E., LeBlanc, S.A. (Eds.) : *Deadly landscapes : case studies in prehistoric southwestern warfare*. University of Utah Press, Salt Lake City, pp. 51-64.
- LIMBREY, S., 1983. Archaeology and paleohydrology. In : Gregory, K.J. (Ed.) : *Background to palaeohydrology*. John Wiley & Sons, New York, pp. 189-212.
- LINDAUER, O., BLITZ, J., 1997. Higher ground : the archaeology of North American platform mounds. *Journal of Archaeological Research* 5(2) : 169-207.
- LIPE, W.D., 1995. The depopulation of the northern San Juan : conditions in the turbulent 1200s. *Journal of Anthropological Archaeology* 14 : 99-103.
- LIPPINCOTT, J.B., 1900. *Storage of water on Gila River, Arizona*. U.S. Geological Survey Water Supply and Irrigation Paper 33, 98 pp.
- LIU, X.M., ROLPH, T., BLOEMENDAL, J., SHAW, J., LIU, T.S., 1995. Quantitative estimates of palaeoprecipitation at Xifeng, in the Loess Plateau of China. *Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 113 : 243-248.
- LOENDORF, C., WOODSON, M.K., 2008. *The Santan data recovery project : archaeological investigations in the Santan area of the Gila River Indian Community. Vol. 1 : Lower Santan Village*. P-MIP technical report N° 2007-03, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton.
- LOPEZ-GOMEZ, J., ARCHE, A., 1993. Architecture of the canizar fluvial sheet sandstones, early Triassic, Iberian Ranges, eastern Spain. *Spec. Publs Int. Ass. Sediment.* 17 : 363-381.

- LOVE, D.W., 1977. *Dynamics of sedimentation and geomorphic history of Chaco Canyon National Monument, New Mexico*. New Mexico Geological Society Guidebook, 28th Field Conference, pp. 291-300.
- LOVE, D.W., 1979. Quaternary fluvial geomorphic adjustments in Chaco Canyon, New Mexico. In : Rhode, D.W., Williams, G.P. (Eds.) : *Adjustments of the fluvial system*. Dubuque, Kendall-Hunt, Iowa, pp. 277-308.
- LOVELY, D.R., STOLZ, J.F., NORD, G.L., PHILLIPS, E.J., 1987. Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing micro-organism. *Nature* 330 : 279-281.
- LOWE, C.H., BROWN, D.E., 1973. *The natural vegetation of Arizona*. Arizona Resources Information Systems Cooperative Publication 2, Phoenix, 53 pp.
- LOWELL, J.C., 2007. Women and men in warfare and migration : implications of gender imbalance in the Grasshopper region of Arizona. *American Antiquity* 72 : 95-123.
- LUCKINGHAM, B., 1989. *Phoenix : the history of a southwestern metropolis*. University of Arizona Press, Tucson, 316 pp.
- LYONS, P.D., 2003. *Ancestral Hopi migrations*. University of Arizona Anthropological papers 68, Tucson, 142 pp.

M

- MABRY, J.B., 1995. A thousand years of irrigation in Tucson. *Newsletter of the Center for Desert Archaeology* 9(4) : 1-6.
- MABRY, J.B., 1996. The ethnology of local irrigation. In : Mabry, J.B. (Ed.) : *Canals and communities : small scale irrigation systems*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 3-32.
- MABRY, J.B., 1999. *Las Capas and early irrigation farming*. *Archaeology Southwest*, Center for Desert Archaeology 13 : 14.
- MABRY, J.B., 2000. Wittfogel was half right : the ethnology of consensual and nonconsensual hierarchies in irrigation management. In : Diehl, M.W. (Ed.) : *Hierarchies in action : cui bono?*. Center for Archaeological Investigations Occasional Papers 27, Southern Illinois University, Carbondale, pp. 284-294.
- MABRY, J.B., 2001. *Rio Nuevo archaeological program : summary of data recovery results from the Clearwater site*. Report to the City of Tucson On file, Desert Archaeology, Inc., Tucson.
- MABRY, J.B., 2006. Geomorphology and stratigraphy. Rio Nuevo Archaeology Project. Tucson, Arizona. Ch. 20.1-20.24. http://www.cdarc.org/pdf/rn/rio_nuevo_ch20.pdf
- MACAIRE, J., 1990. L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviatiles superficiels : de la géodynamique à la chronostratigraphie. *Quaternaire* 1 : 41-49.
- MACCABE, G.J., PALECKI, M.A., BETANCOURT, J.L., 2004. Pacific and atlantic ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States. *Proceedings National Academy Science U.S.A.* 101(12) : 4136- 4141.

- MACCARTNEY, P.H., LINDAUER, O., RICE, G.E., RAVESLOOT, J.C., 1994. Chronological methods. In : Jacobs, D. (Ed.) : *Archaeology of the Salado in the Livingston area of Tonto basin : Roosevelt mound platform study, report on the Livingston management group, Pinto Creek Complex, Part I*. Arizona State University Anthropological Field Studies 32, Tempe, pp. 21–35.
- MACCLINTOCK, J.H., 1921. *Mormon settlement in Arizona*. Manufacturing Stationers, Phoenix, 307 pp.
- MACDONALD, H.R., WOLCOTT, H.N., BLUHM, F.I., 1947. *Geology and ground-water resources of paradise valley, maricopa County, Arizona*. US geological survey open-file report, 34 pp.
- MACDONALD, J.E., 1956. *Variability of precipitation in an arid region : a survey of characteristics for Arizona*. Technical report on the meteorology and climatology of arid regions 1, Inst. Atm. Phys. Tech, University of Arizona, Tucson.
- MACDONALD, J.E., 1960. Variability factors in mountain-watershed hydrometeorology in an arid region. *Journal Arizona Academy Science* 1 (3) : 89-98.
- MACFADDEN, L.D., MCAULIFFE, J.R., 1997. Lithologically influenced geomorphic response to Holocene climatic changes in the Southern Colorado Plateau, Arizona : a soil-geomorphic and ecologic perspective. *Geomorphology* 19 : 303-332.
- MCGLADE, J., 1995. Archaeology and the ecodynamics of human modified landscapes. *Antiquity* 69 : 113-132.
- MACKEE, E.D., WEIR, G.W., 1953. Terminology for stratification and cross-stratification in sedimentary rocks. *Geology Society America Bulletin* 64 : 381-390.
- MACKEE, E.D., CROSBY, E.J., BERRYHILL, H.L., 1965. Flood deposit, Bijou creek, Colorado, June 1965. *Journal of Sedimentary Petrology* 37(3) : 829-851.
- MACKEOWN, T.C., 2006. *Notice of inventory completion*. National NAGPRA Program, Museum of Northern Arizona, Flagstaff. http://www.nps.gov/nagpra/fed_notices/nagpradir/nic0934.html
- MACLAUGHLIN, D., 1976. Report on analysis of pollen samples from Hohokam irrigation canal sites AZ U:9:2, AZ U:9:28, and AZ U:9:26. In : Masse, R. (Ed.) : *The Hohokam Expressway, a study of prehistoric irrigation in the Salt River Valley, Arizona*. Arizona State Museum, University of Arizona, Tucson, pp. 66-69.
- MACPHAIL, R.I., 1986. Paleosols in archaeology : their role in understanding Flandrian pedogenesis. In : Wright, P. (Ed.) : *Paleosols, their recognition and interpretation*. Blackwell Scientific Publication, Oxford, pp. 263-290.
- MACPHAIL, R.I., 1990. *Soil report on the deansway archaeology project, Worcester*. Ancient Monuments Laboratory Report 82/91, English Heritage.
- MACPHAIL, R.I., 1992. Soil micromorphological evidence of ancient soil erosion. In : Bell, M., Boardman, J. (Eds.) : *Past and present soil erosion*. Oxbow Monograph 22, Oxford, pp. 197-215.
- MACPHAIL, R.J., ROMANS, J.C.C., ROBERTSON, L., 1987. The application of micromorphology to the understanding of Holocene soil development in the British Isles, with special reference to early cultivation. In : Fedoroff, N., Bresson, L.M., Courty, M.A. (Eds.) : *Micromorphologie des sols*. AFES, Plaisir, pp. 647-656.

- MACPHAIL, R.I., COURTY, M.A., GEBHARDT, A. 1990. Soil micromorphological evidence of early agriculture in north-west Europe. *World Archaeology* 22 : 53-69.
- MAGERS, P.C., 1974. Appendix D. Technical analysis of perishable artifacts from the Escalante Ruin group. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *Excavations in the Escalante Ruin group, Southern Arizona*. Arizona State Museum, University of Arizona, Tucson, 342 pp.
- MAHER, B.A., THOMPSON, R., ZHOU, L.P., 1994. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon : a new mineral magnetic approach. *Earth Planetary Science Letters* 125 : 461-471.
- MALAVOI, J.-R., BRAVARD, J.-P., 1994. *Eléments d'hydromorphologie fluviale*. Office National des Eaux et des Milieux Aquatiques. <http://www.onema.fr/hydromorphologie-fluviale>, 224 pp.
- MANN, S., 1985. Structure, morphology and crystal growth of bacterial magnetite. In : Kirschvink, J.L., Jones, D.S., McFadden, B.J. (Eds.) : *Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms : a new biomagnetism*. Plenum, New York, pp. 311-332.
- MANN, D.H., MELTZER, D.J., 2007. Millennial-scale dynamics of valley fills over the past 12,000 14 C Yr in northeastern New Mexico, USA. In: *Geological Society of America Bulletin* 119: 1433-1448.
- MANNING, J.G., 2002. Irrigation et État en Égypte antique . *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 2002/3 57e année, pp. 611-623.
- MARMADUKE, W.S., HENDERSON, K.T., 1995. *Archaeology in the distribution division of the Central Arizona Project : thoughts on the history of the Hohokam culture of Southern Arizona, and on the practice of archaeology in the 1990's*. Northland Research Inc., Bureau of Reclamation Contract No. 3-PA-30-00740., Flagstaff, Arizona.
- MARIN, C., 2006. *A Short History of South Phoenix from 1865 to the early 1930's*. http://www.barrioazona.com/short_history_south_phoenix_1865_1930s.html
- MARSHALL, J.T., 2001. Hohokam regional ballcourt data. In. Craig, D.B. (Ed.) : *The Grewe Archaeological Research Project. Vol 1: project background and feature descriptions*. Northland Research Anthropological Papers 99-1, Tempe, Arizona, USA, pp. 571-585.
- MARTIN, A.J., 2000. Flaser and wavy bedding in ephemeral streams : a modern and an ancient example. *Sedimentary Geology* 136(1-2) : 1-5.
- MASON, J.A., SWINEHART J.B., GOBLE R.J., LOOPE, D.B., 2004. Late-Holocene dune activity linked to hydrological drought, Nebraska sand hills, USA. *The Holocene* 14(2) : 209-217.
- MASSE, W.B., 1976. *The Hohokam Expressway project : a study of prehistoric irrigation in the Salt River valley, Arizona*. Arizona State Museum Contributions to Highway Salvage Archaeology in Arizona 43., University of Arizona, Tucson.
- MASSE, W.B., 1980. *Excavations at Gu Achi. A reappraisal of Hohokam settlement and subsistence in the Arizona Papageria*. Western Archeological and Conservation Center Publications in Anthropology 12, Tucson, 458 pp.
- MASSE, W.B., 1981. A reappraisal of the protohistoric Sobaipuri Indians of southeastern Arizona. In : Wilcox, D.R., Masse, W.B. (Eds.) : *The protohistoric period in the North American Southwest, A.D. 1450-1700*. Arizona State University Anthropological Research Paper 24, Tempe, pp. 28-56.

- MASSE, W.B., 1987. *Archaeological investigations of portions of the Las Acequias-Los Muertos irrigation system*. Arizona State Museum Archaeological Series 176, University of Arizona, Tucson.
- MASSE, W.B., 1991. The quest for subsistence sufficiency and civilization in the Sonoran desert. In: Crown, P.L., Judge, W.J. (Eds) : *Chaco and Hohokam prehistoric regional systems in the American Southwest*. School of American Research Press, Santa Fe, pp 195-224.
- MATHIEU, C., RUELLAN, A., 1987. Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi-aride: l'exemple de la Basse Moulouya (Maroc). *Cahiers ORSTOM Pédologie*, 13 : 3-25.
- MATTHEWS, W.J., WORTMAN, L., BILLINGS, J.S., 1893. *The human bones of the Hemenway collection in the United States Army medical museum*. National Academy of Sciences, Vol. VI, 7th Memoir, pp. 139-286.
- MAWN, G.P., 1977. Promoters, speculators, and the selection of the Phoenix townsite. *Arizona and the West* 19 : 207-224.
- MEANS, T.H., 1901. *Soil survey in Salt River valley, Arizona*. United States Department of Agriculture Bureau of Soils, Second Report, Washington D.C., pp. 287-322.
- MEHRINGER, P.J. JR., 1967. Pollen analysis and the alluvial chronology. *The Kiva* 32 : 96-101.
- MEHRINGER, P.J.JR., MARTIN, P.S., HAYNES, C.V.JR., 1967. Murray springs, a mid-postglacial pollen record from southern Arizona. *American Journal of Science* 265 : 786-797.
- MEHRINGER, P.J.JR., WARREN, C.N., 1976. Marsh, dune and archeological chronology, ash meadows, Amargosa desert, Nevada. In : Elston, R., Headrick, P. (Eds.) : *Holocene environmental change in the Great Basin*. Nevada Archeological Survey Research Paper 6, pp 120-150.
- MENU, B. (Dir.), 1994. *Les problèmes institutionnels de l'eau en Égypte ancienne et dans l'antiquité méditerranéenne*. Actes du Colloque AIDEA Vogüé 1992 , Bibliothèque d'étude-110, Institut français d'archéologie orientale, Le Caire.
- MEYER, G.A., WELLS, S.G., BALLING, R.C.JR., JULL, A.J.T., 1992. Response of alluvial systems to fire and climate change in Yellowstone National Park. *Nature* 357 : 147-150.
- MEYER, G.A., WELLS, S.G., JULL, A.J.T., 1995. Fire and alluvial chronology in Yellowstone National park : climatic and intrinsic controls on Holocene geomorphic processes. *Geological Society American Bulletin* 107 : 1211-1230.
- MIALL, A.D., 1985, Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Review* 22: 261-308.
- MICHAELSON, J., 1989. Long-period fluctuations in El Niño amplitude and frequency reconstructed from tree rings. In: Peterson, D.H. (Ed.): *Aspects of climate variability in the Pacific and Western Americas*. Geophysical Monography Aps. 55, American Geophysical Union, Wahsington D.C., pp 69-74.
- MIDVALE, F., 1963. *The prehistoric irrigation of the Casa Grande ruins area of the Gila River in southern Arizona*. Site Survey Records, Arizona State Museum, University of Arizona, Tucson.
- MIDVALE, F., 1965. Prehistoric irrigation of the Casa Grande Ruins Area. *The Kiva* 30 : 82-86.

- MIDVALE, F., 1966. *The Prehistoric Irrigation of the Salt River Valley, 4th edition*. Map on file, Department of Anthropology, Arizona State University, Tempe.
- MIDVALE, F., 1968. Prehistoric irrigation in the Salt River Valley. *The Kiva* 34 : 28-32.
- MIKSICEK, C.H., 1983a. Archaeobotanical aspects of Las Fosas : a statistical approach to prehistoric plant remains. In : Teague, L.S., Crown, P.L (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol VI : Habitation sites on the Gila River*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, University of Arizona, Tucson, pp. 671-700.
- MIKSICEK, C.H., 1983b. Archaeobotanical remains from the Gopherette Site. In : Teague, L.S., Crown, P.L (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol VI : Habitation sites on the Gila River*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, University of Arizona, Tucson, pp. 353-366.
- MIKSICEK, C.H., 1983c. Flotation results from AZ U :15 :84. In : Teague, L.S., Crown, P.L. (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol VI : Habitation sites on the Gila River*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, University of Arizona, Tucson, pp. 741-745.
- MIKSICEK, C.H., 1983d. Plant remains from agricultural features. In : Teague, L.S., Crown, P.L (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project, Vol. III : Specialized activity sites*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, University of Arizona, Tucson, pp. 604-620.
- MIKSICEK, C.H., 1984a. Archaeobotanical remains from Frogtown. In : Teague, L.S., Crown, P.L (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol. IV : Prehistoric occupation of the Queen Creek delta*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, University of Arizona, Tucson, pp. 563-590.
- MIKSICEK, C.H., 1984b. Historic desertification, prehistoric vegetation change, and Hohokam subsistence in the Salt-Gila Basin. In : Teague, L.S., Crown, P.L (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol. VII : Environment and subsistence*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, University of Arizona, Tucson, pp. 53-80.
- MIKSICEK, C.H., 1987. Wood charcoal and seeds. In : Masse, W.B. (Ed.) : *Archaeological investigations of portions of the Las Acequias-Los Muertos irrigation system*. Arizona State Museum Archaeological Series 176, University of Arizona, Tucson, pp 169-175.
- MIKSICEK, C.H., 1989. Snails, seeds, and charcoal : biological remains from La Cuenca del Sedimento. In : Henderson, T.K. (Ed.) : *Prehistoric agricultural activities on the Lehi-Mesa terrace : excavations at La Cuenca del Sedimento*. Northland Research, Flagstaff, pp. 222-242.
- MIKSICEK, C.H., GASSER, R.E., 1989. Hohokam plant use at Las Colinas : the flotation evidence. In : Graybill, D.A., Gregory, D.A., Nials, F.L., Fish, S.K., Miksicek, C.H., Gasser, R.E., Szuter, C.R. (Eds.) : *The 1982-1984 excavations at Las Colinas. Vol. V : Environmental subsistence*. Arizona State Museum Archaeological Series 162, University of Arizona, Tucson, pp. 95-115.
- MIKSICEK, C.H., 1990. Pioneer to present : archaeobotanical remains from Ak-Chin, Arizona. In : Gasser, R.E., Jackson, J.B. (Eds.) : *Archaeology of the Ak-Chin Indian Community west side farms project : subsistence studies, synthesis and interpretations*. Soil System Publications in Archaeology 9 (5).

