Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers

Bertrand Aunay

▶ **To cite this version:**

Bertrand Aunay. Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers. Hydrologie. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2007. Français. NNT : . tel-00275467

HAL Id: tel-00275467

https://theses.hal.science/tel-00275467

Submitted on 24 Apr 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Hydrogéologie

Ecole Doctorale : Biologie des Systèmes Intégrés, Agronomie, Géosciences, Hydrologie, Environnement (ED 167 - SIBAGHE)

présentée et soutenue publiquement

par

Bertrand AUNAY

Le 1er juin 2007

Titre :

_____

Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers

_____

JURY

M	Philippe Renard	, Rapporteur
Mme	Sophie Violette	, Rapporteur
M.	Séverin Pistre	, Directeur de Thèse
Mme	Nathalie Dörfliger	, Encadrante scientifique
M.	Christian Leduc	, Examinateur
Mme	Nabila Mazouni	, Examinateur

Avant-propos

"*La gestion de l'eau, en qualité comme en quantité, est une condition essentielle du développement durable de la région. Elle implique de tenir compte des différents écosystèmes depuis le sol des bassins versants jusqu'à la mer en passant par les aquifères, les lacs, les rivières et les lagunes littorales. Elle nécessite également d'agir à la fois sur l'aménagement des milieux et le comportement des usagers*" [Action inscrite dans la mesure IX.4 "Eau et environnement" du contrat Etat-Région 2000-2006 de la région Languedoc-Roussillon].

Le littoral du Languedoc-Roussillon, fruit d'un subtil équilibre entre les apports de la terre et ceux de la mer, est fragile et vulnérable. Il a subi d'importantes mutations au cours des trente dernières années, liées à une fréquentation touristique massive durant la saison estivale, mais aussi à l'expansion démographique dans les agglomérations du littoral de la région. L'accroissement de la population, tant permanente que saisonnière, ainsi que la multiplication des modes d'utilisation du littoral génèrent de nombreux conflits, dont ceux relatifs à l'utilisation de l'eau. L'ignorance du besoin des autres, l'absence de sensibilisation des populations nouvelles ou saisonnières à la vulnérabilité des milieux littoraux, rendent particulièrement difficile la résolution de ces conflits. De plus, le développement durable de la région et la qualité de vie de ses habitants dépend de la préservation des équilibres naturels. Il est donc nécessaire d'engager des actions destinées à favoriser la mise en œuvre de plans de gestion intégrée des ressources littorales, dont celles des ressources en eaux souterraines afin de proposer des solutions aux conflits d'usage de l'eau, présents et futurs. Ces plans doivent prendre en considération la connaissance scientifique et technique des conditions environnementales, du développement économique et social présent et à venir, et s'appuyer sur la conception d'outils de modélisation et d'aide à la décision pour la gestion des milieux.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du programme "SYStèmes CÔtiers et LAGunaires" (SysCoLag) de la région Languedoc-Roussillon, intégrée au contrat Etat-Région 2000-2006.

Ce programme de recherche appliquée, fédérateur et pluridisciplinaire, est au service d'une mutualisation des connaissances et des savoirs. Il a comme perspective l'élaboration d'un "**Observatoire régional du littoral**".

Les objectifs principaux du programme Syscolag visent à :

- **mobiliser et mutualiser** prioritairement les connaissances disponibles ;
- favoriser une approche **interdisciplinaire** et intégrée ;
- proposer des **indicateurs** pertinents de suivi des milieux et des usages ;
- construire des **outils scientifiques d'aide à la décision**.

La **réalisation** du programme se traduit par :

- un soutien financier à des projets de recherche, répondant aux objectifs du programme et faisant l'objet de **thèses de doctorat** ;
- le développement d'une **base de connaissances** communes par l'ensemble des partenaires du programme, sous la responsabilité de l'Ifremer.

Pour atteindre ces objectifs, le programme est composé de deux volets complémentaires et indissociables :

- **volet opérationnel** : définition d'outils d'aide à la gestion, élaboration d'un accès à l'information, mise en place d'une plate-forme d'experts pouvant alimenter les forums de discussion autour de la définition des politiques publiques (Plan de développement durable du littoral, contrats d'étang, etc…) ;
- **volet recherche** : élaboration de nouveaux concepts, travail de recherche propre à chaque thèse.

Le fonctionnement du programme Syscolag est organisé à partir d'un comité de pilotage (co-présidence Ifremer – Région Languedoc-Roussillon), d'un comité de coordination scientifique (coordination Cépralmar), l'animation du programme étant assurée par le Cépralmar.

Remerciements

Au terme de ce travail de recherche, il m'est agréable de remercier :

La région Languedoc-Roussillon et le BRGM (projet EAUR15 COMPLEX'AQUI) pour le soutien financier apporté.

Monsieur Séverin PISTRE du laboratoire Hydrosciences de l'Université de Montpellier II, pour avoir suivi la direction de cette thèse, pour ses conseils et nos échanges sur des thématiques variées.

Madame Nathalie DÖRFLIGER pour l'encadrement de cette thèse, mais aussi pour la confiance accordée depuis mon premier stage au BRGM. Sa contribution tout au long de ma formation, depuis Cergy-Pontoise, en passant par Neuchâtel, aura été remarquable.

Les membres du jury : Mesdames Nabila MAZOUNI et Sophie VIOLETTE, ainsi que Messieurs Christian LEDUC et Philippe RENARD pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail de thèse.

Les personnes qui ont contribué à l'acquisition de données : Monsieur Alain CHAPITEAU de la société HYDRO-ASSISTANCE, Monsieur Hervé PLANEILLES de la société GAEA, le Conseil Général des Pyrénées-Orientales, représenté par Madame Martine ASSENS, Monsieur Jean-Luc SEIDEL du laboratoire Hydrosciences pour ses analyses chimiques.

L'ensemble de l'équipe du BRGM Montpellier et plus particulièrement Jean-Pierre MARCHAL pour sa disponibilité et sa prodigieuse connaissance du Roussillon ; Vincent PETIT pour son intérêt et son soutien marqué tout au long de ce travail de recherche ; Patrick LACHASSAGNE pour avoir régulièrement souligné les points "sensibles" ; Bernard LADOUCHE pour sa contribution à l'interprétation des analyses chimiques ; Paul LE STRAT pour sa disponibilité et les réponses apportées à mes états d'âme ; Jean-Daniel RINAUDO, ainsi que Marielle MONTGINOUL du CEMAGREF, pour m'avoir sensibilisé à la socio-économie. Je n'oublierai pas non plus les souvenirs des moments sympathiques passés avec Bastien COLAS, Jean-Louis IZAC, Nathalie COURTOIS, Nina GRAVELINE, Stéphanie AULONG et Laure MATON.

La communauté des doctorants SysCoLag : François, Marion, Christelle, Sébastien, Céline, Franck, Gaston, Cédric, Joachim et Julien pour les instants partagés lors des séminaires officiels et officieux.

Mes amis doctorants Vincent et Sébastien, pour leurs opinions sur la modélisation et sur la géologie. Special thanks to my friend faisal for sharing kebab and office space for one year. Je pense aussi à mes autres amis, ceux sur qui j'ai toujours pu compter pour le dépaysement et la détente… Benja, Caro, Stan, Céline, Ravio, Marilyne, Tchoun, Nadège, Micha, Aurélie, Laurent, Saumon, Momo, Cyssou, Davy, Manu, Chaitane, Mat'Duv, Mat'Chaill et tout ceux que j'ai oubliés !

Enfin, merci à ma famille et surtout à mon père pour sa persévérance dans la relecture du manuscrit. Merci Caroline pour ta présence.

"Ce qui est simple est toujours faux ; ce qui ne l'est pas est inutilisable" - Paul Valéry

Nomenclature - Liste des abréviations

AEP	**A**limentation en **E**au **P**otable
AERMC	**A**gence de l'**E**au **R**hône-**M**éditerranée et **C**orse
BD	**B**ase de **D**onnées
BSS	**B**anque de données du **S**ous-**S**ol
CDA66	**C**hambre **d'A**griculture 66 - Roussillon
IFP	Institut Français du Pétrole
IEDS	**I**nterface **E**au **D**ouce / eau **S**alée (représente une limite nette théorique où la proportion d'eau douce est égale à celle en eau salée)
Ma	**M**illions d'**a**nnées
Mm^3	**M**illions de **m**ètres cube
NGF	**N**ivellement **G**énéral de la **F**rance (altitude par rapport au repère fondamental, constitué par un rivet scellé dans le bâtiment abritant le marégraphe totalisateur, à Marseille, Anse Calvo)
PC	**P**liocène **C**ontinental
PMA	**P**liocène **M**arin **A**rgileux
PMS	**P**liocène **M**arin **S**ableux
SIG	**S**ystème d'**I**nformation **G**éographique
STEP	**ST**ation d'**EP**uration
ZTEDS	**Z**one de **T**ransition entre **E**au **D**ouce et eau **S**alée

Nomenclature - Liste des symboles scientifiques

H	Charge hydraulique	[L]	(m)
Q	Débit	[L^3/T]	(m^3/s ou m^3/h)
Q_r	Débit spécifique radial	[L^2/T /L]	(m^3/h /m de crépine)
K	Perméabilité	[L/T]	(m/s)
k	Perméabilité intrinsèque	[L^2]	(m^2)
T	Transmissivité	[L^2/T]	(m^2/s)
q	Vitesse cinématique, vitesse de Darcy	[L/T]	(m/s)
v_x	Vitesse linéaire moyenne	[L/T]	(m/s)
	/ vitesse microscopique en milieu poreux		
n_e	Porosité effective, porosité cinématique	[-]	
n	Porosité totale	[-]	
S	Emmagasinement	[-]	
α_L	Dispersion longitudinale	[L]	(m)
α_T	Dispersion transverse	[L]	(m)
D_m	Diffusion moléculaire	[L^2/T]	(m^2/s)
ρ	Masse volumique	[M/L^3]	(kg/m^3)
μ	Moyenne		
σ	Ecart-type		

Information relative à la lecture du document

La localisation géographique des communes de la plaine du Roussillon est présentée en annexe 2.

Le pas de la grille utilisée à titre d'échelle sur l'ensemble des cartes du présent document et des annexes est de 10 kilomètres.

Les encadrés en fin de chapitre permettent de résumer les points importants du chapitre.

La terminologie géologique est présentée sur la figure 19 (p. 79). Cette terminologie sera utile au lecteur afin de différencier les désignations des unités sédimentologiques.

Les équivalences entre les différentes dénominations des aquifères et des nappes de la plaine du Roussillon sont présentées sur le tableau 10 (p. 138).

Table des matières

Préambule **17**

Introduction générale **19**

1. Présentation du sujet de recherche *19*

2. Problématiques du sujet de recherche *22*

3. Plan de la thèse *23*

Partie I Connaissance géologique et hydrogéologique de la plaine du Roussillon **25**

Chapitre I Contexte général de la plaine du Roussillon *26*

1. Géographie 26
2. Hydrologie 28
3. Climatologie 29
4. Démographie 31
5. Economie 32

Chapitre II Contexte hydrogéologique des aquifères du Roussillon *34*

1. Esquisse de la géologie de la plaine du Roussillon 34
2. Esquisse de l'hydrogéologie de la plaine du Roussillon 38
3. Exploitation des ressources en eau souterraine de la plaine du Roussillon : une croissance constante… 40

Chapitre III Description du modèle conceptuel géologique *52*

1. Une démarche géologique originale 52
2. Les unités sédimentologiques du bassin du Roussillon 67

Chapitre IV Formulation du modèle géologique haute-résolution sous forme d'une base de données *76*

1. La base de données géologiques 77
2. Répartition spatiale des unités sédimentologiques 82

Partie II Du modèle conceptuel géologique d'un bassin sédimentaire à l'hydrogéologie des aquifères littoraux **97**

Chapitre I Rapprochement de la stratigraphie séquentielle et des données de forages *98*

1. Analyse de la distribution verticale des crépines des forages d'eau 99
2. La base de données hydrodynamiques : synthèse des investigations des bureaux d'études 111
3. Ajout d'informations complémentaires à la base de données hydrodynamiques 126
4. Synthèse des relations entre stratigraphie séquentielle et hydrogéologie 131

Chapitre II Analyse fonctionnelle des aquifères de la plaine du Roussillon *140*

1. Description des données disponibles 141
2. Caractéristiques qualitatives des chroniques piézométriques 144
3. Approche fonctionnelle descriptive du système aquifère de la plaine du Roussillon par traitement du signal 148
4. Analyse du fonctionnement hydrogéologique de la plaine du Roussillon par approche de modélisation non-déterministe 155

Chapitre III Qualité des eaux de la plaine du Roussillon *160*

1. Suivi annuel des concentrations en chlorures des aquifères pliocènes 161
2. Minéralisation de l'aquifère de subsurface 166
3. Distribution hétérogène de la salinité 170

Chapitre IV Contribution des études hydrochimiques *174*

1. Démarche adoptée 175
2. Classification des résultats 178

Chapitre V Contribution des études géophysiques *194*
1. Méthodologie d'étude 194
2. Investigation géophysique de terrain 195
Chapitre VI Synthèse des données hydrogéologiques *206*
1. Géologie et hydrogéologie de la zone littorale du Roussillon 206
2. Conceptualisation de la problématique d'intrusion saline 212
3. Indicateur de risque de salinisation des aquifères profonds 214
Partie III Modèle conceptuel et numérique du Roussillon 219
Chapitre I Le modèle conceptuel hydrogéologique du Roussillon *220*
1. De la stratigraphie séquentielle à l'hydrodynamique des aquifères littoraux 220
2. Données complémentaires 222
3. Modèle conceptuel hydrogéologique 224
Chapitre II Modélisation et quantification hydrogéologique *228*
1. Solutions analytiques et simulations numériques 228
2. Détermination des paramètres de la dispersion 229
3. Evaluation de l'indicateur de progression de l'interface eau douce / eau salée 233
4. Dispersion et perméabilité 236
5. Modélisation appliquées au Roussillon 238
Conclusion générale : Synthèse des connaissances sur la gestion des aquifères côtiers et sur l'application à la plaine du Roussillon 243
1. Rappel de la problématique d'étude *244*
2. Apport du travail de recherche sur les transferts de connaissances entre recherches géologiques et hydrogéologiques *246*
3. Synthèse hydrogéologique de la plaine du Roussillon *248*
4. Apport du travail de recherche sur la connaissance des aquifères côtiers *252*

Table des illustrations

Figure introductive - Organigramme du triptyque de recherche sur la gestion optimisée de la ressource en eau souterraine……..…….……20

Figure 1 - Aperçu topographique, localisation des villes (population > 5000 habitants) et stations balnéaires de la plaine du Roussillon 27

Figure 2 - Débits journaliers, mesurés et reconstitués de l'Agly, de la Têt et du Tech 28

Figure 3 - Moyennes maximum et minimum mensuelles de températures et de précipitations à Perpignan-Rivesaltes sur la période 1971-2005 29

Figure 4 - Matrice de corrélation des données pluviométriques et localisation des pluviomètres testés 30

Figure 5 - Croissance de la population[1] et flux migratoires estivaux dans quelques communes littorales[2] 31

Figure 6 - Occupation du sol de la plaine du Roussillon 32

Figure 7 - Le bassin du Roussillon d'après un extrait de la carte géologique de la France à 1/1 000 000 36

Figure 8 - Coupes schématiques interprétatives 39

Figure 9 - Répartition des prélèvements dans les aquifères pliocènes en fonction des usages 41

Figure 10 - Corrélation entre croissance démographique et volumes d'eau souterraine, prélevés à usage d'AEP entre 1975 et 1999 43

Figure 11 -Evolution des prélèvements à usage d'AEP dans l'aquifère plio-quaternaire entre 1975 et 2004 43

Figure 12 - Estimation des volumes annuels prélevés par secteur agricole irrigué 44

Figure 13 - Corrélation entre prélèvements, pluviométrie et piézométrie sur la zone Têt amont 46

Figure 14 - Variation des prélèvements mensuelles autour d'une constante, dans les communes du Barcarès et de Claira 48

Figure 15 - Répartition trimestrielle des prélèvements par commune sur des cycles variant de 3 à 6 ans 49

Figure 16 - Coupe géologique illustrant le schéma conceptuel de la plaine du Roussillon 68

Figure 17 - Concepts de corrélation géologique 75

Figure 18 - Copie d'écran de la base de données géologiques 78

Figure 19 - Structure et contenu de la base de données géologiques 79

Figure 20 - Carte du toit de l'unité sédimentologique de l'Holocène continental 83

Figure 21 - Limite d'extension des prismes marins quaternaires 84

Figure 22 - Cote du toit et épaisseur du Pliocène continental 85

Figure 23 - Toit de l'ensemble des prismes sableux pliocènes 86

Figure 24 - Répartition des faciès en fonction de l'unité sédimentologique 88

Figure 25 - Synthèse des zones de lithologie remarquable 90

Figure 26 - Lithologie du Pliocène continental 93

Figure 27 - Diagrammes en bâtons et diagrammes en secteurs des effectifs des unités sédimentologiques exploitées regroupées par dynamique sédimentaire..... 109
Figure 28 - Exemple d'interprétation de diagraphies de production..... 114
Figure 29 - Répartition géographique des unités à dynamique sédimentaire commune, reconnues pour leur productivité à partir de diagraphies de production 117
Figure 30 - Transmissivité et paléogéographie de la plaine du Roussillon 120
Figure 31 - Distribution des transmissivités et des unités sédimentologiques 123
Figure 32 - Distribution des transmissivités et des unités sédimentologiques regroupés par dynamique sédimentaire commune 125
Figure 33 - Histogramme des distributions des transmissivité obtenues par pompage et estimées par (T≈1/B) 130
Figure 34 - Corrélation entre transmissivité calculée par essai de pompage et transmissivité estimée 130
Figure 35 - Quelques exemples de spatialisation de l'hétérogénéité 134
Figure 36 - Localisation géographique des piézomètres de la plaine du Roussillon et de la Plateforme d'Observation de l'Environnement Méditerranée (POEM) 142
Figure 37 - Charge hydraulique de l'aquifère 146 et précipitations 144
Figure 38 - Evolution décroissante de la charge hydraulique de l'aquifère 225 sur le long terme..... 146
Figure 39 - Evolution des maximas annuels de charge 146
Figure 40 - Evolution de la charge hydraulique de l'aquifère 225 (Pliocène continental) sur le court terme 147
Figure 41 - Exemples d'analyses corrélatoires simples (autocorrélogramme) 150
Figure 42 - Exemples d'analyses corrélatoires croisées entre charge hydraulique et pluviométrie..... 151
Figure 43 - Détermination de l'influence de la mer 153
Figure 44 - Localisation géographiques des piézomètres dont la charge est influencée par les variations du niveau marin 153
Figure 45 - Variations de charges hydrauliques de la nappe 3 et de la nappe 4 sur le site du Barcarès - plage..... 156
Figure 46 - Corrélogrammes croisés des variations de charge hydraulique de la nappe 3 et la nappe 4 157
Figure 47 - Résultat de modélisation non-déterministe..... 158
Figure 48 - Concentration en chlorures des aquifères côtiers de la plaine du Roussillon 163
Figure 49 - Evolution annuelle de la concentration en chlorures dans quelques secteurs littoraux de la plaine du Roussillon..... 164
Figure 50 - Concentration des eaux en chlorures en fonction de la conductivité électrique 167
Figure 51 - Carte des conductivités électriques des points d'eau littoraux..... 169
Figure 52 - Carte des sources potentielles de salinité..... 171
Figure 53 - Schéma simple de salinisation des rivières littorales..... 171
Figure 54 - Localisation des échantillons d'eau prélevés en vue d'analyses chimiques 176
Figure 55 - Diagramme de Piper des eaux échantillonnées..... 180
Figure 56 - Matrice de diagrammes de Schöeller-Berkaloff des eaux échantillonnées 181

Figure 57 - Classification ascendante hiérarchique des résultats d'analyses chimiques 183
Figure 58 - Diagrammes binaires des analyses chimiques (1/3) 189
Figure 59 - Diagrammes binaires des analyses chimiques (2/3) 190
Figure 60 - Diagrammes binaires des analyses chimiques (3/3) 191
Figure 61 - Synthèse schématique des interprétations hydrochimique 192
Figure 62 - Localisation des trois profils géophysiques 195
Figure 63 - Coupe sédimentologique du forage 10972X0062 localisé à proximité du profil 1 198
Figure 64 - Fiche descriptive du profil 1 : LAR - Mas Larrieu 199
Figure 65 - Coupe sédimentologique du forage 10916X0066 localisé à proximité du profil 2 200
Figure 66 - Fiche descriptive du profil 2 : MAR Sainte-Marie 201
Figure 67 - Coupes sédimentologiques des forages 10912X0054 et 10912X0057 localisés à proximité du profil 3 202
Figure 68 - Fiche descriptive du profil 3 : TOR - Torreilles 203
Figure 69 - Géologie et hydrogéologie de la zone littorale du Roussillon avant exploitation des ressources en eau souterraine 209
Figure 70 - Géologie et hydrogéologie de la zone littorale du Roussillon après le début de l'exploitation des ressources en eau souterraine 211
Figure 71 - Problématique de l'intrusion saline au sein d'aquifères captifs profonds 213
Figure 72 - Nombre de jours par année où la charge est inférieure à zéro mètre NGF 216
Figure 73 - Indicateur de risque de salinisation des aquifères profonds 216
Figure 74 - Détermination des aquifères et aquitards sur le modèle génétique de la plaine du Roussillon 221
Figure 75 - Morphologie de la plateforme du Golfe du Lion 222
Figure 76 - Epaisseur des prismes quaternaires marins argileux [Labaune, 2005] 223
Figure 77 - Localisation de la coupe hydrogéologique dans le contexte du Golfe du Lion (trait noir continu) 224
Figure 78 - Coupe hydrogéologique interprétative des écoulements au sein de la plaine du Roussillon 225
Figure 79 - Régimes de transport de solutés en fonction du nombre de Péclet [Pfankuch, 1963] 232
Figure 80 - Schéma du modèle d'évaluation de l'indicateur de progression de l'IEDS 234
Figure 81 - Progression de l'IEDS par augmentation de la concentration observée au cours de dix années de simulation 235
Figure 82 - Flux dispersifs et flux densitaires 237
Figure 83 - Modèle de la coupe hydrogéologique du Roussillon 239
Figure 84 - Flux modélisés dans la zone littorale 240
Figure 85 - Schéma de la méthodologie d'étude 245

Préambule

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses zones littorales de l'Europe méditerranéenne ont subi des transformations socio-économiques et démographiques aussi importantes que rapides, qui se sont traduites par des pressions très importantes sur l'environnement, et en particulier sur les ressources en eau. L'eau constitue un enjeu du développement économique ; celui-ci est principalement fondé sur les ressources naturelles. Ainsi l'eau assure l'essor de l'agriculture tandis que l'espace littoral favorise le tourisme[1]. Dans la région méditerranéenne, les pressions environnementales sont principalement imputables à l'agriculture et au tourisme, l'industrie étant relativement peu développée et localisée dans quelques grands centres urbains. L'agriculture a été profondément transformée par la première phase d'élargissement de l'Europe des années 1980 : des pays comme l'Espagne et la Grèce ont ainsi vu se développer une agriculture intensive, orientée vers le maraîchage et l'arboriculture et rendue très compétitive, du fait du faible coût de la main d'œuvre. Le financement européen de nouvelles infrastructures de transport, permettant l'écoulement rapide des produits maraîchers vers l'Europe du Nord, a accentué ce développement agricole qui s'est poursuivi jusque dans les années 1990.

En parallèle, l'augmentation du pouvoir d'achat de la population européenne a conduit à un développement fulgurant des activités touristiques dans ces mêmes zones littorales, notamment dans les années 1970 et 1980, avant de connaître un ralentissement au cours des années 1990. Depuis, les zones littorales méditerranéennes sont caractérisées par des taux de croissance démographique très importants, dus à l'arrivée massive de populations provenant de régions ou pays du Nord de l'Europe et s'y installant de manière permanente. Ces flux migratoires bouleversent la structure du tissu social, générant occasionnellement des conflits de valeurs entre populations locales et nouveaux arrivants. Ils modifient également le tissu économique, en particulier avec le développement d'une économie reposant fortement sur la production de services de proximité. Enfin, ils génèrent de nouveaux problèmes environnementaux, liés à la forte consommation d'espace des nouveaux arrivants, à l'augmentation des sources de pollution des sols et de l'eau, et surtout, à l'accroissement des prélèvements d'eau. Dans les pays du pourtour méditerranéen, les ressources en eau sont limitées et inégalement réparties dans l'espace et dans le temps.

[1] L'eau et le littoral constituent deux des six thèmes prioritaires pour le développement durable abordés par le Plan Bleu [2005].

Ainsi, les pays méditerranéens rassemblent 7% de la population mondiale mais seulement 3% des ressources en eau et plus de la moitié de la population "pauvre" en eau de la planète, c'est-à-dire disposant de moins de 1 000 m^3 de ressources naturelles renouvelables en eau par habitant et par an [Plan Bleu, 2005]. De plus, dans la plupart des régions côtières méditerranéennes, l'approvisionnement en eau de la population et des activités économiques dépend fortement des ressources en eau souterraine. En l'absence de mécanisme de régulation des prélèvements, ces ressources ont souvent été utilisées au-delà de leur capacité de renouvellement. Les prélèvements étant largement supérieurs à la recharge naturelle, les niveaux piézométriques ont chuté, quelquefois de plusieurs dizaines de mètres, entraînant parfois des intrusions d'eau de mer dans les aquifères côtiers. Si le biseau salé peut localement être un phénomène d'origine naturelle, il est largement amplifié par l'anthropisme : implantation inadéquate de forages, surexploitation locale des nappes ou forages défectueux mettant en contact de manière inopportune différents niveaux aquifères, dont les plus superficiels peuvent être contaminés par l'intrusion d'eau de mer.

En l'absence de stratégie globale de gestion de ces aquifères côtiers, souvent par manque d'information et de moyens de contrôle sur les prélèvements, on a régulièrement assisté à une "fuite en avant" : les captages contaminés par l'intrusion d'eau de mer sont abandonnés et remplacés par de nouveaux ouvrages prélevant dans la même ressource mais situés plus à l'intérieur des terres. La surexploitation persiste, le biseau salé continue de progresser, générant une dégradation difficilement réversible des aquifères.

Dans les situations les plus critiques, le recours au dessalement d'eau saumâtre devient une nécessité, au moins pour faire face aux pics de demande en période estivale (*eg* : zones côtières d'Espagne ou des îles telles que Malte, Chypre, les Canaries, etc.). Au total, 238 usines de dessalement (d'une capacité de production supérieure à 500 m^3/jour) ont été décomptées en 2000 sur le littoral [UNEP/MAP/MEDPOL, 2001].

Depuis la promulgation de la Directive Cadre sur l'Eau [2000/60/CE], une telle fuite en avant n'est plus possible. En effet, les Etats Membres doivent impérativement mettre en œuvre les mesures nécessaires pour préserver le bon état quantitatif et chimique des eaux souterraines (obligation de résultat) et, dans le cas des aquifères côtiers en particulier, éviter tout risque d'intrusion d'eau de mer. Cet objectif, qui doit être atteint à l'horizon 2015, représente un véritable défi pour trois raisons principales : tout d'abord, parce que la pression quantitative exercée sur les aquifères côtiers se maintient, notamment du fait de la croissance démographique et de la poursuite de l'activité agricole ; ensuite, parce que le cadre réglementaire, en vigueur dans la plupart des pays est insuffisant pour permettre une régulation efficace des prélèvements en eau ; enfin, parce que la connaissance des processus hydrogéologiques en jeu reste très insuffisante.

Introduction générale

1. Présentation du sujet de recherche

Lieu de développement économique et démographique intense, les zones côtières constituent des environnements fragiles à de nombreux égards. Dans le cadre de ce travail de thèse, le paramètre "sensible" concerne **les ressources en eau souterraine** dans les domaines littoraux. Partout où l'eau souterraine est la principale ressource en eau, elle est couramment surexploitée : on constate des baisses des niveaux des nappes, entraînant parfois des intrusions d'eau de mer. En effet, si le biseau salé est un phénomène d'origine naturelle, il est largement amplifié par l'activité anthropique : mauvaise implantation de forages, surexploitation locale des nappes, forages défectueux…

Les aquifères côtiers poreux prennent généralement place au sein de sédiments, dont la géométrie complexe résulte de la mise en place et de l'évolution géodynamique de la marge au cours des âges géologiques. L'hétérogénéité géométrique des aquifères et la présence de fluides de densités différentes rendent complexes les écoulements souterrains en zone littorale. Ceux-ci contraignent les gestionnaires des ressources en eau à l'élaboration de simulations numériques. Si la thématique de modélisation des aquifères côtiers a bien été décrite et a bénéficié des résultats de recherches scientifiques au cours des 50 dernières années [Bear *et al*., 1999], une des problématiques majeures reste la **connaissance de la géométrie des aquifères**. L'organisation interne des aquifères exploités, leurs interactions et leurs conditions aux limites sont couramment le résultat d'approximations dues à la méconnaissance géologique ou à une simplification de la géométrie effectuée par les hydrogéologues (conceptualisation).

Face à des modèles hydrogéologiques ne répondant pas à toutes les questions des gestionnaires ou ne prenant pas en compte toutes les contraintes, dont celles imposées par la géométrie des aquifères, le renforcement des connaissances hydrogéologiques (structure et fonctionnement hydrodynamique des aquifères) est apparu comme essentiel aux yeux des gestionnaires des ressources en eau. De plus, le projet SysCoLag, programme de recherche fédérateur de la Région Languedoc-Roussillon (CPER[1] 2000-2006) a pour objectif général de développer des outils pour la gestion durable de l'environnement du littoral. Ce programme s'intéresse plus particulièrement à l'élaboration d'outils de gestion de la ressource en eau souterraine pour l'alimentation en eau potable dans la zone littorale. Pour répondre à cet objectif, trois sujets de thèses de doctorat ont été proposés dans une démarche pluridisciplinaire, associant géologie, hydrogéologie et socio-économie de l'eau.

[1] Contrat Plan Etat-Région

La présente thèse axée sur l'hydrogéologie des aquifères côtiers repose en partie sur la connaissance géologique fine [thèse de Cédric Duvail, à paraître], élaborée à partir des méthodes de stratigraphie séquentielle. De même, certains des concepts développés dans le présent document, concernant notamment des scénarios de gestion de la ressource en eau, seront valorisés dans le domaine de l'économie [thèse de Gaston Giordana, à paraître].

Afin de renforcer les interactions pluridisciplinaires entre les trois travaux de recherche, un cas d'étude commun a été choisi. Localisée sur le littoral des Pyrénées-Orientales, la **plaine du Roussillon** symbolise une problématique locale intéressante dans les domaines de la géologie, de l'hydrogéologie et de l'économie. De plus, bien que régional, ce cas d'étude s'établit comme représentatif des problématiques du pourtour méditerranéen, où collectivités locales, agriculteurs et particuliers "partagent" une ressource en eau commune, fragile et de plus en plus régulièrement contaminée par des intrusions salines.

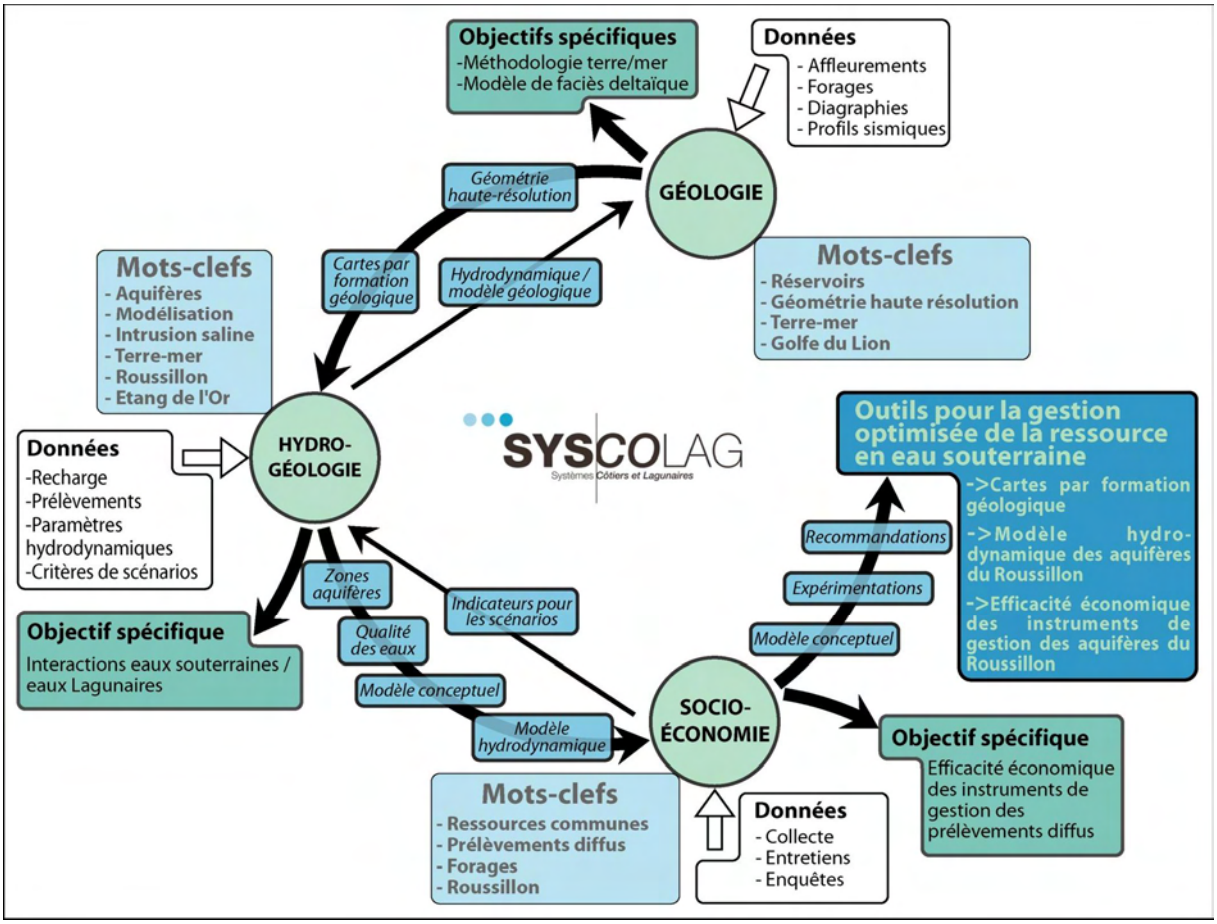


Figure introductive - Organigramme du triptyque de recherche sur la gestion optimisée de la ressource en eau souterraine
[Modifiée en fonction des résultats actuels]

Les notes et publications suivantes, présentées en annexe, ont été rédigées afin de communiquer sur l'approche pluridisciplinaire du travail de recherche.

> **Les défis pour une gestion durable de l'eau des aquifères côtiers. Application au bassin du Roussillon.** Aunay B., Duvail C., Giordana G., Dörfliger N., Le Strat P., Montginoul M. & Rinaudo J.-D. Accepté pour publication dans *La Documentation Française,* à la suite du "Colloque Prospective Littoral", Paris, 1-2 mars 2005.

> **A multidisciplinary approach for assessing the risk of seawater intrusion in coastal aquifers: the case of the Roussillon Basin (France).** Aunay B., Dörfliger N., Duvail C., Grelot F., Le Strat P., Montginoul M. & Rinaudo J.-D. Aquifer Systems Management: Darcy's legacy in a world of impending water shortage (Chery L. and de Marsily G. *eds*). Selected papers from the international meeting of the International Association of Hydrogeologist, Dijon, France, 30 May-1 June 2006. AA. Balkema publishers.

> A **pluridisciplinary methodology for integrated management of a coastal aquifer. Geological, hydrogeological and economic studies of the Roussillon aquifer (Pyrénées-Orientales, France)**. Aunay B., Duvail C., Giordana G., Dorfliger N., Le Strat P., Montginoul M. & Pistre S. *Life and Environment - Vie et Milieu*. 56 (4), pp. 275-285, 2006.

2. Problématiques du sujet de recherche

Compte tenu du cadre dans lequel s'inscrit cette thèse et notamment de son impact attendu en termes de gestion du littoral régional, les problématiques abordées au cours du travail de recherche s'organisent selon deux axes complémentaires : recherche scientifique et recherche appliquée.

Recherche scientifique

Les relations entre géologie et hydrogéologie constituent la problématique principale du présent travail de recherche. En effet, il sera démontré que la **conversion d'un modèle sédimentologique** en un modèle conceptuel hydrogéologique n'est pas une action simple et rapide. Abordées dans certaines études pétrolières, les limites d'unités définies par les méthodes sédimentologiques ne s'avèrent pas coïncider avec les entités définissant les écoulements des fluides. En conséquence, il apparaît nécessaire de bâtir une méthodologie pertinente afin de mettre en évidence les démarches de transfert d'une information géologique complexe vers la gestion des ressources en eau sur le littoral.

Ce transfert de connaissances du domaine géologique vers le domaine hydrogéologique est complexe en raison de la localisation des ressources en eau au sein d'unités sédimentologiques variées. Les aquifères s'organisent dans un milieu poreux, mais complexe, caractérisé par une hétérogénéité favorisant les interactions entre unités hydrogéologiques. Cependant, cette hétérogénéité est plus ou moins accentuée en fonction des échelles d'observation (temporelle ou géographique). L'**évaluation de l'apport de la connaissance géologique** en fonction de l'échelle d'observation constitue ainsi une autre problématique développée dans le présent travail de recherche.

La quantification de l'apport de la connaissance géologique sera abordée selon deux types de modélisation : (i) des **simulations numériques déterministes** visant à isoler l'influence des différents facteurs influençant la position de la zone de transition entre eau douce et eau salée (ZTEDS), (ii) du **traitement du signal** couplé à des modélisations de séries temporelles afin de déterminer les relations internes à un aquifère complexe.

Ces modélisations ont été menées en maximisant l'intégration du contexte naturel du terrain d'étude : un milieu poreux hétérogène constituant un aquifère multicouche où l'influence de fluides de densités différentes est marquée.

Par extension, le travail de recherche aura pour objectif une amélioration des connaissances générales des aquifères côtiers sur le pourtour méditerranéen afin de résoudre des difficultés de gestion de la ressource en eau.

Recherche appliquée

Dans le cadre du programme de recherche SysCoLag, l'objectif est de développer un outil de gestion de la ressource en eau, appliqué à un cas d'étude de la région Languedoc-Roussillon.

Bien qu'étudié, connu et modélisé par les hydrogéologues depuis presque 50 ans, l'**aquifère du Roussillon** laisse les gestionnaires des ressources en eau dans un état d'incertitude persistant. L'augmentation de la population, la variabilité climatique, la baisse des niveaux piézométriques, la vulnérabilité face aux pollutions diffuses constituent les fondements d'une question embarrassante : "Quel sera l'impact de l'augmentation des prélèvements dans l'aquifère du Roussillon, que cela soit d'un point de vue quantitatif, qualitatif ou temporel?" La réponse à cette question, principale préoccupation des gestionnaires de l'eau et des élus, ne peut se formuler simplement. Ainsi, de nombreuses étapes, constituant le premier volet purement hydrogéologique, sont nécessaires pour la construction d'arguments pertinents : (i) l'élaboration d'une base de données hydrogéologiques recensant l'ensemble des connaissances acquises, (ii) la confrontation de données de sédimentologie, de géophysique, de chimie, d'hydrodynamique à différentes échelles (forage, zone de captage, aquifère) et (iii) la compréhension des phénomènes à l'origine de l'augmentation de salinité dans certains aquifères (intrusion saline classique, drainance…).

Le second volet de recherche appliquée a étendu les sciences géologiques et hydrogéologiques à la dimension des sciences économiques et sociales. Diverses collaborations ont ainsi pu se développer au travers de l'économie expérimentale de laboratoire (régulation de la demande) et des enquêtes de terrain (gestion participative). Le contexte géologique, hydrogéologique et socio-économique de la plaine du Roussillon s'intègre aux propositions de gestion de la ressource en eau, avec notamment la simulation de scénarios d'exploitation de l'aquifère multicouches du Roussillon.

3. Plan de la thèse

Le présent manuscrit est divisé en trois parties. La première partie aborde le contexte général de la plaine du Roussillon afin de mettre en évidence la problématique de la gestion des ressources en eau au sein d'une région représentative des zones littorales méditerranéennes. Les études scientifiques antérieures au présent travail de recherche sont aussi présentées et comparées aux nouvelles connaissances acquises dans le cadre du projet Syscolag. Enfin, une présentation de la méthodologie employée dans le cadre de l'étude géologique et son organisation en base de données clôt la première partie.

La seconde partie traite plus spécifiquement de l'hydrogéologie de la plaine du Roussillon avec d'une part, une méthodologie originale d'évaluation des données de stratigraphie séquentielle, et d'autre part le couplage des données de géologie à divers outils issus de l'hydrogéologie opérationnelle, tels que le traitement du signal, l'hydrochimie ou la géophysique électrique… Les résultats interprétatifs de ces diverses méthodes sont synthétisés à la fin de la seconde partie.

Enfin, la conceptualisation des écoulements de la plaine du Roussillon est présentée en troisième partie. Les mécanismes de contamination des aquifères profonds par intrusion saline dans le domaine offshore sont appréhendés et modélisés afin de déterminer la vulnérabilité des ressources souterraines en eau du Roussillon.