- MIKSICEK, C.H., 1992. The verde bridge project : a view from the float tank. In : Hackbarth, M.R. (Ed.) : *Prehistoric and historic occupation of the lower Verde River valley : the state route 87*. Northland Research Inc., Arizona Department of Transportation Contract No. 89-28, Flagstaff, pp. 313-339.
- MILES, W., WOODSON, M.K., 2008. *Annual report on cultural resources tasks conducted in fiscal year 2007 under the programmatic agreement regarding approval of essential services constructed in underground utility corridors on the Gila River Indian Community, Arizona*. CRMP Technical Report No. 2007-10, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton, Arizona, pp. 39-90.
- MILES, W.D., WRIGHT, D.K., WOODSON M. K., 2010. Hohokam irrigated fields near Upper Santan village on the Gila River. *Journal of Arizona Archaeology* 1 : 20-32.
- MILICH, A.R., translator, 1966. *Relaciones by Zárate Salmerón*. Horn & Wallace Publisher, Albuquerque, 123 pp.
- MILLER, W.R., 1983. Uto-Aztecan languages. In : Ortiz, A. (Ed.) : *Southwest*. Handbook of North American Indians 10 : 113-124.
- MILLER, J., 1994. Pueblo Grande flotation, macrobotanical, and wood charcoal analysis. In : Kwiatkowski, S. (Ed.) : *The Pueblo Grande project. Vol. 5 : Environment and subsistence*. Soil Systems Publications in Archaeology 20, Phoenix, pp. 127-204.
- MILLON, R., 1962. Variations in social responses to the practice of irrigation agriculture. In : Woodbury, R.B. (Ed.) : *Civilizations in desert lands*. University of Utah Anthropological Papers 62, Salt Lake City, pp 56-88.
- MILLOT, G., 1979. Les phénomènes d'épigenie calcaire et leur rôle dans l'altération. *Science du Sol* 2/3 : 259-261.
- MILLOT, G., NAHON, D., PAQUET, H., RUELLAN, A., TARDY, Y., 1977. L'épigenie calcaire de roches silicatées dans les encroûtements carbonatés en pays subaride Antiatlas, Maroc. *Sci. Geol. Bull.* 30(3) : 129-152.
- MILLSPAUGH, S.H., WHITLOCK, C., BARTLEIN, P.J., 2000. Variations in fire frequency and climate over the past 17 000 years in central Yellowstone national park. *Geology* 28(3) : 211-214.
- MINDELEFF, C., 1896. *Aboriginal remains in Verde Valley, Arizona*. 13th Annual report of the Bureau of American Ethnology. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., pp. 179-261.
- MINDELEFF, C., 1897. *Cliff ruins of Canyon de Chelly, Arizona*. 16th Annual report of the Bureau of Ethnology to the secretary of the Smithsonian Institution, 1894-95, Government Printing Office, Washington D.C., pp. 73-198.
- MINNIS, P.E., 1985. *Social adaptation to food stress*. University of Chicago Press, Prehistoric archeology and ecology series, Chicago, 250 pp.
- MITCHELL, W., 1973. The hydraulic hypothesis : a reappraisal. *Current Anthropology* 14 : 532-534.
- MITCHELL, D.R., 1988. *Excavations at La Lomita Pequeña : a Santa Cruz-Sacaton phase hamlet in the Salt River Valley*. Soil Systems Publications in Archaeology 10, Phoenix, 588 pp.

- MITCHELL, D.R. (ED.), 1989. *Archaeological investigations at the Grand Canal ruins : a Classic period site in Phoenix, Arizona*. Soil Systems Publications in Archaeology 12, Phoenix, 567 pp.
- MITCHELL, D.R. 1989b. *El Caserío : Colonial period settlement along the East Papago freeway*. Soil Systems Publications in Archaeology 14, Phoenix, 420 pp.
- MITCHELL, D.R. (ED.), 1990. *The La Lomita excavations : 10th century Hohokam occupation in South-Central Arizona*. Soil System Publications in Archaeology 15, Phoenix, 385 pp.
- MITCHELL, D.R., MOTSINGER, T. (EDS.), 1998. *Life at the river's edge : Hohokam irrigation and settlement along the Red Mountain freeway between Price road and McKellips road*. SWCA Archaeological Report 97-23, Scottsdale.
- MITCHELL, D.R., LINDLY, J.M., NORTH, C., 2004. *Results of archaeological monitoring for a portion of the Lombeye Ruin, AZ T:12:109(ASM), in Phoenix, Maricopa County, Arizona*. SWCA, Project No. 6922-031, Phoenix.
- MOBERG, A., SONECHKIN, D.M., HOLMGREN, K., DATSENKO, N.M., KARLEN, W., 2005. Highly variable northern hemisphere temperatures from low- and high-resolution proxy data. *Nature* 433 : 613-617.
- MOHR, J.A., WHITLOCK, C., SKINNER, C.N., 2000. Postglacial vegetation and fire history, eastern Klamath Mountains, California, USA. *The Holocene* 10(4) : 587-601.
- MONGER, H.C., DAUGHERTY, L.A., LINDEMANN, W.C., LIDDELL, C.M., 1991. Microbial Precipitation of pedogenic calcite. *Geology* 19: 997-1000.
- MORATTO, M.J., KING, T.F., WOOLFENDEN, W.B., 1978. Archaeology and California's climate. *The Journal of California Anthropology* 5 : 147-161.
- MORRISON, R.B., 1978. Quaternary soil stratigraphy. Concepts, methods and problems. In : Mahoney, W.C. (Ed) : *Quaternary Soils*. Geoabstracts, pp. 77-108.
- MORRISON, R.B., 1985. *Pliocene/Quaternary geology, geomorphology, and tectonics of Arizona*. Geological Society of America Special Paper 203, pp. 123-146.
- MORIN, R.B., 1987. Des terres sans hommes aux hommes sans terres: les paramètres agraires de l'évolution démographique dans l'Indoamérique (Mexique-Pérou). In : Fauve-Chamoux, A. (Ed.) : *Évolution agraire et croissance démographique*. Liège, Ordina Éditions, 1987, p. 75-87
- MORRIS, D.H., 1969. Red Mountain : an early Pioneer period Hohokam site in the Salt River valley. *American Antiquity* 34 : 40-53.
- MOUSSAVI-HARAMI, R., MAHBOUBI, A., NADJAFI, M., BRENNER, R.L., MORTAZAVI, M., 2009. Mechanism of calcrete formation in the Lower Cretaceous (Neocomian) fluvial deposits, northeastern Iran based on petrographic, geochemical data. *Cretaceous Research* 30 : 1146-1156.
- MOY, C.M., SELTZER, G.O., RODBELL, D.T., ANDERSON, D.M., 2002. Variability of El Niño/southern oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature* 420: 162-165.
- MUHS, D.R., AGER, T.A., BETTIS III, E.A., MCGEEHIN, J., BEEN, J.M., BEGÉT, J.E., PAVICH, M.J., STAFFORD, JR.T.W., STEVENS, D.A.S.P., 2003. Stratigraphy and paleoclimatic significance of late Quaternary loess-paleosol sequences of the last interglacial-glacial cycle in central Alaska. *Quaternary Science Reviews* 22 : 1947-1986.

- MULLINS, C.E., 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science, a review. *Journal of Soil Science* 28: 223-246.
- MUNSON, P.J., PARMALEE, P.W., YARNELL, R.A., 1971. Subsistence ecology of scovill, a terminal middle woodland village. *American Antiquity* 36 : 410-431.
- MURPHY, C.E., 1906. *Destructive floods in the United States in 1905*. U.S. Geological Survey Water Supply and Irrigation Paper 162, 105 pp.
- MURPHY, C.P., MCKEAGUE, J.A., BRESSON, L.M., BULLOCK, P., KOOISTRA, M.J., MIEDEMA, R., STOOPS, G., 1985. Description of soil thin sections : an international comparison. *Geoderma* 35 : 15-37.

N

- NABHAN, G.P., 1979. The ecology of floodwater farming in southwest North America. *AgroEcosystems* 5 : 245-255.
- NABHAN, G.P., 1984. Soil fertility renewal and water harvesting in Sonoran desert agriculture. *Arid Lands Newsletter* 20 : 21-28.
- NABHAN, G.P., 1985. *Gathering the desert*. University of Arizona Press, Tucson, 209 pp.
- NABHAN, G.P., 1986. Ak-chin "Arroyo Mouth" and the environmental setting of the Papago Indian fields in the Sonoran Desert. *Applied Geography* 6(2) : 61-75.
- NAHON, D.H., RUELLAN, A. 1975. Les accumulations de calcaire sur les marnes éocènes de la falaise de Thiès (Sénégal). Mise en évidence de phénomènes d'épigénie. In : Vogt, T. (Ed.) : *Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale*. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 150 pp.
- NEITZEL, J., 1987. The sociopolitical implications of canal irrigation : a consideration of the Hohokam. In : Gaines, S.W. (Ed.) : *Coasts, plains and deserts : essays in honor of Reynold J. Ruppé*. Arizona State University Anthropological Research Papers 38, Tempe, pp. 205-212.
- NELSON, R.S., 1986. Pochtecas and prestige : mesoamerican artifacts in Hohokam sites. In : Mathien, F.J., McGuire, R.H. (Eds.) : *Ripples in the Chiehimée sea, new consideration of Southwestern-Mesoamerican interactions*. Southern Illinois University Press, Carbondale, pp. 154-182.
- NELSON, B.A., LEBLANC, S.A., 1986. *Short-term sedentism in the American southwest : the Mimbres valley Salado*. Maxwell Museum of Anthropology and University of New Mexico Press, Albuquerque, 307 pp.
- NELSON, R.S., 1991. *Hohokam marine shell exchange and artifacts*. Arizona State Museum Archaeological Series 179, University of Arizona, Tucson, 108 pp.
- NELSON, M.C., 1999. *Mimbres during the twelfth century : abandonment, continuity, and reorganization*. University of Arizona Press, Tucson, 256 pp.
- NELSON, M.C., KINTIGH, K., ABBOTT, D.R., ANDERIES, J.M., 2010. The cross-scale interplay between social and biophysical context and the vulnerability of irrigation-dependent societies : archaeology's long-term perspective. *Ecology and Society* 15(3) : 31 pp.

- NETTING, R., 1974. The system nobody knows : village irrigation in the Swiss Alps. In : Downing, T.E., McGuire, G. (Eds.) : *Irrigation 's impact on society*. Anthropological Papers of the University of Arizona 25, Tucson, pp. 67-75.
- NETTING, R., 1993. *Smallholders, householders : farm families and the ecology of intensive sustainable agriculture*. Stanford University Press, Palo Alto, California, 416 pp.
- NI, F., CAVAZOS, T., HUGHES, M.K., COMRIE, A.C., FUNKHOUSER, G., 2002. Cool-season precipitation in the southwestern USA since AD 1000 : comparison of linear and nonlinear techniques for reconstruction. *International Journal of Climatology* 22(13) : 1645-1662.
- NIALS, F.L., GREGORY, D.A., GRAYBILL, D.A., 1986. Salt River streamflow and the Hohokam irrigation system. In : Graybill, D.A., Gregory, D.A., Nials, F.L., Fish, S.K., Gasser, R.E., Miksicek, C.H., Szuter, C.R. (Eds.) : *The 1982-1984 excavations at Las Colinas. Vol. 5 : Environment and subsistence*. Arizona State Museum Archaeological Series 162, Tucson, pp. 59-78.
- NIALS, F.L., FISH, S.K., 1988. Canals and related features. In : Graybill, D., Gregory, D., Nials, F. (Eds.) : *The 1982-1984 excavations at Las Colinas : the site and its features*. Arizona State Museum Archaeological Series 162, Tucson, pp. 275-305.
- NIALS, F.L., GREGORY, D.A., 1989. Irrigation systems in the Lower Salt valley. In : Graybill, D.A., Gregory, D.A., Nials, F.L., Fish, S.K., Gasser, R.E., Miksicek, C.H., Szuter, C.R. (Eds.) : *The 1982-1984 excavations at Las Colinas. Vol. 5 : Environment and subsistence*. Arizona State Museum Archaeological Series 162, Tucson, pp. 39-58.
- NIALS, F., GREGORY, D., GRAYBILL, D., 1989. Long-term streamflow reconstructions, river channel morphology, and aboriginal irrigation systems along the Salt and Gila Rivers. In : Dean, J., Doyel, D. (Eds.) : *Environmental change and human adaptation in the ancient Southwest*. University of Utah Press, Salt Lake City, 44 pp.
- NICHOLAS, L., FEINMAN, G., 1989. A regional perspective on Hohokam irrigation in the lower Salt River valley, Arizona. In : Upham, S., Lightfoot, K.G., Jewett, R.A. (Eds.) : *The sociopolitical structure of prehistoric southwestern societies*. Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 199-236.
- NICHOLAS, L., NEITZEL, J., 1984. Canal irrigation and sociopolitical organization in the lower Salt River Valley : a diachronic analysis. In : Fish, P.R., Fish, S.K. (Eds.) : *Prehistoric agricultural strategies in the Southwest*. Arizona State University Anthropological Research Paper 33, Tempe, pp. 161-178.
- NICHOLAS, L. 1981. *Irrigation and sociopolitical development in the Salt River valley, Arizona : an examination of three prehistoric canal systems*. Arizona State University, Ms. on file, Department of Anthropology, Tempe.
- NIELSEN, B.M., RASMUSSEN, T.M., 2002. Geological correlation of magnetic susceptibility and profiles from Nordre Strømfjord, southern West Greenland. *Geology of Greenland Survey Bulletin* 191 : 48-56.
- NORRIS, R.W., 1869. *Unpublished cadastral survey field notes and plat maps* (Florence area, Pinal County, Arizona). Microfiche on file, Bureau of Land Management, Phoenix.

O

- OLDFIELD, F., 1992. The source of fine-grained 'magnetite' in sediments. *The Holocene* 2(2) : 180-182.
- OLDFIELD, F., THOMPSON, R., DICKSON, D.P.E., 1981. Artificial enhancement of stream bedload : a hydrological application of superparamagnetism. *Phys. Earth Planet. Inter.* 26 : 107-124.
- OLMSTEAD, F.H., 1919. *Gila River flood control, a report on flood of the Gila River in Graham County, Arizona*. U.S. 65th Congress, 3d Session, Document 436, 94 pp.
- ONKEN, J., 2005. Alluvial geomorphology. In : Huber, E., Van West, C. (Eds.) : *Archaeological data recovery in the New Mexico transportation corridor and first five-year permit area, Fence lake coal mine project, Catron County, New Mexico. Vol.3 : Environment*. Statistical Research Technical Series 84, Tucson, pp. 26.1–26.47.
- ONKEN, J., VAN WEST, C., 2005. Paleoenvironmental reconstruction. In : Huber, E., Van West, C. (Eds.) : *Archaeological data recovery in the New Mexico transportation corridor and first five-year permit area, Fence Lake Coal Mine Project, Catron County, New Mexico. Vol.4 : Synthetic studies and summary*. Statistical Research Technical Series 84, Tucson, pp. 35.1–35.38.
- ONKEN, J., WATERS, M.R., HOMBURG, J.A., 2004. *Geoarchaeological assessment for the Tres Rios Project, Maricopa County, Arizona*. Statistical Research Inc., Technical Report 03-68, Redlands, California.
- O'CONNOR, J.E., ELY, L.L., WOHL, E.E., STEVENS, L.E., MELIS, T.S., KALE, V.S., BAKER, V.R., 1994. A 4500-year record of large floods on the Colorado River in the Grand Canyon, Arizona. *Journal of Geology* 102 : 1-9.
- OPENHEIMER, J.M., SUMNER, J.S., 1980. *Depth-to-bedrock map, Basin and Range Province, Arizona*. Scale 1:1,000,000. University of Arizona, Laboratory of Geophysics, Tucson.
- OVIATT, C.G., 1985. Late Quaternary geomorphic changes along the San Juan River and its tributaries near Bluff, Utah. *Utah Geological and Mineral Survey Special Studies* 64 : 32-47.
- OVIATT, C.G., 1988. Late Pleistocene and Holocene lake fluctuations in the Sevier Lake Basin, Utah, USA. *Journal of Paleolimnology* 1 : 9-21.

P

- PACKARD, F., 1974. *The hydraulic geometry of a discontinuous ephemeral stream on a bajada near Tucson, Arizona*. Ph.D. thesis, University of Arizona, Tucson, 127 pp.
- PAILES, R.A., 1963. *An analysis of the Fitch site and its relationship to the Hohokam Classic period*. Arizona State University, Master's thesis, Tempe.
- PALACIOS-FEST, M.R., 1989. Late Holocene ostracodes as hydrochemical indicators in the Phoenix Basin. In : Ackerly, N.W., Henderson, T.K. (Eds.) : *Prehistoric agricultural activities on the Lehi-Mesa Terrace : perspectives on Hohokam irrigation cycles*. Northland Research, Flagstaff, pp. 263-278.

- PALACIOS-FEST, M.R., 1994a. Nonmarine ostracode shell chemistry from ancient Hohokam irrigation canals in central Arizona : a paleohydrochemical tool for the interpretation of prehistoric human occupation of the western United States. *Geoarchaeology* 9 : 1-29.
- PALACIOS-FEST, M.R., 1994b. *Trace element shell chemistry of continental ostracodes and the applicability of experimentally-derived multiple regression models to paleoenvironmental reconstructions in southwestern North America*. Ph.D. Dissertation, University of Arizona, Tucson.
- PALACIOS-FEST, M. R., 1995. Continental ostracode record in the Scottsdale System. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *Archaeological excavation at Pueblo Blanco : the MCDOT Alma School Road project, Vol.2*. Archaeological Consulting Service ltd, Tucson, pp. 363-392.
- PALACIOS-FEST, M.R., 1997a. Paleoenvironmental reconstruction of human activity in central Arizona using shell chemistry of Hohokam canal ostracodes. *Geoarchaeology* 12 : 211-226.
- PALACIOS-FEST, M.R. , 1997b. Continental ostracode paleoecology from the Hohokam Pueblo Blanco area, central Arizona. *Journal of Archaeological Science* 24 : 965-983.
- PALACIOS-FEST, M.R, 2002. Significance of ostracode studies in geoarchaeology : examples from the United States Southwest. *The Kiva* 68(1) : 49-66.
- PAL, D.K., SRIVASTAVA, P., BHATTACHARYYA, T., 2003. Clay illuviation in calcareous soils of the semi-arid part of the Indo-Gangetic Plains, India. *Geoderma* 115 : 177-192.
- PANG, J.L., HU, X., HUANG, C.C., ZHANG, X., 2006. Micromorphological features of old cultivated and modern soils in Guanzhong Areas, Shaanxi Province, China. *Agricultural Sciences in China* 5(9) : 691-699.
- PAQUET, H., RUELLAN, A. 1997. Calcareous epigeny replacement in soils and calcreta formation. In : Paquet, H., Clauer, N. (Eds.) : *Soils and sediments, mineralogy and geochemistry*. Springer, Berlin, pp. 21-48.
- PARKER, I., MATYAS, W.J., 1981. *CALVEG : a classification of Californian vegetation*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Reg. Ecol. Group, San Francisco, 168 pp.
- PARKER, J.T.C., 1995. *Geomorphology and hydrology of the Santa Cruz River, southeastern Arizona*. Unpublished Ph.D. dissertation, University of Arizona, Department of Geosciences, Tucson.
- PARTRIDGE, J., BAKER, V.R., 1987. Paleoflood hydrology of the Salt River, Arizona. *Earth Surface Processes and Landforms* 12 : 109-125.
- PATRICK, H., 1903. *The ancient canal systems and pueblos of the Salt River Valley, Arizona*. Bulletin of the Phoenix Free Museum 1, Phoenix, 20 pp.
- PATTON, P.C., 1977. *Geomorphic criteria for estimating the magnitude and frequency of flooding, in central Texas*. PhD dissertation, University of Texas, Austin, Texas, 222 pp.
- PATTON, P.C., SCHUMM, S.A., 1981. Ephemeral stream processes : implications for studies of Quaternary valley fills. *Quaternary Research* 15 : 24-43.
- PATTON, P.C., DIBBLE, D., 1982. Archeological and geomorphic evidence for the paleohydrologic record of the Pecos River in west Texas. *American Journal of Science* 282 : 97-121.

- PAULSON, R.W., CHASE, E.B., ROBERTS, R.S., MOODY, D.W., 1988-89. *National water summary-hydrologic events and floods and droughts*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2375, 591 pp.
- PAWLUK, S., 1978. The pedogenic profile in the stratigraphic section. In : Mahaney, W.C. (Ed.) : *Quaternary Soils*. Geo Abstracts, Norwich, pp. 61-75.
- PEARSALL, D., 1989. *Paleoethnobotany, a handbook of procedures*. Academic Press, San Diego, 700 pp.
- PEEPLES, M., 2006. *Hohokam population database, Long Term Vulnerability and Transformation Project*. Source électronique : <http://core.tdar.org/dataset/1582>
- PECK, R.M., 1973. Pollen in a small river basin : Wilton Creek, Ontario. In : Birks, H.J.B., West, R.G. (Eds.) : *Quaternary plant ecology : the 14 symposium of the British Ecological society, University of Cambridge, 28- 30 March 1972*. Blackwell scientific publications, Oxford, pp. 61-77.
- PETERS, C., CHURCH, M.J., MITCHELL C., 2001. Investigation of fire ash residues using mineral magnetism. *Archaeological Prospection* 8 : 227-237.
- PETERSEN, K.L., 1985. Palynology in Montezuma County, southwestern Colorado: The local history of the pinyon pine (*Pinus edulis*). In: Jacobs, B.F., Fall, P.F., Davis, O.K. . (Eds.) : *Late Quaternary vegetation and climates in the American Southwest*. American Association of Stratigraphic Palynologists Contributions Series 16., Houston, Texas, pp. 47-62.
- PETERSON, K.L., 1988. *Climate and the Dolores River Anasazi : a paleoenvironmental reconstruction from a 10,000 year pollen record, la Plata Mountains, Southwestern Colorado*. University of Utah Anthropology Papers 113, Salt Lake City, 152 pp.
- PETERSEN, K.L., 1994. A warm and wet little climatic optimum and a cold and dry little ice age in the southern rocky mountains, USA. *Climate Change* 26 : 243-269.
- PETERSON, K.L., VINCENT, E., RICE, G.E., 2002. *Who used the area between the rivers? Employing ceramic temper analysis to study the boundary between the Gila and Salt River*. Paper presented at the symposium entitled : Visible archaeology on the Gila River Indian Reservation ; 67th annual meeting of the Society for American Archaeology, Denver.
- PETERSEN, N., VON DOBENECK, T., VALI, H., 1986. Fossil bacterial magnetite in deep-sea sediments from the South Atlantic Ocean. *Nature* 320 : 611-615.
- PETERSON, W.M., 1913. *Inspect report. National archives RG 314 files, document N° 35449-2*. Washington D.C.
- PÉWÉ, T.L., 1976. Terraces of the lower Agua Fria River Valley, Maricopa County, Arizona. *Journal of the Arizona Academy of Sciences* 11, Proceedings supplement, 93 pp.
- PEWE, T.L., 1978. Terraces of the lower Salt River valley in relation to the late Cenozoic history of the Phoenix Basin, Arizona. In : Burt, D.M., Pewe, T.L. (Eds.) : *Guidebook to the geology of central Arizona, state of Arizona*. Bureau of Geology and Mineral Technology 2, Tucson, pp. 1-46.
- PEWE, T.L., 1987. Terraces of the lower Salt River valley in relation to the late Cenozoic history of the Phoenix basin. In : Davis, G.H., van den Dolder, E.M. (Eds.) : *Geologic diversity of Arizona and its margins; excursions to choice areas*. Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Special Paper 5, pp. 221-226.

- PÉWÉ, T.L., WELLENDORF, C.S., BALES, J.T., 1986. *Environmental geology of the Tempe quadrangle, Maricopa County, Arizona*. Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Geologic Investigation Series Map GI-2.
- PHILLIPS, B.G., GIBBSON, A., MILLER, A., DROZ, M.S., WALKER, L.A., 2004. Paléoenvironnement. In : Powell, S., Boston, R.L. (Eds.) : *Life on the Lehi terrace : the archaeology of the Red Mountain Freeway between State Route 87 and Gilbert road*. Archaeological Consulting Services Cultural Resources Report 135, Tempe, pp 11-47.
- PHILLIPS, B.G., CRAIG, D.B., 2001. Canals. In : Craig, D.B. (Ed.) : *The Grewe archaeological research project. Vol. 1 : Synthesis*. Northland Research Anthological Papers 99-1, Flagstaff et Tempe, pp. 147-161.
- PHILLIPS, B.G., SORRELL, D.H., PALACIOS-FEST, M.R., PURDUE, L., BERGER, G.W., HEILMAN, J., 2009. *Testing report for the city of Phoenix, 36th Avenue paving and storm drain projects, Phoenix, Maricopa County, Arizona*. Ecoplan Associates Inc, 162 pp.
- PHILLIPS, J.V., THOMAS, B.E., 2005. *Hydrologic conditions in Arizona during 1999-2004 : a historical perspective*. USGS fact sheet 2005-3081, 4 pp.
<http://pubs.usgs.gov/fs/2005/3081/pdf/FS2005-3081WEB.pdf>
- PHOENIX DAILY HERALD, 9 avril 1891.
- PIERCE, J.L., MEYER, G.A., JULL, A.J.T., 2004. Fire-induced erosion and millennial-scale climate change in northern ponderosa pine forests. *Nature* 432 : 87-90.
- PINKLEY, E.T., 1926. *Casa Grande : the greatest valley pueblo of Arizona*. Arizona Archaeological and Historical Society, Tucson, Arizona, 23 pp.
- PLOG, F., 1980. Explaining culture change in the Hohokam Preclassic. In : Doyel, D., Plog, F. (Eds.) : *Current issues in Hohokam prehistory. Proceedings of a symposium*. Arizona State University Anthropological Research Papers 23, Tempe, pp. 4-22.
- POPE, C.W., PEWE, T.L., 1973. *Geology of the lower Verde River valley, Maricopa County, Arizona*. Arizona Academy of Science Proceedings Supplement 8, 42 pp.
- POWELL, S., BOSTON, R.L. (Eds.), 2004. *Life on the Lehi Terrace : the archaeology of the Red Mountain freeway between state route 87 and Gilbert Road*. ACS Cultural Resources Report 135, Tempe, 624 pp.
- PORTA, J., 1986. *Edafogenesis en suelos yesíferos en medio semiarido*. Unpublished ETSEA, Lleida, 136 pp.
- PORTA, J., 1998. Methodologies for the analysis and characterization of gypsum in soils : a review. *Geoderma* 87 : 31-46.
- POWELL, S., BOSTON, R.L. (Eds.), 2004. *Life on the Lehi terrace : the archaeology of the Red Mountain Freeway between State Route 87 and Gilbert road*. Archaeological Consulting Services Cultural Resources Report 135, Tempe, 178 pp.
- PRESLEY, D.R., RANSOM, M.D., KLUITENBERG, G.J., FINNELL, P.R., 2004. Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils. *Soil Science Society of America Journal* 68 : 1916-1926.
- PRICE, W.A., 1940. The origin of caliche (abstract). *Bulletin Geological Society America* 51 : 1939.

- PRICE, B., 1971. Prehispanic irrigation agriculture in nuclear America. *Latin American Research Review* 6 (3) : 3-60.
- PURDUE, L.E., MILES, W., WOODSON, K., DARLING, A., BERGER, J.-F., 2010. Micromorphological study of irrigation canal sediments : landscape evolution and hydraulic management in the middle Gila River valley (Phoenix Basin, Arizona) during the Hohokam occupation. *Quaternary International* 216 : 129-144.
- PURDUE, L.E., MILES, W.D., WRIGHT, D.K., PALACIOS-FEST, M.R., PHILLIPS, B.G., WOODSON, M.K., en cours. *Prehistoric agrosystems of central Arizona : a paleoenvironmental approach to the study of Hohokam irrigated fields and canals*.
- PYNE, S., 1997. *Fire in America : a cultural history of wildland and rural fire*, 2nd ed. University of Washington Press, Seattle, WA, 680 pp.
- PYTLAK, E., 2002. The North American monsoon : impacts on the desert southwest, NOAA/NWS Tucson, AZ.

R

- RABENHORST, M.C., WILDING, L.P., WEST, L.T., 1984. Identification of pedogenic carbonates using stable carbon isotope and microfabric analyses. *Soil Science Society of America Journal* 48 : 125-132.
- RAHN, P.H., 1966. Inselbergs and nickpoints in southwestern Arizona. *Zeitschrift für Geomorphologie* 10 : 217-225.
- RAIKES, R.L., 1964. The ancient gabarbands of Baluchistan. *East and West* 15 : 26-35.
- RAIKES, R.L., 1965. The Mohenjodaro floods. *Antiquity* 39 : 196-203.
- RAIKES, R.L., 1984. *Water, weather and prehistory*, 2nd ed. Humanities Press, New York, 208 pp.
- RAMENOFESKY, A.F., 1987. *Vectors of death : the archaeology of european contact*. University of New Mexico Press, Albuquerque, 300 pp.
- RANKIN, A.G., KATZER, K.L., 1989. Agricultural systems in the ACS Waddell project area. In : Green, M. (Ed.) : *Settlement, subsistence, and specialization in the northern periphery : the Waddell project, Vol.2*. Archaeological Consulting Services Cultural Resource Report 65, Phoenix, pp. 981-1020.
- RANDOLPH, B.G., DARLING, J.A., LOENDORF, C., ROCKETTE, B., 2002. *Historic Piman site structure and the evolution of the Sacate site (GR-909), Gila River Indian Community*. Paper presented at the symposium entitled : Visible archaeology on the Gila River Indian Reservation ; 67th annual meeting of the Society for American Archaeology, Denver.
- RANDOLPH, B.G., GREENSPAN, R.I., 2003. *Cultural resource testing of proposed home sites in District 6, Gila River Indian Community, Pinal County, Arizona*. CRMP Technical Report, N°2003-11, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton.

- RAVESLOOT, J.C., 2007. Changing views of Snaketown in a larger landscape. In : Fish, S.K., Fish, P.R. (Eds.) : *The Hohokam Millennium*. School for Advanced Research Press, Santa Fe, New Mexico, pp. 91-98.
- RAVESLOOT, J.C., LASCAUX, A., 1993. *The Maricopa road site : a pre-Classic Hohokam village-AZ T:16:13*. Arizona State University Anthropological Field Studies 28, Tempe, 340 pp.
- RAVESLOOT, J.C., WATERS, M.R., 2002. *A geoarchaeological approach to interpreting site patterning on the Middle Gila River Valley, Arizona*. Paper presented at the symposium entitled : Visible archaeology on the Gila River Indian Reservation ; 67th annual meeting of the Society for American Archaeology, Denver.
- REA, A., 1981. The ecology of Pima fields. *Environment Southwest* 484 : 8-15.
- REA, A., 1983. *Once a river : bird life and habitat changes on the Middle Gila River*. University of Arizona Press, Tucson, 285 pp.
- REA, A., 1997. *At the desert's green edge, an ethnobotany of the Gila River Pima*. University of Arizona Press, Tucson, 430 pp.
- READING, H.G. (Ed.), 1996. *Sedimentary environments : processes, facies, and stratigraphy*, 3^{ème} ed. Blackwell Science, Malden, Mass, , 704 pp.
- READING, H.G., ALLEN, P.A., BALDWIN, T.C., COLLINSON, J.D., EDWARDS, M.B., ELLIOTT, T., JENKYN, H.C. 1986. *Sedimentary environments and facies*. Blackwell Scientific Publications, London, 615 pp.
- REDMAN, C.L., 1999. *Human impact on ancient environments*. University of Arizona Press, Tucson, 239 pp.
- REDMAN, C.L., KINZIG, A.P., 2003. Resilience of past landscapes : resilience theory, society, and the longue durée. *Conservation Ecology* 7(1) : 14 pp.
- REDMOND, K.T., ENZEL, Y., HOUSE, P.K., BIONDI, F., 2002. Climate impact on flood frequency at decadal to millennial time scales. In : House, P.K., Webb, R.W., Baker, V.R., Levish, D.R. (Eds.) : *Ancient floods, modern hazards : principles and applications of paleoflood hydrology*. Water Science and Application Series 5, American Geophysical Union, Washington D.C., pp. 21-45.
- REED, P.F., 2004. *Puebloan society of Chaco Canyon*. Greenwood Press, London, 240 pp.
- REEVES, JR.C.C., 1970. Origin, classification and geologic history of caliche on the southern high plains, Texas and eastern New Mexico. *Journal of Geology* 78 : 352-362.
- REEVES, JR.C.C., 1976. *Caliche : origin, classification, morphology and uses*. Estacado Books, Lubbock, Texas, 233 pp.
- REFERENTIEL PEDOLOGIQUE, 2008. *Référentiel pédologique, de l'Association française pour l'Etude du Sol (AFES)*. Coordinateurs D. Baize, M.-Cl.Girard. Editions Quae, Collections Savoir-Faire, Versailles, France, 435 pp.
- REFF, D.T., 1990. Contact shock and the protohistoric period in the Greater Southwest. In : Minnis, P.E., Redman, C.L. (Eds.) : *Perspectives on southwestern prehistory*. Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 276-288.