Partie I

Connaissance géologique et hydrogéologique de la plaine du Roussillon

Cette partie a pour objectif de dresser un état de l'art des connaissances géologiques et hydrogéologiques de la plaine du Roussillon et de les intégrer à un contexte de zone côtière méditerranéenne. Le modèle conceptuel géologique, élaboré dans le cadre du triptyque axé sur les ressources en eau des zones littorales, est présenté sous la forme d'une base de données. Cette dernière constitue les "fondations" des travaux de recherche menés en hydrogéologie.

Chapitre I

Contexte général de la plaine du Roussillon

La plaine du Roussillon, siège d'écoulements souterrains au sein de plusieurs aquifères est un site qui a fait l'objet de nombreuses publications ou rapports, du contexte géologique, géographique à hydrologique [Got, 1965 ; Marchal *et al.*, 1976 ; Calvet, 1996 ; Chabart, 1996]. Les principales caractéristiques du point de vue géographique, hydrologique, climatique, démographique et économique sont résumées ci-après.

1. Géographie

Limitée naturellement par les reliefs de la terminaison orientale des Pyrénées et par la mer Méditerranée, la plaine du Roussillon se développe sur une superficie de 800 km^2 environ (figure 1, ci-dessous).

Le caractère côtier de cette plaine est marqué par des altitudes faibles en amont d'un cordon littoral d'une quarantaine de kilomètres de longueur : le quart des altitudes des terrains du Roussillon est inférieur à 10 mètres NGF. Ce littoral peu élevé abrite, à proximité des stations balnéaires, quelques zones humides préservées (Réserve naturelle du Mas Larrieu, étangs saumâtres de Canet ou de Salses-Leucate).

En s'éloignant du littoral, au Nord et au Sud d'un relief Est-Ouest débutant à Canet, le colmatage naturel et anthropique des étangs littoraux alterne avec les plaines d'inondation. Puis, dans la partie ouest, les plaines s'élèvent peu à peu (pente moyenne = 0.5%) vers les reliefs des Aspres, des Fenouillèdes et des Albères.

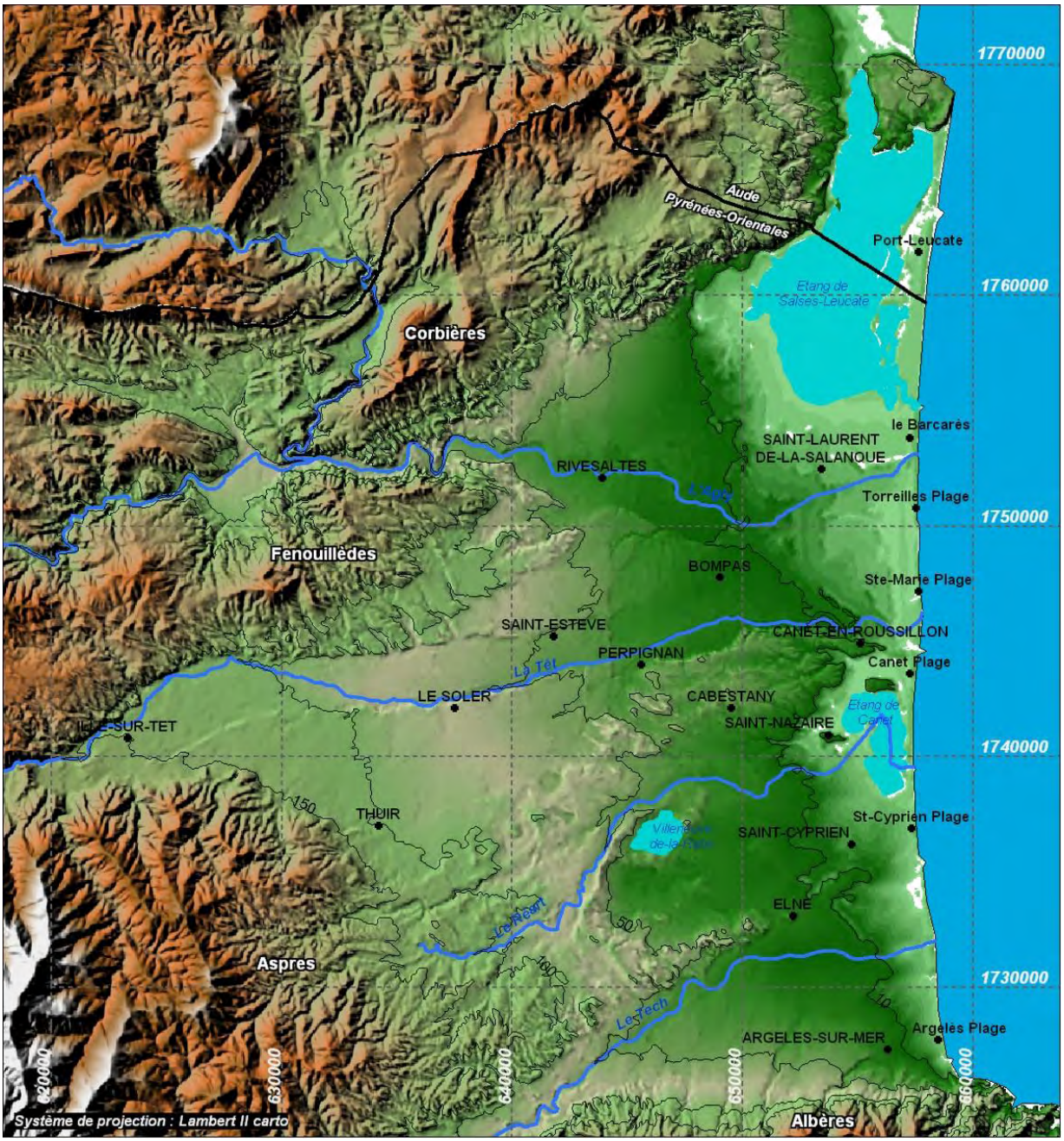


Figure 1 - Aperçu topographique, localisation des villes (population > 5000 habitants) et stations balnéaires de la plaine du Roussillon

2. Hydrologie

La plaine est traversée par quatre fleuves approchant une direction d'écoulement Ouest-Est (figure 1, ci-dessus) : du nord au sud,

- l'Agly (76 km) prend sa source dans le massif karstique des Corbières, le traverse en s'y perdant ponctuellement, puis rejoint la plaine de la Salanque. Son bassin versant couvre une superficie d'au moins 1000 km^2 ;
- la Têt (120 km) prend sa source au pied du Carlit, traverse le Conflent puis la plaine du Roussillon ; son bassin versant principalement constitué de roches métamorphiques couvre une superficie de 1 300 km^2 environ ;
- le Réart (36 km) prend sa source dans le massif des Aspres et présente un bassin versant de 160 km^2 ;
- le Tech (82 km) prend sa source dans le massif du Costabonne. Il présente la particularité de disposer du bassin versant le plus méridional de la France continentale. Il est principalement constitué de roches métamorphiques et couvre une superficie de 750 km^2 environ.

Ces fleuves côtiers présentent des écoulements pérennes (à l'exception du Réart) et sont caractérisés par des régimes proches de celui des oueds, tout en étant, pour la plupart, influencés par la fonte des neiges. Leur débit est souvent faible mais peut connaître des crues spectaculaires, par exemple, la Têt à Perpignan : 3 000 m³/s en 1940 (figure 2, ci-dessous).

Les réseaux de canaux d'irrigation agricoles contribuent également aux écoulements de surface. Le paragraphe traitant des usages de l'eau (Chapitre II - 3.2, p. 41) aborde ce thème.

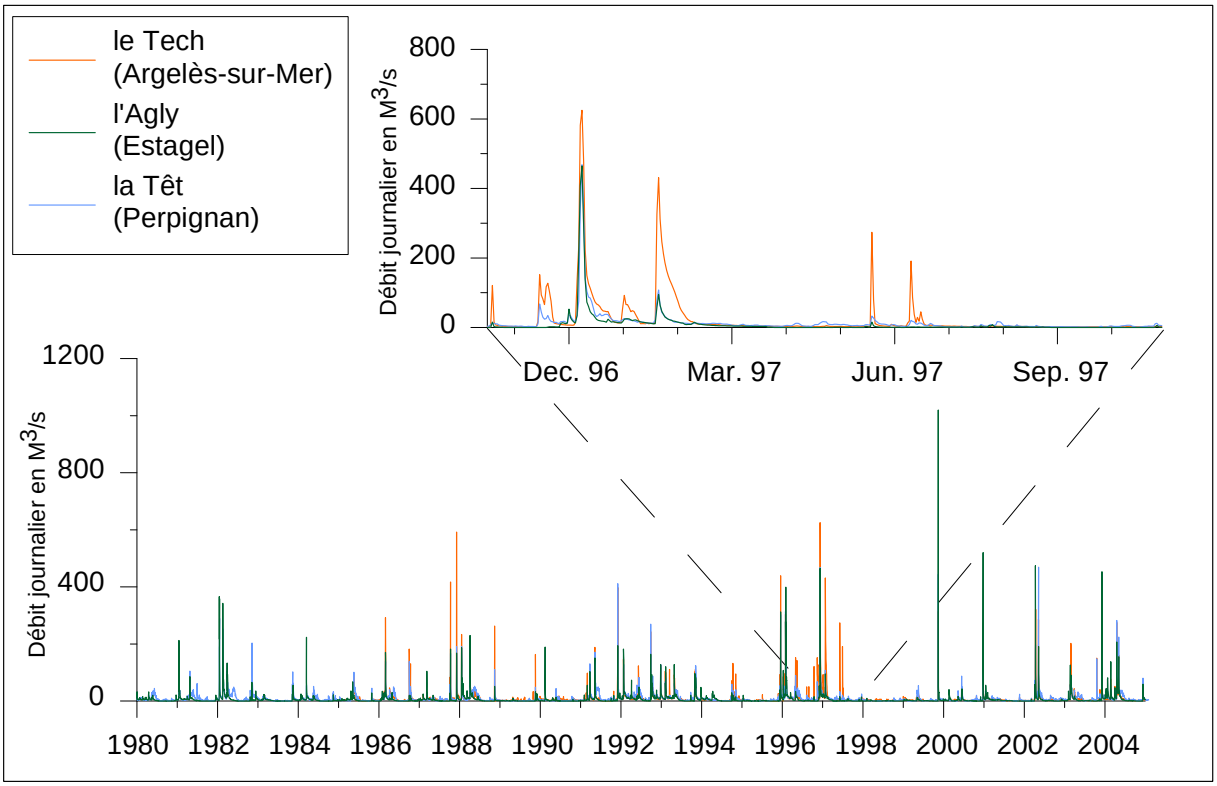


Figure 2 - Débits journaliers, mesurés et reconstitués de l'Agly, de la Têt et du Tech
[Banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie]

3. Climatologie

Le climat de la plaine du Roussillon est de type méditerranéen, à hivers doux et étés chauds durant lesquels se développe la saison sèche (3-4 mois d'après la figure 3, ci-dessous).

La moyenne des températures annuelles s'élève à 15.1°C tandis que la moyenne des précipitations est égale à 571 mm (station de Perpignan-Rivesaltes, période 1872-2003) [données Météo France]. Les précipitations moyennes augmentent en se rapprochant des reliefs (650 mm à Thuir et 850 mm vers Argelès-sur-Mer). Au niveau de la station de Perpignan-Rivesaltes, la température journalière dépasse 25°C environ 100 jours par an.

Le climat est aussi caractérisé par des précipitations se répartissant souvent en automne et en début de printemps de manière :

> épisodique et brève (90 jours de pluie par an sur Perpignan sachant que le nombre de jours secs consécutifs atteint régulièrement 25),

> parfois intense (en 1915 : 435 mm à Perpignan en 24h ; en 1986 : 386 mm à Torreilles et en 1999 : 280 mm à Canet-en-Roussillon),

> et très souvent irrégulière, que cela soit du point de vue temporel ou géographique.

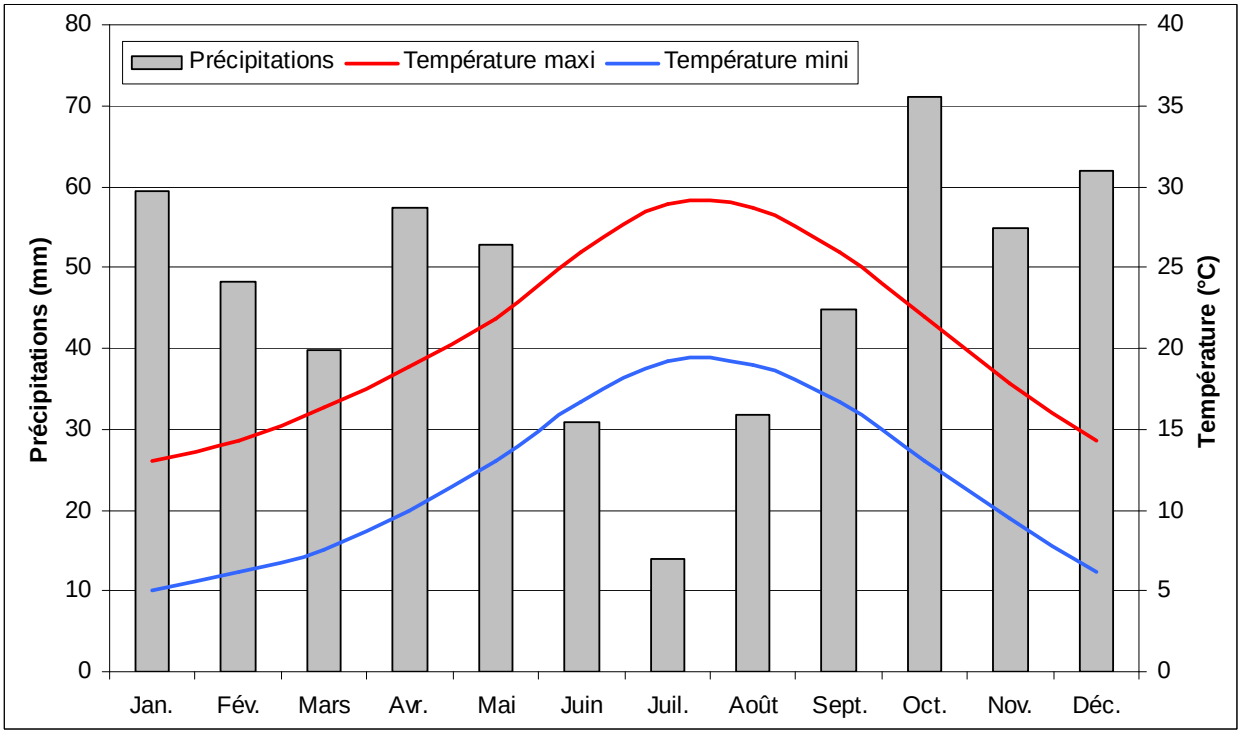


Figure 3 - Moyennes maximum et minimum mensuelles de températures et de précipitations à Perpignan-Rivesaltes sur la période 1971-2005
[Données Météo France]

Toutefois, sur la période 1996-2005, les coefficients de corrélation de dix pluviomètres, répartis sur l'ensemble de la plaine du Roussillon, sont caractérisés par des taux de corrélation assez élevés (figure 4, ci-dessous). La moyenne des différents coefficients de corrélation[1] est égale à 0.84 tandis que l'écart-type reste faible (0.05). Ceci signifie que la répartition des événements pluvieux est assez homogène sur l'ensemble de la plaine du Roussillon lorsque la fenêtre temporelle de l'échantillon observé est suffisamment longue.

Le vent[2] représente le dernier point symptomatique du climat de la plaine du Roussillon, en particulier la tramontane, vent froid et sec du nord-ouest, qui atteint fréquemment des vitesses supérieures à 100 km/h. Sur la période 1872-2003, une moyenne de 132 jours de vents violents (57km/h) par an a été enregistrée à la station météorologique de Perpignan-Rivesaltes.

Outre les faibles précipitations et le fort ensoleillement, la tramontane amplifie le phénomène d'évapotranspiration, particulièrement marqué en Roussillon.

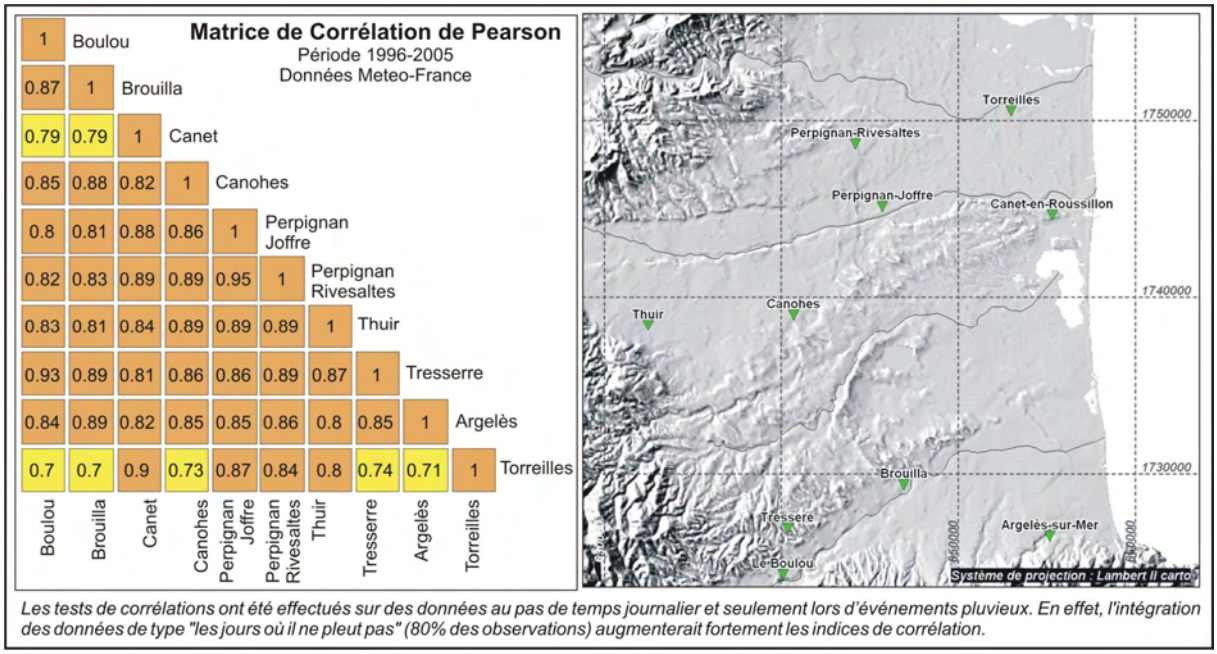


Figure 4 - Matrice de corrélation des données pluviométriques et localisation des pluviomètres testés

[1] Coefficient de corrélation de Pearson : il s'agit du coefficient de corrélation le plus communément utilisé car bien adapté aux données quantitatives. Sa valeur est comprise entre -1 et 1, et il reflète le degré de linéarité entre deux séries de données. Le coefficient de Pearson au carré est dénommé R^2.

[2] Les vents marins sont peu marqués sur le Roussillon. Ils ne seront pas considérés comme potentiellement à l'origine d'une salinité résultant d'une pollution par embruns [Custodio, 1997].

4. Démographie

Le département compte près de 400 000 habitants. La ville de Perpignan en regroupe plus d'un quart à elle seule, et plus d'un tiers avec sa banlieue. C'est la seule ville importante, et les principales autres villes sont Canet-en-Roussillon, Cabestany, Saint-Estève, Rivesaltes, Saint-Laurent-de-la-Salanque, Bompas, Saint-Cyprien, Argelès-sur-Mer, Thuir, Céret, Elne et Prades, comptant chacune entre 6 000 et 10 000 habitants. De fortes variations de la population caractérisent le département des Pyrénées-Orientales (figure 5, ci-dessous) :

- des flux migratoires estivaux. A titre d'exemple, la population de la commune du Barcarès est multipliée par 20 lors du "pic du 15 août", celle de St Cyprien par 10 et celle de Canet-en-Roussillon par 7 [Informations recueillies auprès des offices du tourisme communaux] ;

- une croissance générale démographique du département. Le taux annuel moyen de variation de population, entre 1990 et 1999 est égal à + 0.86 (variation due au solde naturel = - 0.12 et variation due au solde migratoire + 0.98) [données INSEE]. Depuis 1960, l'augmentation de la population suit une progression linéaire.

Ces caractéristiques démographiques s'inscrivent dans une évolution régionale, et sont à ce titre, relativement identiques à celles des autres villes de la région, telles que Montpellier, Béziers, Lunel....

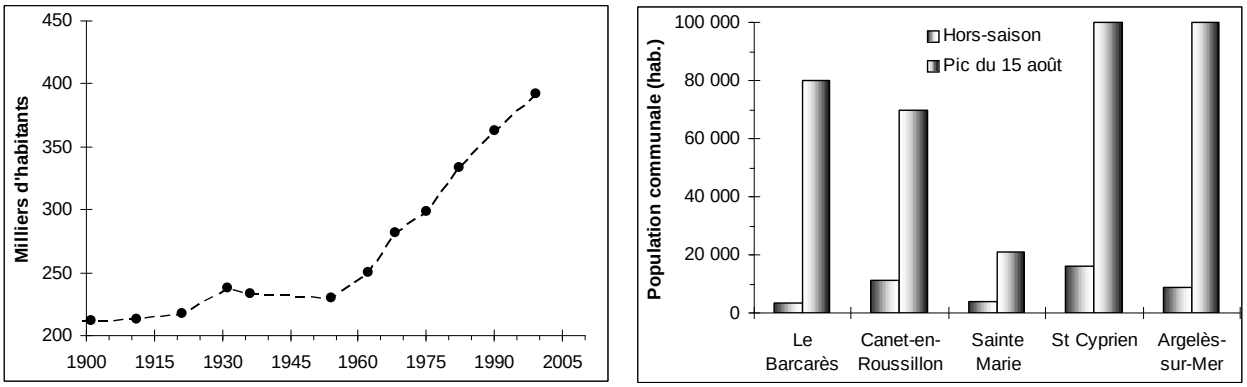


Figure 5 - Croissance de la population[1] et flux migratoires estivaux dans quelques communes littorales[2]

(1 : entre 1900 et 2005 dans le département des Pyrénées-Orientales [données INSEE])

(2 : offices du tourisme communaux)

5. Economie

La caractéristique majeure des Pyrénées-Orientales est la forte présence d'arboriculteurs, de viticulteurs et de maraîchers (4,6 % des emplois en 1999). Si leur nombre tend à diminuer (- 7% entre 1990 et 1999), ils sont encore proportionnellement quatre fois plus nombreux dans le département que dans l'ensemble de la France [données INSEE]. Ceci est lié au fait que l'économie du département repose traditionnellement sur l'agriculture, dominée par l'arboriculture (nombreux vergers de pêchers, d'abricotiers et de cerisiers), le maraîchage (salades, artichauts notamment) et la viticulture. De fait, les activités agricoles (figure 6, ci-dessous) occupent une grande partie de la plaine. L'impact que peut avoir l'agriculture sur la qualité des eaux ne sera pas abordé dans la présente.

Le second pilier de l'économie repose sur le tourisme : plus de 7 millions de visiteurs par an génèrent un chiffre d'affaires évalué à environ 1 milliard d'euros. Le développement s'est organisé autour des stations balnéaires telles que Canet-en-Roussillon, Argelès-sur-Mer, Saint-Cyprien et Le Barcarès (figure 1, ci-dessus, p. 27).

La comparaison entre les bases de données géographiques "Corine Land Cover" années 1990 et 2000 [IFEN] confirme un fort développement des zones urbanisées au détriment principalement des territoires agricoles.

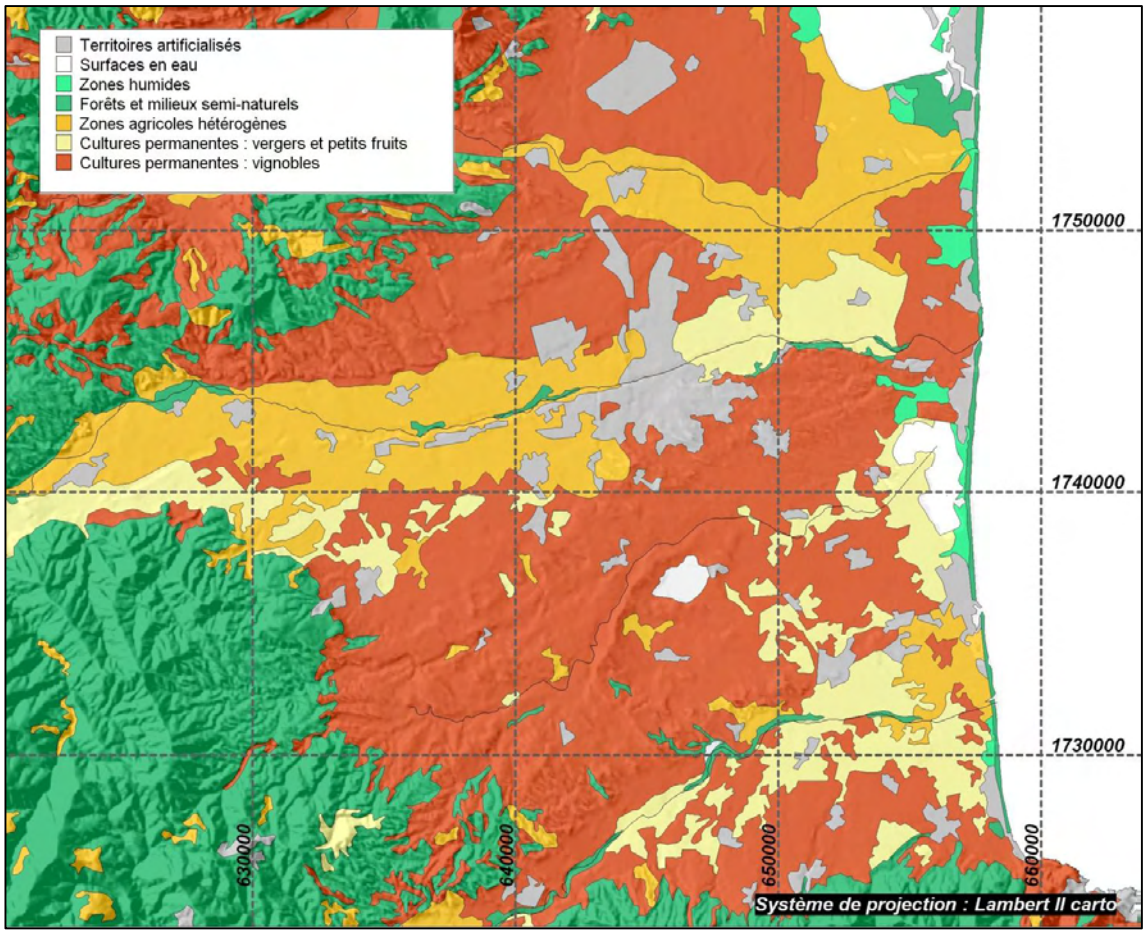


Figure 6 - Occupation du sol de la plaine du Roussillon
[base de données géographiques Corine Land Cover, année 2000 - IFEN]

*

* *

Le contexte général de la plaine du Roussillon

La problématique hydrogéologique de la plaine du Roussillon se dessine rapidement en considérant le contexte général évoqué ci-dessus :

> Une **recharge faible**. Les précipitations sont modestes, souvent sous forme orageuse ; de plus, elle se caractérise par des conditions favorisant l'évapotranspiration (température élevée et vent soutenu).

> Des **prélèvements en augmentation**, liés aux deux principaux pôles économiques de la région : le tourisme estival et l'agriculture. L'héliotropisme contribue aussi à la croissance démographique.

> Une **géographie de plaine littorale**, particulièrement plane (gradient hydraulique faible) pourvue de zones humides salées, facilitant tous deux le phénomène d'intrusion saline.

Chapitre II

Contexte hydrogéologique des aquifères du Roussillon

Ce chapitre a pour objectif de rappeler l'évolution des connaissances tant du point de vue géologique qu'hydrogéologique et de faire le point sur les incertitudes actuelles en matière de gestion de la ressource en eau. Il permet aussi d'identifier les concepts acquis avant l'élaboration du présent travail de recherche.

1. Esquisse de la géologie de la plaine du Roussillon

La chaine alpine tertiaire des Pyrénées, longue de 500 km, a vu le paroxysme de sa mise en place au cours de l'Eocène. Bien que les profonds accidents du socle pyrénéen jouent depuis le cycle Hercynien, l'histoire du bassin du Roussillon ne débute qu'au cours de la distension Oligocène. Cette distension résulte des mouvements relatifs des plaques Afrique et Europe à la fin de l'Eocène. Elle initie, entre autres, la mise en place de grabens très subsidents, tels que bassin provençal ou le bassin du Roussillon et entraîne la formation de la marge du Golfe du Lion.

Le bassin sédimentaire du Roussillon est formé par un remplissage néogène constitué par les produits d'érosion de la chaine des Pyrénées. Ce remplissage atteint en son centre plus d'un millier de mètres. Largement ouvert sur la mer vers l'Est, ce bassin, de type graben, est cerné par des accidents majeurs tels que la faille Nord-pyrénéenne, la faille des Albères et la faille de la Têt.

1.1. Encaissant du bassin

L'encaissant du bassin est observable sur le pourtour de la plaine du Roussillon (figure 7, ci-dessous). Du Nord vers le Sud, cet encaissant est constitué par :

- des formations mésozoïques, à proximité de la zone des Corbières. Il s'agit de marno-calcaires et calcaires karstifiés (Malm et Crétacé inférieur), de quelques dolomies (Dogger) et de marnes métamorphisées (Albien) ;
- un petit bassin conglomératique d'âge oligocène au nord de Rivesaltes ;
- des formations paléozoïques, les séries schisto-gréseuses d'âge silurien et ordovicien des Fenouillèdes ;
- le massif granitique de Millas ;
- le socle métamorphique d'âge précambrien (gneiss et schiste) du massif des Aspres et des Albères ;
- localement, les calcaires d'âge dévonien, probablement karstifiés.

Sur l'ensemble de ces formations, seuls les calcaires karstifiés des Corbières présentent un intérêt hydrogéologique clairement identifié pour la recharge en eau douce de la plaine du Roussillon. Ce point sera développé dans le chapitre VII de la seconde partie.

A proximité des limites intérieures du Roussillon, l'encaissant sous-jacent au bassin a été reconnu sur la coupe de quelques forages. Mais, c'est surtout à la base des sondages pétroliers d'Elne et de Canet [Gottis, 1958 ; Duvail & Le Strat, 2000] que la limite du mur a pu être fixée précisément : -1972 m à Elne et -1716 m à Canet. Cette limite correspond à la base de l'Aquitanien, représentant le début de l'ouverture de la Méditerranée dans la zone d'étude (Miocène inférieur, 22-24 Ma) [Séranne, 1999].

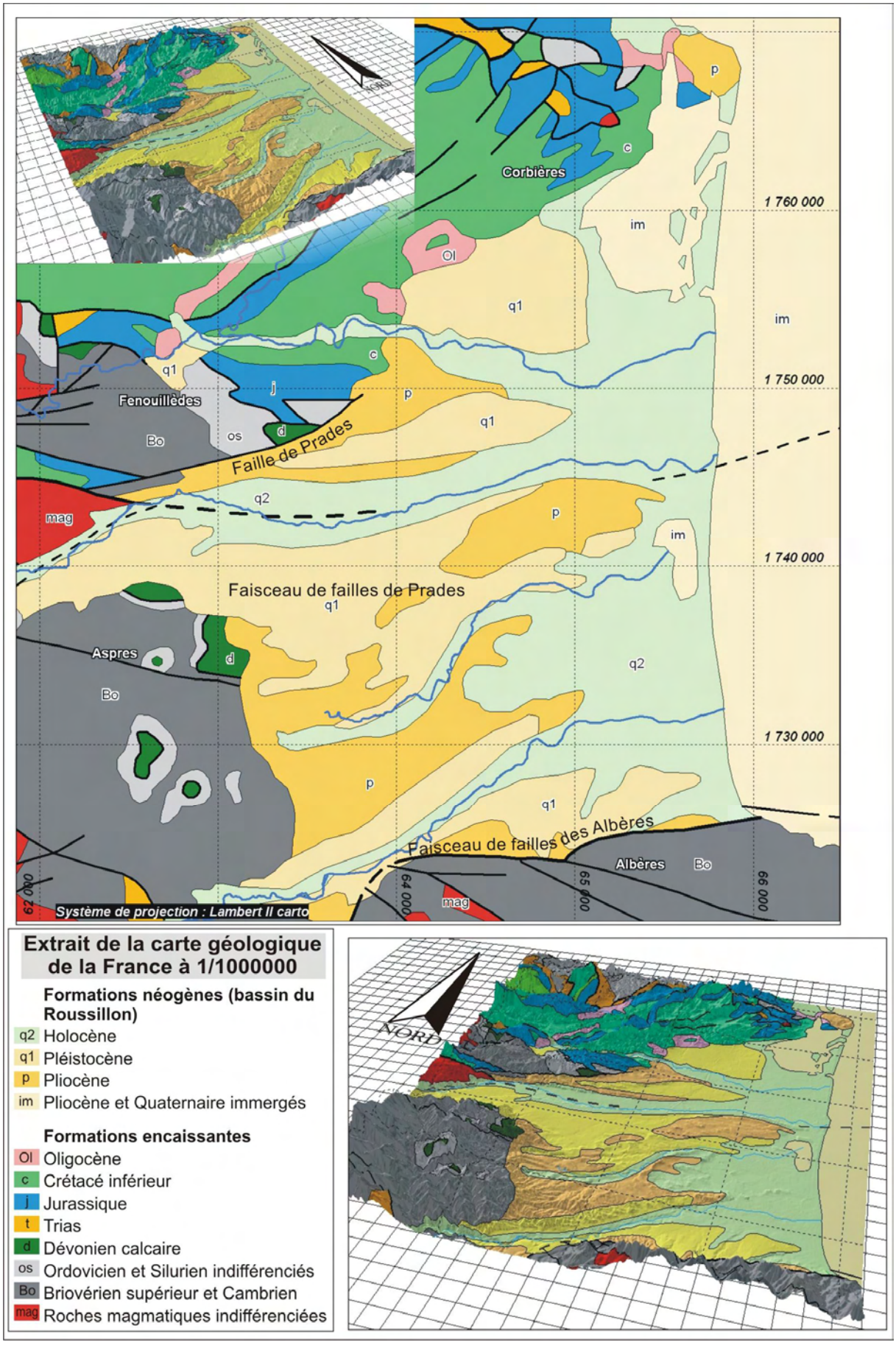


Figure 7 - Le bassin du Roussillon d'après un extrait de la carte géologique de la France à 1/1 000 000

Drapage sur MNT = facteur 4 d'exagération verticale

1.2. Le bassin tertiaire

Le modèle conceptuel géologique sera détaillé et expliqué dans le Chapitre III (p. 52), notamment l'origine des formations sédimentaires et l'impact de la crise de salinité messinienne. Cependant, afin de faciliter la lecture de ce "manuscrit", un aperçu de la géologie est présenté ci-dessous.

Décrit pour la première fois par Depéret en 1885 comme étant "la région classique par excellence du terrain pliocène français", le bassin tertiaire du Roussillon a été subdivisé en deux groupes de couches distinctes à partir du milieu de dépôts et de la composition pétrographique :

- l'un inférieur, **marin**, où domine l'élément arénacé, constitué par des argiles sableuses, bleues et micacées, surmontées par des sables jaunes ;
- l'autre supérieur, d'**eau douce**, où argiles, sables et "calcaires marno-argileux" apparaissent en abondance.

Ces terrains tertiaires sont recouverts, pour une grande partie, d'une épaisseur variable d'**alluvions caillouteuses anciennes** et de dépôts modernes tels que limons de débordement et cordons littoraux.

Cette description sommaire, fondée sur la description lithologique et faunistique des affleurements, permet de classer les grands ensembles du remplissage du bassin du Roussillon [Duvail *et al.*, 2001] : une unité géologique **quaternaire** composée de terrasses fluviatiles pléistocènes et de dépôts modernes holocènes, reposant sur deux unités géologiques nommées **Pliocène continental** (désigné "Pliocène d'eau douce", ci-dessus) et **Pliocène marin**.

Cet ensemble plio-quaternaire repose en discordance sur diverses formations d'âge **miocène**, synchrones à la formation du bassin d'effondrement du Roussillon (ouverture de la Méditerranée).

2. Esquisse de l'hydrogéologie de la plaine du Roussillon

La première constatation est qu'il existe dans le Roussillon des ressources en eau à des niveaux différents [Got, 1965]. La notion d'aquifère "multi-couche" est très vite adoptée pour décrire les aquifères poreux du Roussillon.

Différentes études, suivant un schéma scientifique similaire (étude géologique, inventaire des ressources hydrauliques, études hydrochimique et hydrodynamique), ont été menées dans le bassin inférieur du Tech [Biscaldi, 1964], le bassin inférieur de la Têt [Dazy, 1965 ; Sola, 1977], le bassin du Réart [Paternot, 1964] et enfin dans la plaine de la Salanque [Got, 1965] et la zone des plaines de Rivesaltes [Gadel, 1966].

La carte hydrogéologique du Roussillon [Marchal *et al.*, 1976], ainsi que l'Accord-cadre[1] [2003] synthétisent et homogénéisent l'ensemble de ces résultats scientifiques. Les aquifères sont regroupés selon les entités hydrogéologiques suivantes :

- l'aquifère du **Pliocène** de la plaine du Roussillon affleure sur 200 km^2 essentiellement entre la vallée de la Têt et celle du Tech, dans une zone délimitée par une ligne Céret - Elne au Sud et Thuir - Perpignan - Canet au Nord. Les sédiments pliocènes affleurent aussi le long d'une bande kilométrique située à la limite nord du bassin, entre Rivesaltes et Ille-sur-Têt. L'épaisseur du Pliocène, considéré comme aquifère, atteint son maximum à proximité du littoral : environ 300 mètres [Duvail *et al.*, 2001]. La qualité des eaux issues de cet ensemble aquifère est souvent correcte en raison de la couverture sédimentaire sus-jacente. Cet aquifère Pliocène est subdivisé en deux nappes :
  - **"nappe 3"** : cette nappe est spécifique à la Salanque et se développe entre 40 et 60 mètres de profondeur. Elle est individualisée en raison de propriétés hydrodynamiques intéressantes : les transmissivités moyennes atteignent 10^{-2} à 3.10^{-2} m^2/s [Chabart, 1996] dans le secteur de S^t-Hippolyte, S^t-Laurent-de-la-Salanque. L'extension de cette nappe se limite au Sud aux alentours de Canet-en-Roussillon et, à l'Ouest, vers Salses. Bien que certains forages soient déterminés comme exploitant la "nappe 3" au Sud de Canet-en-Roussillon, cette dernière n'y est pas clairement identifiée.
  - **"nappe 4"** : cette nappe rassemble l'ensemble des niveaux aquifères localisés dans les formations d'âge pliocène. Son extension est celle du bassin du Roussillon. De manière générale, toutes les nappes profondes sont regroupées sous le terme "nappe 4". Ses transmissivités sont comprises généralement entre 10^{-3} et 3.10^{-3} m^2/s [Chabart, 1996].

[1] Accord-Cadre pour la définition d'un programme global de protection et de gestion concertée des ressources en eau de l'ensemble aquifère multicouche plio-quaternaire de la plaine du Roussillon

> les **aquifères alluviaux superficiels** regroupent les nappes du **Quaternaire** ancien et moyen ("nappe 2") et le Quaternaire récent de la frange littorale ("nappe 1"). Leur extension suit la frange littorale et le lit des fleuves côtiers (600 km^2 - Holocène et Quaternaire, sur la figure 7, ci-dessus). La vulnérabilité de ces aquifères est marquée en raison de la proximité de la mer et de leur caractère "libre". Les propriétés hydrodynamiques de ces aquifères est variable : transmissivités de 10^{-4} à 10^{-2} m^2/s en fonction de leur localisation géographique.

La charge hydraulique de ces nappes est inversement proportionnelle à leur profondeur. Dans les années 1960-1970, Got [1965] propose l'approximation suivante au niveau du littoral :

> le niveau piézométrique de la "nappe 2" est à 1 m sous le sol ;

> le niveau piézométrique de la "nappe 3" est au niveau du sol ;

> le niveau piézométrique de la "nappe 4" est artésien à 5 m.

Selon le référentiel hydrogéologique, la synthèse hydrogéologique régionale [Marchal & Blaise, 2004] attribue le code 146 pour les aquifères localisés dans les alluvions quaternaires superficielles et le code 225 pour les aquifères d'âge pliocène. Cette codification est aujourd'hui officiellement utilisée par les gestionnaires des ressources en eau.

La figure 8 (ci-dessous) illustre la vision de la distribution des aquifères et le caractère hétérogène des nappes pliocènes. Cette figure souligne nettement la présence de nombreux corps sableux aquifères, dont la localisation, les connections et les interactions étaient peu connues lors de l'élaboration de ces coupes.