- REFF, D.T., 1992. Contact shock in northwestern New Spain, 1518–1764. In : Verano, J., Ubelaker, D. (Eds.) : *Disease and demography in the Americas*. Smithsonian Institution Press, Washington D.C., pp. 265-276.
- REIMER, P.J., BAILLIE, M.G.L., BARD, E., BAYLISS, A., BECK, J.W., BLACKWELL, P.G., BUCK, C.E., BURR, G.S., CUTLER, K.B., DAMON, P.E., EDWARDS, R.L., FAIRBANKS, R.G., FRIEDRICH, M., GUILDERSON, T.P., HERRING, C., HUGHEN, K.A., KROMER, B., MCCORMAC, F.G., MANNING, S.W., RAMSEY, C.B., REIMER, P.J., REIMER, R.W., REMMELE, S., SOUTHON, J.R., STUIVER, M., TALAMO, S., TAYLOR, F.W., VAN DER PLICHT, J., WEYHENMEYER, C.E., 2004. IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46(3) : 1029-1058.
- REINECK, H.E., WUNDERLICH, F., 1968. Classification and origin of flaser and lenticular bedding. *Sedimentology* 11 : 99-104.
- RETALLACK, G.J., 1986. The fossil record of soils. In : Wright, V.P. (Ed.) : *Paleosols, their recognition and interpretation*. Princeton University Press, Princeton, pp. 1-57.
- RETALLACK, G.J., 1988. Field recognition of paleosols. In : Reinhardt, J., Sigleo, W.R. (Eds.) : *Paleosols and weathering through geologic time : principles and applications*. Geological Society of America Special Paper 216, Boulder, Colorado, pp. 1-20.
- RETALLACK, G.J., 2001. *Soils of the past. An introduction to paleopedology, 2nd ed.* Blackwell Science, Oxford, 404 pp.
- REYNOLDS, S.J., 1988. *Geological map of Arizona*. Arizona geological survey, Map 26, échelle 1 :100000.
- REYNOLDS, S.J., DEWITT, E., 1991, Proterozoic geology of the Phoenix region, central Arizona. In : Karlstrom, K.E. (Ed.) : *Proterozoic geology and ore deposits of Arizona*. Arizona Geological Society Digest 19, pp. 237-250.
- REYNOLDS, S.J., BARTLETT, R.D., 2002. *A subsurface geology of the easternmost Phoenix basin, Arizona : implication for groundwater flow*. Arizona Geological Survey Contributed Report CR-02-A.
http://repository.azgs.az.gov/uri_gin/azgs/dlio/345
- RHOADES, J.D., KANDIAH, A., MASHALI, A.M., 1992. *The use of saline waters for crop production*. FAO Irrigation and Drainage Paper 48. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1992.
- RICKS, D.P., RANSOM, M.D., KLUITENBERG, G.J., FINNELL, P.R., 2004. Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semi-arid soils in Kansas. *Soil Science Society of America Journal* 68 : 1916-1926.
- RICE, G.E., 1987. The organization of the early Hohokam village. In : Rice, G.E. (Ed.) : *The Hohokam community of La Ciudad*. Arizona State University OCRM Report No. 69, Department of Anthropology, Tempe, pp.147-162.
- RICE, G.E., 1992. Modeling the development of complexity in the Sonoran desert of Arizona. In : Redman, C.L., Rice, G.E., Pedrick, K.E. (Eds.) : *Developing perspectives on Tonto basin prehistory*. Roosevelt Monograph Series 2, Anthropological Field Studies 26, Tempe, pp. 11-26.
- RICE, G.E., 1998. War and water : an ecological perspective on Hohokam irrigation. *The Kiva* 63 : 263-301.

- RICE, G.E., 2001. Warfare and massing in the Salt and Gila basins of central Arizona. In : Rive, G.E., LeBlanc, S.A. (Eds.) : *Deadly landscapes : case studies in prehistoric southwestern warfare*. University of Utah Press, Salt Lake City, pp. 289-330.
- RICE, G.E., RAVESLOOT, J.C., 2002. *Hohokam public architecture and settlement systems on the middle Gila River*. Paper presented at the Symposium entitled : Visible archaeology on the Gila River Indian Reservation ; 67th Annual Meeting of the Society for American Archaeology, Denver.
- RICHARDS, G.E., 1982. *Rivers: form and process in alluvial channels*. Methuen, London, 361 pp.
- RILEY, C.L., 2005. *Becoming Aztlan : mesoamerican influence in the greater southwest, AD 1200-1500*. University of Utah Press, Salt Lake City, 450 pp.
- RITTER, D.F., 1978. *Process Geomorphology*. Wm.C. Brown Publishers, Dubuque, Iowa, 579 pp.
- ROBERGE, M., 2002. Human modification of the geomorphically unstable Salt River in metropolitan Phoenix. *The Professional Geographer* 54(2) : 175-189.
- ROBERTS, H., AHLSTROM, R.V.N., 1997. Malaria, microbes, and mechanisms of change. *The Kiva* 63 : 117-135.
- ROBINSON, W.J., DOYEL, D.E., 1974. Appendix I. Species identification of wood and charcoal materials from the Escalante Ruin group. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *Excavations in the Escalante Ruin group, southern Arizona*. Arizona State Museum, University of Arizona, Tucson.
- RODBELL, D.T., SELTZER, G.O., ANDERSON, D.M., ABBOTT, M.B., ENFIELD, D.B., NEWMAN, J.H., 1999. An approximate 15,000-year record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador. *Science* 283 : 516.
- RODGERS, J.B., 1977. *Archaeological investigation of the Granite Reef aqueduct, Cave Creek archaeological district, Arizona*. Arizona State University Anthropological Research Paper 12, Tempe, 185 pp.
- ROGGE, P., PHILLIPS, B., DROZ, M.S., 2002. *Two Hohokam canals at Sky Harbor International Airport, Phoenix, Arizona : archaeological data recovery at Site U :9 :237(ASM)*. Pueblo Grande Museum Anthropological Papers 12, Phoenix, 85 pp.
- ROGGES, A.E., RYAN, K.A., DOYEL, D.E., 2001. *Cultural resource survey for the Las Liga and Rio Vista neighborhoods sidewalk and street improvement projects, Avondale, Maricopa County, Arizona*. URS cultural resource report 2001-71, 47 pp.
- ROOS, C.I., 2008. *Fire, climate and socio-ecological systems in the ancient southwest : alluvial geoarchaeology and applied ecology*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson.
- ROOSE, E., 1994. *Introduction à la GCES*. Bulletin pédologique FAO 70, 420 pp.
- ROOSE, E., ARABI, M., BRAHAMU, K., CHEBBANI, R., MAZOUR, M., MORSLI, B. 1993. *Erosion en nappe et ruissellement en montagne algérienne*. Cahier ORSTOM, Pédologie, 28 (2): 289-308.
- ROSE, M.R., 1994. Long term reconstructions for the lake Roosevelt region. In : Ciolek-Torrello, R., Welch, J.R. (Eds.) : *The Roosevelt rural sites survey. Vol. 3 : Changing land use in the Tonto Basin*, Statistical Research Technical Series 28, Tucson, pp. 311-359.

- ROSEN, M.R., WARREN, J.K., 1990. The origin and significance of groundwater-seepage gypsum from Bristol Dry Lake, California USA. *Sedimentology* 31 : 983-996.
- ROTHROCK, E.P., 1925. On the force of crystallization of calcite. *Journal of Geology* 33 : 80-83.
- RUELLAN, A., 1980. *L'accumulation du calcaire dans les sols*. Colloque Cristallisation, Déformation, Dissolution des carbonates. Université de Bordeaux III, pp. 401-411.
- RUELLAN, A., NAHON, D.; PAQUET, H.; MILLOT, G., 1978. *Figures d'épigénie par la calcite dans les encroûtements calcaires*. Proceedings of the 5th international working meeting on soil micromorphology, Granada : 1051-1056.
- RUMMERY, T.A., BLOEMENDAL, J., DEARING, J., OLDFIELD, F., 1979. The persistence of fire-induced magnetic oxides in soils and lake sediments. *Annals Geophys.* 35 : 103-107.
- RUPPE, P., 1988. Analysis of the macrobotanical remains. In : Greenwald, D.H. (Ed.) : *Investigations of the Baccharis site and extension Arizona canal*. Museum of Northern Arizona Research Paper 40, Flagstaff, pp. 140-159.
- RUSS, J.L., DAVID, H., BOUTTON, T.W., 2000. A paleoclimate reconstruction for southwestern Texas using oxalate residue from lichen as a paleoclimate proxy. *Quaternary International* 67 : 29-36.
- RUSSELL, F., 1908. *The Pima Indians*. Twenty-sixth annual report of the Bureau of American Ethnology, 1904-1905, Smithsonian Institution, Washington, D.C., 389 pp. Reprinted by University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- RYAN, J., 1982. *A perspective on soil erosion and conservation in Lebanon*. Publication 69, American University of Beirut, pp.15-38.

S

- SADIKI, A., FALEH, A., NAVAS, A., BOUHLASSA, S., 2007. Assessing soil erosion and control factors by the radiometric technique in the Boussouab catchment, Eastern Rif, Morocco. *Catena* 71(1) : 13-20.
- SAHLINS, M.D., 1972. *Stone Age economics*. Aldine-Atherton, Chicago, 348 pp.
- SALINAS, M.L., OGURA, T., SOFFCHI, L., 2001. Irritant contact dermatitis caused by needle-like calcium oxalate crystals, raphides in *Agave americana* among workers in tequila distilleries and agave plantations. *Contact dermatitis* 44 : 94-96.
- SALVADOR, P.G., 2005. *Géomorphologie et géoarchéologie des plaines alluviales (piémont alpin et nord de la France)*. Université des Sciences et Technologies de Lille 1, HDR, 298 pp.
- SALVADOR, P.G., BERGER, J.F., FONTUGNE, M., GAUTHIER E., 2005. Etude des enregistrements sédimentaires des paléoméandres du Rhône dans le secteur des Basses Terres (Ain, Isère, France). *Quaternaire* 16(4) : 315-327.
- SALZER, M.W., 2000. Temperature variability and the northern Anasazi : possible implications for regional abandonment. *The Kiva* 65(4) : 295-318.

- SALZER, M.W., HUGHES, M.K. . 2007. Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 yr. *Quaternary Research* 67 : 57–68
- SALZER, M.W., KIPFMUELLER, K.F., 2005. Reconstructed temperature and precipitation on a millennial timescale from tree-rings in the southern Colorado Plateau, USA. *Climatic Change* 70 : 465-487.
- SAMUELS, M.L., BETANCOURT, J.L., 1982. Modeling the long-term effects of fuelwood harvests on pinon-juniper woodlands. *Environmental Management* 6 : 505-515.
- SANDOR, A.S., NORTON, J.B., HUMBURG, J.A., MUENCHRATH, D.A., WILLIAMS, S.E., HAVENER, C.I., STAHL, P.D., 2007. Biochemical studies of a North American runoff. *Geoarchaeology* 22 (3) : 359–386.
- SANDERS, W.T., PRICE, B.J. , 1968. *Mesoamerica: The Evolution of a Civilization*. New York, Random House, 1968.
- SATCHELL, J.E., 1967. Lumbricidae. In : Burges, A., Raw, F. (Eds.). *Soil biology*. Academic Press, London, pp. 259-322.
- SCARBOROUGH, R.B., PEIRCE, H.W., 1978. Late Cenozoic basins of Arizona. In : Callendar, J.F. et al. (Eds.) : *Land of Cochise*. New Mexico Geological Society Guidebook, 29th field conference, November 9-11, pp. 253-259.
- SCARBOROUGH, V.L., 2003. *The flow of power : ancient water systems and landscapes*. A School of American Research Resident Scholar Book. Santa Fe, NM, SAR Press, 204 pp.
- SCARBOROUGH, V.L., 1988. A water storage adaptation in the American Southwest. *Journal of Anthropological Research* 44(1):21-40.
- SHEFFER, C., 1971. Review of the conditions of agricultural growth (Ester Boserup). *American Antiquity* 36 : 337-379.
- SCHIEBER, J., 1990. Significance of styles of epicontinental shale sedimentation in the Belt basin, Mid-Proterozoic of Montana, U.S.A. *Sedimentary Geology* 69(3-4) : 297-312.
- SCHIFFER, M.B., 1982. Hohokam chronology : an essay on history and method. In : McGuire, R.H., Schiffer, M.B. (Eds.) : *Hohokam and Patayan : prehistory of southwestern Arizona*. Academic Press, New York, pp. 299-344.
- SCHIFFER, M.B., 1983. Towards the identification of site formation processes. *American Antiquity* 48 : 675-706.
- SCHIFFER, M.B., 1986. Radiocarbon dating and the “old wood” problem : the case of the Hohokam chronology. *Journal of Archaeological Science* 13 : 13-30.
- SCHLANGER, S.H., 1988. Patterns of population movement and long-term population growth in southwest Colorado. *American Antiquity* 53 : 773-793.
- SCHLESINGER, W.H., REYNOLDS, J.F., CUNNINGHAM, G.L., HUENNEKE, L.F., JARRELL, W.M., VIRGINIA, R.A., WHITFORD, W.G., 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science* 247 : 1043-1048.

- SCHMIDT, E.F., 1928. *Time-relations of prehistoric pottery types in southern Arizona*. Anthropological Papers of the American Museum of Natural History 30, Vol. 5, New York, 245-302.
- SCHOENWETTER, J., 1962. Pollen analysis of eighteen archaeological sites in Arizona and New Mexico. In : Martin, P.S. (Ed.) : *Chapters in the prehistory of Eastern Arizona. Vol. 53*. Fieldiana, Chicago, IL, pp. 168-209.
- SCHROEDER, A.H., 1940. *A stratigraphic survey of pre-spanish trash mounds of the Salt River Valley, Arizona*. Master's thesis, Department of Anthropology, University of Arizona, Tucson.
- SCHROEDER, K.J., CLARK, T., 1999. Subsistence practices at Pinnacle Peak Village in the northern McDowell Mountains, Scottsdale, Arizona. In : Schroeder, K.J. (Ed.) : *McDowell Mountains archaeological symposium*. Roadrunner Publications in Anthropology 10, Tempe, pp. 157-178.
- SCHROEDER, K.J. (ED.), 1999. *McDowell Mountains archaeological symposium*. Roadrunner Publications in Anthropology 10, Tempe, 260 pp.
- SCHUMM, S.A., 1977. *The fluvial system*. The Blackburn Press, Caldwell, New Jersey, 338 pp.
- SCHUMM, S.A., HADLEY, R.F., 1957. Arroyos and the semiarid cycle of erosion. *American Journal of Science* 255 : 161-174.
- SCHUMPETER, J.A., 1987. *Capitalism, socialism and democracy*. 6th edition. Unwin, London, 431 pp.
- SCUDERI, L.A., 1984. *A dendroclimatic and geomorphic investigation of late-Holocene glaciation, southern Sierra Nevada, California*. Ph.D. dissertation, University of California, Los Angeles, 201 pp.
- SEHGAL, J.L., STOOPS, G., 1972. Pedogenic calcite accumulations in arid and semi-arid regions of the Indo-Gangetic alluvial plain of Erswile Punjab (India) - Their morphology and origin. *Geoderma* 8 : 59-72.
- SELLERS, W.D., 1960. *Precipitation trends in Arizona and western New Mexico*. Proceedings of the 28th Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, pp. 81-94.
- SELLERS, W.D., 1965. *Physical climatology*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, 272 pp.
- SELLERS, W.D., 1964. Potential evapotranspiration in arid regions. *Journal Applied Meteorology* 3 : 98-104.
- SERVICE, E.R., 1975. *Origins of the state and civilization : the process of cultural evolution*. W.W.Norton, New York, 388 pp.
- SEYMOUR, D.J., 1989. The dynamics of Sobaipuri settlement in the Eastern Pimeria Alta. *Journal of the Southwest* 31(2) : 205-222.
- SEYMOUR, D.J., 2004. *Thirty-two degrees north latitude : the protohistoric period in the southern southwest*. Manuscrit en possession de l'auteur.
- SHAFIQULLAH, M., DAMON, P., LYNCH, D., REYNOLDS, S., REHRIG, W., RAYMOND, R., 1980. K-Ar geochronology and geologic history of southwestern Arizona and adjacent areas. *Arizona Geological Society Digest* 12 : 201-242.

- SHAUL, D.L., HILL, J.H., 1998. Tepimans, Yumans, and other Hohokam. *American Antiquity* 63 : 375-396.
- SHAW, A.M., 1974. *A Pima past*. University of Arizona Press, Tucson, 262 pp.
- SHERIDAN, S.G., 2003. Childhood health as an indicator of biological stress. In : Abott, D.R., (Ed.) : *Centuries of decline during the hohokam classic period at Pueblo Grande*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 82-106.
- SHEPPARD, P. R., COMRIE, A.C., PACKIN, G.D., ANGERSBACH, K., HUGHES, M.K., 2002. The climate of the US Southwest. *Climate Research* 21 (3): 219–238.
- SIMON, A.W., JACOBS, D., 2000. Salado social dynamics networks and alliances in Tonto Basin. In : Dean, J.S. (Ed.) : *Salado*. University of New Mexico Press, Albuquerque, pp. 193-218.
- SINGHVI, A.K., DERBYSHIRE, E., 1999. *Paleoenvironmental reconstruction in arid lands*. Oxford and IBH Publishing, Calcutta, 336 pp.
- SIRES, E.W., 1983. Excavations at El Polvoron (AZ U :15 :59). In : Teague, L.S., Crown, P.L (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila Aqueduct, Central Arizona Project. Vol. 4 : Prehistoric occupation of the Queen creek delta*. Arizona State Museum Archaeological Series 150 : 221-326.
- SIRES, E.W., 1984. Hohokam architecture and site structure. In : Teague, L.S., Crown, P.L. (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila Aqueduct, Central Arizona Project. Vol 9 : Synthesis and conclusions*. Arizona State Museum Archaeological Series 150 : 115-140.
- SMITH, C.F., RIGAS, P.D., HAM, L.K., DUET, N.R., ANNING, D.W., 1994. *Water resources data, Arizona, Water year 1993*. US Geological survey water data report Az-93-1, 360 pp.
- SMITH, G.I., 1979. *Subsurface stratigraphy and geochemistry of late Quaternary evaporites, Searles Lake, California*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1043, 130 pp.
- SMITH, L.P., 1981. *Long-term streamflow histories of the Salt and Verde rivers, Arizona, as reconstructed from tree rings*. U.S. Army Corps of Engineers Contract Rep. DACW-09-80-C-0071, 129 pp.
- SMITH, M.R., 1995. Continental ostracode record in the Scottsdale System. In : Doyel, D.E., (Ed.) : *Archaeological excavation at Pueblo Blanco. The MCDOT Alma school road project, Vol. 2*. Archaeological Consulting Service ltd, Tucson, pp 363-392.
- SMITH, R.M.H., MASON, T.R., WARD, J.D., 1993. Flash-flood sediment and ichnofacies of late Pleistocene home silts, Kuiseb river, Namibia. *Sedimentary Geology* 85(4) : 579-599.
- SMITH, R., ROBERTSON, V.S., 1962. Soil irrigation classification of shallow soils overlying gypsum beds, Northern Iraq. *Journal of Soil Science* 13 : 106-115.
- SMITH, S.J., 1995. Pollen analysis. In : Henderson, T.K. (Ed.) : *The prehistoric archaeology of Heritage square*. Pueblo Grande Museum Anthropological Papers 3, Phoenix, pp. 151-165.
- SMITH, S.J., 1995B. Pollen analysis. In : Doyel, D.E. (Ed.) : *Archaeological excavation at Pueblo Blanco : the MCDOT Alma School Road project, Vol.2*. Archaeological Consulting Service ltd, Tucson.