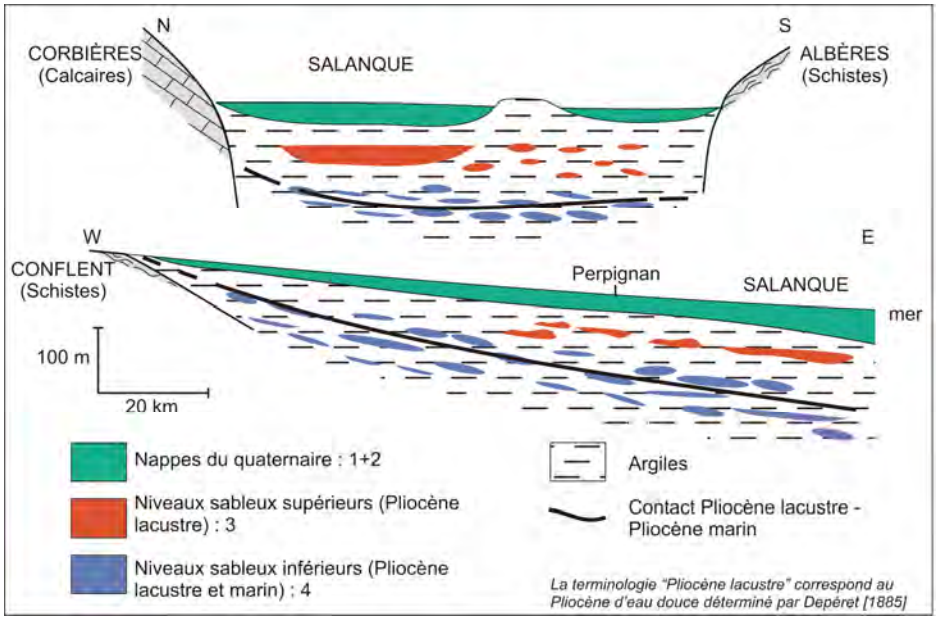


Figure 8 - Coupes schématiques interprétatives
[Marchal et al., 1976]

3. Exploitation des ressources en eau souterraine de la plaine du Roussillon : une croissance constante…

En 1829, à Toulouges, en amont de Perpignan, a été implanté le premier forage de la plaine du Roussillon. Depéret [1885] signale la présence de puits artésiens en grand nombre sur l'ensemble de la plaine[1]. Dans la région de Perpignan, à la fin des années 1940, l'eau d'irrigation provenait du "débordement naturel" des forages réalisés dans les nappes souterraines. A la fin des années 1960, l'inventaire effectué par la faculté des Sciences de Montpellier dénombre 2000 puits et forages (thèses de doctorat citées ci-dessus, § 2.). En 2006, près de 1 500 points d'eau sont répertoriés en BSS sur la plaine du Roussillon. Cette valeur ne tient pas compte, d'une part, des forages et puits dont la profondeur n'excède pas 10 mètres, et d'autre part, des forages non inventoriés. L'Accord-cadre [2003] avance les chiffres de **5 000 à 10 000 forages et puits** dans la plaine du Roussillon.

3.1. Pertinence et origine des données

Les volumes d'eau prélevés, présentés ci-dessous, considèrent d'une part, les estimations effectuées lors de l'élaboration de l'Accord-cadre [2003] et, d'autre part, celles effectuées par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (AERMC).

Dans le cadre de l'élaboration de l'Accord-cadre, les estimations sont le produit de réflexions menées par Jean-Pierre Marchal, hydrogéologue régional au Brgm et par Jacques Feraud, Chef du service de l'eau à la Chambre d'Agriculture 66 - Roussillon. Ces estimations sont basées sur les données disponibles, issues du Recensement Général de l'Agriculture[2]. Les données sont constituées par :

- la surface des exploitations (par commune ou par canton) ;
- le type d'irrigation existant (canaux, réseaux sous pression…) ;
- la nature des cultures ;
- le besoin en eau annuel en fonction des cultures.

Concernant les estimations effectuées par l'AERMC, la mise en garde suivante de l'Agence se doit d'être citée : *"Les données présentées dans les fichiers sont issues des modes de calcul des redevances et des prélèvements, définis par la réglementation. Ces démarches peuvent induire des biais dans les données, pouvant nuire à leur représentativité physique. Ainsi, leur utilisation dans un autre contexte, notamment pour évaluer la pression exercée par les différentes activités sur le milieu naturel, doit faire l'objet d'une certaine prudence et reste de l'entière responsabilité de l'utilisateur."*

Toutefois, une validation des informations a été effectuée dans le cadre de ce travail (i) géographiquement, en croisant les bases de données de l'AERMC avec les informations de la BSS et (ii) quantitativement, avec les informations fournies par les entreprises de distribution d'eau en Roussillon (SAUR, Veolia…).

[1] L'évolution des niveaux piézométriques sera présentée en partie II.

[2] Le Recensement Général Agricole est une enquête réalisée auprès de l'ensemble des exploitations agricoles françaises par le Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (Scees) du ministère de l'agriculture et de la pêche. Les résultats sont uniquement issus de déclarations volontaires.

3.2. Usages de l'eau

L'eau souterraine est destinée à quatre usages principaux : alimentation en eau potable (AEP), irrigation agricole, usage industriel et usage privé (figure 9, ci-dessous). La répartition de ces usages évolue temporellement en fonction du développement économique de la région. D'une manière générale, les besoins en AEP augmentent au même titre que l'accroissement démographique tandis que les besoins de l'agriculture sont constants.

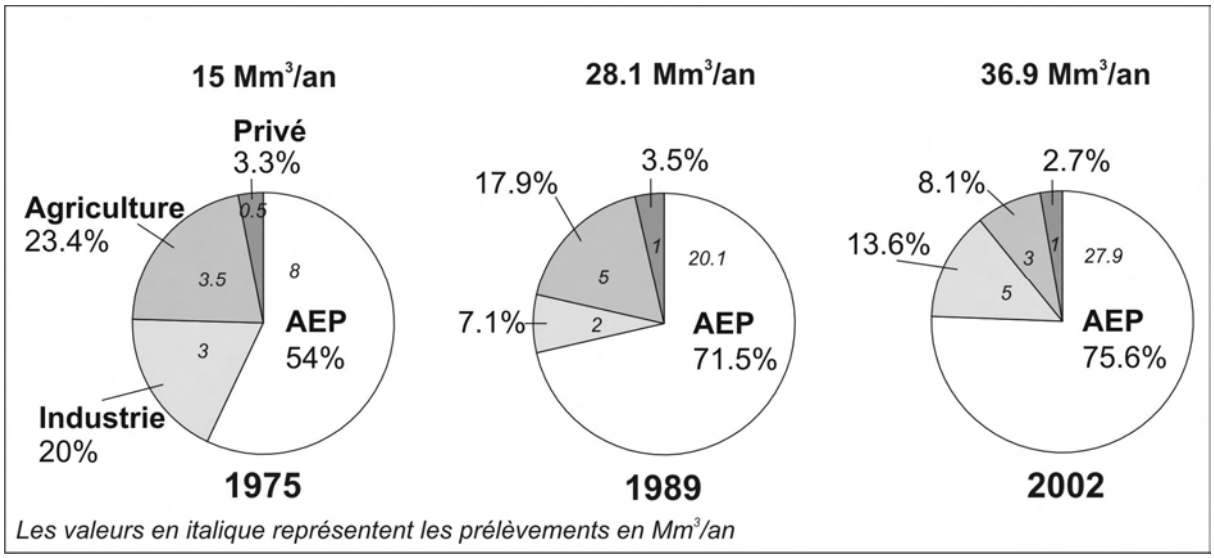


Figure 9 - Répartition des prélèvements dans les aquifères pliocènes en fonction des usages ***[Données AERMC & Brgm]***

a. L'Alimentation en Eau Potable

Les volumes prélevés pour l'AEP sont intimement liés à la démographie du département (figure 10, ci-dessous). Le coefficient de détermination "R^2" de ces deux variables est assez élevé pour la période 1975-1999[1]. Il est ainsi possible de considérer au vu de ces chiffres que la gestion des ressources en eau potable a peu évolué entre 1975 et 1999 : l'augmentation de la demande a toujours été résolue par une augmentation des prélèvements. Depuis les années 90, on observe une pente moins régulière semblant traduire une consommation plus irrégulière. De plus, la quantité d'eau prélevée au cours d'une année est aussi fonction du flux migratoire touristique, dépendant fortement du climat estival.

Ainsi, en 25 ans, les volumes annuels extraits des aquifères pliocènes ont été multipliés par un coefficient 3.5 (figure 11, ci-dessous). En ce qui concerne les aquifères superficiels, leur exploitation est restée stable depuis 25 ans. Ce déséquilibre est lié à la prise de position des gestionnaires de ressources en eau du département qui tendent à privilégier et réserver l'eau du Pliocène pour l'AEP, en raison de sa meilleure qualité et de sa vulnérabilité moindre.

En ce qui concerne la répartition actuelle des points de prélèvement, sur 150 forages environ : 65% exploitent les aquifères pliocènes contre 35% pour les aquifères quaternaires superficiels. Les forages AEP du Quaternaire se localisent dans les alluvions du Tech et dans la partie amont de la Têt. Dans cette zone, la ville de Perpignan prélève environ 10 Mm^3/an dans les alluvions quaternaires de la commune de S^t-Féliu-d'Amont. Depuis 2005, les forages AEP qui exploitaient les alluvions de l'Agly ne sont plus utilisés.

[1] Le nombre d'habitants pris en référence est celui du département, mais il apparaît clairement, d'après les données de l'INSEE que la majorité des flux démographiques se développent autour de la plaine du Roussillon.

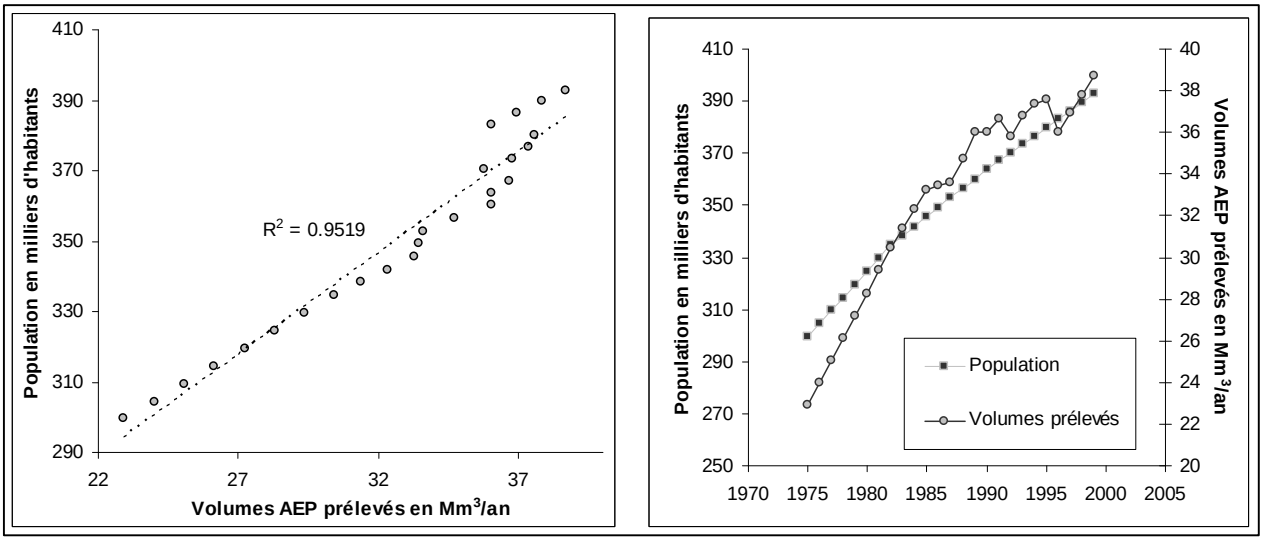


Figure 10 - Corrélation entre croissance démographique et volumes d'eau souterraine, prélevés à usage d'AEP entre 1975 et 1999
[Données INSEE, AERMC & Brgm]

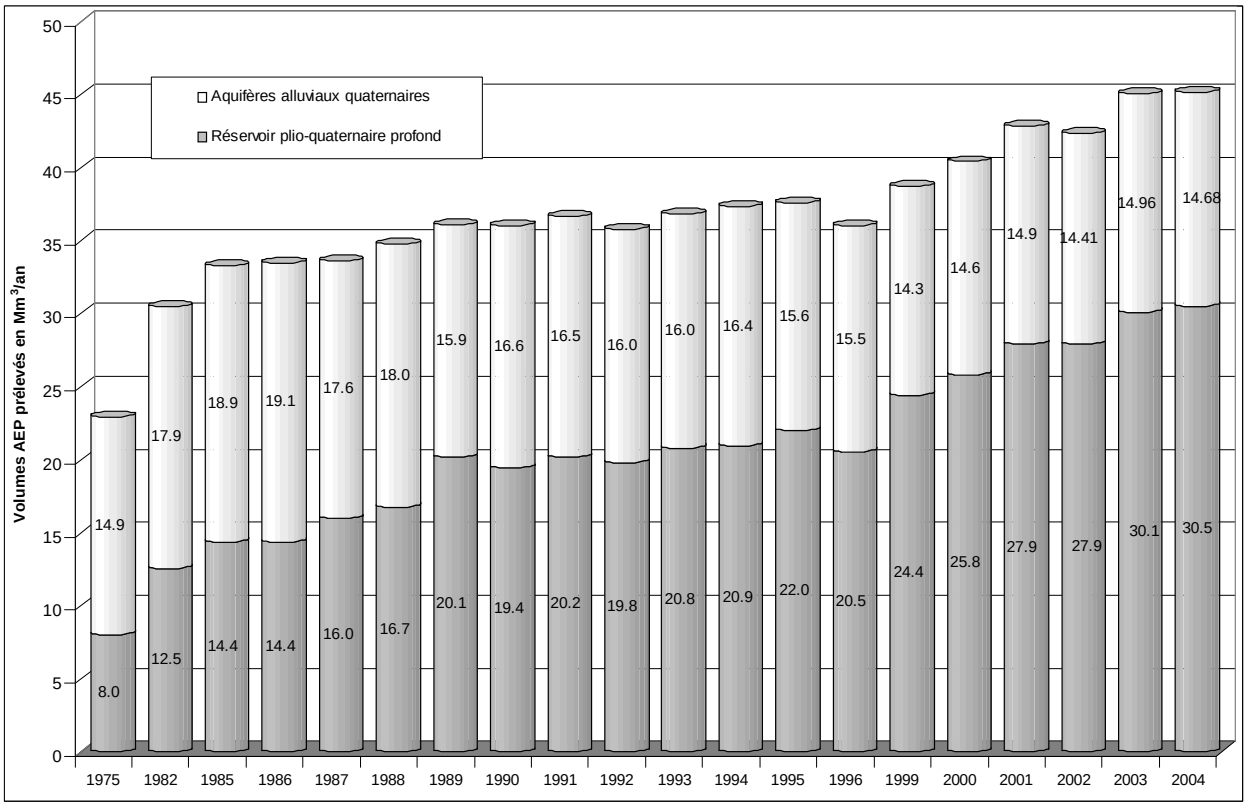


Figure 11 -Evolution des prélèvements à usage d'AEP dans l'aquifère plio-quaternaire entre 1975 et 2004
[Données AERMC & Brgm]

b. *Usage agricole*

Les volumes prélevés, destinés à l'irrigation agricole, sont estimés à 28 Mm^3 par an, dont 5 Mm^3 extraits des aquifères pliocènes et 23 des aquifères quaternaires [données Chambre d'Agriculture des Pyrénées Orientales (CDA66) ; Accord-cadre]. Ces valeurs ne sont que des ordres de grandeur évoluant chaque année en fonction de la météorologie, de la répartition et du type de cultures.

La figure 12 présente la répartition des prélèvements en fonction de secteurs hydrogéologiques homogènes définis par la CDA66. Les prélèvements majeurs se localisent là où les surfaces irriguées sont les plus importantes : en Salanque (où les réseaux d'irrigation par canaux sont peu développés), sur la rive droite de la Têt et sur la rive gauche du Tech. Les prélèvements sont calculés en multipliant chaque hectare de surface irriguée par le facteur "5 000 m^3". Cette valeur est une moyenne pessimiste des besoins en fonction du type de plantation (légumes, fruitiers, vigne…) et du type d'irrigation (aspersion, goutte à goutte…)[1].

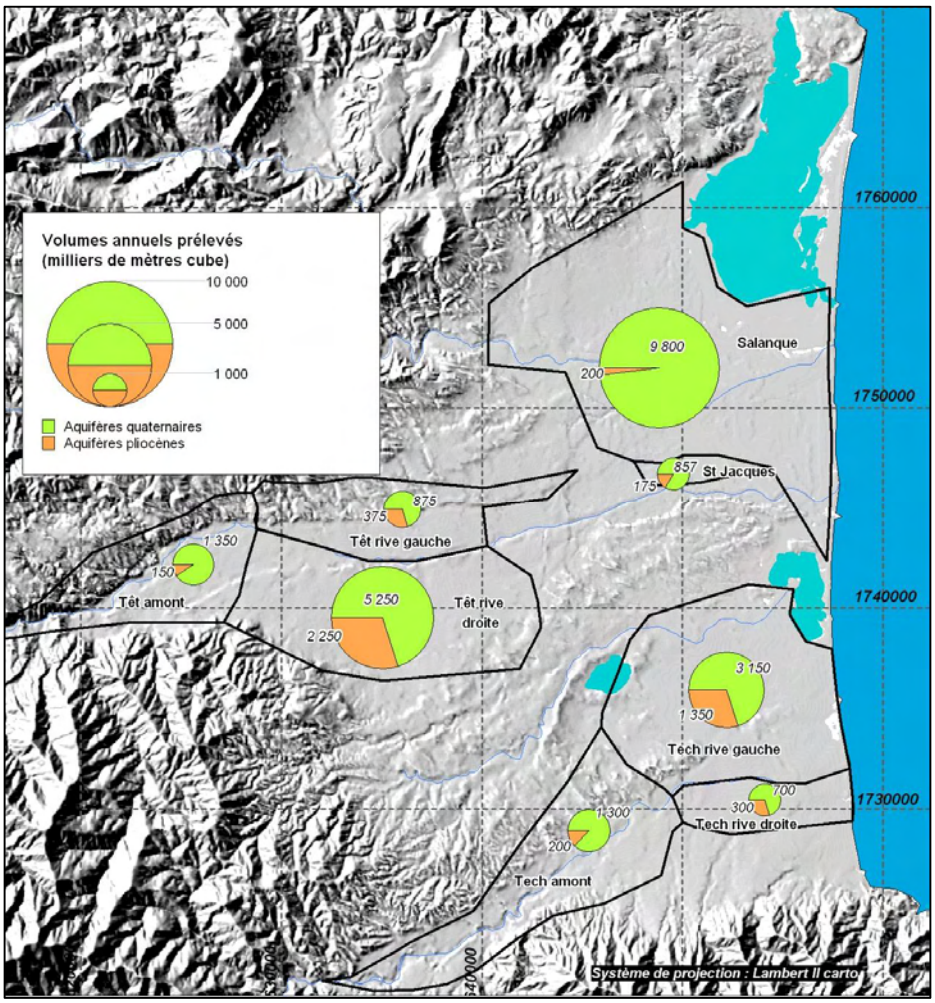


Figure 12 - Estimation des volumes annuels prélevés par secteur agricole irrigué
Les secteurs définis sur la carte correspondent à des secteurs homogènes de la plaine du Roussillon [données Accord-cadre & CDA66]

[1] Dans le cadre de la présente étude, les valeurs estimées ne sont données qu'à titre indicatif. En conséquence, les valeurs proposées par l'Accord-cadre et la CDA66 ne seront pas recalculées.

Les volumes issus des prélèvements d'origine agricole sont les plus importants dans les aquifères superficiels, mais ils contribuent aussi largement à leur recharge, notamment, via l'infiltration des pertes des canaux d'irrigation. En effet, dans le cas d'une irrigation traditionnelle, 35 à 40 % des volumes prélevés percolent vers la nappe quaternaire ou retournent aux canaux[1]. Ce fait s'explique par l'existence d'un grand nombre de canaux d'irrigation secondaires non bétonnés (environ 250 mètres linéaires de réseaux par hectare).

En extrapolant une étude menée à Corneilla-la-Rivière, Jacques Feraud [Chambre d'agriculture 66, communication orale] estime ainsi une percolation de 150 Mm^3/an depuis les canaux jusque dans l'aquifère superficiel (400 millions de m^3/an circulent dans les canaux).

La figure 13 présente, pour la période août 2001 - juillet 2002, les interactions entre :

- les prélèvements effectués par le canal de Thuir, ce qui correspond à un volume d'eau utilisé à des fins d'irrigation (pas-de-temps mensuel sur une période annuelle) ;
- la pluviométrie enregistrée à Thuir (pas-de-temps journalier) ;
- les variations de la nappe quaternaire dans la zone Têt amont, enregistrées par le piézomètre C2-1 de Millas (pas-de-temps journalier).

La faible influence des précipitations (coefficient de corrélation = 0.05 lue sur le corrélogramme croisé[2]) sur le niveau piézométrique et la forte influence du canal sur ce même niveau (coefficient de détermination $R^2 = 0.84$ ou coefficient de corrélation = 0.92) sont des informations complémentaires qui confirment la contribution de l'irrigation à la recharge des aquifères.

La recharge des nappes superficielles par les eaux issues de l'irrigation est donc particulièrement bien marquée dans le secteur Têt amont. De plus, la mauvaise corrélation entre précipitations et niveau piézométrique sur une fenêtre d'observation plus longue (4.5 années) étaye le fait que l'irrigation a une influence significative sur la recharge des aquifères superficiels.

[1] Communication orale de Jacques Feraud au sujet d'un rapport du bureau d'étude GAEA réalisé pour l'ADASIA

[2] Se référer au chapitre II de la partie II, dédié au traitement du signal afin de trouver les explications méthodologiques.

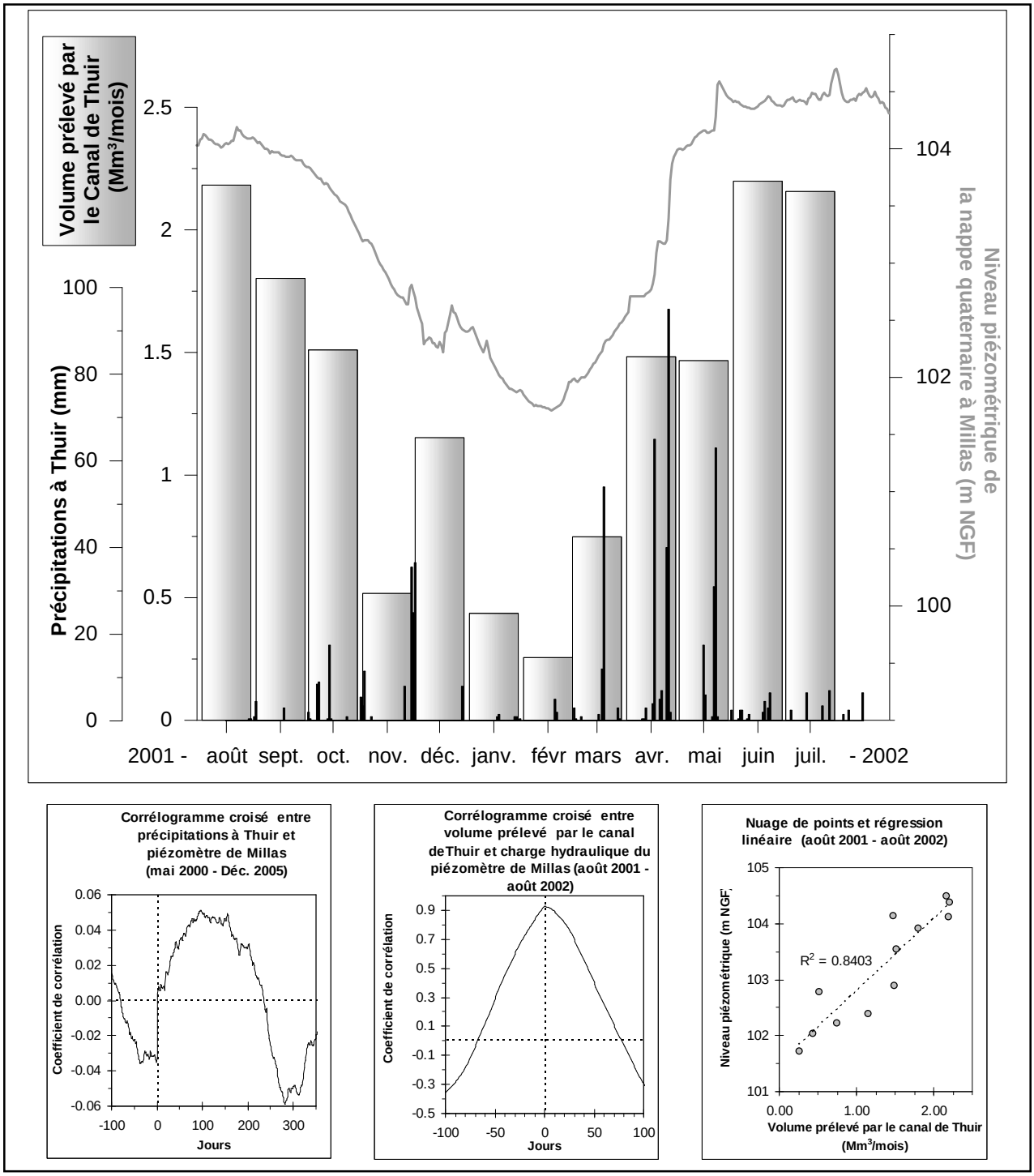


Figure 13 - Corrélation entre prélèvements, pluviométrie et piézométrie sur la zone Têt amont
[Données Brgm & CDA66]

Comme cela a été précisé dans le paragraphe ci-dessus abordant le sujet des AEP, les ressources en eau potable de la ville de Perpignan se localisent, entre autres, au sein des nappes alluviales quaternaires du champ captant de St-Féliu d'Amont. En relation avec les périodes d'irrigation, cette zone subit une baisse piézométrique marquée chaque hiver. Cette baisse est d'autant plus problématique en raison de l'évolution des méthodes d'irrigation à forte efficience telles que la micro-aspersion (communication orale, J.-P. Marchal).

c. Usage industriel

L'ensemble des prélèvements industriels du département ne dépasse probablement pas 3 à 4 Mm^3/an. Ces prélèvements, conditionnés de temps en temps par une bonne qualité de l'eau (eau de processus industriels), sont effectués en majorité dans les nappes profondes [données Accord-cadre & AERMC]. Ils sont relativement constants tout au long de l'année.

d. Usage privé

L'hôtellerie de plein air et les particuliers sont aussi à l'origine de prélèvements dans la nappe. L'estimation des volumes prélevés reste problématique. Différentes méthodes indirectes peuvent être utilisées [Montginoul *et al.*, 2005] : enquêtes, analyse de factures d'eau…

Dans la plaine du Roussillon, les volumes prélevés par les particuliers sont estimés à 6 Mm^3 par an, dont 1 Mm^3 extraits des aquifères pliocènes et 5 Mm^3 des aquifères quaternaires [Accord-cadre, 2003].

Pour l'hôtellerie de plein air, des valeurs ont été estimées par l'Agence de l'Eau [AERMC & Socotec, 2003] : environ 0.2 Mm^3. 250 campings, soit 35604 emplacements sont décomptés sur l'ensemble du département des Pyrénées-Orientales. La majorité des campings possèdent un ou plusieurs forages. L'eau pompée est exclusivement réservée à l'irrigation et aux sanitaires.

Une remarque doit être présentée au sujet des ouvrages privés. Il apparaît que ces derniers sont à l'origine de problèmes de qualité d'eau en raison d'une possible non-conformité du forage : mise en contact de différents horizons aquifères, problèmes d'étanchéité au niveau de la tête de forage… Ces informations demeurent la plupart du temps subjectives, car aucune information quantitative n'est disponible. A titre indicatif, dans le secteur de Pia, la pollution par nitrates de la nappe captive profonde Pliocène a été démontrée par des études hydrochimiques [Ladouche et al., 2003] : la nappe profonde est rechargée par la nappe supérieure dans une zone où les ouvrages particuliers, vraisemblablement défectueux, sont fréquents.

3.3. Conditions d'exploitation temporelle des aquifères

Au niveau des stations balnéaires, en raison de flux démographiques saisonniers, les prélèvements AEP se répartissent inégalement tout au long de l'année (figure 14 & figure 15, ci-dessous). La consommation d'eau durant la période de fréquentation touristique est quelquefois comparable à la consommation annuelle "hors-saison".

Ce phénomène est seulement observé dans les zones littorales. En s'éloignant de la côte, la consommation reste relativement constante sur l'année, avec toutefois une consommation un peu plus élevée durant la période estivale.

Pour les usages privés, la consommation maximale est atteinte au cours de l'été. Pour les usages agricoles, la répartition des prélèvements est fonction de la nature des cultures. D'une manière générale, le pic de consommation se localise dès le printemps jusqu'à la fin de l'été.

Pour l'ensemble de la plaine du Roussillon, les prélèvements sont fonction de la météorologie : la sollicitation de l'aquifère est proportionnelle à la température et inversement proportionnelle aux précipitations. En conséquence, les prélèvements dans les aquifères sont d'autant plus marqués lorsque les saisons sont sèches, c'est-à-dire, lorsque la recharge est la plus faible.

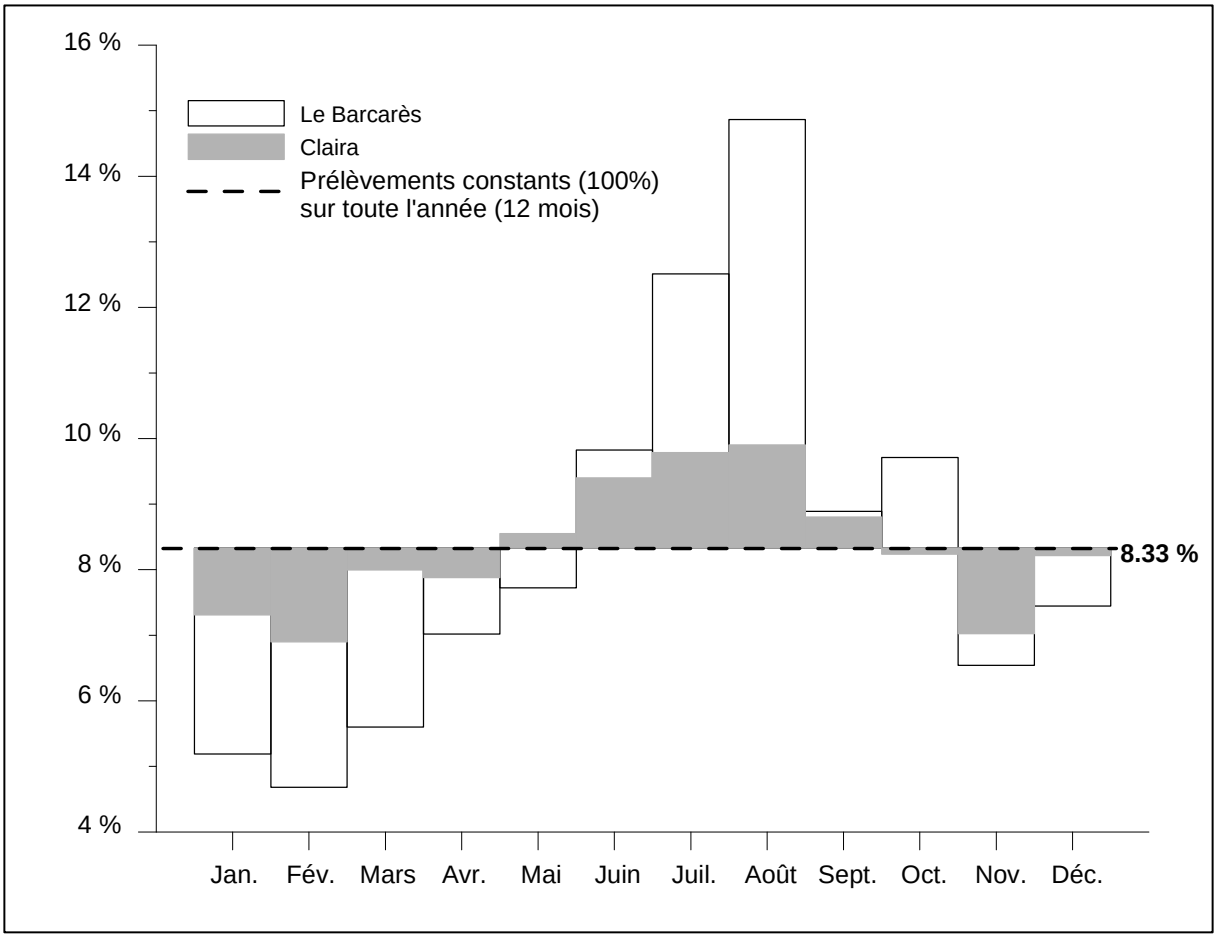


Figure 14 - Variation des prélèvements mensuelles autour d'une constante, dans les communes du Barcarès et de Claira
[Données SAUR et Veolia]

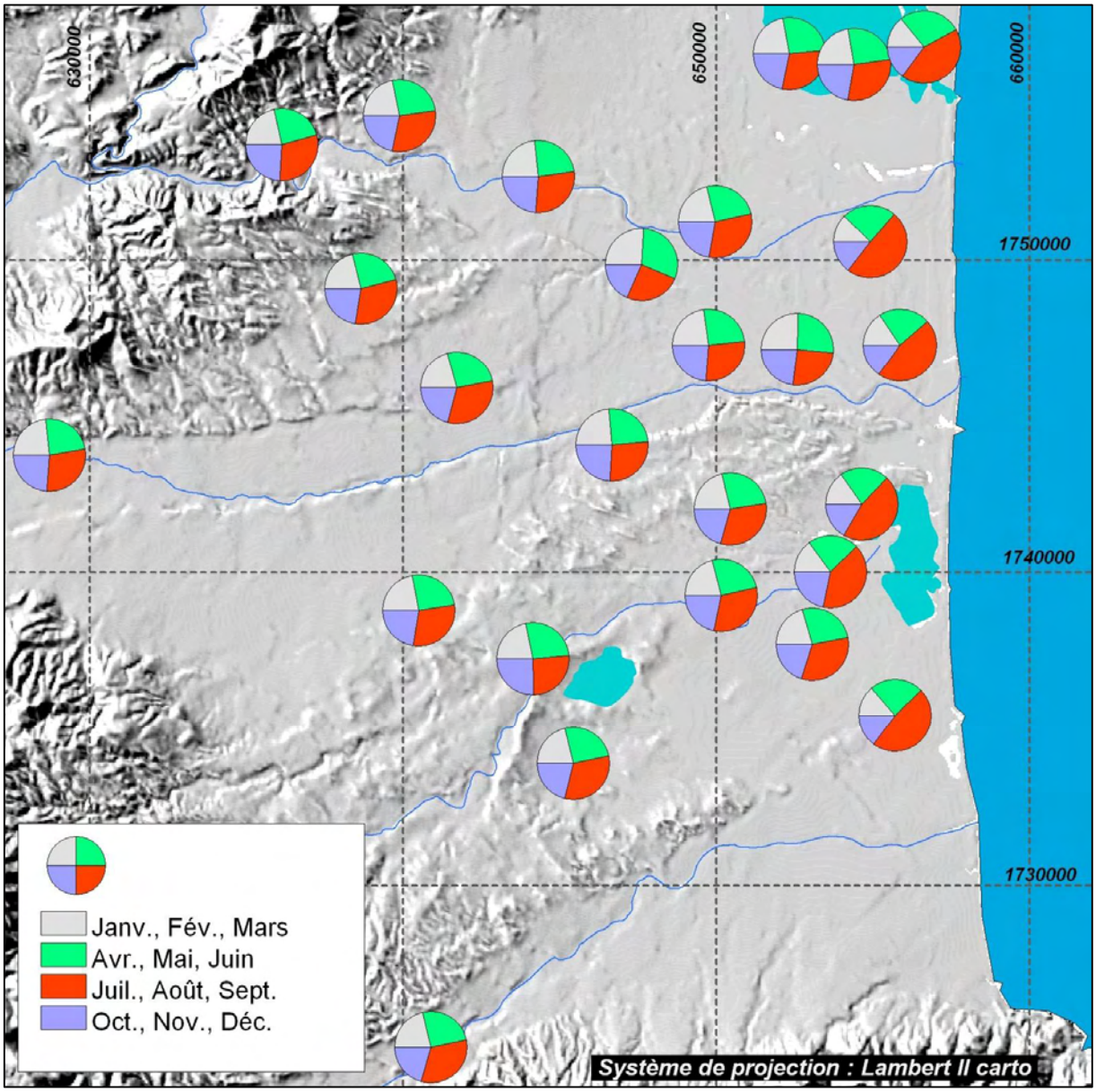


Figure 15 - Répartition trimestrielle des prélèvements par commune sur des cycles variant de 3 à 6 ans
[Données SAUR et Veolia]

*

* *

Des incertitudes persistantes

La volonté de mise en place d'une gestion concertée des ressources en eau souterraine de la plaine du Roussillon a débuté dans les années 1960. Depuis, de nombreuses actions ont été menées afin d'accroître la connaissance hydrogéologique : réseau de surveillance piézométrique, réseau de surveillance qualité (nitrates, chlorures, conductivité), modèle mathématique de simulation…

Toutefois, certaines questions des gestionnaires des ressources en eau demeurent sans réponse face à la complexité des systèmes aquifères du Roussillon :

> Les aquifères du Roussillon sont-ils surexploités? *Depuis le début de l'exploitation, la moyenne annuelle des niveaux piézométriques des aquifères profonds est soumise à une baisse dans de nombreuses zones.*

> Quel serait l'impact d'une augmentation des prélèvements sur la position de l'interface eau douce / eau salée? *Le modèle mathématique de simulation utilisé actuellement [Auroux et al., 1992] est un modèle hydrodynamique, sans prise en compte de la densité des fluides, et avec une limite étanche au niveau du littoral. Ce type de modèle limite sa capacité à aborder cette question.*

> Quelle est la continuité des aquifères vers le domaine off-shore, c'est-à-dire sous le niveau de la mer? *Le champ d'observation se limite aux forages de la plaine. Les écoulements simulés dans le modèle mathématique s'interrompent au niveau du trait de côte.*

> Quelles sont les relations et interactions entre les aquifères dénommés "nappe 3" et "nappe 4"? *Leurs fluctuations piézométriques et leurs particularités hydrodynamiques sont différentes ; cependant sur le long terme, ces nappes semblent évoluer d'une manière similaire.*

Deux aspects essentiels lient ces questions : un développement de la connaissance géologique et l'application de cette connaissance en termes de modélisation hydrogéologique.

Dans le chapitre suivant, les connaissances géologiques acquises au cours du projet de recherche "SysCoLag" seront présentées.

Chapitre III

Description du modèle conceptuel géologique

Ce chapitre constitue une synthèse de certains résultats de la thèse de Cédric Duvail [Duvail, à paraître]. Les travaux présentés ci-dessous ont été le fruit d'une collaboration ponctuelle en ce qui concerne la formulation du modèle conceptuel géologique sous forme d'une base de données et d'un échange régulier au cours du déroulement de nos travaux de recherche respectifs. Pour plus de précisions sur les modalités de mise en place du bassin du Roussillon, sur son contexte géodynamique à l'échelle de la marge, il sera utile de se référer à la thèse de Cédric Duvail [Duvail, à paraître].

Remarque - Afin de faciliter la compréhension, la terminologie géologique employée se doit d'être précisée, d'une vision globale vers une vision haute-résolution : les corps sédimentaires abritent les unités sédimentologiques qui, elles-mêmes, se subdivisent en faciès.

1. Une démarche géologique originale

La publication, présentée ci-après [Aunay *et al.*, 2004], relate la méthodologie géologique développée et utilisée au cours du projet de recherche Syscolag.

Cette méthodologie s'organise autour de l'étude des modalités d'empilement (stacking pattern) [Cross *et al.*, 1993] selon différents axes : (i) analyser l'évolution des modes d'empilement sur les diagraphies de forages de la plaine du Roussillon, (ii) analyser l'évolution des modes d'empilement sur documents sismiques à l'aide de la répartition spatiale des "offlap-break" [Homewood *et al.*, 2002] et enfin, (iii) corréler les informations entre le domaine off-shore et la plaine du Roussillon [Duvail *et al.*, 2005].

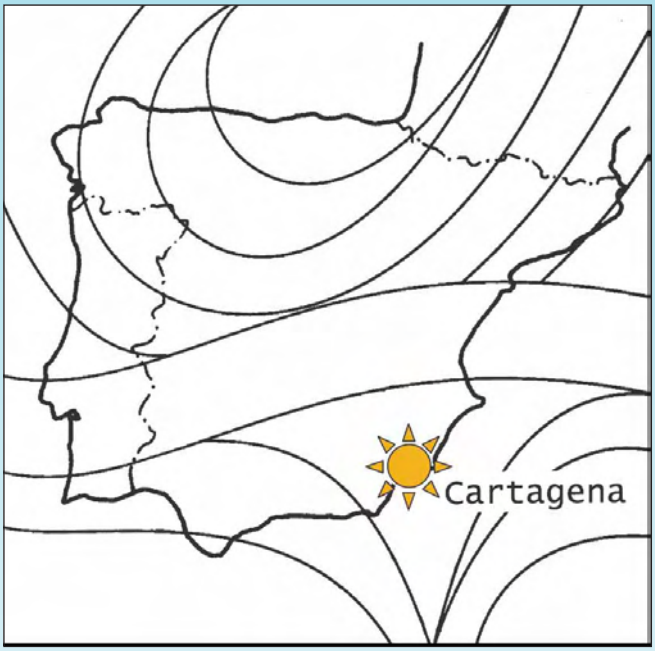
Le contexte géologique, et notamment l'impact de la crise de salinité messinienne, sont aussi abordés dans la note suivante. De plus, cette note introduit le rôle des interactions entre études géologiques et hydrogéologiques. Ces interactions seront développées au début de la seconde partie de la thèse.

PUBLICACIONES DEL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
Serie: HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS Nº 15

Groundwater and saline intrusion

Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting

18 SWIM, CARTAGENA 2004



Edited by: L. Araguás, E. Custodio and M. Manzano

MINISTERIO
DE EDUCACIÓN
Y CIENCIA

Instituto Geológico
y Minero de España

IMPORTANCE OF A HIGH RESOLUTION LITHOLOGICAL AND GEOMETRICAL KNOWLEDGE FOR MEDITERRANEAN COASTAL SEDIMENTARY AQUIFERS MANAGEMENT. APPLICATION TO THE ROUSSILLON BASIN, SOUTH OF FRANCE

B. AUNAY[1,2,✉], C. DUVAIL[3,4], P. LE STRAT[4], N. DÖRFLIGER[2], P. LACHASSAGNE[2] and S. PISTRE[1]

[1] Hydrosciences Montpellier - UMR 5569 - CNRS-IRD - Montpellier II University.
Place Eugène Bataillon. CC MSE; 34095 Montpellier, Cedex 5, France.
Email: b.aunay@brgm.fr
[2] BRGM – Water Division, Resource Assessment, Discontinuous Aquifers Unit. 1039, rue de Pinville;
34000 Montpellier, France
[3] UMR 5573 CNRS- Montpellier II University. Laboratoire DL, CC 060; 34095 Montpellier, Cedex 05, France.
[4] BRGM – Regional Geological Service Languedoc-Roussillon. 1039, rue de Pinville; 34000 Montpellier, France.

Abstract

A good understanding of coastal aquifers is particularly important for their management and preservation, as well as for specific implementations (artificial recharge). A detailed knowledge of the lithology and geometry of the aquitards and aquicludes is as important as that of the aquifers, particularly for seawater encroachment dynamics. A new methodology, based on reservoir geology, is used to contribute to high-resolution lithological and geometrical knowledge of coastal sedimentary aquifers. The proposed methodology is being applied on the Roussillon Basin, located along the southernmost part of the French Mediterranean coast, near the Spanish border. This basin covers an area of 700 km^2 and comprises two Pliocene aquifers whose characteristics are linked to the Messinian event, and is overlain by the Quaternary aquifer whose geometry is linked to eustatic variations. All these aquifers consist of alluvial and coastal deposits. A detailed lithology and geometry model of this basin has been made mainly on the basis of reservoir geology methods: (i) on-shore, through genetic stratigraphy and (ii) off-shore, through seismic stratigraphy. A detailed mapping of the elevation of the top and base of the aquifers and aquitards/aquicludes is thus available and will be used in a hydrogeological finite difference model. This model will be used for various applications such as aquifer management, location of the outflow areas of the aquifers and sensitivity analysis on geometry (on-shore-off-shore).

Keywords: Sequence stratigraphy, on-shore and off-shore geology, saltwater intrusion, Roussillon basin, Mediterranean sea, well logging, eustatism, groundwater, hydrodynamic modelling.

✉ Corresponding author

Introduction

A good understanding of coastal aquifers is particularly important for their management and preservation, as well as for specific implementations (e.g. artificial recharge). In fact, a detailed knowledge of the lithology and geometry of the aquitards and aquicludes is as important as that of the aquifers, particularly for up-coning risk evaluation, salt water encroachment dynamics through surfaces water bodies (rivers, lagoons…) or directly through the sea, etc.

A new methodology is applied to the Roussillon basin in southern France: It is based on high-resolution geology and correlation between off-shore and on-shore domains. Continuity of geometry between off-shore and on-shore fields should permit the testing of new boundary conditions within groundwater modelling.

Case study

The Roussillon basin is located along the southernmost part of the French Mediterranean coast, near the Spanish border, and lies between Albères in the south, Aspres in the west, Corbières in the north and the Mediterranean Sea in east (Figure 1). This basin has an area of approximately 700 km^2 and contains three major aquifers, from bottom to top: the Quaternary aquifer, the continental Pliocene aquifer and the sandy marine Pliocene aquifer. These geological units are embedded within a Miocene structured margin.

A detailed lithological and geometrical-geological model of this basin has been built, mainly on the basis of reservoir geology methods:

- on-shore, through genetic stratigraphy performed with BRGM (French Geological Survey) public underground database (more than 500 wells in that area, with about 120 logging), the interpretation of well logging, and cross checking the outcrops;
- off-shore, through seismic stratigraphy (existing sections provided by oil companies and high-resolution seismic profiles provided by the University of Perpignan).

Detailed mapping of the elevation of the top and base of the aquifers, the aquitards and aquicludes, of their lithology, their internal relationships and with other aquifers (especially a karstic one, whose structure, also influenced by the sea level variations, has been studied separately) is thus available, and is being implemented in an hydrogeological finite difference model.

Methodology

Reservoir geology and some of its tools, used in oil prospecting, are applied to hydrogeology. Tools such as genetic stratigraphy (on-shore domain) and seismic stratigraphy (off-shore domain) were used on pre-existing data (logging -on-shore, seismic profile -off-shore). From established sedimentary process, interpretations have resulted in a better knowledge of the sedimentary geometry, following correlation between on-shore and off-shore domains (Duvail *et al.*, in press). It is thus possible to precisely differentiate coastal groundwater aquifers and to establish their relative connections.

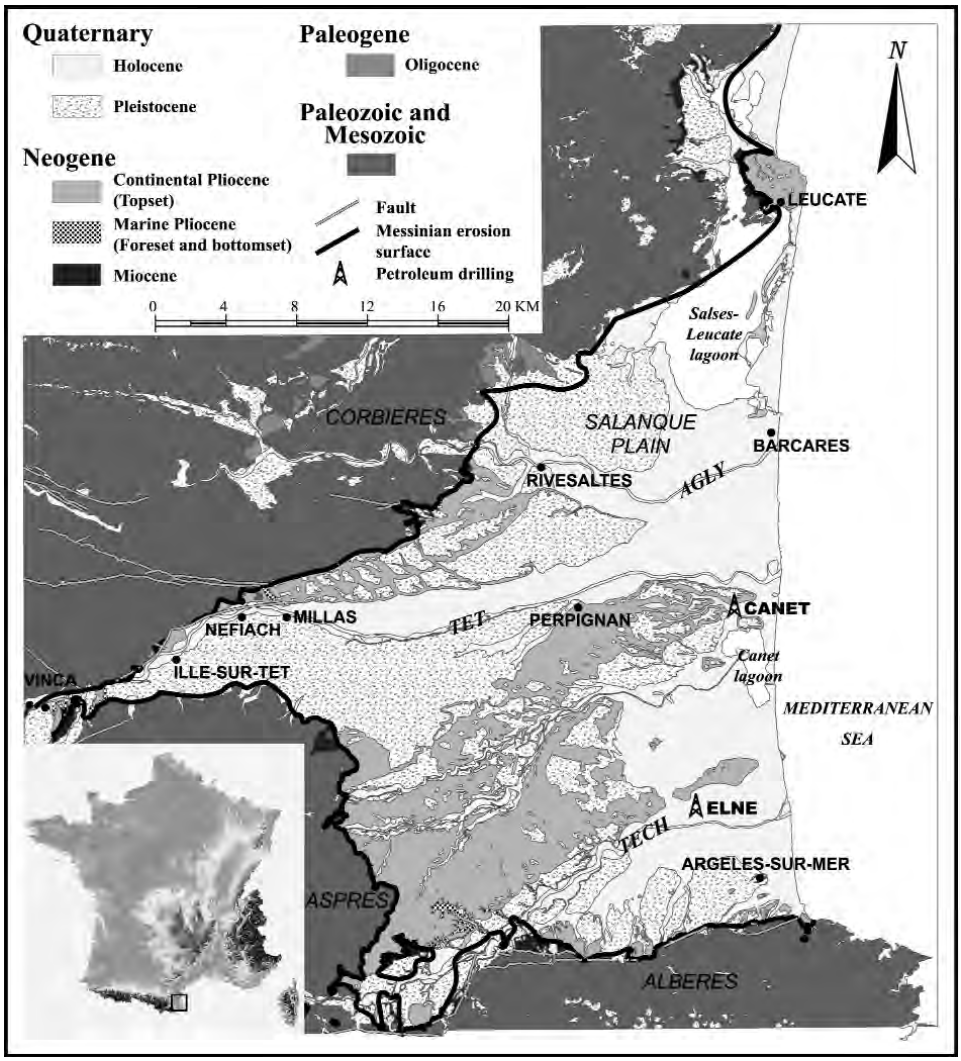


Figure 1. Location of the Roussillon basin.

Short review of the geological background

During the Miocene, there was a marine regression, following the Messinian salinity crisis (partial drying of the Mediterranean Sea; approximately 6 My). A major phase of erosion induced the depression of the fluvial networks and the formation of deep canyons that have been identified in the Roussillon (Clauzon *et al.*, 1987; Clauzon, 1990). These strucutures have been called the Messinian estuaries (*Duvail et al.*, 2001). In the Pliocene (5 My), the opening of the Gibraltar Strait (the only connection between the Mediterranean sea and the Atlantic ocean) enabled the sea water to return, which penetrated the deep valleys and transformed the Roussillon basin into an estuary. All the on-shore Pliocene sediments were deposited within 1.2 My (i.e. 75 cm/1000 years; Clauzon *et al.*, 1987). The Quaternary deposits were due

to the interglacial transgression and regression phases. The last transgression (sea-level rise) resulted in some coastal constructions (e.g. dunes) and a lagoon area from Leucate to Argelès. Today only the Salses-Leucate and Canet lagoons remain (Dörfliger, 2003).

Analysis of on-shore well logging

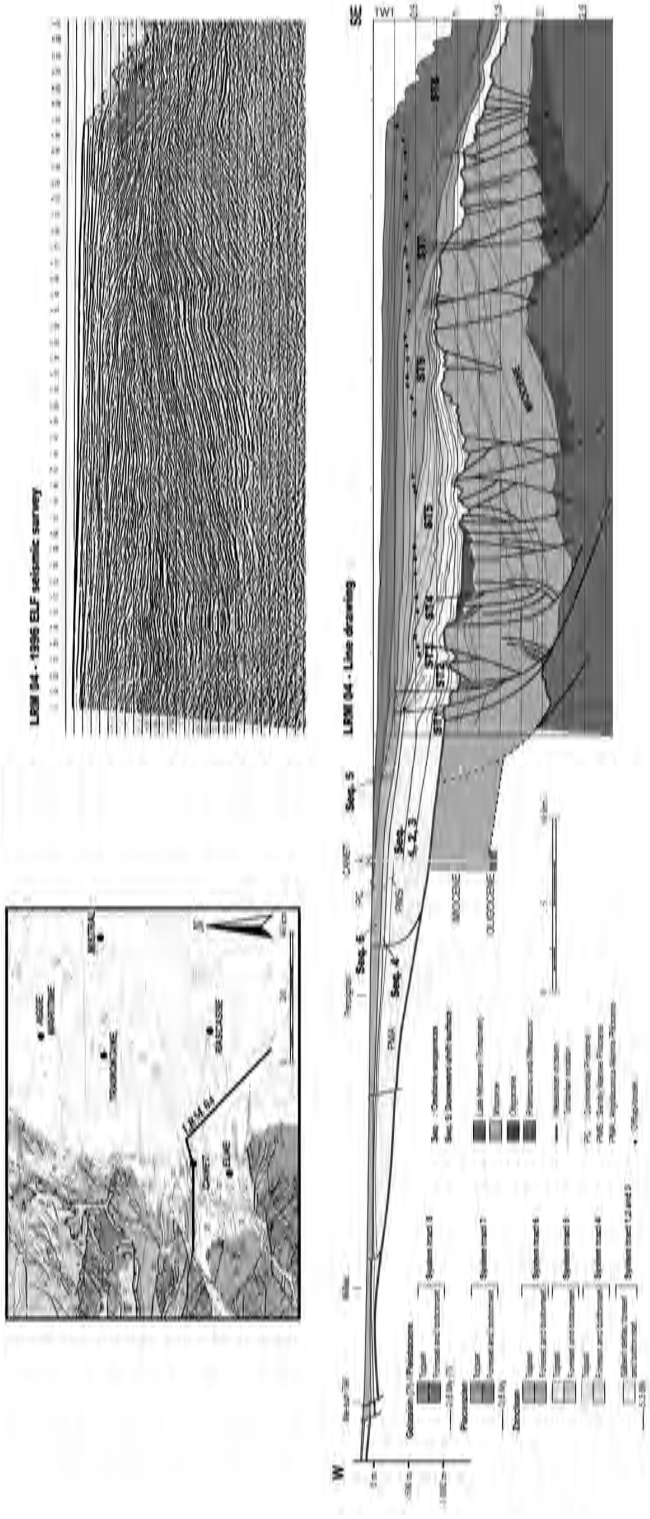
More than 2000 boreholes (exploratory drilling and exploitation boreholes) were carried out for the geotechnical, hydrogeological and petroleum purposes in the sedimentary Roussillon basin. Lithological descriptions of these, with varied quality and depth, are available in the BRGM database. Well-logging and/or precise lithological description exist for approximately 300 boreholes and this information was used to determine the geometry of sedimentary sets and the distribution of internal facies.

For each borehole, cuttings and well logging data (Serra, 1985) provide information on sedimentary depositional environments (Duvail and Le Strat, 2002). Preliminarily, sedimentary facies must be recognised by cross checking on outcrops (Clauzon, 1987; Clauzon *et al.*, 1990, 1995; Calvet, 1996; Duvail and Le Strat, 2002). Genetic stratigraphy principles (Galloway, 1989; Cross, 1988; Guillocheau, 1991; Homewood *et al.*, 1992) are used to (i) determine the vertical stacking of the depositional environments for each borehole and to (ii) build correlation between boreholes. This methodology of analysis (Duvail *et al.*, in press) provides the stacking pattern of the genetic sequences (on-shore domain), identified in terms of progradation, aggradation and retrogradation. Fall in the relative sea level corresponds to erosion surfaces.

Vertical units stacking are a function of subsidence, eustatism and supply of sediments. With the aim of correlating stacking patterns along the same deposit profile, it is necessary to know and measure the influence of local variations (local subsidence and supply of autocyclic sediments), influences of regional variations (margin subsidence and allocyclic sediments supply influenced by climate) and influences of global variations (eustatism). Thus, one dominant stacking pattern is characterised for all studied boreholes. It permits to highlight local perturbations. In order to be able to dissociate the global and regional influences, it is necessary to study several sedimentary basins.

In this paper, we will use the term of "system tract" in the off-shore domain and "sequences" in the on-shore domain. When correlations between on-shore and off-shore domains will be established, we will use the term of "system tract". In the on-shore domain this methodology helped to determine six sequences of the same order and their stacking pattern (Duvail *et al*, in press). For our case study these six zanclean sequences are the following (Figure 2):

(i) sequences 1, 2 and 3, on-shore, are mainly composed by stacking of argillaceous bottomset beds. The top of sequence 3 constitutes the first aquifer, named the sandy marine Pliocene aquifer. It corresponds to beach and shore face sands (thickness: 30-40 m);
(ii) sequence 4, on-shore, begin by paludal deposit like lignite (aquiclude thickness: 0-5 meters). Argillaceous flood-plain deposits with intersected stream-channel are atop marsh deposits. They constitute part of the continental Pliocene aquifer. Sequence 5, on-shore, is a downward shift surface without sedimentary deposit preserved;
(iii) sequence 6, on-shore, is characterized by the modification of the sedimentological mode linked to sequence boundaries. Higher sedimentary contribution increases the hydrodynamic properties of the continental Pliocene aquifer-top (Pliocene continental aquifer thickness: 50-150 m).


LRM 04 - 1996 ELF seismic survey
LRM 04 - Line drawing
W
SE
Seq. 5
Seq. 4
Seq. 3
Seq. 2
Seq. 1
ST5
ST4
ST3
ST2
ST1
Pliocene
Quaternary
Sediment 5
Sediment 4
Sediment 3
Sediment 2
Sediment 1
Miocene
Messinian

Quaternary terraces are the answer to glacio-eustatic dynamics in a context of generalized tilting, underlined by the on-shore downstream convergence of the levels of the most ancient fluviatile terraces (Duvail *et al.*, 2001).

Analysis of the off-shore seismic section

In the off-shore domain, the Pliocene-Quaternary series have been analysed from 1968 and 1996 Elf Aquitaine seismic data (Figure 2) and Labaune *et al.*, 2003 (Figure 3). These data have been provided by Total within the "GDR marge" framework and the University of Perpignan (BDSI Laboratory).

In the off-shore domain the classical method of sequence stratigraphy (Vail *et al.*, 1977; Posamentier and Vail, 1988; Posamentier *et al.*, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1988) is used to analyse seismic profiles. Thus, sequence boundaries (unconformities) individualise the top and base of the major system tracts. Offlap break-picking (Homewood *et al.*, 1999) characterises the different systems tracts. Spatial evolution according to time of this reference point helps to determine the stacking pattern of each system tract identified in terms of progradation, aggradation, retrogradation and forced regression. This methodology helped to determine eight systems tracts (Duvail *et al.*, in press), not detailed in this paper (Figure 2).

Geological results

Correlations between on-shore and off-shore domains

Modifications of regional and global geological factors are identified, in the on-shore domain, by the stacking patterns of the genetic sequences, and in the off-shore domain, by the stacking pattern of the offlap breaks. Stacking pattern comparisons between both domains allow proposing correlations between the Roussillon basin and the Gulf of Lions occidental shelf within respected biostratigraphic knowledge (Clauzon and Cravatte, 1985; Cravatte *et al.*, 1974, 1984; Aguilar *et al.*, 1999; Fauquette *et al.*, 1999). Off-shore – on-shore correlations are not based on geometrical or lithological arguments but on geological events, and they are expressed as variations in sedimentary dynamics. These are identified and put in coherence on a same deposit profile thanks to the stacking pattern between both domains. Four correlations have been determined (Duvail *et al.*, in press) (Figure 2):

(i) the earlier Zanclean (on-shore): sequences 1, 2 and 3 are correlated with systems tract 1, 2 and 3 off-shore;
(ii) the late Zanclean (on-shore): sequences 4 and 6 are correlated with systems tract off-shore 4 and 6, off-shore; system tract 5 is correlated with the downward shift surface, intermediary with sequences 4 and 6;
(iii) the Piacenzian (?): systems tract 7 is limited at its base by the eustatic fall, estimated at 3.8-3.6 My. On-shore, it is likely that the first fluviatile incisions, posterior to the roof of the Pliocene filling, are induced by the eustatic fall of the Zanclean-Piacenzian limit. The first level of fluviatile terrace observed on-shore may correspond to the installation of the prograding systems tract 7;
(iv) the Gelasian (?) - Pleistocene: this period is marked, off-shore, by a tendency of aggradation of system tract 8. In the on-shore domain it shows a base-level falling tendency, underlined by

Figure 3. Correlation between Quaternary and Pliocene deposits of the on-shore and off-shore domains, interpreted in terms of hydrogeological characteristics.

fluviatile incisions and the settling of the alluvial terraces staged system (Clauzon, 1998 ; Le Strat *et al.*, 2001). The existing differences between the two domains correspond to the appearance of a hinge point around which the on-shore domain uplifted and the off-shore domain subsided. The tilting of the margin was described by modelling of the Quaternary systems tract (Rabineau, 2001).

Correlations between data logs and hydrodynamic parameters

Hydrodynamic parameters of the new formations identified are not always known. In order to characterise the hydraulic conductivity (K), the transmissivity (T) and the storage coefficient (S), the numerical logs values numerical, followed by field tests, will be used to obtain the parameters. This extrapolation will be carried out based on a principle of lithological similarity. New extrapolation of parameters will be provided by the geostatistical approach.

Hydrogeological results

The Quaternary aquifer

The Quaternary aquifers are mainly composed of alluviums (conglomerate, flood-plain) and coastal deposits whose geometry is linked to the Pliocene-Quaternary glacio-eustatic variations (Figure 3). Two types of deposits are distinguished:

(i) old and recent banks of stream terraces with gravel and pebbles (Figure 3), for the old banks (average thickness 2 m), and sand, gravel and pebbles for the recent banks (average thickness 5 m);
(ii) Holocene layers corresponding to the last post-glacial sedimentation. The lithology corresponds to a regressive prism composed by sand, clay and marsh facies.

The Quaternary aquifer lies along the main rivers and the coastline. Its thickness varied from 10 m for the sectors located in the upper parts of the valleys (Agly, Têt and Tech) to 20-30 m for the coastal fringe. The porosity of the aquifer is about 7×10^{-2}. This aquifer is confined at the coastal fringe, where its specific storage coefficient varies from 0.1 to 0.4×10^{-5} m^{-1}. The transmissivity values differ according to the sectors: thus, current values in the Têt valley are $4\text{-}5\times10^{-3}$ to $1\text{-}2\times10^{-2}$ m^2/s, with pumping rates going from 50 to 100 and even to 200 m^3/h. In the Tech valley, on the coastal fringe, values are 5×10^{-3} to 10^{-2} m^2/s and even locally higher, whereas at Salanque they are 5×10^{-3} to 2×10^{-2} m^2/s (Chabart, 1996). The coastal part of the Quaternary aquifer associated with the Agly, Têt and Tech valleys is affected by seawater intrusion ($Cl > 300$ mg/L) (Dörfliger, 2003).

The Pliocene aquifer system

The characteristics of the system are linked to the Messinian event: (i) digging out of huge canyons during the Messinian Salinity Crisis (5.9 - 5.3 My), during which the mean sea level dropped down to 1500 m below present mean sea level (pmsl), and (ii) filling-up of these canyons, after the sea level rise up to 80 m

above pmsl (5.3 - 3.8 My) (Hardenbold *et al*, 1998), with the marine and fluvial sands that constitute the two main Pliocene aquifers. The sediments settled according to the "Gilbert delta" genetic model (Figure 4).

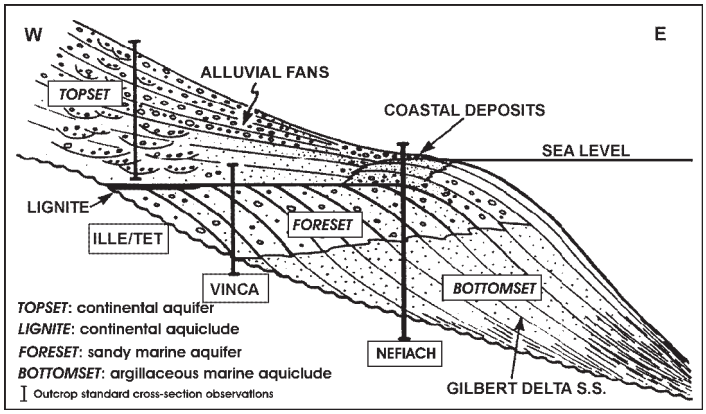


Figure 4. "Gilbert delta" genetic model (Clauzon *et al.*, 1990).

- The continental Pliocene aquifer (topset beds)
Prograding fluvial sands filled the distributary channels of the deltaic complex and covered the marine sands, forming this aquifer. It contains excessive water mineralisation in the northern part of the basin, along the lagoon and even more along the coast at Barcares.

The aquifer is very productive, especially in the Salanque plain, with a transmissivity of 10^{-2} to 3×10^{-2} m^2/s ($T = 10^{-4}$ m^2/s at the edge of the aquifer). It is a confined aquifer with a storage coefficient between 2.2 and 6.4×10^{-5} m^{-1} (Chabart, 1996). Locally there are some connections between the Quaternary and the Pliocene aquifers, mainly because of two reasons:

- leakage from pre-existing borewells;
- incision of the Pliocene aquifer by Quaternary channels (Figure 3). One consequence of the Pliocene subsidence is the shifting of Pliocene sediments (Clauzon, 1990; Duvail *et al.*, 2001).

- The continental Pliocene aquiclude
This aquiclude is located between the continental Pliocene and the marine Pliocene aquifers.
It is formed by diachronous layers of lignite with plants remains alternating with marsh plastic-clays. These layers are not present everywhere: 20 km to the west of Perpignan, lignite layers disappear in several wells and they reappear in the west side of the basin. This fact implies the local connection between the continental and the marine Pliocene aquifers.

- The sandy marine Pliocene aquifer (foreset beds)
Sandy marine Pliocene sediments correspond to the prograding deltaic shoreface. Theoretically, this aquifer is not connected to the sea and it is preserved from seawater intrusion; however, some areas contain highly mineralised water. The origin of the contamination is the vertical leakage from the partially contaminated

Quaternary aquifers to the Pliocene ones, due to the existence of defective boreholes. New boreholes drilled next to the old ones show a strong decrease in the salt content (Dörfliger, 2003).

The sandy marine Pliocene aquifer is characterised by transmissivity values of 10^{-3} to 3×10^{-3} m^2/s (Chabart, 1996) and a storage coefficient of between 0.2 and 1×10^{-5} m^{-1}. In the southwest of the Roussillon plain, the Pliocene aquifer is semi-confined, having a storage coefficient about 5×10^{-2}.

- The Marine Pliocene aquiclude (bottomset beds)
The grain-size distribution decreases with water depth and the marine sands (foreset beds) gradually changes to plastic-blue-clays. As a result, hydraulic conductivity decreases gradually from the on-shore domain to the off-shore domain.

Discussion

According to the previous hydrogeological work carried out in Roussillon (Auroux and Noyer, 1992; Chabart, 1996), three main on-shore aquifers had been identified (Figure 5): (1) the Quaternary aquifer, (2) the Salanque Pliocene aquifer and (3) the deep Pliocene aquifer. The upper aquifer is in contact with the Mediterranean sea and was contaminated by seawater either directly by marine intrusion or as a result of earlier overexploitation. Saline contamination is present in the Salanque Pliocene aquifer as well as due to vertical leakage from the partially contaminated Quaternary aquifer through defective boreholes.

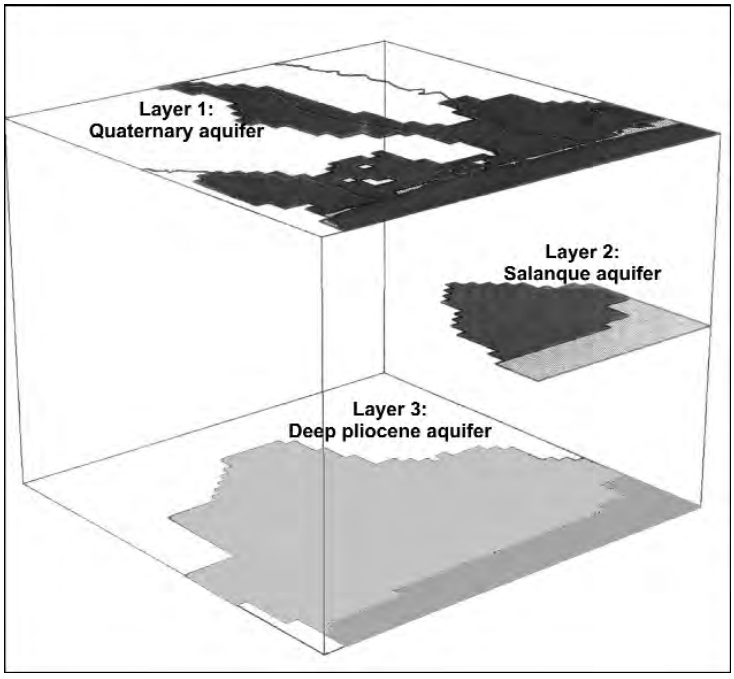


Figure 5. Conceptual model of the Plio-Quaternary aquifer (multi-layers) in Roussillon (Auroux and Noyer, 1992)

The present geological research on the geometry, the structure and the on-shore-off-shore continuum in this area, may require a revision of the groundwater conceptual model: boundary conditions, interconnection between aquifers, new aquifer subdivision within the Pliocene, etc.…

In fact, actual research shows local confusion between the continental Pliocene and the Quaternary aquifers. Moreover, the deep Pliocene aquifers, namely the continental Pliocene aquifer and the marine Pliocene one, are separated by a lignite layer and are independent in part of the Roussillon basin area.

The new fitting of aquifers and aquicludes -according to off-shore and on-shore correlation- will be implemented in a hydrogeological finite difference model. New model results -based on high-resolution geology- will be compared with the classical model (Auroux and Noyer, 1992) in order to determine the influence of high-resolution lithological and geometrical knowledge on groundwater modelling. Sensitivity tests with theoretical groundwater modeling will be carried out in parallel to evaluate the relevance of high-resolution geology.

Conclusions

Contribution to hydrogeology

High-resolution geology of the sedimentary prisms, derived from oil companies, allows a better understanding of the coastal aquifers. It makes possible to have a precise geometry of the aquifers and aquicludes so that the state of relationship (identified connections, compartments) between different aquifers can be precisely known. This knowledge must be integrated at the time of determining new borehole locations. For the existing boreholes already contaminated by saltwater intrusion, high-resolution geology helps to establish the origin of salinity. Indeed, it is possible to determine whether if direct or indirect (e.g. through defective boreholes) connection with seawater exists. Simultaneously, potential submarine spring or basement morphology can be considered.

Applicability of the results

The studied area is a good representation of most of the peri-Mediterranean porous (and also karstic) aquifers, which have, in fact, all undergone the same geodynamic processes and display similar structures. Mediterranean littoral geodynamics is an overall result of the eustatic variations and of the tectonic constraints. Thus, the methodology developed is applicable to most of the Mediterranean coastal areas, particularly to the Pliocene aquifers (linked to filled canyons during the Messinian salinity crisis), and to a lesser extent, to the whole coastal Quaternary aquifers.

Acknowledgements

This study is a part of a PhD at the University of Montpellier II (France), funded by the regional government of Languedoc-Roussillon Septimanie (CPER - Syscolag program) and by the BRGM in the framework of the KARSTEAU project (PDR04EAU01).

References

Aguilar, J.P.; Legendre, S.; Michaux, J. and montuire, S. (1999). Pliocene mammals and climatic reconstruction in the Western Mediterranean area. *In: The Pliocene: Time of Change*. Wren J.H., *et al*. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation: 109-120.

Auroux, F. and Noyer, M.L. (1992). Modèle mathématique de gestion de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon. Modélisation mathématique des risques d'intrusion d'eau marine dans l'aquifère plio-quaternaire. With collaboration of Marchal J.P. and Martin J.C. *BRGM Report*, R34 981LRO4S92. 31 p.

Calvet, M. (1996). Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne ; les Pyrénées Orientales. *Doc. du BRGM*, 255. BRGM, Orléans. 3 t., 1177 p.

Chabart, M. (1996). La recharge de l'aquifère multicouche du Roussillon et les conséquences d'un éventuel changement climatique sur la gestion des ressources en eau (Pyrénées Orientales). *Doc. du BRGM*, 257, BRGM, Orléans. 299 p.

Clauzon, G. (1987). Le détritisme néogène du bassin du Roussillon (Pyrénées orientales, France). *Géol. Alpine, Mém. h.s.*, 13: 427-441.

Clauzon, G. (1990). Restitution de l'évolution géodynamique néogène du bassin du Roussillon et de l'unité adjacente des Corbières d'après les données écostratigraphiques et paléogéographiques. *Paléobiologie continentale*, Montpellier, XVII: 125-155.

Clauzon, G. (1998). L'impact des variations eustatiques du bassin de Méditerranée occidentale sur l'orogène alpin depuis 20 Ma. *Et. Géogr. Phys.*, XXVIII - 1999. Conference acts "La montagne méditerranéenne" 8 - 10 october 1998, Aix-en-Provence: 33-40.

Clauzon, G. and Cravatte, J. (1985). Révision chronostratigraphique de la série marine traversée par le sondage Canet1 (Pyrénées-Orientales, France) : contribution à l'histoire néogène du bassin du Roussillon. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 301, II, (19): 1351-1354.

Clauzon, G.; Aguilar, J.P. and Michaux, J. (1987). Le bassin pliocène du Roussillon (Pyrénées–Orientales, France): exemple d'évolution géodynamique d'une ria méditerranéenne consécutive à la crise de salinité messinienne. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 304, II, (11): 585-590.

Clauzon, G.; Suc J.P.; Aguilar, J.P.; Ambert, P.; Cappetta, H.; Cravatte, J.; Drivaliari, A.; Domèneh, R.; Dubar, M.; Leroy, S.; Martinell, J.; Michaux, J.; Roiron, P.; Rubino, J.L.; Savoye, B. and Vernet, J.L. (1990). Pliocene geodynamic and climatic evolutions in the French Mediterranean region. IX Cong. R.C.M.N.S. *In*: *Iberian Neogene Basins*, *Paleontologia i Evolucio*, Sabadell, Mem. Sp. 2: 133-186.

Clauzon, G.; Rubino, J.L. and Savoye, B. (1995). Marine Pliocene Gilbert-type fan deltas along the French Mediterranean coast. A typical infill feature of preexisting subaerial Messinian canyons. *16 th IAS Regional Meeting of Sedimentology, 5ème Congrès Français de Sédimentologie, Field Trip Guide Book*, Publ. ASF, Paris, 23: 145-222.

Cravatte, J.; Dufaure, P.; Prim, M. and Rouaix, S. (1974). Les sondages du Golfe du Lion : stratigraphie et sédimentologie. *Notes et Mém. C.F.P.*, 11: 209-274.

Cravatte, J.; Mattias, I. and Suc, J.P. (1984). Nouvelles recherches biostratigraphiques sur le Pliocène du Roussillon. *Géologie de la France*, 1-2:149-163.

Cross, T.A. (1988). Controls on Coal Distribution in Transgressive-regressive cycles, Upper Cretaceous, Western Interior, U.S.A. – *Soc. Econ. Paleont. Miner.*, Sp. Publ., 42: 371-380.

Dörfliger, N. (2003). The State of the French Mediterranean coastal aquifers. *Coastal aquifers intrusion technology: mediterranean countries.* Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 8(II): 187-206.

Duvail, C.; Le Strat, P. and Bourgine, B. (2001). Atlas géologique des formations plio-quaternaires de la plaine du Roussillon (Pyrénées Orientales). *BRGM report*, RP-51197-FR. 44 p.

Duvail, C. and Le Strat, P. (2002). Architecture et géométrie haute résolution des prismes sédimentaires plio-

quaternaires au droit du Roussillon suivant un profil terre-mer. With collaboration of Gorini C., Lofi J. and G. Clauzon; *BRGM report*, RP-51972-FR, 71 p.

Duvail, C.; Gorini, C.; Lofi, J.; Le strat, P.; Clauzon, G. and Dos Reis, A.T. (in press) Correlation between on-shore and off-shore Pliocene-Quaternary systems tracts below the Roussillon Basin (eastern Pyrenees, France). *Marine and Petroleum Geology*.

Fauquette, S.; Suc, J.P.; Guiot, J.; Diniz, F.; Feddi, N.; Zheng, Z.; Bessais, E. and Drivaliari, A. (1999). Climate and biomas in the West Mediterranean area during the Pliocene. *Palaeogeography, Palaeoclimaty, Palaeoecology*. 152: 15-36.

Galloway, W.E. (1989). Genetic Stratigraphic Sequences in Basin Analysis: Architecture and Genesis of Flooding-surface Bounded Depositional Units – *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 73: 125-142.

Guillocheau, F. (1991). Modalités d'empilement des séquences génétiques dans un bassin de plate-forme (Dévonien Armoricain) : nature et distorsion des différents ordres de séquences de dépôts emboîtées. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 15, 2: 383-410.

Hardenbol, J.; Thierry, J.; Farley, M.B.; Jacquin, T.; de Graciansky, P.C. and Vail, P.R. (1998). Mesozoic and Cenozoic Sequence Chronostratigraphic Chart. Mesozoic and Cenozoic Sequence Chronostratigraphic Framework of European Basins. *In*: de Graciansky P.C., Hardenbol J., Jacquin T., Vail P.R. (eds), Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins, *Society for Sedimentary Geology*, Spec. Publ., 60: 3-13.

Homewood, P.; Guillocheau, F.; Eschard, R. and Cross, T.A. (1992). Corrélations haute résolution et stratigraphie génétique : une démarche intégrée. *Bull. Centre Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 16: 357-381.

Homewood, P.W.; Mauriaud, P. and Lafont, F. (1999). Best practices in Sequence Stratigraphy for explorationists and reservoir engineers. [Vade-mecum de Stratigraphie Séquentielle pour géologues, géophysiciens et ingénieurs réservoir]. *Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod.*, Mem. 25. 81 p.

Labaune, C.; Tesson, M. and Gensous, B. (2003). Architecture des dépôts post-glaciaires du littoral du "Roussillon": lagune, cordon et plate-forme interne. *9ème Congrès des Sédimentologues Français* – 14-16 October 2003 – abstracts book, ASF publ. 38 - Bordeaux. 285 p.

Le Strat, P.; Duvail, C. and Clauzon, G. (2001). Presentation of BRGM cartography work in the Roussillon basin since 1996. *In:* "GDR marges" workshop "Messinien dans le Golfe du Lion", Perpignan, France, 7-10 September 2001.

Posamentier, H.W. and Vail, P.R. (1988). Eustatic controls on clastic deposition II – Sequence and systems tract models. *In*: Sea level changes – An integrated approach. Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G. St. C., Posamentier H., Ross C.A., Van Wagoner J. (eds.), *Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ.*, 42: 125-154.

Posamentier, H.W.; Jervey, M.T. and Vail, P.R. (1988). Eustatic control on clastic depositions I - Conceptual framework. *In*: Sea level changes – An integrated approach. Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G. St. C., Posamentier H., Ross C.A., Van Wagoner J. (eds.), *Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Publ.*, 42: 109-124.

Rabineau, M. (2001). Un modèle géométrique et stratigraphique des séquences de dépôt quaternaires sur la marge du Golfe du Lion : Enregistrement des cycles climatiques de 100 000 ans. PhD, University of Rennes 1. 480 p.

Serra, O. (1985). Diagraphies différées, bases de l'interprétation. 2: Interprétation des données diagraphiques. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, Mém. 7.

Vail, P.R.; Mitchum, R.M. Jr; Todd, R.G.; Widmier, J.W.; Thomson, S.; Sangree, J.B.; Bubb, J.N. and Hatlelid, W.G. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Payton CE (eds.). Seimic Stratigraphy: Application to hydrocarbon Exploration, *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 26: 49-212.

Van Wagoner, J.C.; Posamentier, M.W.; Mitchum, R.M. Jr.; Vail, P.R.; Sarg, J.F.; Loutit, T.S. and Hardenbol, J. (1988). An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. *In*: Sea level changes – An integrated approach. Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G. St. C., Posamentier H., Ross C.A., Van Wagoner J. (eds.), *Soc. Econ. Paleontol. Mineral.*, *Spec. Publ.*, 42: 39-46.

2. Les unités sédimentologiques du bassin du Roussillon

La figure 16 synthétise l'organisation et la répartition des unités sédimentologiques au sein du bassin du Roussillon. Les unités sont regroupées en fonction de leur âge : socle, Miocène, Pliocène et Quaternaire.