- SMITH, S.J., 2003. Analysis of pollen from the Dutch canal ruin. In : Henderson, T.K. (Ed.) : *Hohokam farming on the Salt River floodplain : Excavation at the Sky Harbor airport north runway*. Center for Desert Archaeology Anthropological Papers 42, Tucson.
- SOCHAVA, V.B., 1963. *Opriedielieniie niekotorykh ponyatii i terminov fizicheskoi gheografii*. Doklady In-ta gheografii Sibiri i Dal'niego Vostoka. Vyp. 3
- SOILS SURVEY STAFF, 1975. *Soil taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Handbook, US Department of Agriculture, 436 pp.
- SOIL SURVEY STAFF, 1999. *Soil Taxonomy, 2nd ed. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA-Soil conservation service, Agricultural Handbook 436, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 869 pp.
- SOUTHWORTH, C.H., 1915. *History of irrigation along the Gila River*. Unites States Indian Service, 55 pp.
- SOUTHWORTH, C.H., 1919. The history of irrigation along the Gila River. In : *Hearings before the committee on Indian Affairs, House of Representatives, 66th Congress, First session, on the condition of various Tribes of Indians, Vol. 2, Appendix A*. Government Printing Office, Washington D.C., pp. 103–225.
- SPAULDING, W.G., 1974. Appendix G. A preliminary statement on the pollen analysis from the Escalante ruin group. In : Doyel, D.E. (Eds.) : *Excavations in the Escalante Ruin group, southern Arizona*. Arizona State Museum, University of Arizona, Tucson.
- SPAULDING, W.G., LEOPOLD, E.B., VAN DEVENDER, T.R., 1983. Late Wisconsin paleoecology of the American Southwest. In : Porter, S.C. (Ed.) : *The late Pleistocene of the United States*. University of Minnesota Press, Minneapolis, pp. 259-293.
- SPIELMANN, K.A. (Ed.), 1998. *Migration and reorganization : the Pueblo IV period in the American southwest*. Arizona State University Anthropological Research Papers 51, Tempe, 301 pp.
- SPIER, L., 1933. *Yuman tribes of the Gila River*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, 433 pp.
- SROUBEK, P., DIEHL, J.F., KADLEC, J., 2007. Historical climatic record from flood sediments deposited in the interior of Spirálka Cave, Czech Republic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 251 : 547-562.
- SRP, 1979. *The taming of the Salt*. Salt River Project, 130 pp.
- SRP, 2009. *The canal system*. Salt River Project. <http://www.srpnet.com/water/canals/>
- STAGE, M., 2001. Magnetic susceptibility as carrier of a climatic signal in chalk. *Earth Planetary Science Letter* 188(1-2) : 17–27.
- STAHMAN, A., MOORE, S.B., 2006. *Cultural resources extent testing of 7.13 acres within the prehistoric site of Lombeye Ruin (Az T:12:109[ASM]) near the northeast corner of 31st avenue and Southern avenue, Phoenix, Maricopa County, Arizona*. Northland Research Inc. project No. 06-27, Tempe.
- STANISH, C., 1994. The hydraulic hypothesis revisited : lake Titicaca basin raised fields in theoretical perspective. *Latin American Antiquity* 5(4) : 312-332.

- STANJEK, H., FASSBINDER, J.W.E., VALI, H., WIIGELE, H., GRAF, W., 1994. Evidence of biogenic greigite (ferrimagnetic Fe₃S₄) in soil. *Eurasian Journal Soil Science* 45 : 97-103.
- STARKEK, L., 1983. The reflection of hydrological changes in the fluvial environments of the temperate zone during the last 15 000 years. In: Gregory, K.J. (Ed.) : *Background to Paleohydrology: a perspective*. Wiley, New York : 216-235
- STEIN, J.K., FARRAND, W.R., 1985. *Archeological sediments in context, Vol. 1*. Center for the Study of Early Man, Institute for Quaternary Studies, University of Maine, Série "Peopling of the Americas", Orono, 147 pp.
- STEIN, P., 1979. *Archaeological investigations along the Salt-Gila aqueduct*. Arizona Projects Office, United States Bureau of Reclamation, Phoenix.
- STEVENS, M.A., SIMONS, D.B., RICHARDSON, E.V., 1975. *Non-equilibrium river form*. American Society Civil Engineering, Journal of the Hydraulics Division 101, pp. 557-565.
- STEVENSON, M.C., 1905. *The Zuni indians : their mythology, esoteric fraternities, and ceremonies*. 23rd Report of the Bureau of American Ethnology, 1901-02. Réimprimé en 1970 par Rio Grande Press, Glorieta, New Mexico, 634 pp.
- STEWART, J.H., ADAMS, R.M, COLLIER, D., PALERM, A., WITTFÖGETL, K.A., BEALS, R., 1955. *Irrigation civilizations : a comparative study*. Pan American Union Social Sciences Monographs 1, 78 pp
- STEWART, G.R., 1940. Conservation in Pueblo agriculture. *Scientific Monthly* 51 (1) : 201-220.
- STINE, S., 1990. Late Holocene fluctuations of Mono Lake, eastern California. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, and Palaeoecology* 78 : 333-382.
- STINE, S., 1994. Extreme and persistent drought in California and Patagonia during medieval time. *Nature* 369 : 546-549.
- STOCKTON, C.W., FRITTS, H.C., 1971. Conditional probability of occurrence for variations in climate based on width of annual tree-rings in Arizona. *Tree-Ring Bulletin* 31 : 3-24.
- STONE, C.L., 1981. *Economy and warfare along the Lower Colorado river*. Anthropological Research Papers 24, Arizona State University, Tempe, pp. 183-197.
- STOOPS, G., 2003. *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 184 pp.
- STRONG, J., 1945. The personal history of Jonathan Strong. In : Shadegg, S.C. (Ed.) : *Arizona. Adventure in irrigation*. Times Mirror Press, Los Angeles, California, pp. 19-22.
- STUART, D.E., 2000. *Anasazi America*. University of New Mexico Press, Albuquerque, 264 pp.
- STUART, D.M., DIXON, R.M., 1973. Water movement and caliche formation in layered arid and semi-arid soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 37 : 323-324.
- SWANSON, S., DIEHL, M.W., 2003. Mimbres pithouse dwellers. *Archaeology Southwest* 17(4) :3.
- SWANSON, S., 2009. *The ecology of early farming : a Mogollon case study*. PhD dissertation, School of Human Evolution and Social Change, Arizona State University, 250 pp.

- SWARTHOUT, J.E., BLANK-ROPER, L., 1984. *Studies of small prehistoric sites in the Gila Butte-Santan area*. Office of Cultural Resource Management Report 61, Arizona State University, Tempe, 228 pp.
- SWETNAM, T.W., 1993. Fire history and climate change in giant sequoia groves. *Science* 262 : 885-889.
- SWETNAM, T.W., BAISAN, C. H., 2003. Tree-ring reconstructions of fire and climate history in the Sierra Nevada and southwestern United States. In : Veblen, T.T., Baker, W.L., Montenegro, G., Swetnam, T.W. (Eds.) : *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the western Americas*. Ecological Studies 160, Springer-Verlag, New York, pp. 158-195.
- SWETNAM, T.W., BETANCOURT, J.L., 1990. Fire-southern oscillation relations in the south-western United States. *Science* 249:1017–1020.
- SWETNAM, T.W., BETANCOURT, J.L., 1998. Mesoscale disturbance and ecological response to decadal climatic variability in the American Southwest. *Journal of Climatology* 11 : 3128-3147.
- SWETNAM, T.W., TOUCHAN, R., BAISAN, C.H., CAPRIO, A.C., BROWNS, P.M., 1991. *Giant sequoia fire history in Mariposa Grove, Yosemite National Park*. Proceedings of the Yosemite centennial symposium, NPS D-374, Denver, CO, pp. 249-255. <http://tree.ltrr.arizona.edu/~tswetnam/tws-pdf/Yos>
- SWETNAM, T.W.; BAISAN, C.H., KAIB, J.M., 2001. Forest fire histories in the sky islands of La Frontera. In: Webster, G.L., Bahre, C.J. (Eds.) : *Changing plant life of La Frontera: observations on vegetation in the United States/Mexico borderlands*. Albuquerque, University of New Mexico Press, pp. 95-119.

T

- TAINTER, J.A., 1988. *The collapse of complex societies*. New Studies in Anthropology, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 264 pp.
- TATE, H., 2006. *Results of archaeological monitoring for a roadway improvement project located along 35th avenue between South Mountain avenue and Baseline road, Phoenix, Maricopa County, Arizona*. Logan Simpson Design Inc. Technical Report No. 055504a, Tempe, Arizona.
- TEAGUE, L.S., 1984. The organization of the Hohokam economy. In : Teague, L.S., Crown, P.L. (Eds.) : *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol. IX : Synthesis and conclusions*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, Tucson, pp. 187-249.
- TEAGUE, L.S., 1989. The Postclassic and the fate of the Hohokam. In : Teague, L.S., Deaver, W.L. (Eds.) : *The 1982–1984 excavations at Las Colinas. Vol. 6 : Syntheses and conclusions*. Arizona State Museum Archaeological Series 163, University of Arizona, Tucson, pp. 145-167.
- TEAGUE, L.S., 1993. Prehistory and the traditions of the O'odham and Hopi. *The Kiva* 58(4) :435-454.
- TEAGUE, L.S., CROWN, P.L. (Eds.), 1982-1984. *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project, Vols. I-IX*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, University of Arizona, Tucson.

- TEAGUE, L.S., CROWN, P.L. (Eds.), 1983. *Hohokam archaeology along the Salt-Gila aqueduct, Central Arizona Project. Vol. 6 : Habitation sites on the Gila River*. Arizona State Museum Archaeological Series 150, Arizona State Museum, Tucson.
- TERWINDT, J.H.J., BREUSERS, H.N.C., 1972. Experiments on the origin of flaser, lenticular and sand clay alternating bedding. *Sedimentology* 19 : 85-98.
- THEIS, C.V., 1936. Possible effects of ground water on the Ogallala formation of Llano Estacado. *Washington Academy Science Journal* 26 : 390-392.
- THOMPSON, R., OLDFIELD, F., 1986. *Environmental Magnetism*. Allen & Unwin, London, 227 pp.
- THOMPSON, T.L., HOSSNER, L.R., WILDING, L.P., 1991. Micromorphology of calcium carbonate in bauxite processing waste. *Geoderma* 48 : 31-42.
- THORP, J., 1949. Effects of certain animals that live in soils. *Science Monthly* 68 :180-191.
- TOOTH, S., 1997. *The morphology, dynamics and late quaternary sedimentary history of ephemeral drainage systems on the northern plains of central Australia*. Unpublished PhD thesis, University of Wollongong, Australie.
- TRAPIDO-LURIE, 2007 : *Arizona Geographic Alliance*. <http://alliance.la.asu.edu/maps/maps.htm>
- TRENBERTH, K.E., 1997. The definition of El Niño. *Bulletin American Meteorological Society* 78 : 2771-2777.
- TURNER, C.G., 1993. Southwest indian teeth. *National Geographic Research and Exploration* 9(1) : 32-53.
- TURNER, R.M., BROWN, D.E., 1982. Sonoran desertscrub. In : Brown, D.E. (Ed.) : *Biotic communities of the american southwest-United States and Mexico*. Desert Plants 4, pp. 181-221.
- TURNEY, O.A., 1924. The land of the stone hoe. Arizona Republican Print Shop, Phoenix.
- TURNEY, O.A., 1929. Prehistoric Irrigation. *Arizona Historical Review* 2 : 2-52, 3 : 9-45, 4 : 33-73.
- TURPEN, J.B., ANGELL, R.W., 1971. *Aspects of moulting and calcification in the ostracode Heterocypris*. Biological Bulletin of the Marine Biology Laboratory 140, Woods Hole, Massachusetts, pp. 331-338.

U

- UMBANHOWAR, C.E.JR., MCGRATH, M.J. ,1998. Experimental production and analysis of microscopic charcoal from wood, leaves, and grasses. *The Holocene* 8 : 341-346.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1966. *Flood damage report on flood of December 1966 - January 1966*. Phoenix, Corps of Engineers.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 1991. *Soil survey of Gila River Indian Reservation, Arizona, Parts of Maricopa and Pinal Counties*. Soil Conservation Service, 166 pp.

- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 1991. *Soil Survey of Maricopa County, Central Part*. Soil conservation service, 125 pp.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1963. *Water Resources Research Catalog*. WRSIC-69-101, Volume 4.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 1992. www.water.usgs.gov/osw/pubs.html
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2004.
http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/state_fd/cawater1.html
- UPHAM, S., 1983. Aspects of Gila Pima acculturation. In : Rice, G.E., Upham, S., Nicholas, L. (Eds.) : *Alicia : the history of a Piman homestead*. Arizona State University Anthropological Field Studies 4, Tempe, pp. 39-59.
- UPHAM, S., RICE, G.E., 1980. Up the canal without a pattern : modeling Hohokam interaction and exchange. In : Doyel, D., Plog, F. (Eds.) : *Current issues in Hohokam prehistory*. Arizona State University Anthropological Research Paper 23, Tempe, pp. 78-105.
- UPHOFF, N., 1986. *Local institutional development: an analytical sourcebook with cases*. Kumarian Press, West Hartford, Connecticut, 421 pp.
- USAI, M.R., 2001. Textural pedofeatures and pre-Hadrian's wall ploughed paleosols at Stanwix, Carlisle, Cumbria, U.K. *Journal of Archaeological Science* 28 : 541-553.

V

- VALDEZ, P., 1980. *Sketch of extent of 1891 flood*. 16 février 1980, Arizona Republic.
- VALENTINE, K.W.G., DALRYMPLE, J.B., 1976. Quaternary buried paleosols : a critical review. *Quaternary research* 6 : 208-222.
- VALI, H., FORSTER, O., AMARANTIDIS, G., PETERSON, N., 1987. Magnetotactic bacteria and their magnetofossils in sediments. *Earth Planetary Science Letter* 86 : 389-400.
- VAN ALPHEN, J.G., LOS RIOS ROMERO, F., 1971. *Gypsiferous soils. Notes on their characteristics and management*. International institute for land reclamation and improvement Bulletin 12, Netherlands, Wageningen, 44 pp.
- VAN DER LEEUW, S., ASCHAN-LEYGONIE, C., 2000. *A long term perspective on resilience in socio-natural systems*. Workshop « System shocks -system resilience », Abisko, Suède.
- VAN DER LEEUW, S., REDMAN, C.L., 2002. Placing archaeology at the center of socio-natural studies. *American Antiquity* 67(4) : 597-605.
- VAN DEVENDER, T.R., 1987. Holocene vegetation and climate in the Puerto Blanco Mountains, southwestern Arizona. *Quaternary Research* 27 : 51-72.
- VAN DEVENDER, T.R., 1990. Late Quaternary vegetation and climate of the Sonoran Desert, United States and Mexico. In : Betancourt, J.L., Van Devender, T.R., Martin, P.S. (Eds.) : *Packrat middens : the last 40 000 years of biotic change*. University of Arizona Press, Tucson, pp. 134-165.

- VAN DEVENDER, T.R., THOMPSON, R.S., BETANCOURT, J.L., 1987. Vegetation history of the deserts of southwestern North America; the nature and timing of the late Wisconsin-Holocene transition. In : Ruddiman, W.F., Wright, H.E.Jr. (Eds.) : *North America and adjacent oceans during the last deglaciation*. Geological Society of America Vol. K-3, Boulder, Colorado, pp. 323-352.
- VAN WEST, C.R., ALTSCHUL, J.H., 1994. Agricultural productivity and carrying capacity in the Tonto basin. In : Ciolek-Torrello, R., Welch, J.R. (Eds.) : *The Roosevelt rural sites study : changing land use in the Tonto basin*. Statistical Research Inc., Tucson, pp. 361-436.
- VERBA, M.P., AL-KASIRI, A.S., GONCHAROVA, N.A., CHIZHIKOVA, N.P., 1995. Impact of irrigation on micromorphological features of desert soils of Hadramout Vallet (Yemen). *Eurasian Soil Science* 27, 108-124.
- VERBA, M., AIDABEKOVA, L. & YAMNOVA, I., 2002. *Micromorphological and mineralogical peculiarities of old-irrigated soils in Aral Sea Basin*. Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, Poster, 2 pp.
- VIVIAN, R.G., HILBERT, B., 2002. *The Chaco handbook : an encyclopedic guide*. University of Utah Press, Salt Lake City, 291pp.
- VIZIER, J.F., 1988. Cité par le CIRAD, 1993: *La toxicité ferreuse dans les sols de rizières. L'importance du problème, causes et mécanismes mis en jeu, conséquences pour l'utilisation des sols*. Rapport d'avancement juin 1988, pp 77-89.
- VOGT, B.J., 2003. *The arroyo problem in the Southwestern United States*. US Geological Survey. Ressource électronique : <http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/geology/arroyos/>
- VOKES, A.W., MIKSICEK, C.W., 1987. Snails, clams, and canals : an analysis on nonmarine molluscan remains. In : Masse, W.B. (Ed.) : *Archaeological investigations of portions of the Las Acequias-Los Muertos irrigation system*. Arizona State Museum Archaeological Series 176, University of Arizona, Tucson, pp. 177-187.

W

- WALKER, W.R., 1989. *Guidelines for designing and evaluations surface irrigation systems*. FAO irrigation and drainage paper 45. <http://www.fao.org/docrep/T0231E/T0231E00.htm>
- WALKER, B., GUNDERSON, L., KINZIG, A., FOLKE, C., CARPENTER, S., SCHULTZ., L., 2006. A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems. *Ecology and Society* 11(1) : 13.
- WALLACE, H.R., 1956. The seasonal emergence of larvae from cysts of the beet eelworm, *Heterodera schachtii* Schmidt. *Arizona Agricultural Experiment Station Technical Bulletin* 49 : 227-238.
- WALLACE, H.D., DOELLE, W.H., 1997. *From ballcourts to platform mounds to rancherias : a comparison of three organizational strategies on the lower San Pedro River*. Paper presented at the 62nd Annual Meeting of the Society for American Archaeology, Nashville, Tennessee.

- WALLACE, H.D., DOELLE, W.H., 2001. Classic period warfare in southern Arizona. In : Rice, G., Leblanc, D. (Eds.) : *Deadly landscape : case studies in prehistoric southwestern warfare*. University of Utah Press, Salt Lake City, pp. 239-289.
- WALLWORK, J.A., 1970. *Ecology of soil animals*. McGraw-Hill, New York, 283 pp.
- WANG, D., ANDERSON, D.W., 1998. Stable carbon isotopes of carbonate pendants from Chernozemic soils of Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 84 : 308-322.
- WASLEY, W.W., 1960. A Hohokam platform mound at the Gatlin site, Gila bend, Arizona. *American Antiquity* 26(2) : 244-262.
- WATERBOLK, H.T., 1983. The integration of radiocarbon dating in archaeology. *Radiocarbon* 25 : 639-644.
- WATERS, M.R., 1983. Late Holocene lacustrine chronology and archaeology of ancient lake Cahuilla, California. *Quaternary Research* 19 : 373-387.
- WATERS, M.R., 1985. Late Quaternary alluvial stratigraphy of Whitewater Draw, Arizona : implication for regional correlation of fluvial deposits in the american southwest. *Geology* 13 : 705-708.
- WATERS, M.R., 1987. Holocene alluvial geology and geoarchaeology of Az BB:13:14 and the San Xavier reach of the Santa Cruz River, Arizona. In : Ravesloot, J.C. (Ed.) : *The archaeology of the San Xavier bridge site (AZ BB:13:14), Tucson basin, southern Arizona*. Arizona State Museum Archaeological Series 171, University of Arizona, Tucson, pp. 39-60.
- WATERS, M.R., 1989. Late Quaternary lacustrine history and paleoclimatic significance of pluvial Lake Cochise, southeastern Arizona. *Quaternary Research*. 32 :1-12.
- WATERS, M.R., 1991. The geoarchaeology of gullies and arroyos in southern Arizona. *Journal of Field Archaeology* 18 : 141-159.
- WATERS, M.R., 1992. *Principles of geoarchaeology. A north American perspective*. University of Arizona Press, Tucson, 398 pp.
- WATERS, M.R., 1996. *Surficial geologic map of the Gila River Indian Community*. P-MIP Technical Report No. 96-1, Cultural Resource Management Program, Department of Land and Water Resources, Gila River Indian Community, Sacaton, Arizona.
- WATERS, M.R., 1998. The effect of landscape and hydrologic variables on the prehistoric Salado : geoarchaeological investigations of the Tonto Basin, Arizona. *Geoarchaeology* 13 : 105-160.
- WATERS, M.R., 2000. Alluvial stratigraphy and geoarchaeology in the American southwest. *Geoarchaeology* 15 : 537-557.
- WATERS, M.R., FIELD, J.J., 1986. Geomorphic analysis of Hohokam settlement patterns on alluvial fans along the western flank of the Tortolita mountains, Arizona. *Geoarchaeology* 1(4) : 329-345.
- WATERS, M.R., HAYNES, C.V., 2001. Late Quaternary arroyo formation and climate change in the American southwest. *Geology* 29(5) : 399-402.
- WATERS, M.R., RAVESLOOT, J.C., 2000. Late Quaternary geology of the middle Gila River, Gila River Indian Reservation, Arizona. *Quaternary Research* 54 : 49-57.

- WATERS, M.R., RAVESLOOT, J.C., 2001. Landscape change and the cultural evolution of the Hohokam along the middle Gila River and other river valleys in south-central Arizona. *American Antiquity* 66 (2) : 285-299.
- WATERS, M.R., RAVESLOOT, J.C., 2003. Disaster or catastrophe : human adaptation to high and low-frequency landscape processes - a reply to Ensor, Ensor, and De Vries. *American Antiquity* 68(2) : 400-440.
- WATSON, A., 1985. Structure, chemistry and origin of gypsum crusts in southern Tunisia and the central Namib Desert. *Sedimentology* 32 : 855-875.
- WATTEZ, J., COURTY, M.A., 1987. *Morphology of ash of some plant materials*. In : Micromorphologie des sols. Acte de la VIIème réunion internationale, Paris, juillet 1985 - AFES. Paris, pp. 677-683.
- WATTS, N.L., 1980. Quaternary pedogenic calcretes from the Kalahari, Southern Africa : mineralogy, genesis and diagenesis. *Sedimentology* 27 : 661-686.
- WEAVER, D.E.JR, 1972. A cultural-ecological model for the Classic Hohokam period in the lower Salt River valley. *The Kiva* 38 : 43-52.
- WEBB, R.H., 1987. Occurrence and geomorphic effects of streamflow and debris flow floods in southern Utah and northern Arizona. In : Mayer, L., Nash, D.B. (Eds.) : *Catastrophic flooding*. Allen and Unwin, Boston, pp. 247-265.
- WEBB, R.H., BETANCOURT, J.L., 1992. *Climatic variability and flood frequency of the Santa Cruz River, Pima County, Arizona*. USGS Water-Supply Paper 2379, Denver, 40 pp.
- WEBB, R.H., HASBARGEN, J., 1997. *Floods, ground-water levels, and arroyo formation on the Escalante River, south-central Utah : learning from the land*. Grand Staircase-Escalante National Monument Science Symposium Proceedings, pp. 335-345.
- WEBB, R.H., SMITH, S.S., MCCORD, V.A.S., 1991. *Historic channel changes in Kanab Creek, southern Utah and northern Arizona*. Grand Canyon Natural History Association Monograph 9, 91
- WESTERN REGIONAL CLIMATE CENTER, 2008. *Historical climate information*. www.wrcc.dri.edu
- WHITE, R.W., 1876. *Unpublished cadastral survey field notes and plat maps*. Gila River Indian Community, microfiche on file, Bureau of Land Management, Phoenix.
- WHITLOCK, C., SHAFER, S.L., MARLON, J., 2003. The role of climate and vegetation change in shaping past and future fire regimes in the northwestern US and the implications for ecosystem management. *Forest Ecology and Management* 178 : 5-21.
- WHITTLESEY, S.M., CIOLEK-TORRELLO, R., 1992. A revolt against rampant elites : toward an alternative paradigm. In : Lange, R.C., Germick, S. (Eds.) : *Proceedings of the second Salado conference, Phoenix*. Arizona Archaeological Society, pp. 312-324.
- WIEDER, M., YAALON, D.H., 1974. Effect of matrix composition on carbonate nodule crystallization. *Geoderma* 11 : 95-121
- WIEDER, M., YAALON, D.H., 1978. Grain cutans resulting from clay illuviation in calcareous soil material. In : Delgado, M. (Ed.) : *Micromorfología de Suelos. Vol. 2*. Universidad de Granada, España, pp. 1133-1158.

- WIEDER, M., YAALON, D.H., 1982. Micromorphological fabrics and developmental stages of carbonate nodular forms related to soil characteristics. *Geoderma* 28 : 203-220.
- WILCOX, D.R., 1979. The Hohokam regional system. In : Wilcox, D., Rafferty, K., Schoenwetter, J. (Eds) : *An archaeological test of sites in the Gila Butte-Santan region, south-central, Arizona*. Arizona State University Anthropological Research Papers 18, Tempe, pp. 77-116.
- WILCOX, D.R., 1980. The current status of the Hohokam concept. In : Doyel, D.E., Plog, F. (Eds.) : *Current issues in Hohokam Prehistory: proceedings of a symposium*. Arizona State University Anthropological Research Paper 23, Tempe. pp. 236-242.
- WILCOX, D.R., 1987. *Frank Midvale's Investigation of the site of La Ciudad*. Arizona State University Archaeological Field Studies 19, Department of Anthropology, Tempe.
- WILCOX, D.R., 1988. The regional context of the Brady Wash and Picacho Area Sites. In : Ciolek-Torello, R., Wilcox, D. (Eds) : *Hohokam settlement along the slopes of the Picacho Mountains. Vol 6 : synthesis and conclusion*. Museum of Northern Arizona Research Papers, Flagstaff, pp. 244-267.
- WILCOX, D.R., 1991. Hohokam social complexity. In : Crown, P.L., Judge, W.J. (Eds.) : *Chaco and Hohokam : prehistoric regional systems in the american southwest*. School of American Research Press, Santa Fe, pp. 253-275.
- WILCOX, D.R., HAAS, J., 1994. The scream of the butterfly. In : Gumerman, G.J. (Ed.) : *Themes in Southwest Prehistory*. School of American Research, Santa Fe, pp. 211-238.
- WILCOX, D.R., HOWARD, J.B., NELSON, R.H., 1990. One hundred years of archaeology at La Ciudad de los Hornos. *Soil Systems Publications in Archaeology* 16, Phoenix.
- WILCOX, D.R., MCGUIRE, T.R., STERNBERG, C. 1981. *Snaketown revisited : a partial cultural resource survey*. Arizona State Museum Archeological Series 155, 241 pp.
- WILCOX, D.R., SHENK, L.O., 1977. *The architecture of the Casa Grande and its interpretation*. Arizona State Museum Archaeological Series 115, University of Arizona, Tucson, 240 pp.
- WILCOX, D.R., STERNBERG, C., 1983. *Hohokam ballcourts and their interpretation*. Arizona State Museum Archaeological Series 160, University of Arizona, Tucson, 296 pp.
- WILDING, L.P., 1997. *Micromorphology emphasis in the United States over the past decade*. Proceedings of 10th international working meeting on soil micromorphology : studies on soil diversity, diagnostics, and dynamics, July 8-13, 1996, Moscow, Russia.
- WILDING, L.P., FLACH, K.W., 1985. Micropedology and soil taxonomy. In : Douglas, L.A., Thompson, M.L. (Eds.) : *Soil micromorphology and soil classification*. Soil Science Society of America Special Publication 15., Madison, Wisconsin, pp. 1-16.
- WILL, P.E., 1989. Techniques et organisation en chine : l'exemple de l'irrigation et de la protection hydraulique a l'époque impériale. *Les Cahiers du Centre de Recherches Historiques* 4. [En ligne], mis en ligne le 13 avril 2009. URL : <http://ccrh.revues.org/index2904.html>.
- WILLIAMS, G.W., 2003. *References on the American Indian use of fire in ecosystems*. Document électronique. http://www.wildlandfire.com/docs/biblio_indianfire.htm

- WILLIS, B.J., BEHRENSMEYER, A.K., 1994. Architecture of Miocene overbank deposits in northern Pakistan. *Journal of Sedimentary Research* B64 : 60-67.
- WILSON, J.P., 1999. *Peoples of the Middle Gila : a documentary history of the Pimas and Maricopas, 1500s-1945*. Ms. on file, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton, Arizona, 474 pp.
- WILSON, C., SIMPSON, I.A., CURRIE, E.J., 2002. Soil management in Pre-hispanic raised field systems : micromorphological evidence from Hacienda Zuleta, Ecuador. *Geoarchaeology* 17 (3) : 261-283.
- WINTER, J.C., 1973. Cultural Modifications of the Gila Pima: A.D. 1697-A.D. 1846. *Ethno-history* 20(1): 67-77
- WITTFOGEL, K.A., 1957. *Oriental despotism. a study of total power*. Yale University Press, New Haven, 556 pp.
- WOOD, D.G., 1972. *Recorded archaeological sites on the Gila River Indian Reservation : phase III*. Arizona State Museum Anthropological Series 16, University of Arizona, Tucson.
- WOOD, J.S., 1985. The northeastern periphery. In : Dittert, A.D., Dove, D.E. (Eds.) : *Proceedings of the 1983 Hohokam symposium*. Arizona Archaeological Society Occasional Paper 2, Phoenix, pp. 239-262.
- WOOD, J.S., MCALLISTER, M.E., 1980. Foundation and empire : the colonization of the northeastern Hohokam periphery. In : Doyel, D.E., Plog, F.T. (Eds.) : *Current issues in Hohokam prehistory : proceedings of a symposium*. Arizona State University Anthropological Research Papers 23, Tempe, pp. 180-200.
- WOODBURY, R.B., 1960. The Hohokam canals at Pueblo Grande, Arizona. *American Antiquity* 26(2) : 267-270.
- WOODSON, M.K., 1999. Migrations in late Anasazi prehistory : the evidence from the Goat Hill site. *The Kiva* 65 : 63-84.
- WOODSON, M.K., 2003. *A research design for the study of prehistoric and historic canal systems in the middle Gila valley, Arizona*. P-MIP Technical Report No. 2003-10, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton, AZ.
- WOODSON, M.K., 2009. *Re-drawing the map of Hohokam canals in the middle Gila River valley*. P-MIP Technical Report No. 2009-01, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton, AZ.
- WOODSON, M.K., DAVIS E., 2001. *A cultural resources assessment of the western half of the Blackwater management area, Pima-Maricopa Irrigation Project, Gila River Indian Community, Maricopa County, Arizona*. P-MIP Report 14, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Pima-Maricopa Irrigation Project, Sacaton, Arizona.
- WOODSON, M.K., NEILY, R.B., RAVESLOOT, J.C., 1999. *The archaeology of the Gila River landscape*. Paper presented at the 72nd Pecos Conference, Pinedale, Arizona.
- WOODSON, M. K., NEILY, R.B., 1998. *Cultural resource testing along the Pecos road segment of the Pecos-Price canal alignment, Santan extension (memorial) management area, Pima-Maricopa Irrigation Project, Gila River Indian Community, Maricopa County, Arizona*. P-MIP Technical

- Report 97-08, Cultural Resource Management Program, Gila River Indian Community, Sacaton, Arizona.
- WOODSON, M.K., RICE, G.E., 2002. *The hegemony of the Casa Grande platform mound community*. Paper Presented at the symposium entitled : Visible Archaeology on the Gila River Indian Community ; 67th Annual Meeting of the Society for American Archaeology, Denver.
- WOOSLEY, A.I., 1980. Agricultural diversity in the prehistoric southwest. *The Kiva* 45(4) : 317-333.
- WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES, 2006. *A framework for international classification*. FAO, Rome. Ressource Internet : <http://www.fao.org/ag/Agl/agll/wrb/doc/wrb2006final.pdf>
- WORSTER, D., 1985. *Rivers of empire : water, aridity and the growth of the american west*. Oxford University Press, Oxford, USA, 416 pp.
- WRIGHT, D.K., DARLING, J.A, FERTELMESS, C., FORMAN, S.L., WATERS, M.R., 2011. *The archaeology of dust : historical roots of a modern problem*. Poster présenté aux SAA's 2011, Sacramento, Californie.
- WRIGHT, V.P., 1987. The evolution of the early Carboniferous limestone province in southwest Britain. *Geological Magazine* 124 : 477-480.
- WRIGHT, V.P, MARRIOTT, S.B, 1993. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems : the role of floodplain sediments storage. *Sedimentary Geology* 86 : 203-210.
- WYCKOFF, D.G., 1977. Secondary forest succession following abandonment of Mesa Verde. *The Kiva* 42(3-4) : 215-231.

Z

- ZARBIN, E. 1984. *Roosevelt Dam : a history to 1911*. Salt River Project, Central Arizona Museum, Phoenix, 250 pp.
- ZARBIN, E., 1986. *Salt River : four steps forward, 1902-1910*. Salt River Project, Phoenix, 169 pp.
- ZARBIN, E., 1997. *Two sides of the river : Salt River valley canals, 1867-1902*. Salt River Project, Phoenix, 230 pp.