En ce qui concerne les abréviations relatives aux unités sédimentologiques, elles sont listées dans le tableau ci-dessous :

Abréviations	Signification
…C ou …cont	continental
…Pl	plaine d'inondation
PT…	prisme transgressif
…pal	palustre
…sab	sableux
…arg	argileux
…Q	Quaternaire
Mio	Miocène

Tableau 1 - Abréviations relatives aux unités sédimentologiques

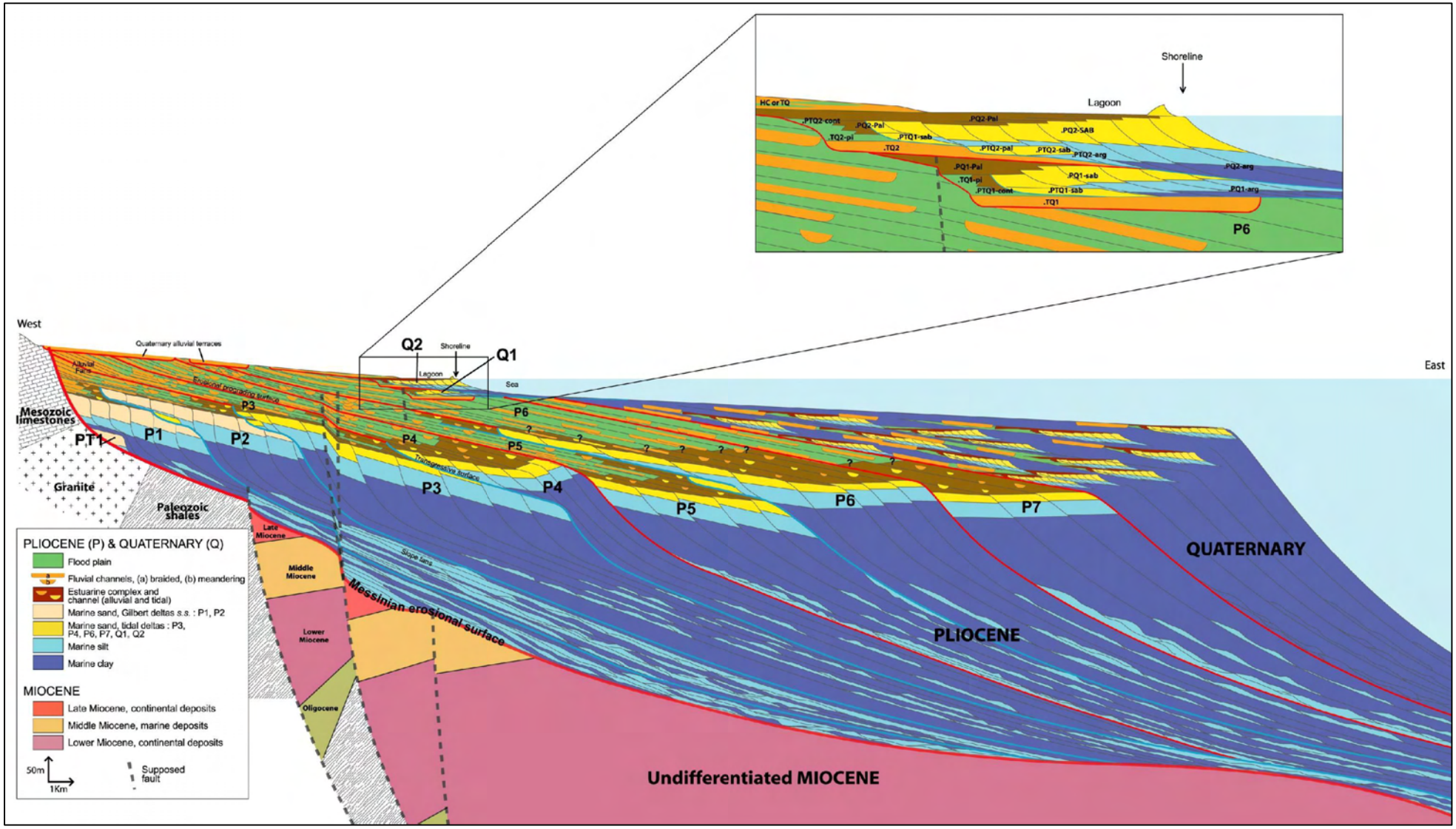


Figure 16 - Coupe géologique illustrant le schéma conceptuel de la plaine du Roussillon
[Aunay et al., sous presse ; Duvail, à paraître]
Les lignes temps isochrones sont représentées par les traits gras rouges (surface de progradation) et bleus (surface de transgression)

2.1. Le socle et le Miocène

Le socle, déjà présenté au début du chapitre II et ne présentant pas un grand intérêt dans le cadre de l'étude hydrogéologique, sera considéré en tant qu'encaissant, sans distinction particulière.

Le Miocène est structuré par de grands accidents liés à l'effondrement de la marge lors de l'ouverture de la Méditerranée. Les observations de ces unités sont principalement effectuées sur profils sismiques. Dans le bassin du Roussillon, il est subdivisé en trois unités sédimentologiques :

> le Miocène inférieur (24-16 Ma) : sédiments continentaux dont les matériaux constitutifs sont de plaines d'inondation et de quelques chenaux cimentés, affleurant à Vivès dans la vallée du Tech. Il est considéré comme très faiblement perméable ;

> le Miocène moyen (16-11 Ma) : sédiments marins de type molassique ou sableux, possédant des propriétés aquifères possibles dans la zone de Pia [Ladouche *et al.*, 2003] ;

> le Miocène supérieur (11-6 Ma) : sédiments continentaux, reconnus dans la vallée de l'Hérault et souvent associés à un événement tectonique daté du Tortonien.

Avec peu de forages et sans datation, l'information géologique du Miocène reste clairsemée et hypothétique dans le bassin du Roussillon. Seuls quelques forages sur le pourtour du bassin du Roussillon seraient susceptibles d'exploiter de manière concomitante les terrains d'âge pliocène et miocène. Sur d'autres secteurs, tel que le forage d'Argelès ayant atteint 400 m de profondeur (**10976x0002/F**), aucune venue d'eau n'est identifiée au delà de 200 m, limite entre le Pliocène et le Miocène. En conséquence, l'ensemble de ces unités sédimentologiques ne sera pas pris en considération lors de la conceptualisation hydrogéologique.

2.2. Le Pliocène

Les unités sédimentologiques du Pliocène occupent la plus grande partie du remplissage du bassin du Roussillon. Le contexte géodynamique particulier postérieur à la crise de salinité messinienne [Hsü *et al.*, 1973] confère une organisation particulière des corps sédimentaires. Ces derniers se définissent selon la trilogie classique des Gilbert deltas [Gilbert, 1890] (figure 4 de la note SWIM), de la zone distale à proximale : (i) **bottomset** beds argilo-silteux marins ou **P**liocène **M**arin **A**rgileux -PMA-, (ii) **foreset** beds sableux, marins ou **P**liocène **M**arin **S**ableux -PMS- et (iii) **topset** beds conglomératique à argileux, continentaux ou **P**liocène **C**ontinental -PC-. Un quatrième corps sédimentaire a été identifié : les horizons **palustres** qui séparent le PMS du PC. Souvent constitué d'argiles, de débris de végétaux et d'inter-lits sableux, le contexte de sédimentation était celui d'un environnement similaire aux étangs littoraux actuels.

L'ensemble de ces corps sédimentaires est décrit dans la note insérée ci-dessus [Aunay *et al.*, 2004]. Les éventuelles évolutions conceptuelles seront décrites dans les paragraphes suivants.

Sur la figure 16 (ci-dessus), le Pliocène est subdivisé en plusieurs prismes : PT1 et P1 à P7.

> à la fin de la crise de salinité messinienne (5.3 Ma), les canyons messiniens sont noyés et sont transfigurés en profondes rias. La sédimentation zancléenne débute principalement par le comblement de ces rias. **PT1** correspond au premier Prisme Transgressif fossilisé lors de la remise en eau de la Méditerranée. Le PT1 a été identifié à proximité des limites du bassin. Les systèmes distaux du prisme PT1 ont aussi été déterminés dans le fond du bassin, dans les forages d'Elne et Canet ;

> lorsque le niveau marin est stabilisé à +80 m NGF [Hardenbol *et al.*, 1998], le facteur prépondérant de la sédimentation dans les rias est constitué par l'apport détritique (peu d'influence maritime). Les prismes **P1** et **P2** illustrent cette sédimentation dominée par la dynamique gravitaire. Ils sont dénommés dans notre cas d'étude Gilbert delta *s.s* ;

> puis, le comblement du bassin se propage depuis les bords du bassin (amont de la Têt et du Tech) vers la mer ouverte. En conséquence, les zones de dépôt-centre avancent successivement depuis l'Ouest vers l'Est. Lors de ce déplacement, la sédimentation évolue depuis des termes de sédimentation en milieu assez fermé (P1 et P2 - Gilbert delta *s.s*), vers des termes plus marins, dominés par la houle : **P3**, puis tidaux : **P4** à **P7**.

D'après les concepts de Homewood *et al*. [2002], l'organisation de P1, P2 et P3 est caractérisée par la progradation des corps sédimentaires ; cette dynamique relève d'une stabilité du niveau marin et d'une sédimentation à l'accomodation couplée à un fort flux de sédiments. Lors de la mise en place de P4, la tendance à l'aggradation se développe. Les origines peuvent être multiples et se conjuguer : augmentation de l'accomodation[1] (liée à la subsidence croissante ou à la baisse énergétique du flux de sédiments). Un retour temporaire de la sédimentation à l'accomodation est observable sur le prisme P5 ; puis cette tendance cesse avec une croissance de l'accommodation afin d'aboutir, cette fois à une sédimentation en rétrogradation (P6). Enfin, le dernier prisme retrouve une dynamique progradante.

Les prismes le plus distaux, P6 et P7, n'ont pas été reconnus en forage dans la plaine du Roussillon.

Avant de préciser la lithologie des différents prismes, rappelons que la sédimentation du PC, du PMS et du PMA est synchrone le long d'un même profil de dépôt. En conséquence, à l'intérieur d'un même prisme, la transition entre PMS et PMA correspond à une limite "diffuse". Par opposition, cette limite peut-être nette dans le cas de superposition ou d'emboîtement de plusieurs prismes. En formalisant ces exemples, deux types de surfaces remarquables sont mis en évidence : (i) les surfaces isochrones, qui limitent des ensembles de même âge tels que prismes sédimentaires montrant le passage graduel des faciès au sein des unités de temps (corps sableux et argileux contemporains des formations fluviatiles) et (ii) les surfaces diachrones, qui limitent des ensembles de même environnement de dépôt et de même lithologie tels que les formations marines sableuses des formations continentales. La première limite diachrone identifiée dans le Roussillon différencie les corps marins des corps continentaux : la surface de Transition Marin / Continental [Clauzon, 1990]. Les déformations de cette surface, initialement horizontale car en adéquation avec un niveau marin stable dans le Roussillon, mettent en évidence compaction, subsidence ou tectonique.

[1] Accommodation : espace (volume) total disponible pour emmagasiner du sédiment ; en domaine marin peu profond, cela correspond en première approximation au volume délimité entre le niveau de la mer et le substrat au début de la sédimentation [Homewood *et al*., 2002].

a. Pliocène Marin Argileux - marine Pliocene aquiclude (bottomset beds)

Sur la figure 16, le corps sédimentaire du PMA est subdivisé en deux unités sédimentologiques : les silts marins et les argiles marines. Les silts marins se localisent, d'une part, dans la zone de transition entre PMA et PMS (limite diachrone diffuse) et, d'autre part, au sein même du PMA. La mise en place par glissement gravitaire justifie la présence de sédiments plus grossiers piégés dans des formations à granulométrie fine.

Ce phénomène a été observé dans de nombreux forages du Roussillon, où certains corps sableux métriques coexistent au sein de formations argileuses homogènes pluridécamétriques. Ces corps sableux, bien que souvent crépinés lors de la réalisation du forage, s'avèrent ensuite non productifs, car isolés au sein de formations peu perméables et ne présentent pas d'intérêt hydrogéologique.

b. Pliocène Marin Sableux - Sandy marine Pliocene aquifer (foreset beds)

Les unités sédimentologiques du PMS sont distinguées en fonction de la dynamique des modalités d'empilement. Les particularités de faciès des unités distales sont difficiles à déterminer en raison de l'absence d'affleurement ou même de forage. Sur la figure 16, les prismes "PT1, P1 et P2" sont regroupés sous le faciès de Gilbert deltas *s.s.*, ce qui correspond à une granulométrie plus grossière et à des pendages lithologiques beaucoup plus marqués que pour les prismes tidaux P4 à P7.

c. Horizons palustres - Continental Pliocene aquiclude

Ces horizons marquent la limite diachrone "Transitionnel Marin Continental", c'est-à-dire la limite entre le PC et le PMS. Pour plus de clarté et pour des questions d'échelle, les horizons palustres ne sont pas représentés sur la figure 16. Néanmoins, chaque prisme (P1 à P5) comporte un horizon palustre localisé au toit des faciès marins.

d. Pliocène Continental - Continental Pliocene aquifer (topset beds)

L'ensemble des formations du PC est regroupé au sein d'un même corps sédimentaire quel que soit le prisme contemporain de la sédimentation (P1? P2? ou P3?...). En effet, il n'a pas été possible d'appliquer une méthodologie efficace afin de distinguer ces prismes sédimentés en milieu continental. En conséquence, des propriétés hydrodynamiques différentes peuvent être attendues au sein du Pliocène continental, qui regroupe le PC des prismes P1 à P7.

Toutefois, au sein de l'alternance entre chenaux et plaine d'inondation, des faciès spécifiques ont pu être identifiés : les réseaux tresses sont distingués des réseaux méandriformes.

2.3. Le Quaternaire

Les prismes deltaïques zancléens ont été incisés par des érosions fluviatiles successives formant un système de terrasses alluviales étagées, conjuguées à des prismes marins. Des incertitudes subsistent sur l'âge des formations ainsi que sur leur dynamique sédimentaire.

La figure 16 (ci-dessus, p. 68) présente le schéma conceptuel sédimentaire des formations quaternaires. Ce schéma a été adopté mais n'a pu être confirmé sur l'ensemble du bassin. Il reste donc hypothétique et notamment en ce qui concerne l'extension spatiale du double prisme quaternaire[1]. Ce dernier a uniquement été identifié en Salanque. Un forage stratigraphique pourvu de datations est à l'étude dans cette zone afin de lever les incertitudes relatives à l'organisation et à l'architecture des sédiments quaternaires.

a. Le Quaternaire - Pléistocène et Holocène marin indifférencié

La lithologie des systèmes pléistocènes s'apparente à celle des prismes pliocènes : des ensembles conglomératiques continentaux associés à des prismes sableux devenant argileux. Deux systèmes de ce genre ont pu être identifiés localement dans le bassin du Roussillon.

Les ensembles conglomératiques de type terrasses étagées sont dénommés TQ1 puis TQ2 (ou TQ lorsqu'il n'existe qu'un seul ensemble). Les prismes marins associés à ces terrasses, ainsi que les horizons palustres, sont désignés comme PQ1 et PQ2. Localement, dans la zone du Barcarès, le prisme transgressif antérieur à l'ensemble Q2 a pu être identifié ; il est désigné sous le terme PTQ2.

b. L'Holocène continental

Les sédiments holocènes sont composés par les alluvions des cours d'eau (conglomérat - sable) et par les dépôts des plaines d'inondation (silts beiges). Ils sont liés à la dernière transgression enregistrée il y a 8 000 ans environ.

[1] Le Quaternaire est composé de deux étages : Pléistocène et Holocène

*

* *

L'apport de la connaissance géologique

La figure 17 (ci-dessous) illustre l'importance du choix des concepts de corrélation : les mêmes données de puits peuvent conduire à trois interprétations géologiques différentes [Homewood *et al*., 2002]. Dans le cadre de la présente étude, les corrélations de stratigraphie séquentielle, prenant en considération l'accommodation et l'apport sédimentaire, sont appliquées à l'ensemble des forages du Roussillon (cas n°3 de la figure 17). Le principe du partitionnement volumétrique met en évidence les différences de sédimentation spatio-temporelle réparties le long du profil de dépôt. De manière explicite, les sédiments fossilisés lors d'une hausse relative du niveau marin seront plutôt continentaux tandis que ceux préservés lors d'une baisse du niveau marin seront de type tidal en raison de l'érosion plus marquée.

La figure 17 met aussi l'accent sur l'importance qui doit être accordée à la qualité des interprétations géologiques en termes d'exploitation et de gestion des ressources en eau. De même, la modélisation d'aquifères tabulaires homogènes (cas n°1 de la figure 17) ne prendra pas les mêmes hypothèses de départ qu'une modélisation d'aquifères sous la forme de prismes discontinus et hétérogènes (cas n°3 de la figure 17).

Dans le cas du Roussillon, la figure 8 (p. 39) illustre les limites des corrélations lithostratigraphiques, tandis que la figure 16 (p. 27) présente un modèle conceptuel géologique issu des concepts de stratigraphie séquentielle. Bien que certaines incertitudes persistent, ce modèle conceptuel récent permet d'incrémenter la connaissance hydrogéologique, notamment en ce qui concerne les interactions entre aquifères, la continuité des aquifères et la distribution des faciès.

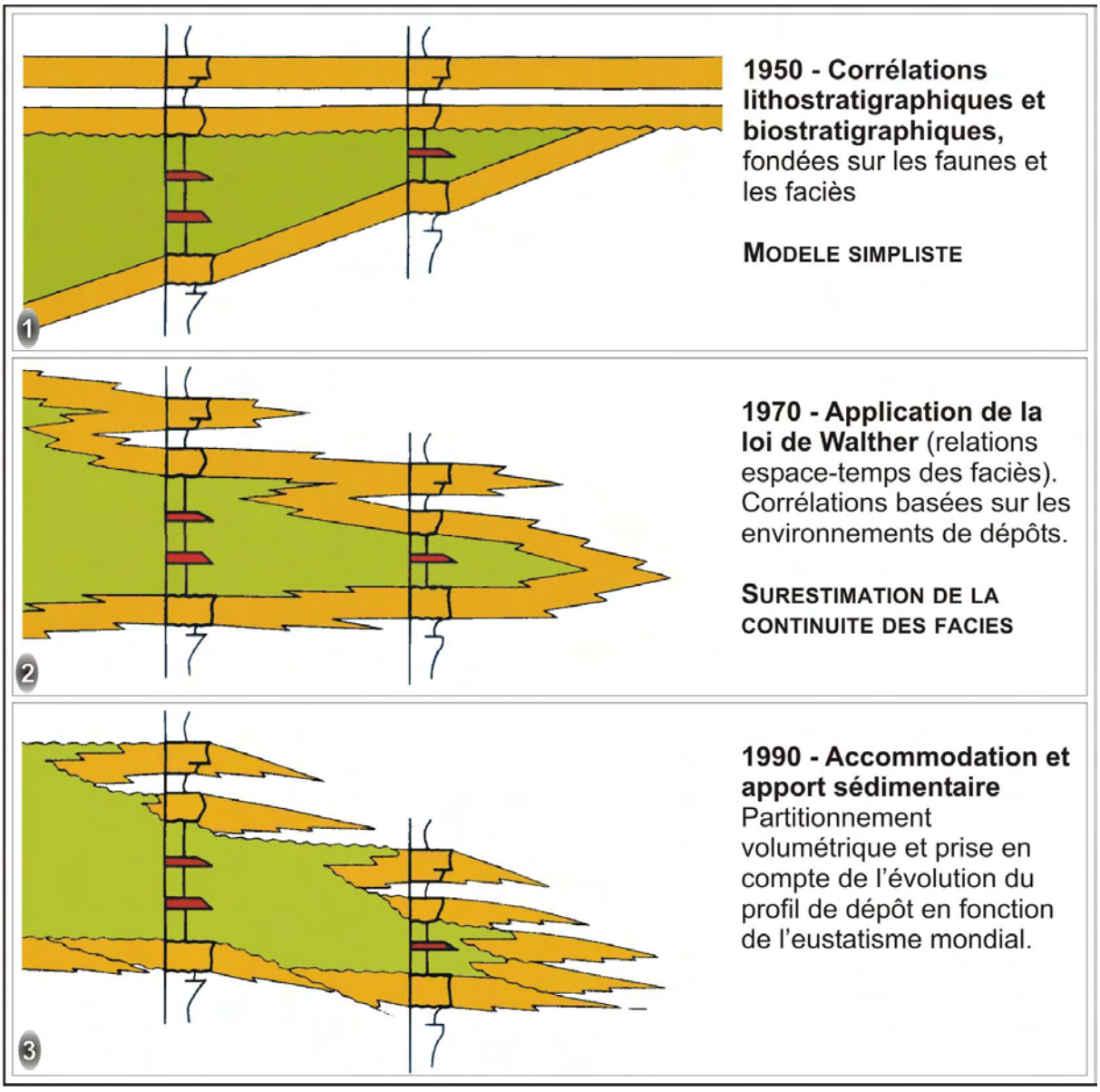


Figure 17 - Concepts de corrélation géologique
[Homewood et al., 2002]

Chapitre IV

Formulation du modèle géologique haute-résolution sous forme d'une base de données

Une Base de Données (BD) est un ensemble structuré et organisé permettant le stockage de grandes quantités d'informations afin d'en faciliter l'exploitation (ajout, mise à jour, recherche de données…). L'élaboration d'une BD géologiques s'est avérée indispensable afin de structurer l'ensemble des interprétations géologiques menées dans le Roussillon par C. Duvail.

1. La base de données géologiques

1.1. Conception

Dans un premier temps, une "BD orientée objet" a été préférée afin de répondre aux besoins. Dans une telle organisation, les données sont représentées sous forme d'objets. Les forages et sondages du Roussillon constituent les objets de la BD. Chaque objet (forage) contient des données de description et des états classés hiérarchiquement : "Pliocène" => "P3" => "P3arg" => "P3arg faciès silt".

Dans un second temps, les informations de chaque forage ont été organisées sous la forme d'une BD géographique (SIG) afin de spatialiser l'information géologique. L'extension de la BD objet géologique vers un SIG s'est effectuée en intégrant la structure de la **B**anque du **S**ous-**S**ol du Brgm -BSS-. Cette dernière inclut déjà de nombreuses informations organisées sous forme de "points" (pas de polygone, ni de ligne) :

- identification du point : indice BSS[1], désignation (par ex : "F4") ;
- localisation : coordonnées spatiales, commune d'appartenance, n° INSEE, lieu-dit… ;
- informations sur le point : nature de l'ouvrage (forage, sondage…), profondeur atteinte, propriétaire… ;
- informations connexes au point : documents disponibles, auteurs, dates de saisie / mise à jour, état de l'ouvrage…

Les saisies de la BD ont été effectuées sous un tableur (Excel), celui-ci permettant d'effectuer simultanément opérations de calcul et vérifications. De plus, l'exportation et l'importation des données de ce logiciel depuis un logiciel de SIG (Map Info dans notre cas) restent aisées. Ce paramètre de flexibilité permet de vérifier régulièrement la cohérence spatiale des informations saisies dans la base.

[1] L'indice BSS est un code alphanumérique possédant quatre groupes d'informations. Par exemple, pour l'indice **1097-1X-0187/F3** : le premier nombre (**1091**) correspond au numéro de la carte au 1/50 000 (couverture de la France IGN ou couverture géologique Brgm) sur laquelle le point est localisé. Chaque carte est divisée en huitième : le second nombre (**1**) correspond au huitième sur lequel le point est localisé. "**X**" est une constante. **0187** signifie que le point est le 187ème saisi sur ce huitième. "**F3**" est la désignation du point (en général le nom donné par le maitre d'ouvrage). Cette dernière information est facultative pour l'identification d'un point de la BSS.

1.2. Contenu de la base de données géologiques

Les figures 18 et 19 (ci-dessous) présentent la structure, le contenu et la mise en forme de la BD géologiques. La profondeur du toit, du mur (ou du mur non atteint) pour chaque unité sédimentologique et des descriptions de faciès sont intégrés à la BD. Des informations supplémentaires, organisées sous le terme "remarques", sont insérées lorsque les forages présentent des caractéristiques uniques, non intégrables dans la structure de la BD.

Cette base recense les forages pourvus d'une information géologique pertinente (diagraphie ou log détaillé) mais aussi l'ensemble des forages sur lesquels des investigations hydrogéologiques ont été menées (pompages d'essais, analyses chimiques...).

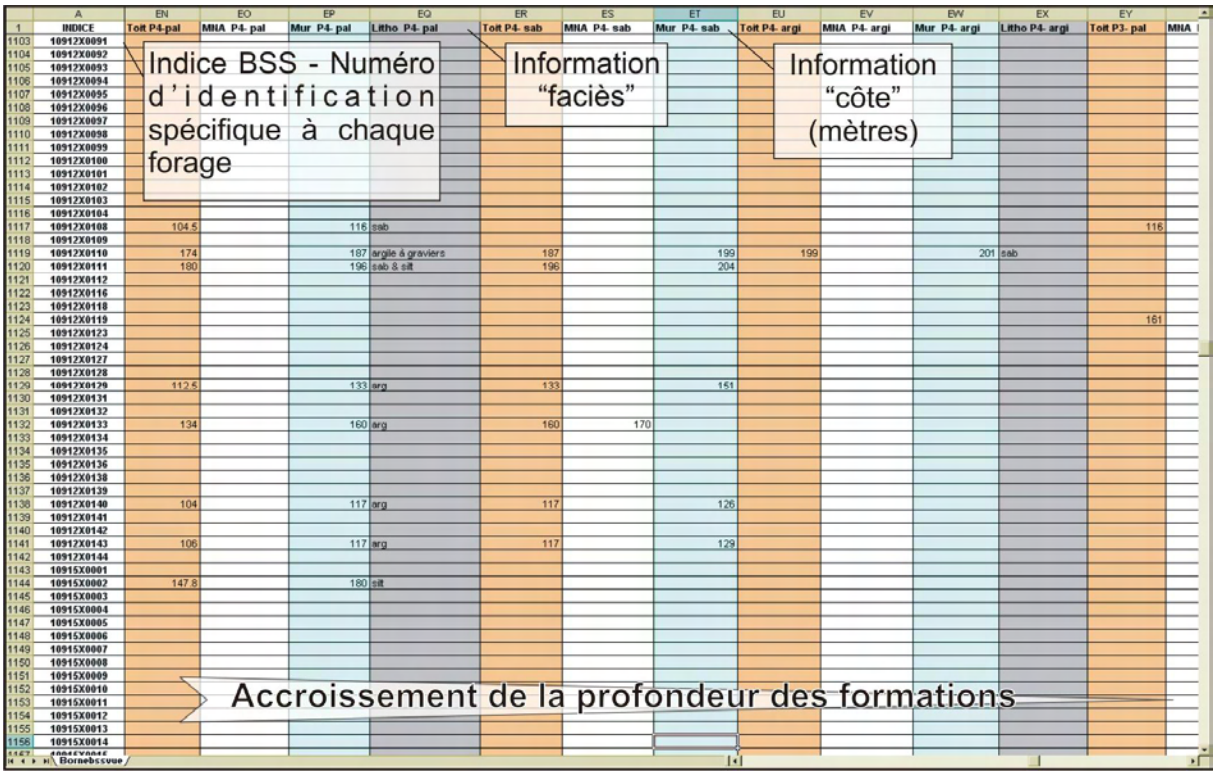


Figure 18 - Copie d'écran de la base de données géologiques
Un code couleur a été adopté afin de simplifier la saisie et la lecture

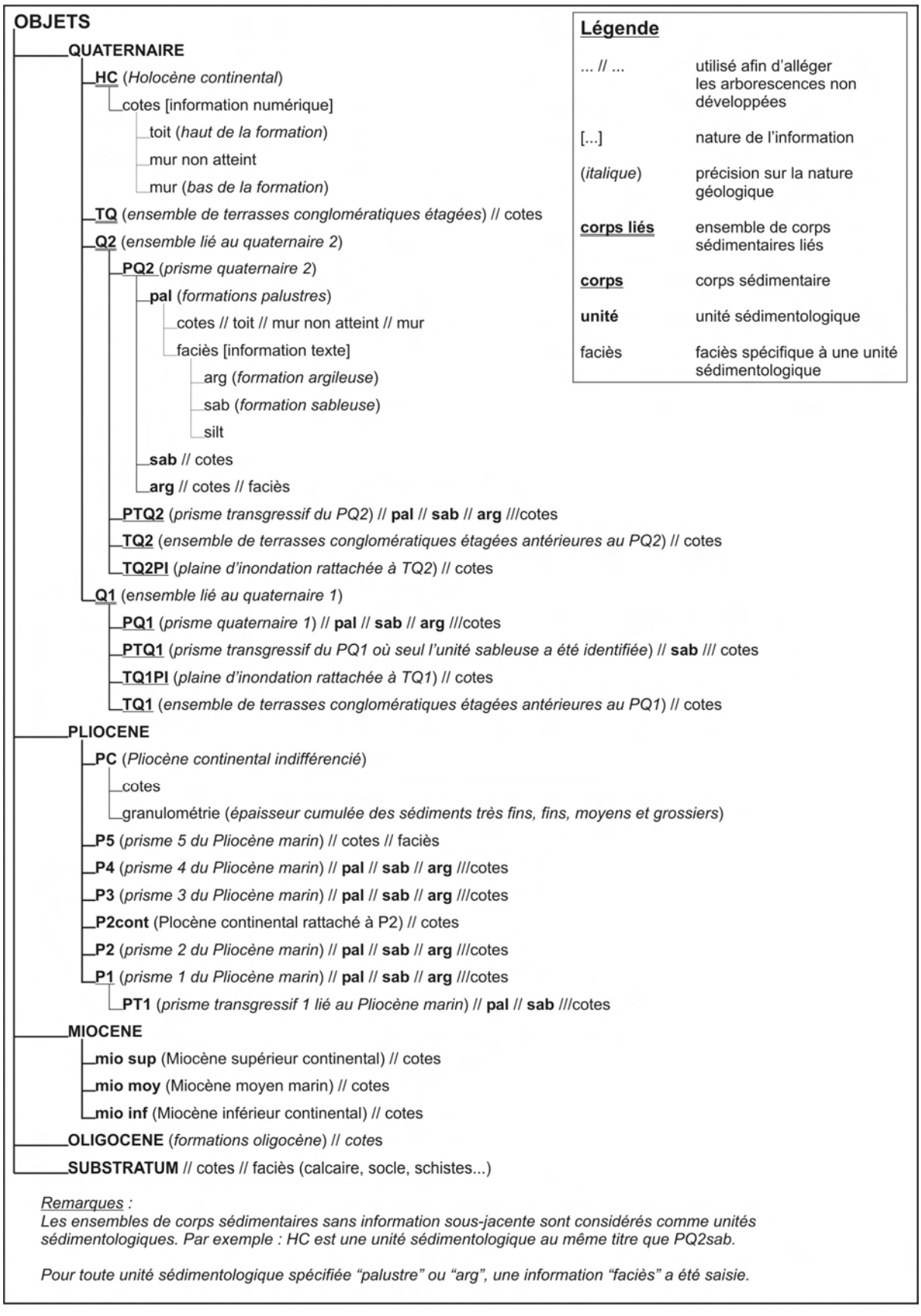


Figure 19 - Structure et contenu de la base de données géologiques
Les informations issues de la BSS sont masquées

1.3. Contrôle des informations saisies – domaine de validité

Le contrôle des informations saisies représente une phase importante qui fait suite à l'élaboration de la BD. Différentes méthodes de contrôle automatique ou manuel ont été élaborées. Elles visent, soit à vérifier la saisie de l'opérateur, soit à contrôler les informations issues de la BSS[1] :

> vérification automatique de la croissance des profondeurs dans la BD (sur la figure 18, ci-dessus, les unités sédimentologiques s'approfondissent de la gauche vers la droite en raison de leur superposition successive) ;

> insertion de la date de saisie sous le tableur afin de revenir facilement sur des problèmes antérieurs (*eg* : décalage de ligne ou de colonne) ;

> comparaison du nombre de valeurs (nombre de valeurs "toit" = nombre de valeurs "mur non atteint" + "mur") ;

> comparaison de la profondeur lue sur les documents utilisés lors de la saisie et de la profondeur du point BSS (formule automatique sous tableur) ;

> comparaison de l'altitude du point de la BD (extraction à partir du MNT[2]) et de l'altitude du point BSS ;

> vérification visuelle de la cohérence spatiale des informations saisies (élaboration de cartes par unité sédimentologique).

1.4. La base de données en chiffres

La BD géologiques est constituée de 566 lignes correspondant au nombre de points bénéficiant d'une information géologique. Cette information géologique se répartit dans 145 colonnes (plus de 200 en intégrant la structure de la BSS). Ces 145 colonnes abritent les cotes et faciès de 38 unités sédimentaires.

Le tableau 2 synthétise les saisies de la BD géologiques : 5406 informations ont été intégrées dans la BD dont 3816 informations de cotes et 1590 informations faciologiques. Les faciès ne sont pas précisés lorsque l'unité sédimentologique est considérée comme "homogène" (*eg* : le faciès de P4sab est uniquement sableux). Certains "murs" de points n'ont pu être interprétés en raison d'une basse qualité des documents géologiques. Pour la même raison, certains faciès n'ont pu être déterminés.

[1] Bien que la BSS fasse l'objet de nombreux contrôles, certains points comportent encore des erreurs. Toutefois, au cours de l'élaboration de la BD géologique, ces erreurs ont été corrigées sur les fichiers sources du Brgm.

[2] La précision du MNT utilisé ("BD alti" de l'IGN) est de l'ordre de 10 mètres en Z pour un pas de 50 mètres.

	Unités sédimentologiques	Nombre de cote **TOIT**	Nombre de cote **MNA**	Nombre de cote **MUR**	Faciès	Total d'info. "cotes"
1	HC	167	3	164		334
2	PQ2pal	33	0	33	33	66
3	PQ2sab	106	2	104		212
4	PQ2arg	32	0	32	31	64
5	PTQ2pal	19	0	19	19	38
6	PTQ2sab	57	0	57		114
7	PTQ2arg	4	0	4		8
8	TQ	276	9	267		552
9	TQ2-PI	5	0	5		10
10	TQ2	55	3	52		110
11	PQ1pal	32	14	18	31	64
12	PQ1sab	57	2	55		114
13	PQ1arg	64	42	22	62	128
14	PTQ1sab	12	0	12		24
15	TQ1-PI	8	0	8		16
16	TQ1	10	2	8		20
17	PC (3pts pas interp.)	357	153	201	1081	711
18	P5	9	0	9	9	18
19	P4pal	69	16	53	66	138
20	P4sab	40	7	33		80
21	P4arg	23	3	20	20	46
22	P3pal	94	18	76	92	188
23	P3sab (1 pt pas interp.)	114	38	75		227
24	P3arg	66	46	20	61	132
25	P2cont	4	2	2		8
26	P2pal	12	2	10	12	24
27	P2sab	46	6	40		92
28	P2arg	36	23	13	33	72
29	P1pal	3	2	1	3	6
30	P1sab	15	3	12		30
31	P1arg	15	8	7	13	30
32	PT1pal	1	0	1	1	2
33	PT1sab	3	0	3		6
34	Mio sup.	17	10	7		34
35	Mio moy.	14	5	9		28
36	Mio inf.	8	1	7		16
37	Oligo	4	2	2		8
38	Sub	23	23	0	23	46
	TOTAL (= 5406)	**1910**	**445**	**1461**	**1590**	**3816**

Tableau 2 - Inventaire des informations saisies dans la base de données géologiques

2. Répartition spatiale des unités sédimentologiques

Le présent travail de thèse n'ayant pas pour objectif l'interprétation générale des données géologiques, seules quelques observations sont consignées ci-dessous. De plus, la partie suivante, traitant des liens entre géologie et hydrogéologie, abordera l'information géologique de manière ponctuelle.

2.1. Géométrie des unités sédimentologiques

Les données brutes ont été regroupées par unités sédimentologiques et figurent en annexe sous forme de cartes de profondeur, par rapport au sol[1], et d'épaisseur. Lorsque l'échantillon d'observations est suffisamment important, un histogramme est présenté afin d'apprécier la distribution des valeurs. Ces cartes sont riches d'informations au point de vue sédimentologique. Différentes observations et remarques sont listées ci-dessous :

> l'unité sédimentologique Holocène continental (HC) affleure toujours (figure 20), c'est-à-dire que le toit de la formation correspond à la topographie ;

> les deux prismes Quaternaire marin se développent dans une bande de cinq à dix kilomètres de large à partir du littoral. Leur limite d'extension est soulignée sur la figure 21. Le prisme 1 se développe uniquement en Salanque, tandis que le prisme 2 occupe tout le littoral de la plaine du Roussillon ;

> la subsidence Pléistocène en Salanque, mise en évidence par Duvail *et al*. [2001], apparaît de manière moins significative sur les données de la BD géologiques. Toutefois, la superposition des prismes 1 et 2 du Quaternaire marin permet d'expliquer l'épaisseur anormalement forte du Pléistocène (figure 21). Cette superposition a été reconnue en Salanque et sur le lido de l'étang de Salses-Leucate ;

> le toit du Pliocène continental apparaît comme une surface plane pentée vers l'Est (figure 22). Seule la zone de la Salanque est caractérisée par une dépression marquant vraisemblablement (i) la première incision quaternaire, antérieure à la mise en place du prisme 1 Quaternaire marin et/ou (ii) la subsidence Pliocène continental ;

> la distribution des prismes pliocènes P1, P2, P3 et P4 suit la progradation d'Ouest en Est. Sur la figure 23, les "courbes enveloppes" des prismes délimitent les zones où les prismes sableux ont été reconnus. Les zones où plusieurs prismes sableux se superposent sont les suivantes : partie occidentale du bassin, Salanque et entre la retenue de Villeneuve-de-la-Raho et le Tech. Lors de la sédimentation de ces prismes, le niveau marin est resté relativement constant, autour de 80 mètres NGF. En conséquence, la figure 23 souligne le fait que la subsidence et la compaction sédimentaire sont croissantes d'Ouest en Est.

[1] Dans un premier temps, les cartes de profondeur ont été élaborées avec un référentiel sol et non pas NGF afin de croiser plus facilement les informations issues des forages.

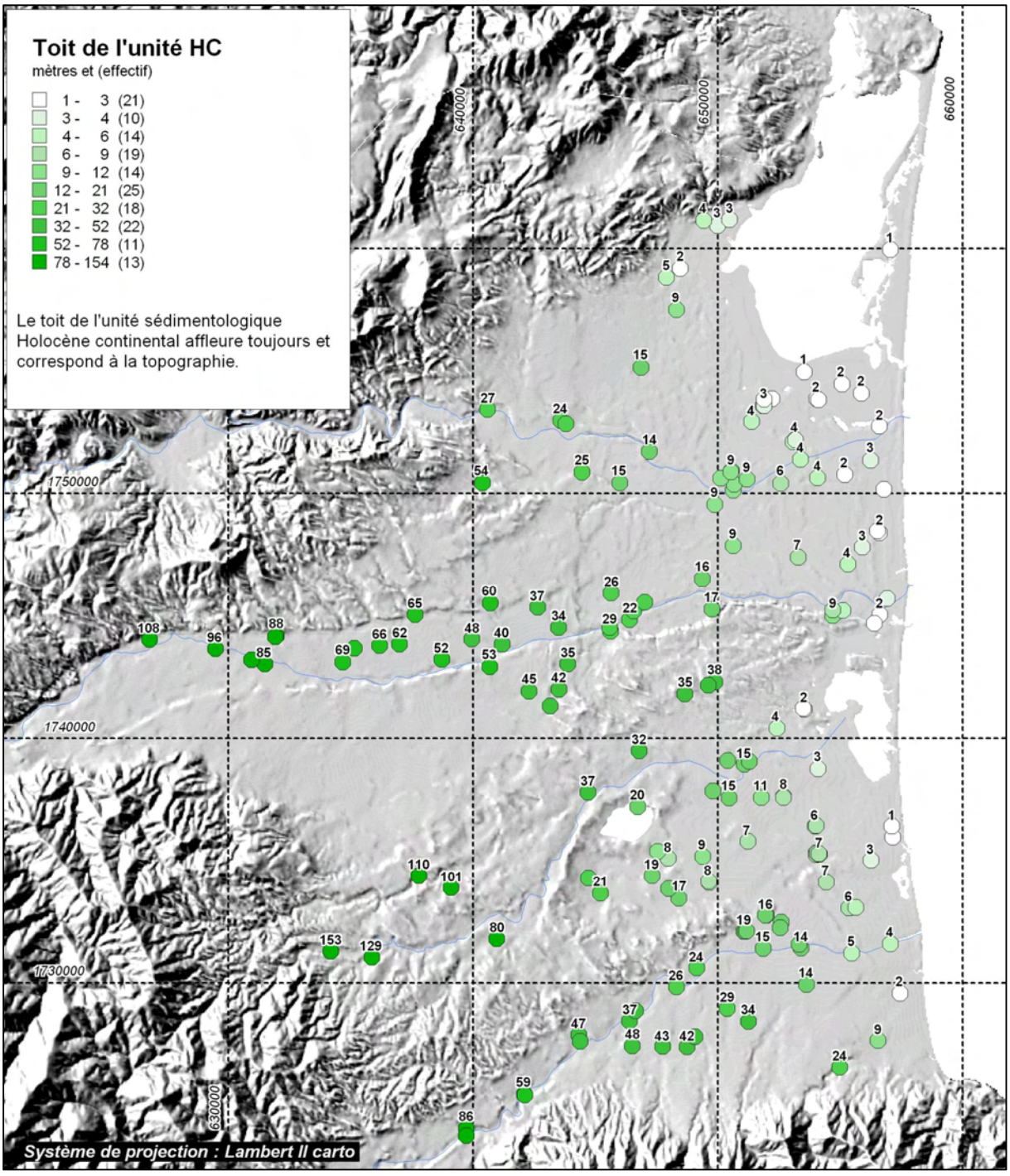


Figure 20 - Carte du toit de l'unité sédimentologique de l'Holocène continental

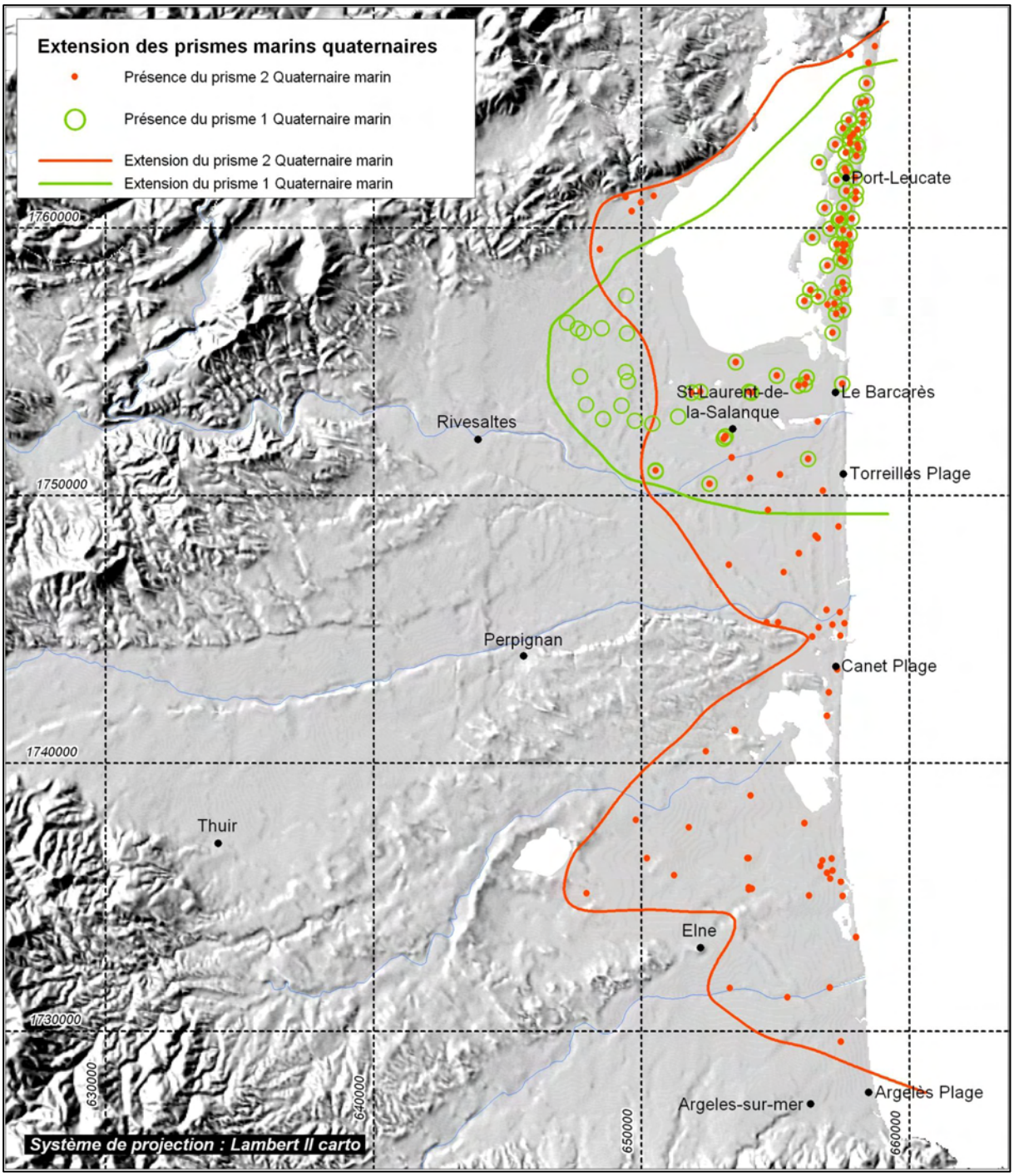


Figure 21 - Limite d'extension des prismes marins quaternaires

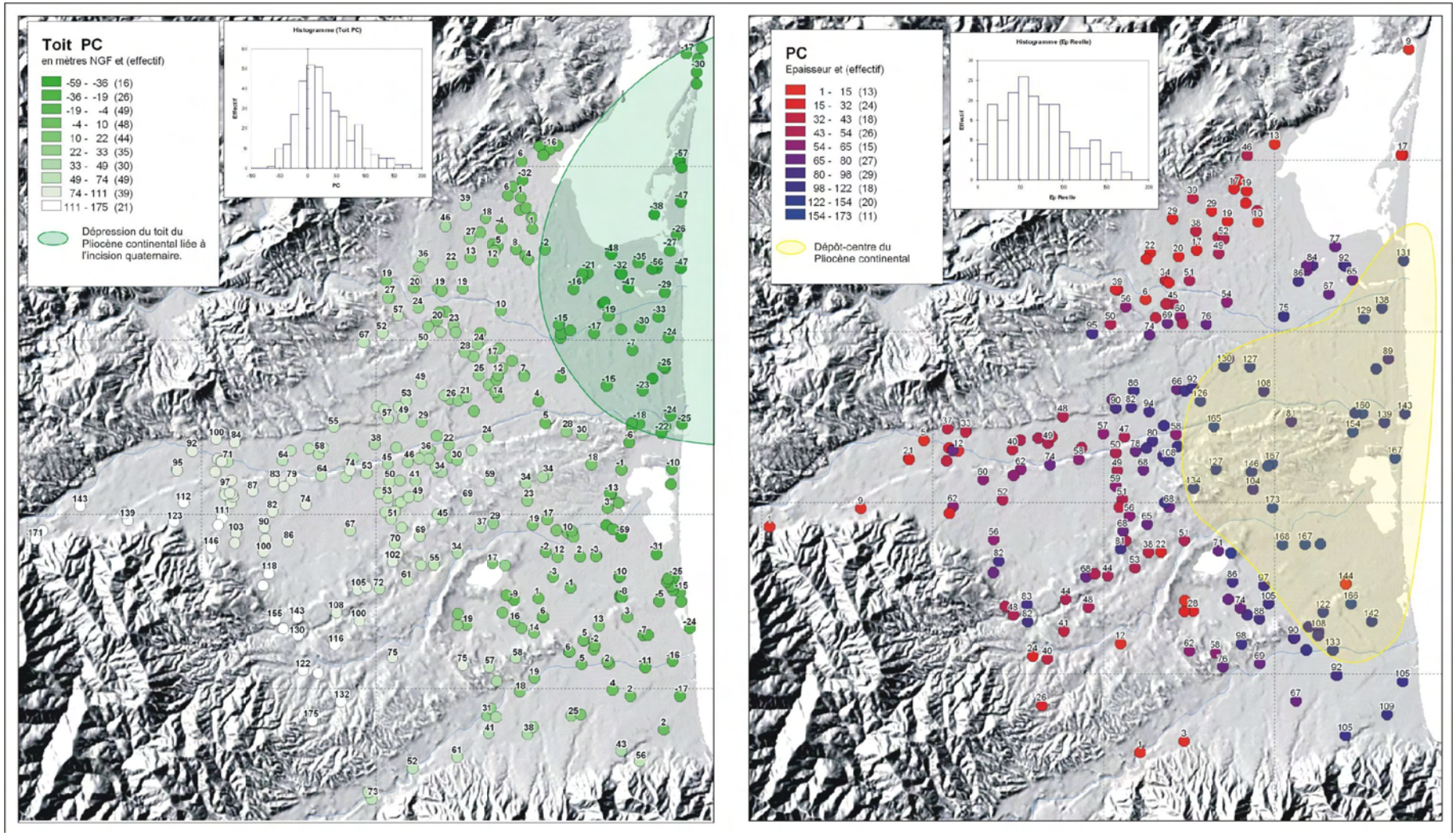


Figure 22 - Cote du toit et épaisseur du Pliocène continental

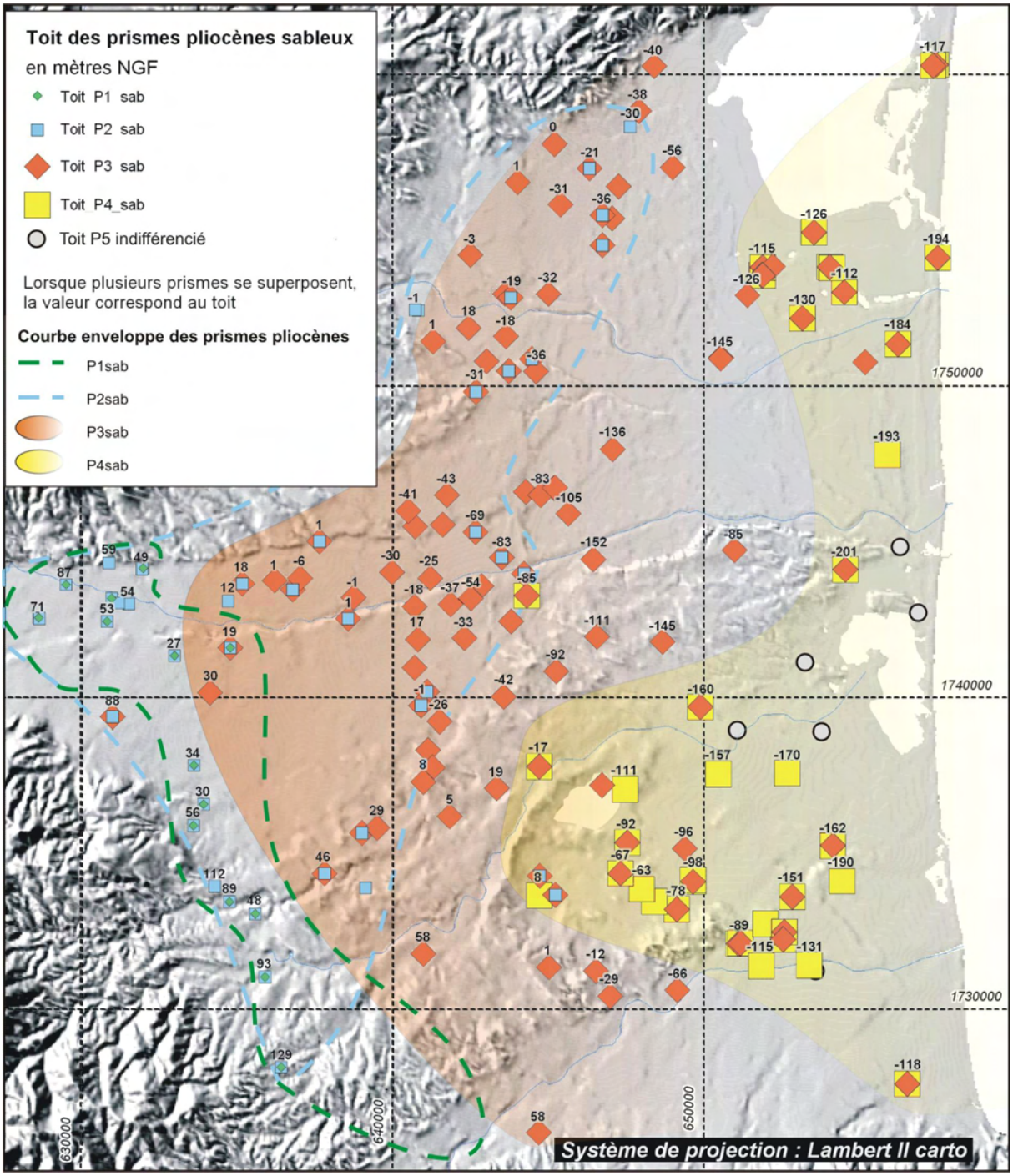


Figure 23 - Toit de l'ensemble des prismes sableux pliocènes
(en mètres NGF)

2.2. Lithologie des unités sédimentologiques

L'objectif de la cartographie lithologique est double :

- la localisation de zones potentiellement perméables constitue le premier objectif. En effet, les zones dont les faciès sont constitués de silt sont plus perméables que les zones totalement argileuses et donc plus vulnérables aux transferts de pollutions ;
- la description quantitative de la lithologie au sein d'une unité sédimentologique hétérogène telle que le Pliocène continental constitue l'étape préliminaire du second objectif. La finalité est d'établir des relations entre lithologie et propriétés hydrodynamiques. Ce point sera développé dans la seconde partie du manuscrit.

Les informations lithologiques proviennent de la BSS. Lors de l'élaboration de la méthodologie d'étude, nous étions conscients qu'il existait de nombreuses sources d'erreur sur ce genre de documents, tels que les erreurs de saisie, d'interprétation ou d'archivage. Le croisement d'informations et la recherche de documents originaux permet de détecter les erreurs de saisie et d'archivage. En ce qui concerne l'interprétation subjective[1] des auteurs des logs géologiques, nous considérons qu'il existe une erreur non quantifiable mais lissée par le nombre d'observations.

[1] Les descriptions lithologiques sur cuttings de forage demeurent subjectives : les sédiments ne remontent pas toujours à la surface, ils peuvent être "lavés" et la personne en charge de relever les informations géologiques fournit un descriptif des sédiments et très rarement une mesure physique de la granulométrie.

a. Lithologie des unités palustres et argileuses

Les faciès saisis dans la BD géologiques[1] ont été classés selon quatre types de lithologie différente : sable, silt, argile et sable / argile. Lorsqu'aucun faciès n'est prépondérant sur les autres, le terme "sable / argile" est employé. La localisation des différentes lithologies est présentée sous forme de quatre cartes en annexe, sur lesquelles âges (Pliocène - Quaternaire) et unités sédimentologiques (argileuses - palustres) sont distingués.

La répartition des faciès en fonction de l'unité sédimentologique est présentée sur la figure 24. En raison de déstabilisation gravitaire, des sédiments grossiers se localisent au sein des unités sédimentologiques argileuses. Ainsi, sables et silts sont quelquefois recensés dans les prismes argileux. De manière générale et en toute logique, le faciès sable est moins représenté dans les unités sédimentologiques argileuses que dans les unités palustres.

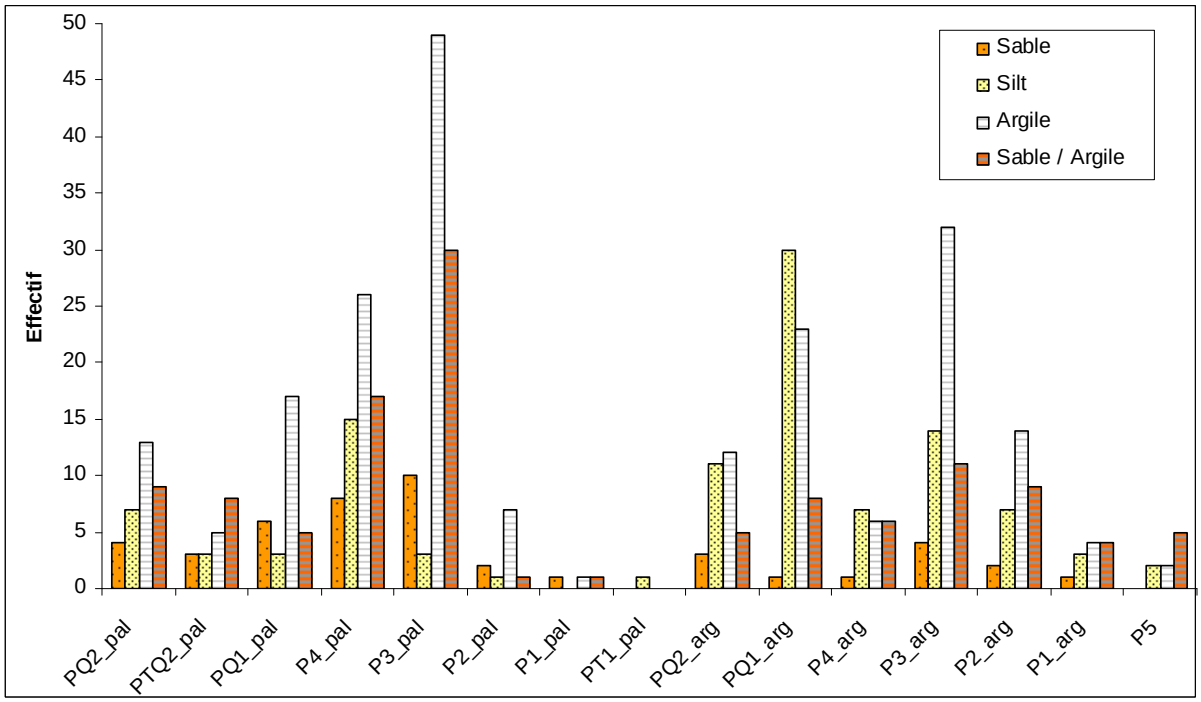


Figure 24 - Répartition des faciès en fonction de l'unité sédimentologique

[1] Les faciès saisis dans la BD géologique concernent exclusivement les formations argileuses et palustres.

Sur les cartes annexées, aucune organisation spatiale concordante avec la sédimentologie n'a pu être clairement identifiée. Ce fait peut-être considéré comme normal dans les formations palustres, particulièrement hétérogènes. En revanche, au sein des prismes argileux, il peut s'agir d'un biais de la méthode lors de la saisie des informations : en fin de forage, le faciès décrit sur quelques mètres n'est pas toujours représentatif de l'ensemble de l'unité sédimentologique dont le toit a été atteint. Cependant, toutes les informations ont été conservées en raison du faible nombre d'observation à l'échelle du bassin.

Toutefois, certaines zones plus argileuses ont été identifiées :

> pour les **formations quaternaires palustres**, PQ1pal se développe dans le Nord du bassin, entre la plaine de la Salanque et le cordon littoral du Barcarès. Les formations palustres identifiées présentent une **dominante argileuse**. PQ2pal s'étend plus au Sud et conserve le caractère argileux évoqué ci-dessus ;

> la répartition géographique des **prismes argileux quaternaires** (PQ1arg au Nord et PQ2arg au Sud) est la même que celle des environnements palustres. Les faciès présentent une **dominante silteuse** le long de la côte. En conséquence, les unités sédimentologiques argileuses quaternaires peuvent être considérées comme faiblement perméables ;

> les **formations palustres pliocènes** présentent une légère dominante argileuse. Le nombre d'observations, différent sur chaque prisme, ne permet pas de comparer correctement les prismes. Néanmoins, le centre de la plaine semble abriter des faciès **plus argileux** ;

> les faciès des **formations argileuses pliocènes** correspondent à des unités assez hétérogènes. Le centre de la plaine semble aussi présenter des faciès **plus argileux**.

La figure 25 synthétise l'ensemble des informations listées ci-dessus. Seules les particularités lithologiques sont figurées sur la carte. Les zones où aucune tendance lithologique n'a pu être mise en évidence ne sont pas représentées. Cette carte ne constitue pas un document final.

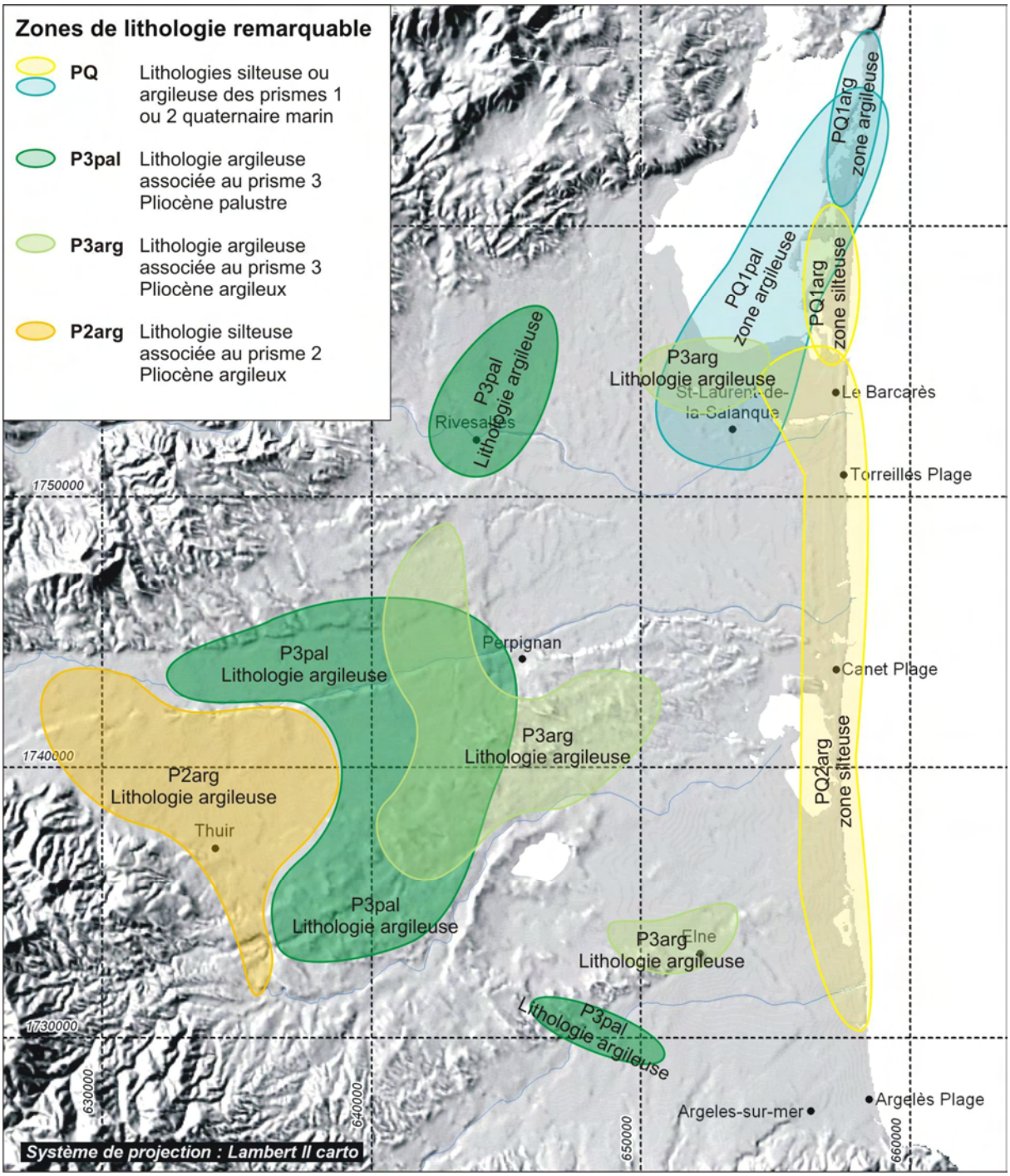


Figure 25 - Synthèse des zones de lithologie remarquable

b. Lithologie du Pliocène continental (PC)

Par nature, l'hétérogénéité caractérise les terrains rattachés au Pliocène continental. Ils sont constitués d'une alternance de plaines d'inondation et de chenaux. Dans la plaine du Roussillon, les chenaux pliocènes s'organisent selon des réseaux en tresses dans la zone amont ou méandriformes dans la zone aval [Duvail, à paraître]. En théorie, les réseaux en tresse présentent une forte proportion de sédiments grossiers par rapport aux réseaux méandriformes.

Les faciès du pliocène continental (PC) ont été organisés selon quatre classes qualitatives fautes de données quantitatives :

> les sédiments à granulométrie très fine (code "tresfin" dans la BD géologiques) tels qu'argile, marne et argile sableuse ;

> les sédiments à granulométrie fine (code "fin" dans la BD géologiques) tels que sable argileux et sable fin ;

> les sédiments à granulométrie moyenne (code "moy" dans la BD géologiques) tels que sable, sable moyen et sable grossier ;

> les sédiments à granulométrie grossière (code "gros" dans la BD géologiques) tels que gravier, cailloutis et conglomérat.

Afin d'éviter de mauvaises interprétations, l'ensemble des forages n'atteignant pas le mur du Pliocène continental a été filtré par élimination[1]. Au total, 195 points possédant une information lithologique sur la totalité du Pliocène continental ont été utilisés lors de l'élaboration des cartes.

Deux caractéristiques principales apparaissent sur les cartes et histogrammes annexés :

> une forte proportion de sédiments du Pliocène continental présente une **dominante argileuse**. En moyenne, le Pliocène continental est composé de 77% de sédiments fins (32%) et très fins (45%) contre 23% de sédiments moyens (15%) et grossiers (9%). La situation semble paradoxale, car l'unité sédimentologique du Pliocène continental abrite quelques horizons aquifères particulièrement productifs ("nappe 3 de la Salanque"). Il est envisageable de penser, dans un premier temps, que les sédiments fins contribuent à la réserve capacitive des horizons plus grossiers et plus productifs ;

> l'unité du Pliocène continental est aussi caractérisée par des **variations lithologiques** marquées sur de très faibles distances. Sur les cartes annexées, plusieurs forages situés à des distances infrakilométriques présentent des natures et épaisseurs de lithologies très différentes. La densité de points ne permet pas de mettre en évidence une logique (localisation de chenaux) dans ces hétérogénéités.

[1] Les données non filtrées sont aussi présentées en annexe.

Bien que la lithologie du Pliocène continental soit assez hétérogène, différentes zones de faciès similaires peuvent être identifiées (figure 26) :

- les faciès plus grossiers sont reconnus
  - d'une manière générale, à proximité des limites du bassin du Roussillon ;
  - au sud de la zone Têt amont, là où se développent les Gilbert deltas *s.s.* Ces faciès correspondent vraisemblablement aux réseaux en tresses ;
  - le long de la Têt ;
  - dans le Nord-ouest, dans la plaine de la Salanque.
- les faciès plus argileux sont reconnus
  - dans le centre de la plaine du Roussillon ;
  - le long de la vallée du Tech ;
  - dans l'interfluve aval du Tech et du Réart.

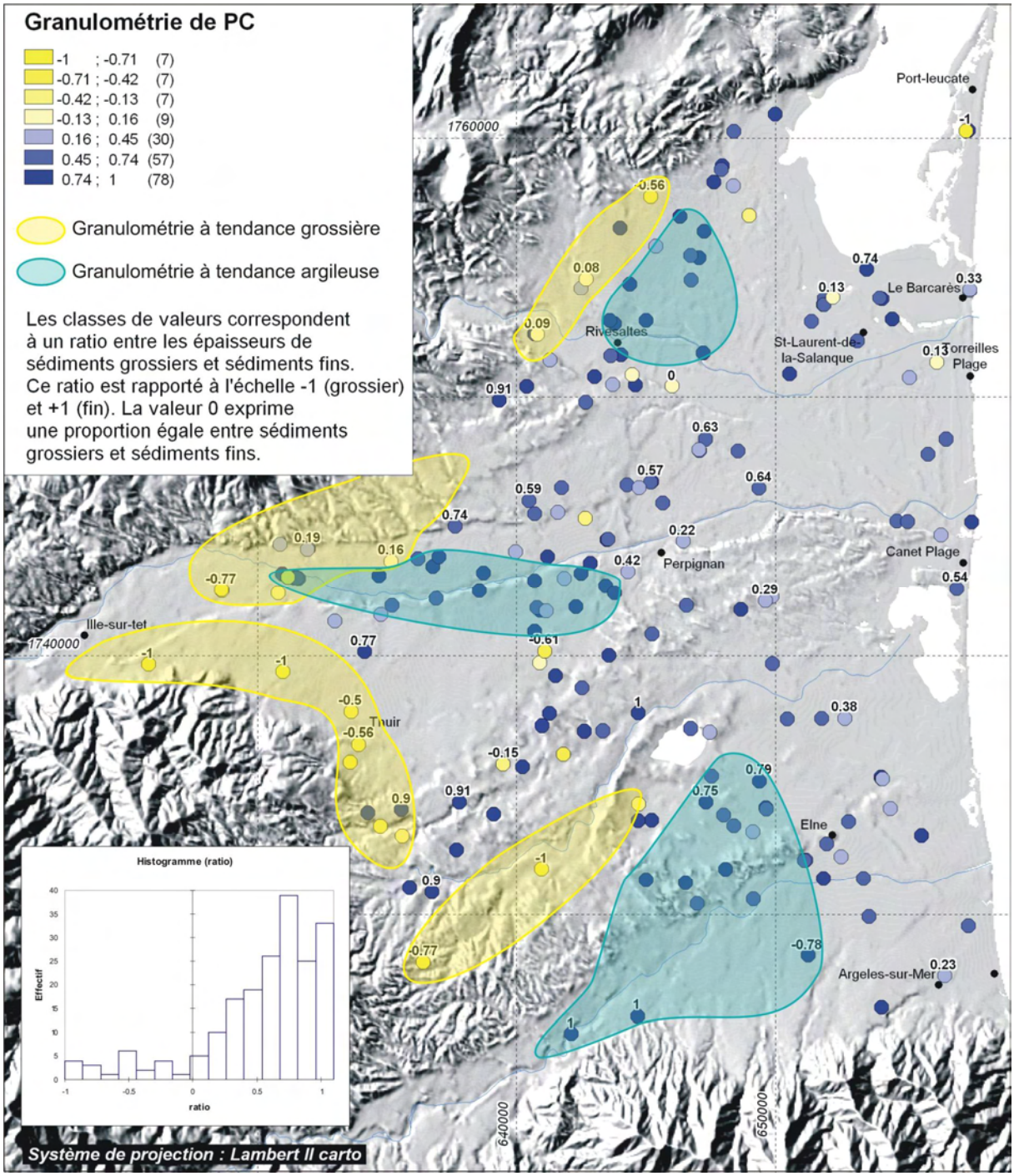


Figure 26 - Lithologie du Pliocène continental

*

* *

La base de données géologiques du Roussillon

La base de données géologiques du Roussillon constitue un outil efficace afin de déterminer la distribution spatiale des différentes unités sédimentologiques. La densité de points permet d'estimer correctement l'organisation des faciès dans une grande partie du bassin du Roussillon. La structure de la base de données géologique, couplée à celle de la BSS permet aussi d'adapter les interprétations géologiques des anciens forages.

De plus, dans la seconde partie du travail de recherche, cette base de données géologiques évoluera vers une base de données hydrogéologiques intégrant la distribution des crépines et la productivité des forages. Ces informations sont autant de pistes de contraintes d'une modélisation hydrogéologique.

Les différentes unités sédimentologiques présentent une hétérogénéité lithologique marquée. Différentes dominantes de faciès ont pu être mises en évidence. Dans la seconde partie, ces points seront confrontés aux données hydrogéologiques.

Partie II

Du modèle conceptuel géologique d'un bassin sédimentaire à l'hydrogéologie des aquifères littoraux

L'objectif de cette seconde partie consiste à élaborer le modèle conceptuel hydrogéologique de la plaine du Roussillon à partir de diverses méthodes telles que la piézométrie, l'hydrochimie et la géophysique tout en intégrant les nouvelles données de la géologie.

Chapitre I

Rapprochement de la stratigraphie séquentielle et des données de forages

Afin de tester l'efficacité des outils de stratigraphie séquentielle appliqués à l'hydrogéologie, les interprétations géologiques ont été saisies dans un premier temps "en aveugle", sans prise en considération de l'information hydrogéologique. En première approximation, les 38 unités sédimentologiques identifiées devaient se décomposer en 12 unités aquifères (unités sableuses), 11 semi-perméables (unités palustres ou continentales) et 15 très faiblement perméables (unités argileuses).

Parallèlement, quelques informations hydrogéologiques, telles que la position des crépines ou la productivité des ouvrages ont été intégrées à la base de données géologiques, "en aveugle", sans retour vers les informations géologiques. Lors de la vérification de la cohérence des informations géologiques et hydrogéologiques, il s'est avéré que certains horizons interprétés comme "argileux" correspondaient à des niveaux crépinés et, de même, certaines formations sableuses n'étaient vraisemblablement pas exploitées. Par exemple, les crépines du forage F4 de Montescot (**10971x0217**) sont placées au niveau des unités du "PC" et du "P4arg faciès argileux" alors que les unités du "P4pal faciès sableux" et "P4sab" ne sont pas crépinées.

En conséquence, les informations issues de la stratigraphie séquentielle ne pouvaient pas être directement utilisées afin de déterminer la géométrie des aquifères. La démarche présentée dans le chapitre suivant a été développée afin de mettre en évidence les relations entre études sédimentologiques et propriétés hydrogéologiques des formations du bassin du Roussillon.

1. Analyse de la distribution verticale des crépines des forages d'eau

La BD géologiques a été complétée, lorsque cela était possible, par la détermination des unités exploitées, la position et la profondeur des crépines. Les sources de données sont les suivantes :

> les coupes techniques des forages du Roussillon qui sont archivées au format papier dans la BSS du Brgm[1] ;

> cette information a été complétée et précisée par les rapports d'examens endoscopiques de forages réalisés par des bureaux d'études[2].

1.1. Objectifs

Les objectifs étaient de déterminer quels horizons présentaient des propriétés aquifères en forages et de comparer cette information à la position des unités sédimentologiques, telle que déterminée au sein du chapitre précédent. De même, l'identification d'unités sédimentologiques superficielles non-exploitées, bien que sableuses, peut faire apparaître un éventuel problème de qualité d'eau (*eg* : dans la zone du Barcarès, la nappe superficielle n'est que très rarement exploitée en raison de sa très forte vulnérabilité face aux intrusions salines). Enfin, l'exploitation commune de plusieurs unités sédimentologiques est mise en évidence par le recensement de la position des crépines.

En raison du nombre de données, l'ensemble des informations saisies seront traitées par analyse statistique.

[1] BSS du Service Géologique Régional Languedoc-Roussillon (1039, rue de Pinville - 34000 Montpellier)

[2] Plus de cent examens endoscopiques ont été effectués par le bureau d'étude Hydro-Assistance (2, allée Dache Dise - 40180 Hinx) spécialisé, entre autres, dans l'ingénierie de forage.

1.2. Pondération des observations

Les crépines sont théoriquement placées en face de niveaux sableux potentiellement aquifères. Cependant, un certain nombre de crépines se positionnent au sein d'unités définies comme argileuses dans la BD géologiques. Plusieurs origines ont été déterminées à la suite de l'observation des données :

> les crépines utilisées par les foreurs présentent des "longueurs types", c'est-à-dire que la longueur des crépines est toujours multiple d'une certaine unité de longueur. Dans le cas du Roussillon, d'après les informations saisies, des crépines de trois mètres de longueur sont couramment utilisées. En conséquence, des unités sédimentologiques argileuses peuvent être crépinées sur une courte longueur de manière involontaire ;

> la crépine positionnée dans le forage est continue et recoupe aussi des unités argileuses ou le rechemisage d'un forage par une crépine continue masque l'emplacement originel des crépines ;

> au sein d'un même prisme, la transition entre les niveaux sableux supérieurs et les niveaux argileux inférieurs peut-être diffuse. La limite estimée lors de l'interprétation géologique ne correspond pas exactement aux limites déterminées lors du positionnement des crépines ;

> l'interprétation géologique conserve un caractère subjectif et bien que le schéma géologique soit cohérent, certaines erreurs peuvent subsister.

1.3. Description des informations de la base de données hydrogéologiques

La BD hydrogéologiques comprend 674 points renseignés[1]. 114 points (soit 17%) sont des sondages et ne sont pas crépinés. Les 560 points restants sont constitués par des forages et des puits. La **majorité** des 150 **AEP** et de la trentaine de forages industriels ont été **renseignés** dans la **BD hydrogéologiques**. Les autres points étudiés se répartissent entre les forages de particuliers et les forages d'irrigation.

Sur l'ensemble des 674 points renseignés, 159 (soit 24%) n'ont pu être interprétés en raison du manque ou de la mauvaise qualité des documents. Il peut s'agir d'une information géologique manquante ou d'une incertitude sur la position des crépines.

En conséquence, la BD hydrogéologiques comprend 401 points (59% des informations saisies) pourvus d'une information comprenant à la fois la position des crépines et la liste des unités sédimentologiques exploitées.

Douze forages, localisés à proximité des limites du bassin, exploitent des aquifères, majoritairement karstiques, qui constituent l'encaissant du bassin du Roussillon. Ces forages ne seront pas inclus dans l'étude ci-après.

Finalement, **389 points** seront utilisés lors de l'analyse statistique ci-après. Leur distribution est similaire à celle des données initiales, c'est-à-dire homogène par rapport aux données disponibles sur l'ensemble de la plaine du Roussillon.

[1] A ce jour, tous les documents recensés lors du travail de thèse ont été intégrés à la BD hydrogéologiques. Les informations ont été recueillies auprès de la BSS, de bureaux d'études opérant dans le Roussillon, de la Chambre d'Agriculture 66 et du Conseil Général 66.

1.4. Analyse statistique de la base de données hydrogéologiques

a. Détermination des potentialités aquifères

Les données brutes sont présentées sous forme d'un tableau en annexe 7. Ces données sont synthétisées dans le tableau 3, ci-dessous. Les unités sédimentologiques sont renseignées sous forme de lignes tandis que les colonnes correspondent aux points suivants :

- effectif des crépines par unité sédimentologique ;
- fréquence des crépines par unité sédimentologique (rapport de l'effectif sur le total des effectifs) ;
- effectif des cotes "toit" présentées dans la première partie. Les valeurs de cotes ne concernent que les points d'eau ;
- la fréquence d'exploitation est une valeur indicative calculée à partir du ratio "effectifs des crépines" sur "effectif des côtes toit". Cette valeur caractérise la proportion des unités sédimentologiques crépinées par rapport à celles qui auraient pu être crépinées, car présentes dans un captage d'eau souterraine.

L'ensemble de ces informations permet d'aboutir à une première définition des unités sédimentologiques potentiellement aquifères ou aquicludes (colonne "Conclusion provisoire" du tableau 3). Le caractère aquifère ou aquiclude est aussi fonction (i) des propriétés géologiques abordées dans la partie précédente et (ii) du nombre d'observations.

Par exemple, pour l'unité sédimentologique "P3sab" : 90 forages sont crépinés sur la hauteur de cette unité ce qui représente 86.5% des 104 forages recoupant l'unité "P3sab". A cette étape de l'étude, l'unité "P3sab" est donc considérée comme potentiellement aquifère.

En ce qui concerne la terminologie utilisée :

- aquitard correspond à une formation semi-perméable capacitive ;
- aquiclude correspond à une formation saturée dont la conductivité hydraulique est très faible ;
- aquifuge correspond à une formation imperméable, sans interstice connecté.

	Unités sédimento.	Effectif des crépines par unités sédimento.	Fréquence des crépines par unités sédimento. (%)	Effectif des cotes "toit"	Fréquence d'exploitation (%)	Remarques relative à la BD hydrogéologi-ques	Conclusion provisoire
1	HC	15	**2.4**	139	10.79	Information très ponctuelle, disséminée le long du Tech et de la Têt	Aquitard
2	PQ2pal	4	0.6	30	13.33	Information ponctuelle et agrégative	Aquitard
3	PQ2sab	5	0.8	44	11.36	Information très ponctuelle, disséminée le long de la côte	Aquitard
4	PQ2arg	0	0	20	0.00	Jamais exploité	Aquiclude
5	PTQ2pal	2	0.3	11	18.18	Information très ponctuelle, disséminée le long de la côte	Aquitard
6	PTQ2sab	0	0	15	0.00	Jamais exploité	Aquiclude
7	PTQ2arg	0	0	3	0.00	Jamais exploité	Aquiclude
8	TQ	**63**	**10.0**	218	28.90	Répartition homogène en Salanque, sur la Têt amont, le long du Tech	Aquifère moyen
9	TQ2-PI	0	0	5	0.00	Jamais exploité	Aquiclude
10	TQ2	8	1.3	32	25.00	Information très ponctuelle	Aquifère mineur
11	PQ1pal	3	0.5	4	**75.00**	Information très ponctuelle	Aquitard
12	PQ1sab	1	0.2	18	5.56	Information très ponctuelle	Aquitard
13	PQ1arg	2	0.3	64	3.13	Information très ponctuelle, niveaux sableux inclus dans l'argile	Aquitard
14	PTQ1sab	4	0.6	12	33.33	Information très ponctuelle	Aquifère mineur
15	TQ1-PI	5	0.8	8	**62.50**	Toujours exploité avec TQ1	voir TQ1
16	TQ1	9	1.4	10	**90.00**	Localisé sur le littoral	Aquifère mineur
17	PC	**233**	**37.0**	314	**74.20**	Répartition homogène, exploité seul dans 60% des cas	Aquifère majeur
18	P5	5	0.8	8	**62.50**	Toujours exploité avec PC	voir PC
19	P4pal	29	**4.6**	63	46.03	Exploité avec PC ou P4sab	Aquifère moyen
20	P4sab	29	**4.6**	35	**82.86**	Exploité avec PC ou P4sab	Aquifère majeur
21	P4arg	3	0.5	20	15.00	Information très ponctuelle	Aquiclude
22	P3pal	**40**	**6.3**	91	43.96	Lithologie de l'unité : 18 sab, 22 arg donc hétérogène	Aquitard
23	P3sab	**90**	**14.3**	104	**86.54**	Répartition homogène, exploité seul dans 30% des cas	Aquifère majeur
24	P3arg	12	1.9	59	20.34	Faciès silteux ou sableux sur 10 observations	Aquitard
25	P2cont	2	0.3	4	50.00	Information très ponctuelle - voir P3	Aquifère mineur
26	P2pal	3	0.5	12	25.00	Information très ponctuelle - toujours exploité avec P2sab	Aquitard
27	P2sab	37	**5.9**	42	**88.10**	Répartition homogène, exploité seul dans 30% des cas	Aquifère majeur
28	P2arg	4	0.6	31	12.90	Information ponctuelle, Faciès silteux ou sableux sur 3 observations	Aquitard
29	P1pal	1	0.2	3	33.33	Information très ponctuelle exploité avec P1sab	voir P1sab
30	P1sab	12	1.9	15	**80.00**	Exploité avec P2sab dans 62% des cas	Aquifère moyen
31	P1arg	3	0.5	12	25.00	Information très ponctuelle exploité avec P1sab	Aquitard
32	PT1pal	0	0	1	0.00	Jamais exploité	Aquiclude
33	PT1sab	1	0.2	3	33.33	Information très ponctuelle exploité avec P1sab	Aquitard
34	Mio	5	0.8	8	**62.50**	Uniquement sur les bords du bassin	Aquifère mineur

Tableau 3 - Crépines et unités sédimentologiques du bassin du Roussillon

b. Exploitation concomitante des unités sédimentologiques

Le fait qu'un même forage recoupe plusieurs unités sédimentologiques est une information importante, notamment, dans le cas d'une modélisation hydrogéologique. Seuls certains logiciels de modélisation permettent de simuler ce genre de configuration, désignée par le terme "Multiaquifer Wells". Dans le cas de simulations hydrodynamiques, différentes méthodes de modélisation ont été synthétisées par Neville & Tonkin [2004]. Toutefois, dans le cas de modèles de transport, les forages "multi-aquifères" compliquent singulièrement la convergence des calculs.