Liste des figures

Fig. 1 : Carte de la zone d'étude (bassins de la Salt et de la Gila) et délimitation du territoire culturel des Hohokam	21
Fig. 2 : Chronologie culturelle en Arizona au cours des deux derniers millénaires : phases de stabilité et de ruptures	23
Fig. 3 : Principe des cycles adaptatifs et de la panarchie	25
Fig. 4 : Gestion de l'hydraulique à l'interaction entre les sociétés et l'environnement	27
Fig. 5 : Système hydrographique et relief dans le bassin de Phoenix	37
Fig. 6 : Physiographie et géologie du bassin de Phoenix (Reynolds, 1988)	38
Fig. 7 : Section transversale typique d'une vallée appartenant à l'unité physiographique du <i>Basin and Range</i>	39
Fig. 8 : Décharge des rivières de la Salt et de la Verde avec les pics de crue associés	41
Fig. 9 : Localisation des barrages le long de la Salt et Gila Rivers et paysages associés	42
Fig. 10 : Carte géomorphologique de la Salt River (adapté de Pewé, 1978)	43
Fig. 11 : Géomorphologie de la Gila River Indian Reservation (Waters, 1996)	46
Fig. 12 : Diagramme ombrothermique de Phoenix et répartition spatiale des précipitations	47
Fig. 13 : Dynamique de fonctionnement de la mousson nord-américaine	48
Fig. 14 : Circulation atmosphérique de Walker et dynamique du phénomène ENSO	50
Fig. 15 : Evolution historique des T° (Celsius) dans le sud-est de l'Arizona	52
Fig. 16 : Evaporation moyenne mensuelle le long de la Salt River (Tempe et Mesa) et le long de la Gila River (Sacaton). (Données collectées sur le site internet du Western Regional Climate Center / Desert Research Institute).	52
Fig. 17 : Lien entre les conditions climatiques et la dynamique fluviale	53
Fig. 18 : Lien entre précipitation et décharges annuelles moyennes dans le bassin de la Salt	55
Fig. 19 : Lien entre décharge, type de crue et saisonnalité dans le bassin de la Verde	55
Fig. 20 : Décharge mesurée de la Salt et Gila Rivers, de 1913 à 2004 (56
Fig. 21 : Largeur moyenne du lit mineur de la Gila River (du Southern Pacific Railroad à Pima Butte)	58
Fig. 22 : Couverture végétale et organisation spatiale des principaux groupes végétaux (Graf, 1988 a)	60
Fig. 23 : Couvert végétal et unité géomorphologique	61
Fig. 24 : Carte pédologique de la Gila River Indian Community	63
Fig. 25 : Carte pédologique de la partie est du comté de Maricopa	64
Fig. 26 : Sites archéologiques répertoriés et cartographiés le long de la Salt et Gila Rivers	73
Fig. 27 : Vue du nord-ouest des berges d'un canal préhistorique, Canal System 2 en 1930 (SRP, 1930)	74
Fig. 28 : Cartographie des systèmes d'irrigation le long de la Salt River	75
Fig. 29 : Illustration de la phase d'agrégation observée dans le territoire Hohokam à la fin de la période Sédentaire.	79
Fig. 30 : Le village de Pueblo Grande, rive nord de la Salt River	80
Fig. 31 : Architecture publique et domestique des Hohokam	84
Fig. 32 : Histoire séquentielle des paysages de la moyenne vallée de la Gila et de la confluence Salt/Gila	91
Fig. 33 : Synthèse des données géomorphologiques en amont de la Salt: transect effectué dans la terrasse Lehi	92
Fig. 34 : <i>Park of the four canals</i> : canaux d'irrigation et champs agricoles préhistoriques	95
Fig. 35 : Organisation potentielle des champs agricoles: gestion et taille des champs le long du CS1	95
Fig. 36 : Calendrier agricole des Akime O'Odham dans la Gila River Indian Community	100
Fig. 37 : Les 14 principaux systèmes d'irrigation le long de la Salt River	104
Fig. 38 : Les principaux systèmes d'irrigation dans la Gila River Indian Reservation	104
Fig. 39 : Organisation interne des systèmes d'irrigation	105
Fig. 40 : Structure possible d'une vanne d'entrée	108
Fig. 41 : Vue en plan et photographie d'un réservoir d'eau préhistorique, Upper Santan Village, GRIC	108
Fig. 42 : Canal d'irrigation principal, avec un remplissage argileux à la base et une couche cendreuse au sommet	111
Fig. 43 : Amas rocheux à but agricole : les <i>rock piles</i>	113
Fig. 44 : Terrasses agricoles observée à Loma del Rio, Papago Park, Tempe	113
Fig. 45 : Principe de l'Ak Chin farming ou agriculture sèche.	114
Fig. 46 : Répartition de l'habitat et canaux d'irrigation construits au cours de la période Pionnière	116
Fig. 47 : Répartition de l'habitat et canaux d'irrigation construits au cours de la période Coloniale	118
Fig. 48 : Répartition de l'habitat et construction de canaux d'irrigation à la fin de la période Sédentaire	119
Fig. 49 : Répartition de l'habitat et construction de canaux au cours de la période Classique	121
Fig. 50 : Répartition de l'habitat et canaux d'irrigation au début de la période Historique	123
Fig. 51 : Vue de l'est de la Salt River partiellement en eau en 1930 au niveau de 48th street	125
Fig. 52 : Vue de l'ouest d'un canal d'irrigation en terre en 1930. Intersection entre McDowell Road et 106th street	125
Fig. 53 : Localisation géomorphologique des villages Hohokam en diachronie	127
Fig. 54 : Sites archéologiques abandonnés de la période Pionnière à Classique	128

Fig. 55 : Cartographie des canaux d'irrigation en utilisation dans la Gila River au cours de la période Classique	130
Fig. 56 : Canaux d'irrigation et districts au cours de la période protohistorique/historique	131
Fig. 57 : Localisation des canaux Pimas/Maricopas après 1850 dans la moyenne vallée de la Gila	132
Fig. 58 : Localisation des structures hydrauliques après 1864 dans la moyenne vallée de la Gila	133
Fig. 59 : Localisation des sites d'étude le long de la Salt et de la Gila Rivers	142
Fig. 60 : Variabilité sédimentaire des dépôts de crues	144
Fig. 61 : Paléosols cumuliques le long de la séquence de Gila Florence	145
Fig. 62 : Caliche : formation, reconnaissance et exploitation	147
Fig. 63 : Figures syn-sédimentaires observées en plaine alluviale	148
Fig. 64 : Répartition géographique approximative des arroyos en Arizona	151
Fig. 65 : Model hypothétique de la partie terminale des cônes détritiques et évolution des facies sédimentaires de l'amont vers l'aval	151
Fig. 66 : Zones sensibles à l'activité locale érosive	152
Fig. 67 : Coupe transversale de l'extrémité digitée d'un cône déritique en provenance des Papago Buttes.	152
Fig. 68 : Figures sédimentaires observées en plaine d'inondation	154
Fig. 69 : Repérage des canaux d'irrigation préhistoriques	156
Fig. 70 : Urbanisation en 1934 et 2009, destruction des canaux préhistoriques	157
Fig. 71 : Distinction entre un chenal naturel et un canal de forme trapézoïdale	157
Fig. 72 : Trace d'activité humaine dans un canal d'irrigation	158
Fig. 73 : Processus taphonomiques dans les canaux selon leur localisation géomorphologique	160
Fig. 74 : Chronologie et gap sédimentaire dans les canaux : exemple de l'impact de l'activité humaine	161
Fig. 75 : Principe de la datation par luminescence stimulée optiquement	165
Fig. 76 : Principe de l'échantillonnage des datations à luminescence stimulée optiquement	166
Fig. 77 : Principe de la datation chronostratigraphique dans les canaux d'irrigation	168
Fig. 78 : Ensemble des canaux d'irrigation étudiés dans la basse vallée de la Salt par système d'irrigation	172
Fig. 79 : Localisation du projet Riverview at Dobson (AZ U :9 :135 ASM) et sites archéologiques	176
Fig. 80 : Profil et description du canal T 206, projet Riverview at Dobson	178
Fig. 81 : Profil et description du canal T 204, projet Riverview at Dobson	179
Fig. 82 : Corrélations chronostratigraphiques entre les sédiments de plaine d'inondation des tranchées T 110, 204 et 206, projets RAD	181
Fig. 83 : Corrélations chronostratigraphiques des canaux d'irrigation, projet RAD	181
Fig. 84 : Log stratigraphique n°5, SRMG, Salt River	182
Fig. 85 : Localisation des canaux d'irrigation étudiés le long du système Scottsdale,	184
Fig. 86 : Lithostratigraphie et description de la séquence SRMG LOG 6, Salt River	187
Fig. 87 : Lithostratigraphie et description de la séquence SRMG LOG 4, Salt River	189
Fig. 88 : Synthèse chronostratigraphique partielle le long du système Scottsdale	190
Fig. 89 : Localisation et corpus des canaux étudiés le long du CS2, source bibliographique	191
Fig. 90 : Localisation des villages de La Lomita et La Lomita Pequeña, et localisation du canal étudié. Mise en évidence des dynamiques érosives dans ce secteur (Huckleberry, 1990)	194
Fig. 91 : Stratigraphie et description du canal Az U :9 :67 (ASM) appartenant au Canal System 2	195
Fig. 92 : Cadre géomorphologique et localisation des tranchées effectuées sur la terrasse Lehi (Desert Archaeology)	196
Fig. 93 : Stratigraphie et description de la tranchée 8, Bloc 4, Terrasse Lehi, Canal System 2, Az U :9 :28 (ASM)	199
Fig. 94 : Stratigraphie et description de la tranchée 18, Bloc 7, Terrasse Lehi, Canal System 2, Az U :9 :28 (ASM)	200
Fig. 95 : Stratigraphie et description du canal F 3, T 11, Canal System 2, Az U :9 :28 (ASM)	201
Fig. 96 : Stratigraphie et description du canal F 10, T 22, Canal System 2, Az U :9 :28 (ASM)	202
Fig. 97 : Chronostratigraphie le long du Canal System 2	204
Fig. 98 : Localisation géographique et positionnement des tranchées, projet ECOPLAN	205
Fig. 99 : Sites archéologiques le long du canal 7 et canaux associés	206
Fig. 100 : Stratigraphie et description du canal Az T :8 :270 (ASM), projet Ecoplan, Salt River	208
Fig. 101 : Stratigraphie et description du canal Az T :8 :272 (ASM), projet Ecoplan, Salt River	209
Fig. 102 : Chronostratigraphie de la séquence étudiée sur le site de Vulcan, terrasse Lehi, Salt River	211
Fig. 103 : Stratigraphie naturelle des sédiments de la terrasse T1/Lehi, Tempe, Arizona	212
Fig. 104 : Localisation du site de Cashion et du Canal System 12	214
Fig. 105 : Vue aérienne du village de Cashion et photographies de terrain	216
Fig. 106 : Chronostratigraphie des canaux du site de Cashion	217
Fig. 107 : Stratigraphie du canal 12, Cashion Site, T 890	218
Fig. 108 : Stratigraphie du canal 12, Cashion Site, T 887	219
Fig. 109 : Représentation graphique des 28 dates radiocarbone obtenues dans les canaux et les sédiments du lit majeur de la Salt	221
Fig. 110 : Synthèse des dynamiques hydrosédimentaires et formation des terrasses alluviales dans la basse vallée de la Salt	224

Fig. 111 : Diagramme cumulé de 83 dates obtenues dans le remplissage de 70 structures hydrauliques dans la basse vallée de la Salt	225
Fig. 112 : Localisation géographique et géomorphologique du Fiber Road Project, Gila River Indian Community	228
Fig. 113 : Localisation des sites archéologiques le long du Fiber Road Project	229
Fig. 114 : Vue aérienne des canaux étudiés appartenant au Casa Blanca System	232
Fig. 115 : Localisation, profil et description du canal F2, projet GR 886, Casa Blanca Canal System	233
Fig. 116 : Localisation, profil et description du canal F8, projet GR 886, Casa Blanca Canal System	234
Fig. 117 : Localisation et description du canal F6, projet GR 886, Casa Blanca Canal System	235
Fig. 118 : Stratigraphie de la Terrasse T2 sur le long du Casa Blanca System	237
Fig. 119 : Localisation géographique et géomorphologique du site de Santan	238
Fig. 120 : Dynamiques hydrosédimentaires dans le secteur de Santan	239
Fig. 121 : Sites archéologiques identifiés dans le secteur de Santan	240
Fig. 122 : Profil synthétique des 5 structures hydrauliques étudiées et chronologie associée	242
Fig. 123 : a) Structuration des champs préhistoriques dans le secteur de Santan, b) Champ préhistorique Hohokam identifié entre deux canaux latéraux	243
Fig. 124 : Localisation des prospections géomorphologiques conduites le long de la Gila River	244
Fig. 125 : Lithostratigraphie et photographies de la carrière de gravier de Santan	245
Fig. 126 : Localisation des systèmes d'irrigation et des travaux antérieurs géomorphologiques et de la séquence Gila Florence	248
Fig. 127 : Profil des tranchées réalisées dans le secteur de Florence par Huckleberry, 1993, 1995	249
Fig. 128 : Localisation, lithostratigraphie et résultats micromorphologiques sur le site de Gila Florence	250
Fig. 129 : Clé d'interprétation des valeurs de susceptibilité magnétique	264
Fig. 130 : Carte des valeurs de susceptibilité magnétique dans les bassins de la Salt, Verde et Gila	268
Fig. 131 : Photographies des zones d'érosion dans le bassin de Phoenix	269
Fig. 132 : Echelles de perception et apports d'une recherche interdisciplinaire multi-proxy intégrée	272
Fig. 133 : Equifinalité des processus pédo-sédimentaires	277
Fig. 134 : Les 4 échelles d'observation, du terrain à la lame mince	278
Fig. 135 : Stratégie d'échantillonnage micromorphologique	279
Fig. 136 : Technique de fabrication des lames minces	280
Fig. 137 : Charte de quantification	282
Fig. 138 : Transfert d'image sous Image J et sélection des particules siliceuses et mesures	283
Fig. 139 : Marqueurs micromorphologiques de l'érosion locale	293
Fig. 140 : Répartition géographique de l'érosion locale le long de la basse vallée de la Salt/moyenne vallée de la Gila et dynamiques identifiées à l'échelle microscopique	294
Fig. 141 : Localisation de l'échantillon éolien moderne (Gila River Indian Community)	296
Fig. 142 : Caractéristiques des dépôts éoliens actuels à faible grossissement et fort grossissement	296
Fig. 143 : Reconnaissance micromorphologique des alluvions par la dynamique d'écoulement	298
Fig. 144 : Evènements hydrosédimentaires par objet d'étude (canal/formation alluviale) et par secteur géographique	299
Fig. 145 : Identification des faciès granulométriques dans les remplissages de canaux, Gila River	301
Fig. 146 : Répartition géographique des classes granulométriques identifiées dans les deux systèmes d'irrigation étudiés (Casa Blanca et Santan), Gila River Indian Community	301
Fig. 147 : Identification des faciès granulométriques dans les séquences stratigraphiques, Gila River	302
Fig. 148 : Répartition géographique des classes granulométriques dans les cinq séquences stratigraphiques étudiées dans la moyenne vallée de la Gila	302
Fig. 149 : Identification des faciès granulométriques dans les remplissages de canaux, Salt River	303
Fig. 150 : Identification des faciès granulométriques dans la plaine alluviale et les basses terrasses de la Salt River	304
Fig. 151 : Répartition géographique des classes granulométriques dans les cinq séquences stratigraphiques étudiées dans la basse vallée de la Salt	304
Fig. 152 : Localisation des échantillons actuels prélevés le long de la Verde (Rio Verde et South Verde)	307
Fig. 153 : Caractéristiques pétrographiques des dépôts en provenance des bassins de la Salt et de la Verde	308
Fig. 154 : Résultats de l'ACM « minéraux rares », Salt River	310
Fig. 155 : Résultats de l'ACM « minéraux communs », Salt River	311
Fig. 156 : Identification finale du Facies de Source Sédimentaire dans le bassin de la Salt	313
Fig. 157 : Segmentation géologique/pétrographique du bassin de la Gila, Arizona	315
Fig. 158 : Résultats de l'ACM « minéraux rares », Gila River	316
Fig. 159 : Variation du lit mineur et majeur de la Salt River au cours des périodes historiques	327
Fig. 160 : Destruction du Tempe Railroad bridge au cours de la crue de 1891	328
Fig. 161 : Carte de répartition géographique de la crue de 1891 le long de la basse vallée de la Salt	329
Fig. 162 : Archive sédimentaire de la crue de 1891	330
Fig. 163 : Localisation et caractéristiques micromorphologiques de la crue de 1993	331
Fig. 164 : Flux solides en suspension dans la Salt et la Verde entre janvier et mars 1993	333