Les unités sédimentologiques exploitées de manière concomitante sont dénombrées lorsqu'un même forage présente des crépines dans différentes unités sédimentologiques (données brutes en annexe 8). La BD hydrogéologiques, qui compte 389 observations, dénombre :

- 256 points d'eau soit 65.8%, exploitant **une** seule unité sédimentologique,
- 71 points d'eau soit 18.2%, exploitant exactement **deux** unités sédimentologiques,
- 40 points d'eau soit 10.3%, exploitant exactement **trois** unités sédimentologiques,
- 17 points d'eau soit 4.4%, exploitant exactement **quatre** unités sédimentologiques,
- 5 points d'eau soit 1.3%, exploitant exactement **cinq** unités sédimentologiques.

Il existe donc **133 points (34%)** exploitant au moins **deux** unités sédimentologiques.

Les unités sédimentologiques exploitées simultanément ont été organisées par doublets d'unités. Le nombre total de doublets d'unités est égal à 343 (*eg* : un forage qui exploite quatre unités a, b, c et d exploite en réalité six doublets d'unités : ab, ac, ad, bc, bd et cd). Cette méthode permet d'avoir une vue exhaustive des combinaisons d'unités sédimentologiques exploitées.

L'organisation des données dans un tableau de contingence[1] (ou tableau croisé) permet de dénombrer aisément les unités sédimentologiques exploitées simultanément. Différentes informations sont observables sur le tableau ci-dessous (tableau 4, ci-dessous, p. 106) :

> l'unité sédimentologique du Pliocène continental est la plus souvent exploitée en concomitance avec les autres unités (colonne du PC presque complète) ;

> les unités sédimentologiques du Quaternaire sont exploitées de manière concomitante, sauf pour le cas du PC (*eg* : PC et HC, ou PC et TQ, ou PC et PQ1…) ;

> cette observation est aussi valide pour les unités sédimentologiques du Pliocène marin ; elles sont exploitées conjointement, sauf pour le cas du PC (*eg* : PC et P4sab, ou PC et P3sab, ou PC et P2sab…) ;

> le PC marque la limite d'exploitation commune entre les unités sédimentologiques en contact avec la mer (prismes marins et terrasses quaternaires) et les unités isolées de la mer (Pliocène marin sableux) ;

> le fait qu'une diagonale figure sur le tableau ci-dessous signifie que les unités sont exploitées dans un même ordre de profondeur sur un même forage (un forage profond n'exploite pas les aquifères superficiels) ;

> parallèlement, de nombreux forages exploitent simultanément plusieurs unités sédimentologiques du pliocène marin sableux (P4, P3 et P2) ;

> au sein d'un même prisme, les formations palustres et sableuses sont fréquemment exploitées simultanément (*eg* : P4pal et P4sab, P3pal et P3sab, P2pal et P2sab).

Les tests statistiques sur tableau de contingence, de type Analyse Factorielle des Correspondances[2] ou tests d'indépendance des données (Khi^2 de Pearson) n'apportent pas de résultats complémentaires et tendent à biaiser l'information en raison de la répartition très inégale des effectifs.

[1] Le tableau de contingence n'est pas une matrice de corrélation symétrique. Il dénombre les effectifs des observations de deux listes indépendantes qui ne contiennent pas les mêmes modalités (cas de "Mio" dans la liste 1, qui ne figure pas dans la liste 2 ou "PT1sab" dans la liste 2, qui ne figure pas dans la liste 1). Les valeurs ont été regroupées de manière à limiter les comptages divisés en deux cases.

[2] L'AFC constitue un cas particulier de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). L'AFC étudie la liaison entre deux ensembles de modalités, qualitatives dans notre cas, constituant les lignes et les colonnes d'un tableau de contingence.

Le tableau 5 (p. 107) a été élaboré en regroupant les unités sédimentologiques par dynamique sédimentaire identique (*eg* : les unités P4pal et P4sab sont regroupées sous le terme P4). Les valeurs en italique des cellules grisées représentent l'exploitation concomitante d'unités à dynamique sédimentaire identique (*eg* : P4pal et P4sab). Les observations effectuées sur le tableau 4 sont confirmées par celles effectuées sur le tableau 5 :

> l'unité sédimentologique du PC est exploitée avec la plupart des autres unités sédimentologiques ;

> les unités du Quaternaire sont exploitées simultanément ;

> les unités des prismes marins sableux sont souvent exploitées par doublets ou triplets : P4-P3, P3-P2, P2-P1, P1-PT1.

Liste 2 / Liste 1	PQ2 sab	TQ2	PQ1 pal	PQ1 sab	PTQ1 sab	TQ1	PC	P4 pal	P4 sab	P4 arg	P3 pal	P3 sab	P3 arg	P2 pal	P2 sab	P2 arg	P1 sab	P1 arg	PT1 sab
HC							3												
TQ			1				**5**												
TQ2			1	1			2												
PQ2pal	1	1					1												
PQ2sab		1					1												
PQ1pal				1															
PQ1arg					2		1												
PTQ1sab						2	2												
TQ1							1												
TQ1pi					1	**5**													
P5pal							**5**												
P4pal							**24**		**10**		**7**	**12**	2						
P4sab							**19**	1		3		**17**	4						
P4arg							1					2	1						
P3pal							**26**				1	**25**	**6**		**7**	3	1		
P3sab							**42**						**11**		**14**	4	1		
P3arg							4								4	2			
P2pal							2								3		2		1
P2sab							**10**									3	**8**	1	1
P2arg							1												
P1pal																	1		
P1sab							2											3	1
Mio							1				1	1		1	3		2	1	1

Tableau 4 - Tableau de contingence des doublets d'unités sédimentologiques crépinées
(Unités sédimentologiques classées par profondeur)

Liste 1 \ Liste 2	PQ2	TQ2	PQ1	PTQ1	TQ1	PC	P4	P3	P2	P1	PT1
HC						3					
TQ			1			**5**					
PQ2	*1*	2				2					
TQ2			2			2					
PQ1			*1*	2		1					
PTQ1					2	2					
TQ1				1	***5***	1					
P5						**5**					
P4						**44**	***14***	**45**			
P3						**72**		***43***	**34**	2	
P2						**13**			***6***	**11**	2
P1						2				*4*	1
Mio						1		2	4	3	1

Tableau 5 - Tableau de contingence des doublets de groupes d'unités sédimentologiques crépinées
(Unités sédimentologiques classées par profondeur et regroupées selon la dynamique sédimentaire)

c. Autres observations

D'autres observations ont été effectuées sur la BD hydrogéologiques :

- la **distribution spatiale des forages crépinés** est analogue à la distribution des unités sédimentologiques (annexe 4) en ce qui concerne les unités pliocènes marines ou continentales. Pour les unités quaternaires, le nombre de forages crépinés est réduit par rapport au nombre de points BSS en raison de l'existence dans la BD géologiques d'un certain nombre de sondages géotechniques. Le seul cas particulier concerne la distribution spatiale des unités TQ (terrasse quaternaire) et HC. Cette dernière est principalement réduite à l'existence de stations de pompage : S^{t}-Féliu-d'Amont, Millas, rive gauche de l'Agly, Argelès ;
- le rapport entre la longueur de crépine et l'épaisseur de l'unité sédimentaire qu'elle exploite permet de caractériser l'hétérogénéité d'une formation. D'une manière générale, les unités sableuses sont crépinées sur l'intégralité de leur épaisseur alors que seule une partie de l'épaisseur des unités continentales et palustres est crépinée. Cette observation dépend aussi de la méthode utilisée pour la coupe technique des forages : à partir de diagraphies ou de la seule coupe géologique élaborée à partir des cuttings.

1.5. Résultats et interprétation

L'élaboration d'un inventaire des crépines des unités sédimentologiques permet de dresser les premières relations entre information géologique et modèle conceptuel hydrogéologique. Sur la figure 27, ci-après, trois groupes d'unités sédimentologiques sont prépondérants : TQ, PC et les prismes marins pliocènes.

> les terrasses quaternaires (**TQ**) de la zone Têt amont sont largement exploitées par la communauté d'agglomération "Perpignan Méditerranée" (site de Millas et de S^{t}-Féliu-d'Amont). Par opposition, peu de forages crépinés ont été recensés dans les prismes marins quaternaires. L'explication de ce phénomène est multiple :

  - choix des gestionnaires des ressources en eau de ne pas utiliser cette ressource en raison de sa vulnérabilité et de sa faible qualité (présence de nitrates et/ou de chlorures) ;
  - la BD hydrogéologiques contient peu d'information sur les forages d'irrigation (agriculture, hôtellerie de plein air du littoral) ;

> bien que l'unité sédimentologique du **Pliocène continental** présente un caractère argileux marqué (voir p. 90), cette unité semble être exploitée par une majorité des forages d'eau de la plaine du Roussillon. Toutefois, l'unité sédimentologique du PC comporte les sédiments continentaux associés aux cinq prismes marins pliocènes. En théorie, si l'interprétation géologique avait été homogène, les différentes unités sédimentologiques continentales situées en amont des prismes marins auraient pu être distinguées des autres[1] (*eg* : PC3 : Pliocène continental synchrone au prisme Pliocène marin 3). La comparaison de l'épaisseur moyenne du Pliocène continental (71 m) et de l'épaisseur moyenne cumulée de tous les prismes pliocènes marins sableux (82 m) illustre le fait que l'unité sédimentologique du **Pliocène continental** représente un **volume important par rapport aux autres unités pliocènes** ;

> les prismes pliocènes marins sableux sont souvent exploités avec d'autres unités que cela soit au sein du même prisme (*eg* : P3pal et P3sab), au sein de plusieurs prismes (*eg* : P3sab et P2sab) ou au sein d'unités à dynamique sédimentaire différente (*eg* : P3sab et PC). D'une manière générale, P3sab semble être prépondérant sur les autres prismes.

[1] Cela n'a pu être le cas sur le bassin du Roussillon car l'échelle de travail (800 km^2) et l'espacement des données ne permettent pas à la stratigraphie séquentielle d'individualiser et de corréler les différentes unités continentales superposées. La corrélation de chenaux métriques ou plurimétriques espacés de plusieurs dizaines de kilomètres ne peut-être scientifiquement envisageable. Cependant, l'enregistrement sédimentaire des faciès continentaux pourrait être valorisé dans une modélisation génétique de systèmes fluviatiles.

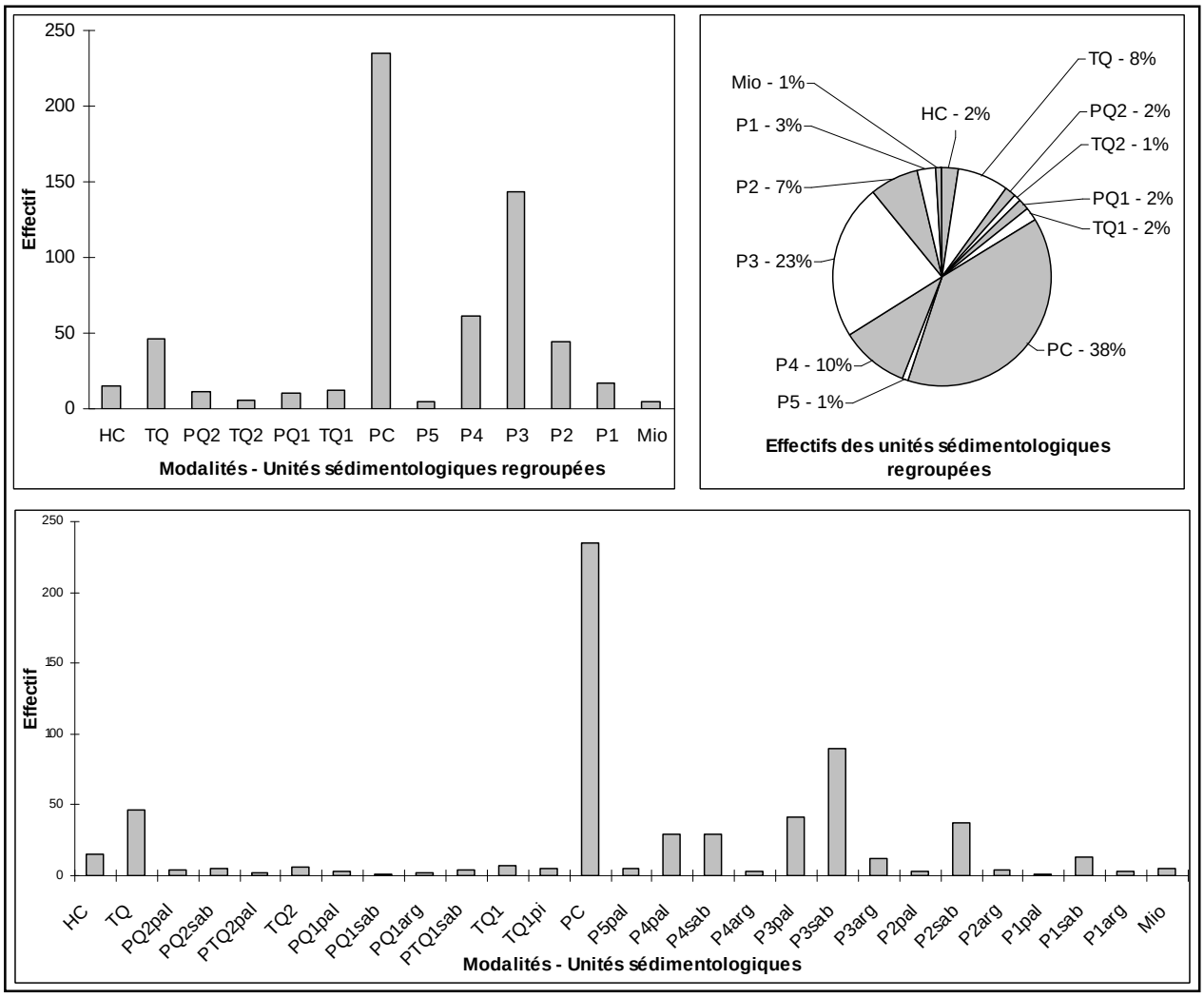


Figure 27 - Diagrammes en bâtons et diagrammes en secteurs des effectifs des unités sédimentologiques exploitées regroupées par dynamique sédimentaire
Chaque unité n'est comptée qu'une seule fois même si plusieurs crépines recoupent la même unité sédimentologique

Dans un premier temps, l'information issue de l'analyse de la distribution des crépines est complémentaire et en accord avec l'information hydrogéologique. Dans un second temps, l'élaboration d'un modèle conceptuel en vue d'une modélisation hydrogéologique devra intégrer le fait qu'un tiers des forages exploitent au moins deux unités sédimentologiques. Ce tiers ne tient pas compte de l'exploitation concomitante de l'ensemble du Pliocène continental qui n'a pu être différencié (Pliocène continental du prisme 1, 2 ou 3…).

D'une manière générale, l'analyse de la distribution des crépines est une méthode indicative qui permet d'élaborer des hypothèses fiables lors de la construction d'un modèle conceptuel. Cependant, la méthode n'est pas toujours pertinente, car elle fournit trop peu d'informations sur la productivité réelle des ouvrages et des unités sédimentologiques. Deux exemples ci-dessous, entre autres, illustrent les insuffisances de cette méthode :

> cinq crépines se localisent dans le Miocène. Quelle est la contribution réelle sur le débit d'exploitation de cette unité sédimentologique? Doit-on considérer que le Miocène constitue potentiellement une unité productive?

> 20% des crépines sont positionnées en face d'unités sédimentologiques théoriquement peu perméables. Doit-on supposer une erreur lors de la mise en place des crépines ou lors de la définition des unités sédimentologiques?

Afin, d'améliorer le modèle conceptuel hydrogéologique en relation avec la connaissance géologique, l'analyse de diagraphies de production, ci-après, complète la BD hydrogéologiques.

Dans le cas d'une sédimentation par déstabilisation gravitaire, il est fréquent que les argiles de bottomset renferment des interlits sableux.

2. La base de données hydrodynamiques : synthèse des investigations des bureaux d'études

La démarche suivie lors de l'implantation d'un nouveau forage destiné à l'AEP peut-être résumée ainsi (chaque étape doit être validée avant d'être franchie) :

1. Détermination du "besoin" : débit souhaité et localisation ;
2. Mise au point des connaissances locales des aquifères (géologie, hydrogéologie, pollution…)
3. Etude de faisabilité (emplacement, périmètre de protection envisageable…)
4. Implantation de l'ouvrage
5. Réalisation éventuelle d'un forage de reconnaissance (petit diamètre, suivi de piézométrie possible…)
6. Réalisation du forage d'exploitation
7. Etude diagraphique et détermination de la coupe technique de l'ouvrage
8. Equipement de l'ouvrage, nettoyage, développement
9. Contrôle de réception de l'ouvrage (essais de puits et de nappe, caractéristiques hydrauliques, examens endoscopiques, diagraphies de production et de fluide)
10. Démarches officielles et administratives : déclaration, contrôle de la qualité et aspects sanitaires, respect de la Loi sur l'Eau, intervention de l'hydrogéologue agréé (périmètre de protection), recommandations d'exploitation
11. Après quelques années de service ou lors de problèmes de production : investigations de contrôle similaires à celles effectuées lors de la réception de l'ouvrage.

L'ensemble de ces opérations est mené par différents intervenants. Dans le cadre de la présente étude sur la plaine du Roussillon, les étapes 9, 10 et 11 se révèlent particulièrement intéressantes : 115 rapports traitant de ces étapes ont pu être recueillis auprès des bureaux d'études œuvrant en Roussillon.

2.1. Organisation de l'information

Une sélection d'informations contenues dans les 115 rapports des bureaux d'études a été saisie sous la forme d'une base de données dénommée "BD hydrodynamiques". Elle contient les informations suivantes :

Identification de l'indice BSS : permet d'établir les liaisons entre la BD hydrogéologiques et l'information contenue dans les rapports des bureaux d'études. Pour chaque rapport, ce numéro est déterminé en fonction de la localisation géographique ou en fonction de la dénomination du forage. Cette étape de "croisement de l'information" met en évidence les contradictions entre les différentes sources de données (*eg* : le nom du forage en BSS ne correspond pas à l'information contenue dans le rapport ou le forage a été remplacé par un ouvrage neuf localisé au même endroit mais dont l'équipement diffère…).

Localisation spatiale de l'ouvrage : coordonnées géographiques (et correction éventuelle sur la base des connaissances du terrain et de la BSS)

Informations sur l'ouvrage : commune, exploitant, identifications du forage (nom BSS, nom du rapport, nom du lieu-dit…).

Informations sur le document : auteur et date du rapport, contenu (étude de vulnérabilité, essai de pompage, analyses chimiques, présence de diagraphie de production ou géologique…), origine, remarques particulières…

Informations hydrogéologiques : nappe exploitée ("nappe 3" ou "nappe 4"), transmissivité, productivité (m^3/h par mètre de rabattement), équation de courbe caractéristique, débit d'exploitation, coupe technique, unités productives, remarques sur la productivité, remarques sur l'équipement (crépines continues ou discontinues, forages rechemisé…), conductivité (à partir de la diagraphie).

Les transmissivités extraites des rapports des bureaux d'études ont été complétées par la synthèse des caractéristiques hydrodynamiques de la plaine du Roussillon [Marchal, 1991]. Ce document inventorie l'ensemble des transmissivités extraites des rapports, thèses et autres documents disponibles avant 1991.

Entre les données inventoriées au cours du présent travail de recherche et la synthèse évoquée ci-dessus, il est possible que deux valeurs de transmissivités différentes coexistent pour un même ouvrage. La différence maximum entre ces deux valeurs n'excède jamais 36% (*eg* : 1.36×10^{-5} et 1.10^{-5} m^2/s) et la somme de ces différences est égale à -0.15%[1]. Au vu de ces faibles différences par rapport à la variabilité naturelle de la transmissivité et aux méthodes d'interprétation et dans l'impossibilité de remonter aux données d'origine (rabattement, débit, temps…), une moyenne a été effectuée entre les deux sources d'informations.

[1] Le théorème empirique de la diminution de l'erreur lors de l'accumulation des observations est particulièrement bien vérifié dans le cas présent.

2.2. Analyse des diagraphies de production

a. Objectif

Les aquifères ne peuvent valablement être identifiés à partir des 34 unités sédimentologiques de la BD géologiques. L'analyse de la position des crépines permet d'ébaucher une réflexion sur les relations entre stratigraphie séquentielle et hydrogéologie. L'analyse des diagraphies de production permet de confronter directement l'information géologique et les propriétés hydrodynamiques.

b. Exemple d'interprétation

Les deux exemples ci-après illustrent les caractéristiques fréquemment relevées au cours de la saisie des données. Le calcul du débit spécifique radial Q_r (présenté ci-après, § 3.1, p. 126, quotient du débit de la zone perméable sur la hauteur de celle-ci) permet de quantifier la distribution des entrées d'eau dans le forage.

Sur la figure 28, à gauche, le forage F1 de Pézilla-la-Rivière (**10907x0121**), présente une distribution des niveaux producteurs relativement étendue, où plus de 60% de la hauteur crépinée participe à la production des entrées d'eau dans l'ouvrage. Dans le détail, la distribution des entrées d'eau dans le forage s'établit comme suit :

- la zone "1a", bien que crépinée, n'est que très faiblement productive ;
- 11% du débit sont produits au sommet du tube plein inter-crépines, entre 57 et 58.6 mètres (zone "2a" sur la figure 28), Q_r = 4.1 m^3/h /m de crépine ;
- 89% du débit sont produits entre 64.6 et 76.5 mètres (zone "3a" sur la figure 28), Q_r = 4.4 m^3/h /m de crépine.

En ce qui concerne la géologie, la crépine supérieure (de 52.5 à 58.6 m) est positionnée entièrement dans l'unité sédimentologique du P3sab (de 52 à 61 m), tandis que la seconde (de 64.6 à 76.5 m) appartient au P2sab (de 64 à 80 m).

Sur ce premier cas, deux unités sédimentologiques théoriquement homogènes (unités marines), présentent une répartition de flux hétérogène pour l'unité P3sab et homogène pour l'unité P2sab. Cependant, la productivité réelle des deux unités semble équivalente en raison d'un débit spécifique radial égal.

Sur la figure 28, à droite, le forage F2 de Corneilla-la-Rivière (**10907X0138**) présente une répartition relativement hétérogène des arrivées d'eau avec deux zones principales de production situées à chaque extrémité de la zone crépinée :

> 42% du débit sont produits entre le sommet des crépines à 42 mètres et 49.50 mètres, (zone "1b" sur la figure 28), Q_r = 2.9 m^3/h /m de crépine ;

> entre 49.50 mètres et 75.10 mètres, la zone est peu productive (zone "2b" sur la figure 28), Q_r = 0.3 m^3/h /m de crépine ;

> 44.7% du débit sont produits entre 75.10 mètres et la base des crépines à 83.60 mètres, (zone "3b" sur la figure 28), Q_r = 2.9 m^3/h /m de crépine ;

En ce qui concerne la géologie, l'ensemble de la crépine (de 43 à 83.6 m) est positionnée dans l'unité sédimentologique du P2sab (de 40 à 92 m). Sur cet exemple aussi, la productivité de l'unité sédimentologique marine est particulièrement mal répartie : 88% du débit sont produits sur 35% de la "hauteur utile" des crépines.

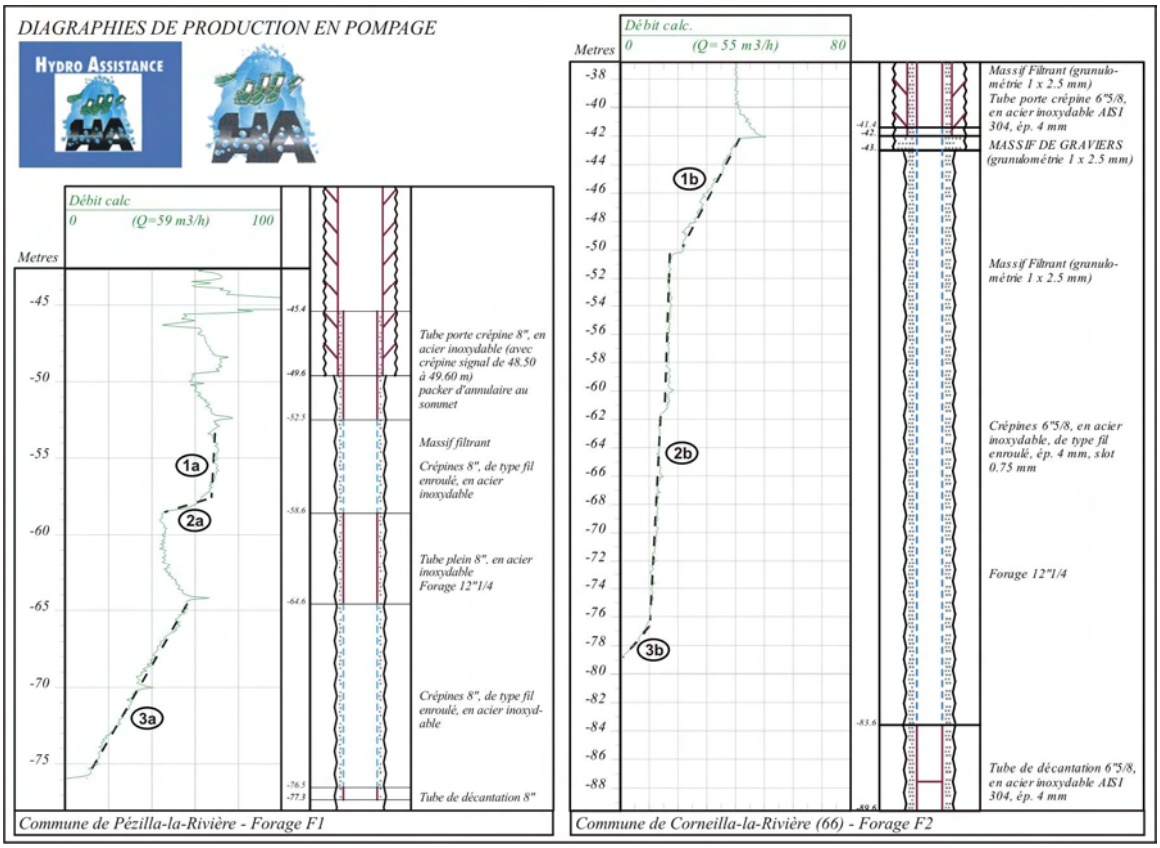


Figure 28 - Exemple d'interprétation de diagraphies de production

c. Résultats

Après recensement de l'ensemble des données, il apparaît clairement que les deux cas d'hétérogénéité évoqués ci-dessus sont communs à l'ensemble de la plaine du Roussillon.

L'évolution temporelle de l'équipement des forages tend aussi à confirmer l'hétérogénéité de la distribution des zones productives. En effet, historiquement et par souci d'économie, les forages étaient équipés de plusieurs crépines positionnées au droit des niveaux sableux reconnus par diagraphie. Actuellement, par expérience et afin d'optimiser la productivité des forages, les bureaux d'études recommandent la mise en place d'une crépine continue sur toute la hauteur de l'aquifère. Par exemple, sur la figure 28 (ci-dessus, p. 114), le tube plein positionné entre les deux crépines occulte vraisemblablement une partie de l'aquifère. Néanmoins, cette évolution d'équipement de forage, bien que favorisant la productivité de l'ouvrage, contribue à amplifier les échanges inter-nappes.

En ce qui concerne les résultats quantitatifs (tableau 6), les unités les plus productives correspondent au Pliocène continental et aux unités sableuses du Pliocène marin. Toutefois, ces productivités ne sont pas homogènes à l'échelle de la plaine du Roussillon : dans quelques cas moins fréquents, les unités sédimentologiques du "P3sab" ou du "P2sab" peuvent se révéler non productives. De même, les unités sédimentologiques définies comme argileuses peuvent être reconnues productives.

Il apparaît, au vu de ces résultats, que dans deux tiers des cas, les crépines sont placées de manière judicieuse.

Comme cela a été évoqué ci-dessus, une certaine hétérogénéité des venues d'eau existe au sein d'une même unité. De plus, il apparaît que les niveaux les plus productifs se localisent quelquefois à la base (6 observations) ou au toit (8 observations) des unités sédimentologiques. Ce phénomène, bien que non quantifié, est lié à la sédimentation gravitaire au sein des prismes marins.

Unités sédimentologiques ou spécificité des unités	**Nombre d'unités à dynamique sédimentaire commune, reconnue pour leur productivité sur la plaine du Roussillon**	**Détails complémentaires**	**Nombre d'unités crépinés observé (pourcentage d'unités productives)**
Holocène continental	3	Co-exploité avec PC	5 (60%)
Prismes marins quaternaires indifférenciés	1		1 (100%)
Terrasse quaternaire	4		4 (100%)
Pliocène continental	**49**	90% des observations = K hétérogène	**62 (79%)**
Prisme Pliocène marin P4	13	P4pal = 7 ; P4sab = 5 ; P4arg = 1	21 (**62%**)
Prisme Pliocène marin P3	30	P3pal = 5 ; P3sab = 23 ; P3arg = 2	43 (**70%**)
Prisme Pliocène marin P2	12	P2pal = 1 ; P2sab = 9 ; P2arg = 2	19 (**63%**)
Prisme Pliocène marin P1	9	P1pal = 1 ; P1sab = 6 ; P1arg = 2	10 (**90%**)
Unités palustre du Pliocène marin	14		32 (**44%**)
Unités sableuses du Pliocène marin	**43**		**52 (83%)**
Unités argileuses du Pliocène marin	7		12 (**58%**)
Distribution très hétérogène des venues d'eau	34		78 (44%)

Tableau 6 - Décompte des unités productives sur la plaine du Roussillon
Données synthétisées à partir des diagraphies de productivités

La figure 29 présente la répartition géographique des unités à dynamique sédimentaire commune, reconnues pour leur productivité à partir de diagraphies de production (cercles de grand diamètre). La distribution de cette première information est fonction de l'existence d'une diagraphie de production.

Afin de compléter cette première information, la position des crépines au sein de deux grands ensembles d'unités sédimentaires : Pliocène continental et Pliocène marin sableux (*eg* : P4pal, P3sab, P2sab…) a été représentée (cercles de petit diamètre). Ces données sont issues de l'inventaire des crépines de la plaine du Roussillon (ci-dessus, p. 99). Hormis la zone de relief entre Thuir et Perpignan, le PC est exploité de manière homogène sur l'ensemble de la plaine. Le PMS, n'est pas exploité dans la vallée du Tech, ni à proximité du littoral.

Sur cette figure, un quart des ouvrages (79 observations) exploite le PC et le PMS. Ces ouvrages sont localisés dans la zone centrale du bassin. La moitié des ouvrages (154 observations) exploite le PC sans le PMS. Enfin, le dernier quart des ouvrages (82 observations) exploite le PMS sans le PC. Ces derniers sont localisés dans l'Ouest du bassin et le Nord du bassin

En ce qui concerne la productivité (figure 29), il apparaît clairement une dichotomie entre la partie Ouest / Nord-ouest et la partie Est de la plaine du Roussillon. Sur la **partie Est**, seul le **Pliocène continental** est **productif**. Il est intéressant de remarquer que quelques crépines sont positionnées dans le Pliocène marin sableux alors que celui-ci est peu productif d'après notre échantillonnage d'observations.

Dans la partie Ouest, les unités sédimentologiques du **Pliocène marin sableux** constituent les **niveaux les plus productifs**. Aucune information de productivité n'est exploitable sur le Pliocène continental (les ouvrages AEP exploitent des unités plus profondes).

Le calcul de la perméabilité de chaque unité sédimentologique, à partir des diagraphies de production, n'a pas été effectué en raison de l'hétérogénéité indéterminée au sein de chaque unité.

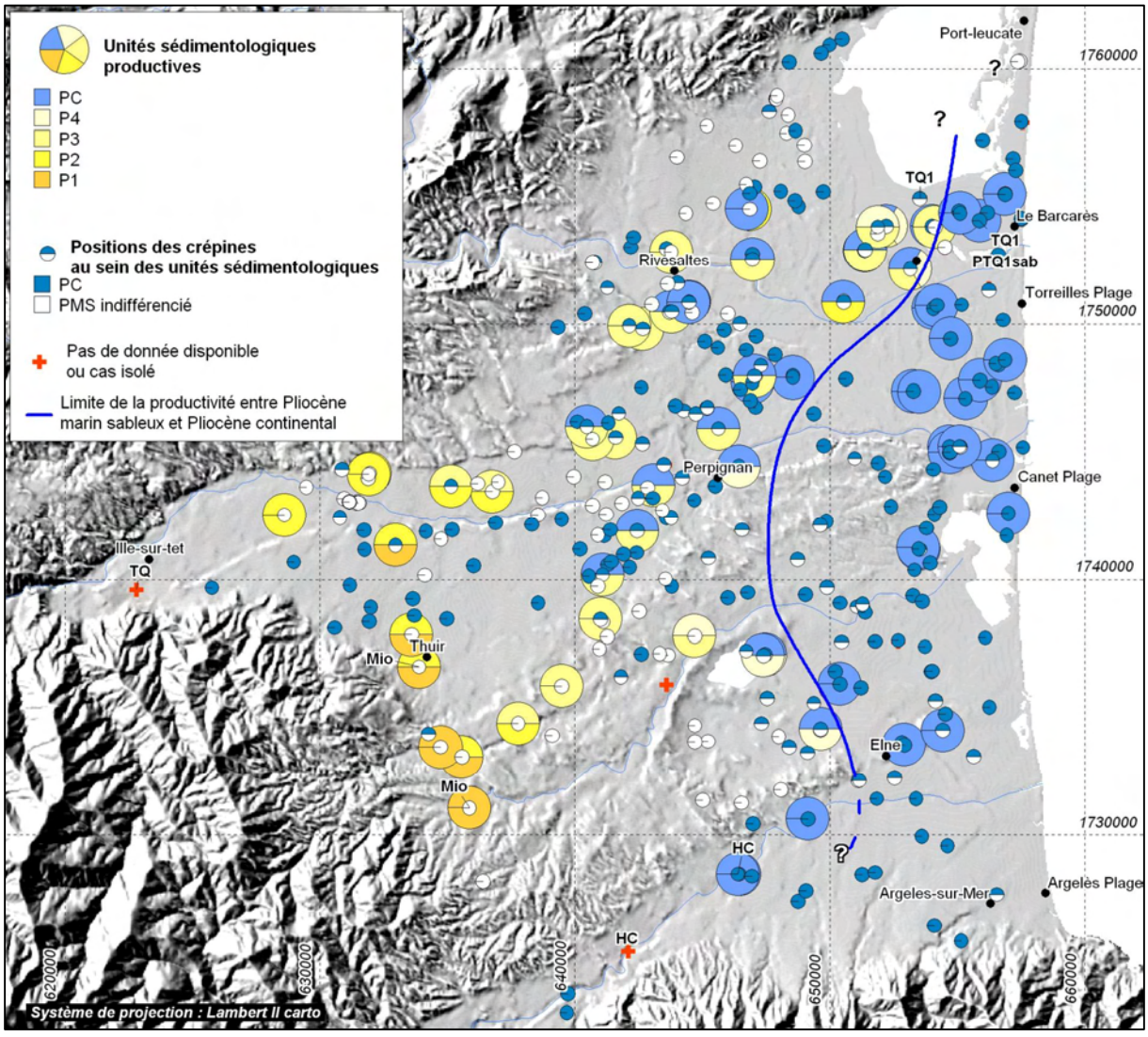


Figure 29 - Répartition géographique des unités à dynamique sédimentaire commune, reconnues pour leur productivité à partir de diagraphies de production
Les cercles sont divisés par le nombre d'unités productives ou crépinées.

2.3. Valeurs de transmissivité de la plaine du Roussillon

Les différentes valeurs de transmissivité ont été recensées et cartographiées par Marchal [1990]. Les données d'origines sont présentées en annexe 9. Les données synthétisées sont présentées sur la figure 30, ci-après.

a. Transmissivités de l'aquifère codé 146

Pour les aquifères superficiels dénommées "nappe 2" (100 observations), les zones particulièrement productives se localisent dans les terrasses situées à proximité des cours d'eau (ordre de grandeur de $T \approx 10^{-2}$ m^2/s). Dans le secteur de S^t Cyprien, au sud de l'étang de Canet, les forages AEP exploitent l'horizon palustre sus-jacent aux prismes marins quaternaires (PQ2pal principalement). Dans ce secteur, cette unité sédimentologique correspond à un paléochenal du Tech particulièrement productif : $T \approx 2.10^{-2}$ m^2/s. Dans le domaine de la recherche pétrolière, les paléochenaux sont visés en priorité pour leur productivité [Poston *et al.*, 1984].

Par opposition, les zones situées sur le pourtour du bassin ou éloignées des cours d'eau, sont un peu moins productives (ordre de grandeur de $T < 10^{-3}$ m^2/s). Par exemple, à Tressere, sur la bordure sud du bassin, la transmissivité chute à 10^{-4} m^2/s. Les transmissivités suivent une loi log-normale[1], seulement lorsque ces faibles valeurs ne sont pas prises en considération.

b. Transmissivités de l'aquifère codé 225 (nappe 3 et nappe 4)

La transmissivité varie spatialement à l'échelle du bassin du Roussillon. Certains secteurs, mis en évidence par Marchal [1990], présentent des transmissivités plus élevées (197 observations). L'origine de cette variabilité spatiale peut-être expliquée par certains facteurs géologiques dont l'étude a été abordée dans le travail de Duvail *et al.* [2001] (annexe 10) :

- au nord du Bassin, en **Salanque** et sur le lido de Leucate, les transmissivités de la "nappe 3" atteignent des valeurs particulièrement élevées (10^{-2} m^2/s à $5.10^{-3} m^2/s$). Dans ce secteur, ce sont les unités sédimentologiques du Quaternaire marin et la partie supérieure de PC qui sont exploitées sur une hauteur effective de l'ordre de 10-15 mètres. Cette zone, localisée au Nord du prolongement de la Faille Nord-pyrénéenne, est caractérisée par l'existence d'un double prisme quaternaire et par l'existence d'une **subsidence** Plio-quaternaire. Le dépôt-centre Pléistocène se superpose exactement avec la zone de forte transmissivité ;
- en allant vers le Sud-Ouest, dans le secteur amont de Perpignan, sur les rives de la Têt, de **Nefiach** à **S^t-Feliu d'Avall**, une zone d'une dizaine de kilomètres de longueur présente des transmissivités plus élevées que la moyenne de la "nappe 4" : de l'ordre de 5.10^{-3} m^2/s. La "nappe 4" correspond dans cette zone aux unités sédimentologiques des prismes pliocènes marins sableux 2 et 3 (P2sab et P3sab). Cette zone productive se superpose avec l'**axe de distribution** des sédiments de la paléo-Têt post-messinienne. En toute logique, les sédiments situés dans le prolongement d'un axe de transit présen-

[1] Une distribution de probabilité d'une variable aléatoire X est dite log-normale si la distribution de probabilité de la variable aléatoire Y = ln X est normale.

tent une granulométrie plus grossière. Cette zone inclut également les faciès plus grossiers rattachés à la mise en place des Gilbert Delta ;

> plus à l'Est, au niveau de l'embouchure de la Têt, aux alentours de la ville de **Canet**, les forages exploitent les unités du Pliocène continental. Les transmissivités de ces forages sont un peu plus élevées que celles des forages localisés en amont (de l'ordre de $3.10^{-3} m^2/s$). Cette zone correspond à un dépôt-centre subsident au cours du Pliocène continental ;

> enfin, dans un secteur très restreint, au Sud-Est de la retenue de Villeneuve-de-la Raho, les forages AEP de **Montescot** sont plus productifs que ceux situés à proximité. Aucune particularité géologique n'a pu expliquer cette différence ;

> à l'échelle du Roussillon, la transmissivité, ainsi que la subsidence pliocène, ont toutes deux tendance à diminuer du Nord vers le Sud du bassin.

D'une part, la subsidence d'un secteur provoque une accumulation de sédiments sur une plus grande épaisseur. En conséquence, il semble logique que les transmissivités soient plus fortes dans les secteurs subsidents. Cette théorie est vérifiée au sein des prismes marins sableux Pliocène. D'autre part, en ce qui concerne la sédimentation continentale, l'expérience géologique et les simulations sédimentologiques [Edington & Poeter, 2006] tendent à prouver qu'il existe une faible connexion des réseaux fluviatiles dans le cas d'accommodation prononcée. Ce phénomène est expliqué par l'existence d'un enregistrement continu des alternances de chenaux et de plaines d'inondation. A l'opposé, lorsque l'accommodation est faible, les plaines d'inondation sont érodées : seuls les systèmes chenalisés sont fossilisés et se juxtaposent, favorisant ainsi les connexions.

En théorie, dans les zones subsidentes de la plaine de la Salanque et du secteur de Canet, les systèmes chenalisés devraient être isolés par les plaines d'inondation fossilisées. La théorie semble être confirmée par l'existence d'une forte proportion de sédiments fins par rapport aux sédiments grossiers (annexe 6). Cette information peut se révéler importante au cours de l'élaboration d'une modélisation hydrogéologique.