Fig. 165 : Répartition géographique du ruissellement le long de la Verde River au cours de la crue de 1993	333
Fig. 166 : Localisation et stratigraphie du canal historique Az T :8 :271	340
Fig. 167 : Proposition de corrélation entre les archives historiques et sédimentaires d'un canal historique fonctionnant au début du 20 ^{ème} siècle	342
Fig. 168 : Localisation et stratigraphie du canal historique Saint John	344
Fig. 169 : Résultats de l'analyse micromorphologique conduite dans le canal historique Saint Johns.	345
Fig. 170 : Corrélation entre archives sédimentaires et les données climatiques textuelles, Saint Johns canal	347
Fig. 171 : Micromorphologie des traces de bioturbation animale et microstructure associée	356
Fig. 172 : Microphotographie de la morphologie de la matière organique identifiée en lame mince	357
Fig. 173 : Microphotographies des particules organiques carbonisées identifiées en lame mince	358
Fig. 174 : Microphotographies des traits texturaux identifiés en lame mince (Lumière Naturelle)	360
Fig. 175 : Identification du Facies des traits texturaux. Analyse conduites sur 607 US. Chaque point représente une unité microstratigraphique visible sur les axes F1 et F2. Le % de variabilité expliqué par les axes F1 et F2 atteint 69,51%.	361
Fig. 176 : Localisation de l'échantillonnage de surface	364
Fig. 177 : Marqueurs micromorphologiques de la dynamique végétale	367
Fig. 178 : Microphotographie des principales caractéristiques des sols cultivés et irrigués historiques, modernes et actuels	371
Fig. 179 : Synthèse et interaction des traits texturaux et écologiques identifiés en surface des formations cultivées et non cultivées	375
Fig. 180: Marqueurs micromorphologiques de la dynamique pédo-climatique (traits d'oxydation)	380
Fig. 181 : Type et pourcentage de traits d'oxydation dans les facies contenant plus de 5% d'intercalations	382
Fig. 182 : Pourcentages et types de cristaux de carbonates secondaires identifiés dans l'ensemble des US étudiées	382
Fig. 183 : Marqueurs micromorphologiques de la dynamique pédo-climatique (traits carbonatés)	383
Fig. 184 : Cristallisation des carbonates en fonction de la texture des sédiments et de la température	385
Fig. 185 : Pourcentage des traits carbonatés secondaires en fonction de la microstructure des dépôts	386
Fig. 186 : Photographie optique des sels solubles et du gypse lenticulaire	388
Fig. 187 : Lien entre la taille des charbons et la granulométrie	390
Fig. 188 : Répartition de la taille des charbons en fonction du processus de transport de la charge solide	391
Fig. 189 : Résultats des AFC/CAH réalisées sur les variables : % de charbons, taille des charbons et origine sédimentaire (bassins de la Salt et de la Gila)	393
Fig. 190 : Résultats de l'AFC/CAH réalisée sur 3 variables : % de charbons, taille des cristaux secondaires de carbonates, type de traits d'oxydation (bassins de la Salt et de la Gila)	394
Fig. 191 : Principaux résultats obtenus sur l'interaction entre les processus pédoclimatiques	397
Fig. 192 : Résultats micromorphologiques/magnétiques, projet Riverview at Dobson, CS1, Canal 206	406
Fig. 193 : Résultats micromorphologiques/magnétiques projet Riverview at Dobson, CS1, Canal 204	407
Fig. 194 : Analyse micromorphologique des dépôts de crue, projet RAD	409
Fig. 195 : Lithostratigraphie, chronologie et résultats micromorphologiques, SRMG LOG 5	410
Fig. 196 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du CS1, période Coloniale à Classique (de 600 à 1700 apr. J.-C.)	414
Fig. 197 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, SRMG LOG 4	416
Fig. 198 : Résultats des analyses malacologiques et polliniques conduites dans 4 canaux du système Scottsdale, exploités de la période Coloniale à Classique	418
Fig. 199 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, La Lomita	421
Fig. 200 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du Canal System 2, période Classique Soho (1220-1300 apr. J.-C.)	424
Fig. 201 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques /magnétiques, Ecoplan F 7	425
Fig. 202 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques /magnétiques, Ecoplan F 1	426
Fig. 203 : Scan des lames minces et microphotographies des sédiments de la phase 2 et des traits texturaux	429
Fig. 204 : Stratigraphie et description de la séquence stratigraphique Vulcan, rivière Salt, terrasse Lehi	430
Fig. 205 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du Canal System 7, période Pionnière à Historique (7 ^{ème} -19 ^{ème} s.)	432
Fig. 206 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, Cashion site, T 890	434
Fig. 207 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, Cashion site, T 887	435
Fig. 208 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du canal système 12, période Coloniale à Classique (750-1300 apr. J.-C.)	437
Fig. 209 : Aménagements hydrauliques sur le site de Cashion	438
Fig. 210 : Phasage pédo-sédimentaire final dans le bassin vallée de la Salt, de la période Pionnière à la période Historique	441
Fig. 211 : Synthèse des données pédoclimatiques et écologiques (Salt et Gila)	447
Fig. 212 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, projet GR 886, Casa Blanca Canal System, Canal 6	451
Fig. 213 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, projet GR 886, Casa Blanca Canal System, Canal 2	452
Fig. 214 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, projet GR 886, Casa Blanca Canal System, Canal 8	453
Fig. 215 : Proposition de corrélations pédo-stratigraphiques des canaux du Casa Blanca System	455

Fig. 216 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du Casa Blanca System, période Formative à ?	456
Fig. 217 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, Projet GR 441, Santan Canal System, Canal principal F 698	458
Fig. 218 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques, Projet GR 441, Santan Canal System, réservoir d'eau	459
Fig. 219 : Lithostratigraphies et résultats micromorphologiques/magnétiques, Projet GR 441, Santan Canal System, canaux F 779, F 786, F 366	460
Fig. 220 : Lithostratigraphique, résultats micromorphologiques/magnétiques, Gila Sand and Gravel Corporation, Santan Plant	464
Fig. 221 : Figure synthétique des dynamiques hydrosédimentaires et paléoenvironnementales le long du Santan System, période Sédentaire à Historique (950-1800 apr. J.-C.)	466
Fig. 222 : Pratiques agraires le long du Casa grande et Poston System	467
Fig. 223 : Lithostratigraphie et résultats micromorphologiques/magnétiques sur le site de Gila Florence	470
Fig. 224 : Micromorphologie de potentielles zones irriguées, secteur de Gila Florence	471
Fig. 225 : Synthèse chronologique des dynamiques hydriques et des évolutions morphologiques, de l'origine sédimentaire, et des caractéristiques de l'écoulement dans les canaux d'irrigation et les dépôts du lit majeur	474
Fig. 226 : Comparaison des phasages sédimentaires obtenus dans les bassins de la Salt et de la Gila	487
Fig. 227 : Dynamiques hydrosédimentaires et comparaison avec les dynamiques morphogéniques dans les bassins de la Gila, Little Colorado, San Juan et Colorado	488
Fig. 228 : Localisation des projets géomorphologiques et géoarchéologiques présentés dans la Fig. 227	489
Fig. 229 : AFC sur données quantitatives pour mesurer le lien entre dynamique hydrosédimentaire et climat sur la longue durée	497
Fig. 230 : Dynamiques hydrosédimentaires et comparaison avec les dynamiques climatiques régionales et globales	498
Fig. 231 : Zoom sur les conditions climatiques, l'occurrence d'évènements El Niño et les dynamiques fluviales (11 ^{ème} s)	502
Fig. 232 : Modélisation des dynamiques hydrosédimentaires et climatiques en Arizona	506
Fig. 233 : Comparaison entre les flux de charbons, l'exploitation du territoire, l'évolution de la population et le climat	510
Fig. 234 : Bassin de la Colorado et groupes culturels implantés en bordure des affluents : les Anasazi, Zuni, Sinagua, Salado, Hohokam et Mimbres	512
Fig. 235 : Proposition d'un modèle de fonctionnement de l'agrosystème dans un contexte de stabilité des paysages fluviaux (période Formative, Protohistorique, Historique et Coloniale/Sédentaire)	514
Fig. 236 : Proposition d'un modèle de fonctionnement de l'agrosystème dans un contexte géomorphologique d'instabilité fluviale (Période Coloniale, fin Sédentaire, fin Classique, Historique)	518
Fig. 237 : Cascade de contraintes environnementales et humaines subies par les Akimel O'Odham	519
Fig. 238 : Proposition d'un modèle de fonctionnement de l'agrosystème dans un contexte d'absence d'eau et de cours d'eau incisé (Période début Classique Soho)	523
Fig. 239 : Proposition d'un modèle de fonctionnement de l'agrosystème dans un contexte de conditions chaudes et sèches (Période Pionnière)	525
Fig. 240 : Evolution de la population dans le Sud-Ouest américain, évolution de l'ingénierie agricole et lien avec les dynamiques hydrosédimentaires	526

Liste des tableaux

Tab. 1 : Tableau d'équivalence entre les formations identifiées par Waters (1996) et Huckleberry (1993, 1995) dans la moyenne vallée de la Gila et par Onken (2004) à la confluence Salt/Gila	46
Tab. 2 : Equivalence entre la taxonomie internationale des sols, la classification française et américaine	62
Tab. 3: Chronologie régionale et locale des Hohokam et caractéristiques culturelles (d'après Dean, 1991)	77
Tab. 4 : Liste des projets, nombre de structures mises au jour et analyses réalisées.	142
Tab. 5 : Liste des datations radiocarbone obtenues dans le cadre de notre étude	164
Tab. 6 : Découpage typo-chronologique de la culture Hohokam	168
Tab. 7 : Premiers questionnements sur le terrain en fonction de l'objet d'étude	169
Tab. 8 : Critères descriptifs et interprétation des données pédo-sédimentaires de terrain	170
Tab. 9 : Facies sédimentaires identifiés dans les canaux d'irrigation, source bibliographique	173
Tab. 10 : Corpus des canaux étudiés le long du CS1, source bibliographique	173
Tab. 11 : Chronologie, facies sédimentaires identifiés dans les canaux du Canal System 1 et nombre de curages visibles, source bibliographique	174
Tab. 12 : Chronologie, facies sédimentaires identifiés dans les canaux du Scottdale System et nombre de curages visibles, source bibliographique	185
Tab. 13 : Chronologie, facies sédimentaires identifiés dans les canaux du CS2 et nombre de curages visibles, source bibliographique	192
Tab. 14 : Comparaison des dates radiocarbone et OSL	210
Tab. 15 : Liste des sites archéologiques référencés le long de la Casa Blanca Road, GRIC	229
Tab. 16 : Nombre de structures hydrauliques étudiées, d'échantillons prélevés et d'US décrites	241
Tab. 17 : Susceptibilité magnétique des minéraux communs	263
Tab. 18 : Liste des formations géologiques identifiées dans les bassins versants de la Salt, Gila et Verde, et valeurs de susceptibilité magnétique indicatives associées	267
Tab. 19 : Démarche en cinq étapes adoptée lors de la classification des facies hydrosédimentaires	290
Tab. 20 : Nombre de sites et d'échantillons analysés à l'échelle microscopique et intégrés dans des analyses statistiques, en fonction du bassin versant étudié et de l'environnement fluvial	291
Tab. 21 : Reconnaissance des processus d'érosion locale	292
Tab. 22 : Caractérisation micromorphologique des sables éoliens modernes	296
Tab. 23 : Reconnaissance micromorphologique des alluvions	297
Tab. 24 : Affectation d'un milieu de sédimentation (alluvial, colluvial, éolien) aux microUS en fonction de l'environnement géographique et fluvial	300
Tab. 25 : Codification des marqueurs des sources sédimentaires, Salt River	312
Tab. 26 : Classification des échantillons référentiels de la Salt et de la Verde	312
Tab. 27 : Classification des minéraux communs (biotite, carbonate, amphibole), moyenne vallée de la Gila	316
Tab. 28 : Classification des facies sédimentaires alluviaux, éoliens et colluviaux identifiés dans les formations alluviales (dépôts des terrasses T ¹ , Lehi et Mesa), Salt River	320
Tab. 29 : Classification des facies hydrosédimentaires alluviaux, éoliens et colluviaux identifiés dans les remplissages de canaux, Salt River	322
Tab. 30 : Classification des facies sédimentaires alluviaux, éoliens et colluviaux identifiés dans les dépôts des terrasses T ¹ , T ² et des transitions cônes détritiques/terrasse T ² , Gila River	324
Tab. 31 : Classification des facies hydrosédimentaires alluviaux, éoliens et colluviaux identifiés dans les remplissages de canaux, Gila River	326
Tab. 32 : Liste des évolutions historiques de la morphologie de la Gila River, des crues, des dommages enregistrés et de leurs causes climatiques	336
Tab. 33 : Synthèse et essai d'interprétation climatique et géomorphologique des facies sédimentaires en plaine d'inondation, Salt et Gila	337
Tab. 34 : Résultats de l'analyse micromorphologique conduite dans le canal historique Az T :8 :271 (ASM)	341
Tab. 35 : Synthèse et essai d'interprétation climatique, géomorphologique et humain des facies sédimentaires dans les canaux d'irrigation, Salt et Gila	351
Tab. 36: Codification des traits texturaux pour les analyses statistiques	361
Tab. 37 : Traits micro-pédologiques de surface identifiés sur 4 échantillons modernes de surface	365
Tab. 38 : Caractéristiques micromorphologiques des champs historiques, modernes et actuels	372
Tab. 39 : Développement des traits ferrugineux et discrimination en lame mince	379
Tab. 40 : Proposition de classification et d'interprétation des facies pédoclimatiques	397
Tab. 41 : Synthèse des données botaniques le long du CS1 (Fish, 1987 ; Miksicek, 1987 ; Vokes et Miksicek, 1987)	412
Tab. 42 : Synthèse diachronique des analyses polliniques conduites sur des sites implantés le long du Scottsdale System	418
Tab. 43: Synthèse des données botaniques sur les principaux sites archéologiques le long du Canal System 2	422
Tab. 44 : Phasage pédosédimentaire final dans la basse vallée de la Salt.	440
Tab. 45 : Synthèse partielle des données botaniques sur les principaux sites archéologiques le long de la Gila River	468
Tab. 46 : Synthèse chronostratigraphique	473
Tab. 47 : Synthèse des données microstructurales, des dynamiques pédo-climatiques et écologiques.	475

Titre de la thèse :

Dynamique des paysages agraires et gestion de l'eau dans le bassin semi-désertique de Phoenix, Arizona de la Préhistoire à l'époque moderne

Résumé :

Les Hohokam et leurs descendants les Akimel O'Odham ont exploité et irrigué la basse vallée de la Salt et la moyenne vallée de la Gila dans le bassin semi-désertique de Phoenix en Arizona depuis presque deux millénaires. Leur histoire culturelle repose sur une interaction constante de ses membres avec une ressource rare, l'eau. Pour comprendre les dynamiques socio-environnementales, résultats de cette interaction sur la longue durée, nous avons adopté une approche géoarchéologique, chronologique et paléoenvironnementale des systèmes hydrauliques et des formations alluviales, approche affinée par les méthodes géophysiques et micromorphologiques.

La reconstruction de l'agro et de l'hydrosystème met en relief un développement de l'irrigation autour de 300 apr. J.-C. lors de conditions environnementales stables mais sèches. De 300 à 1050 apr. J.-C. (période pré-Classique), l'agrosystème Hohokam est caractérisé par une irrigation efficace de la plaine alluviale et des basses terrasses, qui s'exhaussent puis se stabilisent entre 850 et 1000 apr. J.-C. Un épisode d'élargissement puis d'incision est enregistré entre 1050-1150 apr. J.-C. Malgré un entretien poussé des structures hydrauliques, l'organisation du territoire évolue. Les basses terres sont abandonnées, de nouveaux systèmes d'irrigation sont construits et les pratiques agraires se diversifient. L'exhaussement du lit est à nouveau attesté à partir du 13^{ème} s. et le fonctionnement de l'irrigation est optimal entre 1150 et 1450 apr. J.-C. (période Classique). Le bassin de Phoenix est toutefois abandonné jusqu'au 17^{ème} s. Cette déprise agraire est associée à une phase de stabilité du paysage, entre 1450 et 1600 apr. J.-C, puis par une reprise rapide de l'aggradation associée à une forte mobilité fluviale jusqu'en 1870, date après laquelle le système s'incise à nouveau. L'agrosystème Akimel O'Odham fonctionne de façon optimale du 17^{ème} jusqu'à l'arrivée massive des pionniers (circa 1870), après laquelle il évolue de façon presque irréversible (réduction de la superficie irrigable, coupe du bois, pratique de l'agriculture sèche).

Ces résultats permettent d'aborder les modalités de la morphogénèse en contexte semi-aride mais également les concepts de rupture et de stabilité socio-environnementale. Nous réfutons l'hypothèse d'un déclin d'origine environnementale autour de 1450 apr. J.-C. Par contre, une crise environnementale autour de 1000-1150 apr. J.-C., associée à des conditions climatiques contraignantes conduisant à des migrations massives et une surexploitation du territoire dans un milieu déjà fragilisé car trop spécialisé, pourrait être responsable du lent déclin de la communauté d'irrigation Hohokam, 200 à 300 ans plus tard. Le système socio-environnemental des Akimel O'Odham au 19^{ème} s. semble reproduire le même schéma sur une échelle spatiale et temporelle plus réduite.

Mots clés : géoarchéologie, paysage agraire, gestion de l'eau, irrigation, micromorphologie, pédologie, archéologie, climat, Etats Unis, Arizona, Bassin de Phoenix, Hohokam, Akimel O'Odham

Title of the dissertation:

Landscape dynamics and water management in the semi-desert Phoenix basin, Arizona from prehistoric times to the present day

Abstract

The Hohokam and their descendants the Akimel O'Odham have cultivated and irrigated the lower Salt river valley and the middle Gila river valley in the semi-desert Phoenix basin in Arizona for almost two thousand years. The cultural history of this tribe is based on the continuous interaction of its members and water, a rare resource in the region. To fully comprehend the socio-environmental dynamics resulting from this interaction over a long period, we have opted for a geoarcheological, chronological and paleoenvironmental approach to hydraulic systems and alluvial formations, together with precise geophysical and micromorphological methods.

The reconstruction of the agro-system and hydro-system brings to light a development in Hohokam irrigation technology around 300 AD in stable environmental conditions. From 300 AD to 1050 AD (pre-Classic period) the Hohokam agro-system demonstrates efficient irrigation of the alluvial plain and low terraces whose level rises then stabilises between 850 AD and 1000 AD. There follows a widening period followed by an incision between 1000 AD and 1150 AD. In spite of considerable efforts to maintain the hydraulic structures, the land has to be reorganised. The lower lands are abandoned, new irrigation systems are built, and there is more agricultural diversity. As from the 13th century, there is another rise in the level of the alluvial plain and between 1150 AD and 1450 AD (Classical Period) there is a peak in irrigation efficiency. However, the Phoenix basin is abandoned until the 17th century. This land abandonment brings about a stability in the landscape between 1450 AD and 1600 AD and is followed by a rapid return to aggradation together with a strong fluvial mobility lasting until 1870 at which time another incision is recorded. The Akimel O'Odham agro-system works with optimal results from the 17th century to the arrival of pioneers (circa 1870), following which it evolves in an almost irreversible way (reduction of irrigated areas, clearing of trees and dry farming practices).

These results allow us to debate not only about the practical details of morphogenesis in semi-arid conditions but also about the concepts of socio-environmental stability and breakdown. We refute the hypothesis of environmental decline around 1450 AD, yet an environmental crisis around 1050-1150 AD, combined with difficult climatic conditions, leading to massive population migrations and land overexploitation, might have caused a slow decline in the Hohokam irrigation community almost 200 to 200 years later. The socio-environmental system of the Akimel O'Odham in the 19th century seems to reproduce the same pattern on a smaller spatial and temporal scale.

Key words : geoarcheology, farming land, water management, irrigation, micromorphology, pedology, archaeology, climate, United States, Arizona, Phoenix Basin, Hohokam, Akimel O'Odham