D'une manière générale, les conclusions de l'analyse stratigraphique et de la connaissance hydrogéologique sont en accord. Toutefois, ces deux informations sont parfaitement complémentaires car dépendantes l'une de l'autre : la connaissance géologique n'explique pas complètement les différences de productivité de la plaine du Roussillon. De même, certaines observations géologiques n'entraînent, semble-t-il, pas de particularité hydrogéologique.

Sur la plaine du Roussillon, la cartographie des réseaux fluviatiles méandriformes et des réseaux en tresse pourrait contribuer à mettre en évidence les relations hydrogéologie / stratigraphie séquentielle.

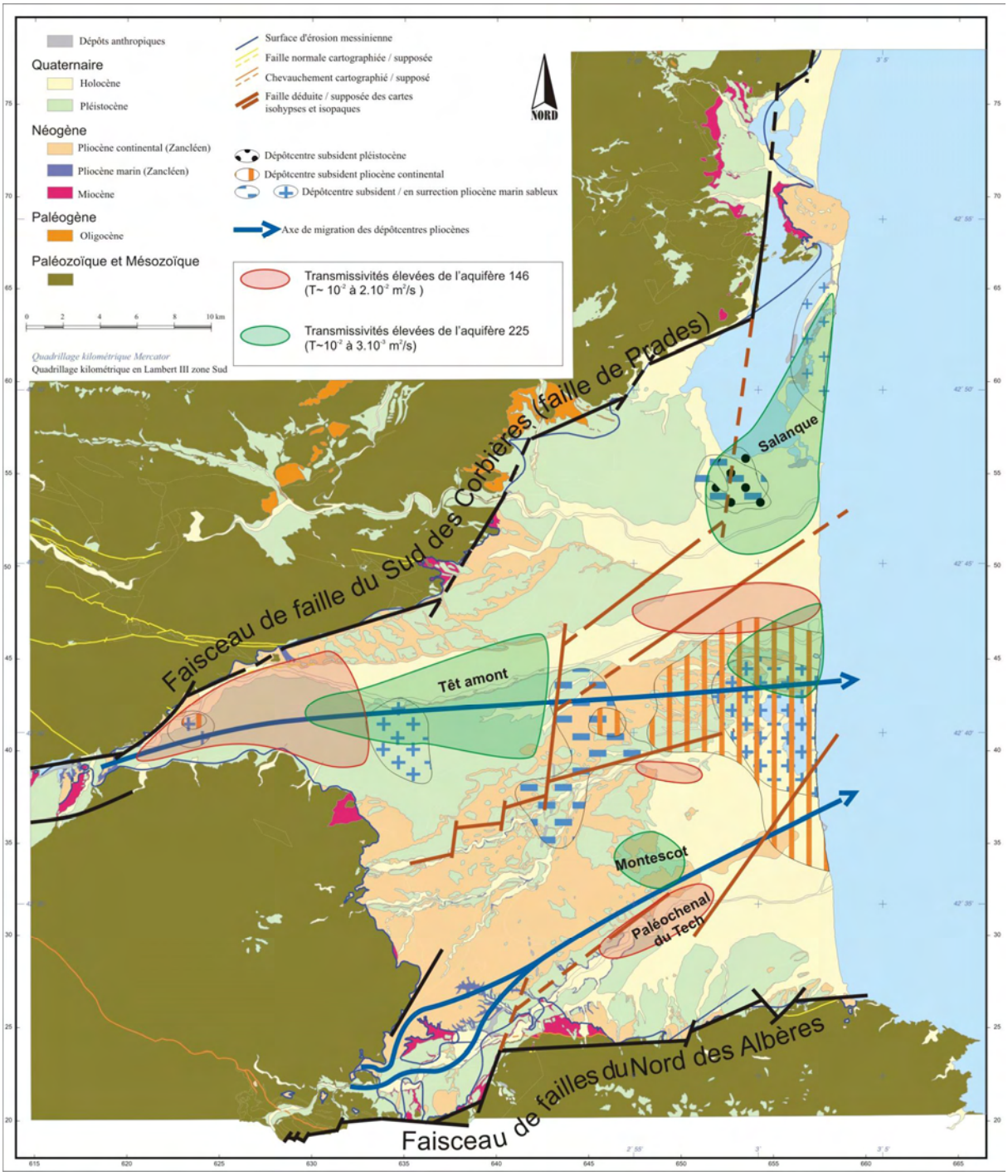


Figure 30 - Transmissivité et paléogéographie de la plaine du Roussillon
Duvail et al. [2001] modifié

c. *Transmissivités et unités sédimentologiques*

i. *Observations des unités sédimentologiques*

Les valeurs de transmissivité ont été couplées à la base de données afin de déterminer les propriétés hydrodynamiques des unités sédimentologiques. Seules 138 valeurs de transmissivité ont pu être mises en relation avec les unités sédimentaires (tableau 7). En ce qui concerne les 159 autres valeurs de transmissivité, aucune information technique ou géologique n'a pu être obtenue.

L'exploitation concomitante des unités sédimentologiques se manifeste par la présence de 58 combinaisons[1] différentes d'unités sédimentologiques. La caractérisation hydrodynamique de chaque unité sédimentologique n'est pas envisageable avec les données disponibles.

Cependant, la représentation des données sous forme de graphique semi-logarithmique permet une première approche de la caractérisation hydrodynamique des unités sédimentologiques. Sur la figure 31, les transmissivités sont placées en abscisses et les unités sédimentologiques en ordonnées. Les unités sédimentologiques sont approximativement classées de haut en bas dans l'ordre suivant :

- prismes pliocènes marins sableux proximaux (P1sab) à distaux (P5pal) numérotés de 1 à 23 ;
- prismes pliocènes marins sableux exploités de manière concomitante avec le Pliocène continental (de P1sab-PC à P5pal-PC) numérotés de 24 à 45 ;
- Pliocène continental, numéro 46 ;
- formations quaternaires exploitées ou non avec le Pliocène continental, numéros 47 à 58.

L'ensemble des unités sédimentologiques du Pliocène et du Quaternaire correspondent respectivement aux aquifères 225 et 146 évoqués dans les paragraphes précédents.

Les valeurs de transmissivité respectent approximativement les groupes listés ci-dessus. Les transmissivités du Pliocène marin sableux s'échelonnent entre 2.10^{-4} m^2/s et 6.10^{-3} m^2/s. La transmissivité de ces prismes marins semble décroître depuis les prismes proximaux de l'Ouest du bassin vers les prismes distaux de l'Est du bassin.

Les transmissivités disparates du Pliocène continental sont liées à l'hétérogénéité de cette unité continentale.

Enfin, les transmissivités des unités quaternaires sont plus élevées ($\approx 10^{-2}$ m^2/s) que les autres observations relatives au Pliocène. Les faibles transmissivités ($\approx 2.10^{-4}$ m^2/s) sont des cas isolés sans particularités spécifiques.

[1] Le terme combinaison est ici utilisé pour exprimer le fait qu'un essai de pompage n'est pas représentatif d'une unité sédimentologique mais plutôt d'une combinaison d'unités.

	Unités sédimentologiques	Nombres d'observations	Moyenne des transmissivités [m^2/s]	Écart-type des données
1	P1pal ; P1sab	1	2.00E-03	
2	P1sab	2	1.80E-03	1.41E-04
3	P1sab ; P1arg	1	1.50E-03	
4	P1sab ; P1arg ; Mio	1	4.10E-03	
5	P2pal ; P2sab ; P1sab ; PT1sab ; Mio	1	3.00E-03	
6	P2sab	1	4.50E-03	
7	P2sab ; Mio	1	3.50E-03	
8	P2sab ; P1sab	2	2.70E-03	2.26E-03
9	P2sab ; P1sab ; P1arg	1	3.50E-03	
10	P3pal ; P3sab	1	3.20E-03	
11	P3pal ; P3sab ; P2sab	1	6.00E-03	
12	P3pal ; P3sab ; P2sab ; P1sab	1	2.80E-03	
13	P3pal ; P3sab ; P3arg	1	3.50E-03	
14	P3pal ; P3sab ; P3arg ; P2sab ; P2arg	1	4.90E-03	
15	P3sab	4	3.25E-03	2.53E-03
16	P3sab ; P2sab	4	1.95E-03	1.18E-03
17	P3sab ; P3arg ; P2sab	1	1.40E-03	
18	P4pal ; P3sab	1	1.40E-03	
19	P4pal ; P4sab ; P3sab	1	3.20E-03	
20	P4pal ; P4sab ; P3sab ; P3arg	1	3.20E-03	
21	P4sab ; P3sab	1	1.80E-03	
22	P4sab ; P4arg ; P3sab	1	3.00E-04	
23	P4sab ; P4pal	1	3.00E-03	
24	PC ; P2pal ; P2sab ; P1sab	1	3.30E-03	
25	PC ; P2sab ; Mio	1	4.40E-03	
26	PC ; P2sab ; P1sab	1	3.00E-03	
27	PC ; P3pal	2	1.35E-03	9.19E-04
28	PC ; P3pal ; P3sab	4	2.55E-03	1.96E-03
29	PC ; P3pal ; P3sab ; P2arg	1	5.80E-03	
30	PC ; P3pal ; P3sab ; P2sab	2	1.70E-03	2.83E-04
31	PC ; P3pal ; P3sab ; P3arg	1	5.30E-03	
32	PC ; P3pal ; P3sab ; P3arg ; P2sab	1	2.50E-03	
33	PC ; P3sab	5	2.41E-03	1.39E-03
34	PC ; P3sab ; P3arg	1	1.00E-03	
35	PC ; P4pal	6	1.13E-03	7.78E-04
36	PC ; P4pal ; P3pal ; P3pal	1	1.70E-03	
37	PC ; P4pal ; P3pal ; P3sab	3	2.67E-03	7.64E-04
38	PC ; P4pal ; P3pal ; P3sab ; P3arg	1	2.60E-03	
39	PC ; P4pal ; P3sab	1	4.00E-03	
40	PC ; P4pal ; P4sab	4	1.76E-03	7.02E-04
41	PC ; P4pal ; P4sab ; P3sab	3	1.06E-03	8.33E-04
42	PC ; P4sab	3	1.93E-03	8.02E-04
43	PC ; P4sab ; P3sab	8	1.93E-03	8.28E-04
44	PC ; P4sab ; P4arg	1	3.80E-03	
45	PC ; P5pal	2	3.25E-03	3.54E-04
46	PC	30	3.25E-03	3.87E-03
47	PQ1arg ; PTQ1sab	1	2.00E-03	
48	PQ1arg ; PTQ1sab ; PC	1	5.00E-03	
49	PQ2pal	2	2.10E-02	1.27E-02
50	PTQ1sab ; TQ1 ; PC	1	3.90E-03	
51	PTQ1sab ; TQ1Pl ; TQ1	1	8.10E-03	
52	PTQ2pal	1	2.50E-02	
53	TQ	9	2.11E-02	2.58E-02
54	TQ1 ; TQ1Pi	2	2.50E-02	7.07E-03
55	TQ2	1	2.00E-04	
56	TQ2 ; PQ1pal ; PQ1sab	1	1.70E-02	
57	HC	2	2.32E-02	1.87E-02
58	HC ; PC	2	1.50E-02	0.00E+00
	Total	**138**	**5.23E-03**	**9.45E-03**

Tableau 7 - Combinaisons d'unités sédimentologiques et transmissivités

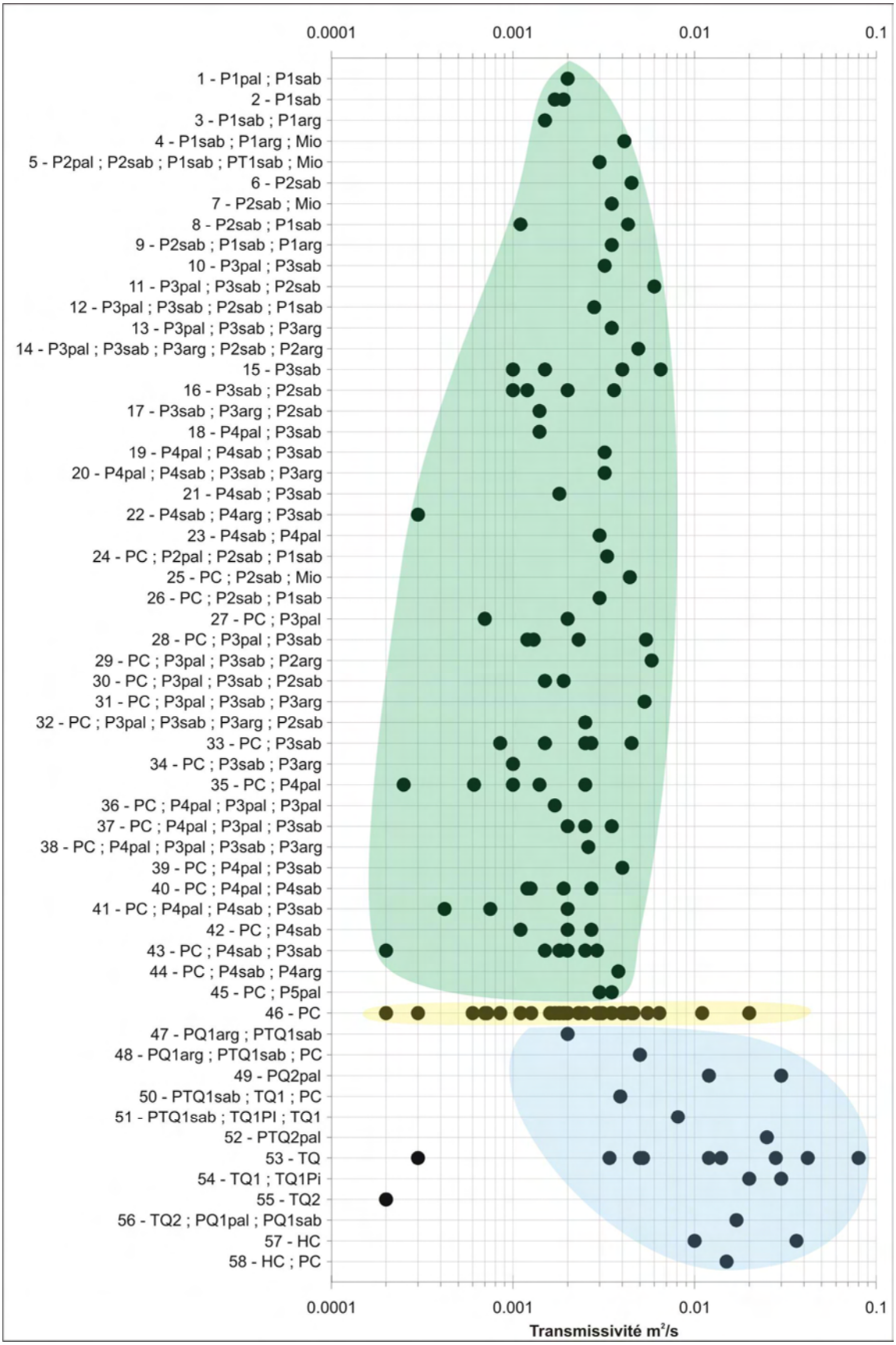


Figure 31 - Distribution des transmissivités et des unités sédimentologiques
Les ensembles colorés soulignent les unités du Pliocène marin sableux, du Pliocène continental et du Quaternaire

ii. Observations des unités sédimentologiques regroupées

Afin d'augmenter le nombre d'observations pour chaque échantillon, les unités sédimentologiques ont été regroupées par dynamique sédimentaire commune (*eg :* P3sab et P3arg regroupé sous le terme P3). Ces données sont présentées ci-dessous tableau 8. Les combinaisons d'unités sédimentologiques sont réduites à 25.

Ces données sont aussi représentées sous forme de graphique semi-logarithmique. Sur la figure 32, les transmissivités sont placées en abscisses et les unités sédimentologiques en ordonnées. Les unités sédimentologiques sont classées de haut en bas dans l'ordre suivant :

- prismes pliocènes marins sableux proximaux (P1) à distaux (P5) numérotés de 1 à 11 ;
- prismes pliocènes marins sableux exploités de manière concomitante avec le Pliocène continental (de P1 ; PC à P5; PC) numérotés de 12 à 18 ;
- Pliocène continental, numéro 19 ;
- formations quaternaires exploitées ou non avec le Pliocène continental, numéros 20 et 21.

Cette nouvelle représentation confirme les observations effectuées sur les données non regroupées. De plus, les points suivants méritent d'être soulignés :

- les points à faible transmissivité du prisme P1 (en rouge sur la figure 32) sont situés à proximité des Albères, en dehors des axes de transits pliocènes ;
- la baisse de la transmissivité est bien corrélée avec l'augmentation du caractère distal des prismes pliocènes marins sableux (en vert foncé sur la figure 32) ;
- cette observation est aussi valable pour les prismes exploités de manière concomitante avec le Pliocène continental (en vert clair sur la figure 32). Dans ce cas, la transmissivité est la résultante des transmissivités du Pliocène continental (en jaune sur la figure 32) et des transmissivités du Pliocène marin sableux.

Dans le cas des aquifères du Roussillon, la décroissance de la transmissivité ne peut-être expliquée par la diminution de l'épaisseur des unités sédimentologiques d'amont en aval. Bien au contraire, dans le cas d'un bassin subsident, l'épaisseur des prismes à tendance à augmenter depuis les zones distales vers les zones proximales (figure 16, p. 68). Cette diminution de transmissivité est donc significative d'une baisse de perméabilité d'Ouest en Est.

Cette observation a déjà été mentionnée dans le cas de grands bassins sédimentaires [Person *et al.*, 1996].

	Unités sédimento-logiques	Nombres d'observations	Moyenne des transmissivités [m^2/s]	Écart-type des données
1	P1	4	1.78E-03	2.22E-04
2	P1 ; Mio	1	4.10E-03	
3	P2	1	4.50E-03	
4	P2 ; Mio	1	3.50E-03	
5	P2 ; P1	3	2.97E-03	1.67E-03
6	P2 ; P1 ; Mio	1	3.00E-03	
7	P3	6	3.28E-03	1.97E-03
8	P3 ; P2	7	2.87E-03	1.99E-03
9	P3 ; P2 ; P1	1	2.80E-03	
10	P4	1	3.00E-03	
11	P4 ; P3	5	1.98E-03	1.24E-03
12	PC ; P2 ; Mio	1	4.40E-03	
13	PC ; P2 ; P1	2	3.15E-03	2.12E-04
14	PC ; P3	13	2.40E-03	1.65E-03
15	PC ; P3 ; P2	4	2.93E-03	1.96E-03
16	PC ; P4	14	1.67E-03	9.74E-04
17	PC ; P4 ; P3	17	2.05E-03	9.94E-04
18	PC ; P5	2	3.25E-03	3.54E-04
19	PC	30	3.25E-03	3.87E-03
20	PQ	2	2.10E-02	1.27E-02
21	TQ	12	2.00E-02	2.31E-02
22	TQ ; PQ	4	1.30E-02	1.01E-02
23	TQ ; PQ ; PC	2	4.45E-03	7.78E-04
24	HC	2	2.32E-02	1.87E-02
25	HC ; PC	2	1.50E-02	0.00E+00
	Total	**138**	**5.23E-03**	**9.45E-03**

Tableau 8 - Combinaisons d'unités sédimentologiques regroupées par dynamique sédimentaire commune et transmissivités

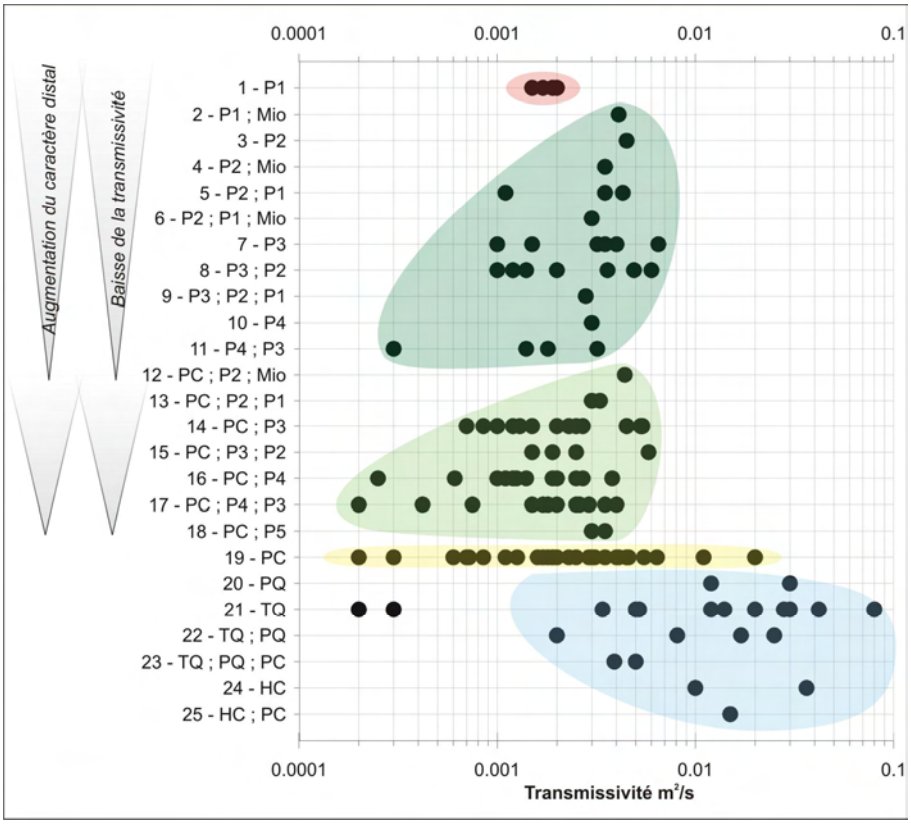


Figure 32 - Distribution des transmissivités et des unités sédimentologiques regroupés par dynamique sédimentaire commune

3. Ajout d'informations complémentaires à la base de données hydrodynamiques

La BD hydrodynamiques a été complétée par diverses données élaborées à partir des résultats des bureaux d'études.

3.1. Calcul du débit spécifique radial Q_r

Le débit spécifique radial "Q_r" permet de comparer la production de forages ne présentant pas le même équipement (crépines continues ou discontinues). Ce débit est calculé en divisant le débit par le nombre de mètres sur lequel ce débit est produit (figure 28, p. 114). Pour plus de clarté, il s'exprime en m^3/h par mètre de crépine.

Sur l'ensemble de la plaine, le débit spécifique radial des unités sédimentologiques P3sab, et PC dans un moindre mesure, est particulièrement plus élevé que pour les autres unités.

3.2. Réinterprétation d'essais de pompage[1]

L'objectif était de **valider les données** des bureaux d'études en comparant leurs résultats avec ceux obtenus avec le logiciel "WinIsape" d'interprétation de tests hydrauliques en forage (Brgm - Antea). Les résultats comparés ont été validés sans aucune différence notable (< 20%) entre l'interprétation WinIsape et celle des bureaux d'études. Bien entendu, il n'est pas exclu que des différences plus importantes existent de manière ponctuelle.

Cette comparaison a été menée sur les ouvrages suivants, sélectionnés de manière aléatoire : **10911X0225**, **10911X0226**, **10912X0129**, **10912X0133** et **10972x0145**.

[1] Dans la plupart des cas, c'est-à-dire sans les données originales, la réinterprétation des essais de pompage nécessite la digitalisation puis l'extraction des valeurs des courbes de descente et de remontée.

3.3. Détermination des pertes de charges quadratiques

Dans un premier temps, l'objectif était de **valider les données** des bureaux d'études en comparant leurs résultats avec ceux obtenus par calcul des pertes de charge quadratiques (régression polynomiale d'ordre 2). Les résultats obtenus sont similaires à ceux des bureaux d'études (comparaison effectuée sur 14 ouvrages sélectionnés de manière aléatoire).

Rappelons que d'après Jacob [1947], le rabattement "*s*" observé à un instant t donné dans un puits de pompage est la somme de deux composantes, dont l'une est linéaire et l'autre quadratique par rapport au débit :

$$s = BQ + CQ^2$$

BQ	perte de charge linéaire due à l'écoulement laminaire ;
CQ^2	perte de charge quadratique due à l'écoulement turbulent dans les crépines, le tubage et au sein de l'aquifère à proximité immédiate des crépines.

A l'échelle de la plaine du Roussillon, les pertes de charges quadratiques sont moyennement élevées : elles représentent en moyenne 22% des pertes de charge totales (51 observations ; $\mu = 0.22$; $\sigma = 0.13$). Ce taux aura tendance à augmenter avec le temps en raison de l'augmentation de travaux de réhabilitation d'ouvrage. Le rechemisage d'un ouvrage entraîne des chutes de productivité de l'ordre de 30% (*eg* : 26% pour le **10963x0019/F2** à Thuir et 38% pour le **10916x0013/F** à S^t Nazaire).

Le débit spécifique des ouvrages atteint en moyenne 10.4 m^3/h par mètre de rabattement (82 observations). La forte valeur d'écart-type ($\sigma = 13.7$) est influencée par quelques valeurs extrêmes. Toutefois, le débit spécifique de plus de 80% des ouvrages présente des gammes de productivité comprises entre 2 et 14 m^3/h par mètre de rabattement. Les ouvrages dont le **débit spécifique** est le **plus élevé** exploitent les **nappes superficielles** des terrasses quaternaires (TQ) et dans une moindre mesure, sont localisés en **Salanque** (pour les ouvrages du **Pliocène**).

Cette information concorde avec l'inventaire des caractéristiques hydrodynamiques de la plaine du Roussillon [Marchal, 1990].

Dans un second temps, l'objectif était de déterminer si, dans le cas du Roussillon, une relation pouvait être mise en évidence entre **pertes de charge linéaires** et **propriétés hydrodynamiques**. Des calculs d'emmagasinement ou de transmissivité ont été effectués par différentes méthodes lors d'essais de pompage par paliers [Birsoy & Summers, 1980 ; Eden & Hazel, 1973 ; Avci, 1992 ; Kawecki, 1995]. Mais selon les données disponibles, seule l'approximation courante des hydrogéologues, consistant à déduire la valeur de transmissivité de l'inverse du coefficient "*B*" ($T \approx 1/B$) permettrait de valoriser la BD hydrodynamiques. Cependant, cette relation empirique est à considérer avec une certaine prudence. Forkasiewicz, [1978] recommande de respecter les conditions suivantes :

- puits parfait, c'est-à-dire complet (captant au moins 75% de la hauteur totale de l'aquifère) et sans aucune perte de charge quadratique positive ou négative due au remaniement autour de la crépine ;
- régime permanent établi en fin des paliers.

Sur l'ensemble des observations de la plaine du Roussillon, aucune de ces conditions n'est réellement respectée. Les pertes de charge quadratiques sont toujours positives et les observations sont principalement constituées d'essais de pompage par paliers dont la durée avoisine, au maximum, une à deux heures.

Toutefois, en raison d'un échantillon important (transmissivités et coefficients de pertes de charge linéaires), quelques tests de corrélations ont été effectués sur l'ensemble des 45 observations communes.

	Transmissivités déterminées par pompage d'essai (m^2/s)	**Transmissivités déterminées à partir de la formule empirique : $T \approx 1/B$ (m^2/s)**	**Différence**
Moyenne	4.8×10^{-3}	5×10^{-3}	3.1 %
Ecart-type	5.5×10^{-3}	9.3×10^{-3}	66.8 %
Minimum	5.7×10^{-4}	7.9×10^{-4}	38.8 % (maximum de différence = -73%)
Maximum	3×10^{-2}	6.1×10^{-2}	104.4 % (maximum de différence = 309%)
Moyenne des valeurs absolues des différences			37.9%

Tableau 9 - Comparaison des transmissivités calculées et estimées

Sur l'ensemble de l'échantillon, la méthode d'estimation semble correcte avec une répartition de l'erreur assez homogène (20 valeurs supérieures à 0 et 28 inférieures à 0). Cette méthode pourrait être utilisée à grande échelle lors d'approximations prévisionnelles (figure 33). Par opposition, si une corrélation est effectuée entre chaque valeur de transmissivité, la qualité des résultats devient moins pertinente (figure 34). D'après la régression linéaire, l'estimation de la transmissivité par la formule empirique ($T \approx 1/B$) tend à surestimer les valeurs.

Cette observation confirme la théorie : si le temps de pompage est allongé pour atteindre un régime permanent établi, donc un rabattement stabilisé, la valeur de ce même rabattement augmente. De même, le coefficient "B" augmente et la transmissivité estimée diminue. En conséquence, en allongeant le temps de pompage, la transmissivité estimée deviendrait meilleure.

Toutefois, sur l'échantillon observé (45 observations), la moyenne d'erreur de l'estimation est égale à -4.7 % et 40 % en valeur absolue ($\sigma = 0.5$; maximum d'erreur = 176 % ; minimum d'erreur = -73%). L'augmentation de la divergence des points sur les valeurs fortes ($T_{estimé} < 0.008$ m^2/s sur la figure 34) est expliquée par cette erreur d'estimation. Pour cette forte valeur, l'erreur ne dépasse pas 60% (valeur absolue).

Sur la figure 34 ont été représentées :

- la droite "y=x" matérialisant une estimation parfaite ;
- les droites "y = 1.6x" et "y = 0.4x" matérialisant une erreur de plus ou moins 60 % autour d'une estimation parfaite.

En conclusion, dans le cas du Roussillon, la formule empirique ($T \approx 1/B$) constitue un estimateur de la transmissivité de qualité moyenne. La connaissance non-exhaustive de la qualité des données ne permet pas d'aboutir à des réflexions plus poussées.

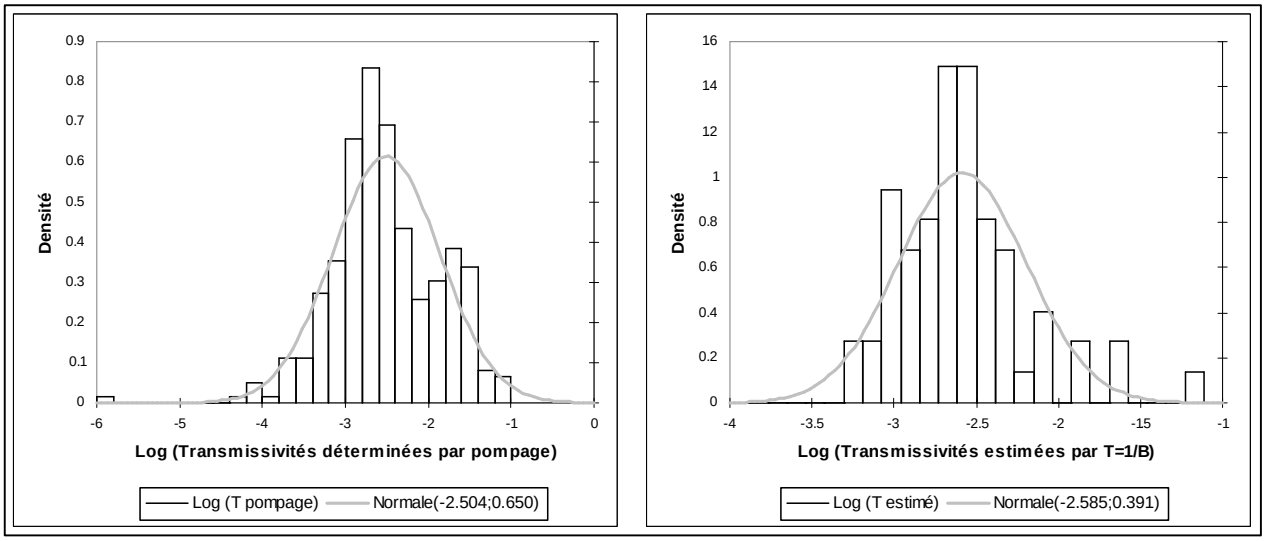


Figure 33 - Histogramme des distributions des transmissivité obtenues par pompage et estimées par (T≈1/B)

Les deux échantillons suivent une loi log-normale (test de Kolmogorov-Smirnov[1]). Les paramètres de la loi normale du log des transmissivités sont précisés entre parenthèses.

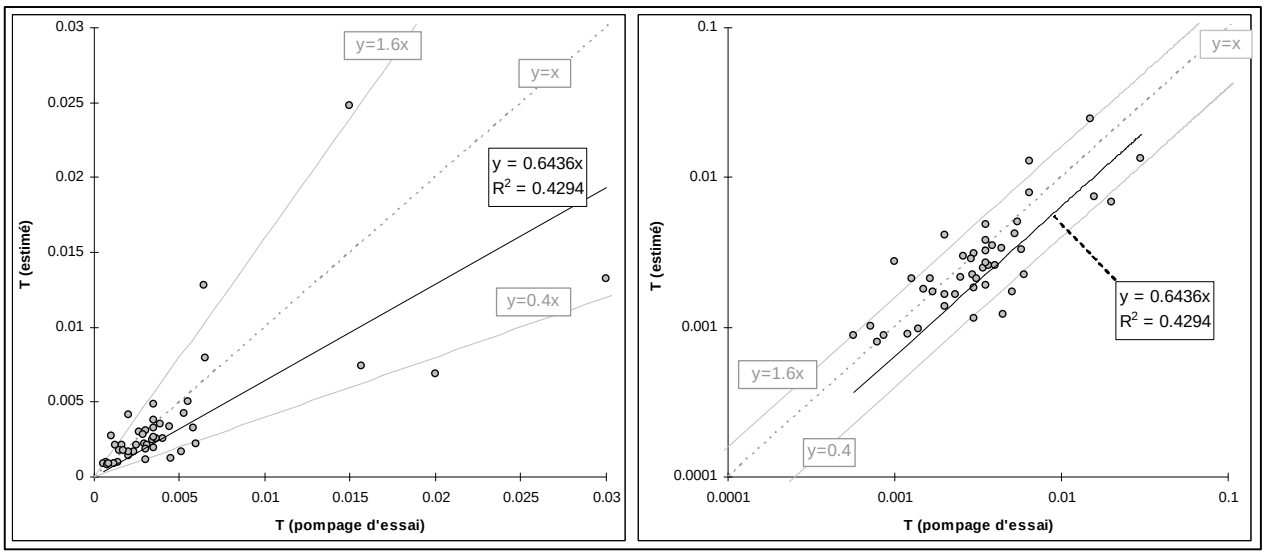


Figure 34 - Corrélation entre transmissivité calculée par essai de pompage et transmissivité estimée

Echelle linéaire et logarithmique

[1] Le test de Kolmogorov-Smirnov teste l'égalité entre la distribution cumulée et la fonction de répartition de la loi de probabilité ajustée [manuel de l'utilisateur XLSTAT-Pro, 2004, http://www.addinsoft.com]

4. Synthèse des relations entre stratigraphie séquentielle et hydrogéologie

Le bassin du Roussillon, historiquement considéré comme un aquifère multicouche, est constitué par la succession de cinq prismes sédimentaires marins pliocènes alternant avec des systèmes continentaux. Sur la zone littorale, un système quaternaire marin est emboîté en aval de la série des terrasses alluviales contemporaines des phénomènes glacio-eustatiques.

Au vu des différentes données énumérées ci-dessus, l'**hétérogénéité** de cet ensemble aquifère multicouche, que cela soit au sein du Pliocène continental ou dans la progradation marine des prismes pliocène, représente un paramètre difficilement négligeable lors de la gestion des ressources en eau en zone littorale.

4.1. Représentations numériques de l'hétérogénéité

Le récent article de Marsily *et al*. [2005] synthétise les différentes approches menées sur la prise en considération des hétérogénéités au sein des aquifères. Les auteurs insistent notamment sur le rôle des hétérogénéités dans les problématiques de modélisation du transport[1] sur des aquifères côtiers.

La distribution des hétérogénéités est fonction de l'évolution de différents paramètres naturels tels qu'apport sédimentaire, eustatisme, subsidence, érosion, compaction ou tectonique... D'une manière générale, tous les processus intervenant dans l'élaboration d'une roche sédimentaire depuis son dépôt jusqu'à son état actuel contribuent chacun, à son hétérogénéité. Pour une roche sédimentaire, l'ensemble de ces processus est regroupé sous le terme de diagenèse[2]. Intrinsèquement aux sédiments, le rôle des hétérogénéités sur l'hydrogéologie se décline selon :

- la distribution des perméabilités qui influe directement sur les vitesses d'écoulement ;
- la taille et la distribution de la porosité qui contraignent très fortement les temps de transport ;
- la connectivité entre les zones plus ou moins perméables apparaît être aussi un facteur prépondérant [Krishnan & Journel, 2003; Zinn & Harvey, 2003; Proce *et al.*, 2004; Knudby & Carrera, 2006] ;
- la présence de discontinuités (faille, chenaux…).

Afin de prendre en considération les hétérogénéités d'un milieu, un certain nombre de méthodes a été élaboré et sera présenté ci-dessous. Pour une revue de littérature plus exhaustive, se référer à de Marsily *et al.* [2005].

Différents exemples de spatialisation des hétérogénéités sont présentés ci-après, figure 35, p. 134.

[1] L'importance des hétérogénéités sur les charges hydrauliques lors de modélisations hydrodynamiques reste moindre car, à l'inverse des vitesses, la charge hydraulique varie peu dans une zone hétérogène.

[2] L'hétérogénéité des roches de socle ou volcaniques est aussi liée à un ensemble de processus naturels mais le terme diagenèse est réservée aux roches sédimentaires.

a. Approches géostatistiques

Les premiers travaux de **géostatistique** et de **méthodes stochastiques** appliquées à l'hydrogéologie peuvent être attribués à Warren & Price [1961], Matheron [1967], Gelhar [1976] et Delhomme [1978]. L'objectif de ces méthodes consiste à extrapoler les connaissances d'un milieu tout en intégrant la répartition spatiale et l'éloignement des points d'observation (variogramme). Le résultat de l'application de ces méthodes est un modèle reproduisant les hétérogénéités de manière continue, mais ne correspondant pas nécessairement à la réalité naturelle de ces dernières [de Marsily *et al.*, 2005].

Les **approches booléennes**, développées par les compagnies pétrolières [Haldorsen & Chang, 1986] présentent la particularité d'introduire des éléments finis (lentilles de sables / argiles, fractures) dont les interactions sont parfaitement contrôlées. La distribution spatiale des éléments peut correspondre à des faciès ou à des unités homogènes. Cette distribution peut aussi être contrainte par une approche géostatistique. Ce genre d'approche a permis d'optimiser le taux de récupération d'huile au sein des réservoirs pétroliers [Larue & Legarre, 2004 ; Stolz & Graves, 2005].

Le développement du code HERESIM [Matheron *et al.*, 1987], élaboré par l'Institut Français du Pétrole (IFP) et le Centre de Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris permet d'intégrer une nouvelle dimension aux géostatistiques : la simulation de **gaussiennes seuillées** (gaussian threshold model), qui prend en compte l'information relative à la connectivité entre différents points.

Une approche plus récente, les **géostatistiques multipoints** (multiple-point statistics) [Strebelle, 2002], permet d'obtenir une contrainte naturaliste lors de l'élaboration des différents modèles de faciès. Les simulations appuyées sur des probabilités conditionnelles peuvent être inspirées de cartes de distribution réelle de faciès (image d'entrainement).

Les simulations de gaussiennes seuillées et des approches multipoints produisent des résultats en accord avec les structures géologiques observées sur le terrain [de Marsily *et al.*, 2005].

D'autres méthodes peuvent être utilisées dans le cas de simulation d'hétérogénéités, (chaine de Markov, simulations de Monte-Carlo…). Ces méthodes, quelque peu éloignées de la réalité géologique ne seront pas abordées ici.

b. Modélisation génétique géologique

La modélisation génétique permet d'appréhender d'une autre façon la distribution des hétérogénéités. L'article de Kolterman & Gorelick [1996] aborde les différentes méthodes employées jusqu'en 1996.

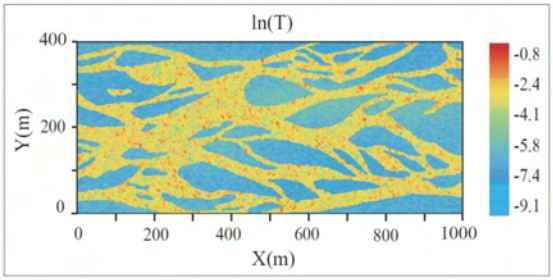
L'objectif de ce type de modèle et de reproduire les systèmes de sédimentation et la réalité géologique selon des lois physiques ou empiriques. Les premiers résultats à grande échelle sont à attribuer à Koltermann & Gorelick [1992]. Sur une échelle plus réduite, et dans le domaine de l'hydrogéologie, les travaux de Teles *et al.* [2004] s'intéressent à la mise en place des réseaux fluviatiles.

En fonction de l'objectif visé (géométrie de grands corps sédimentaires ou distribution de faciès dans des systèmes alluviaux), l'échelle de modélisation doit être adaptée. Différentes équations sont utilisées[1] :

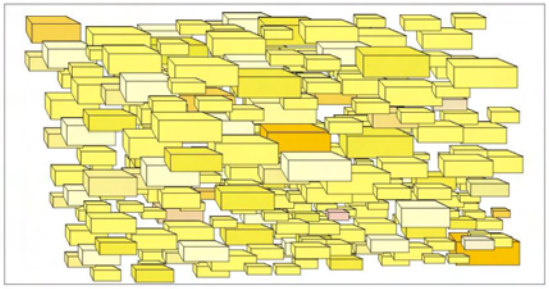
- équations de diffusion où le flux de sédiment est proportionnel à la pente. D'autres facteurs tels que subsidence et compaction interviennent aussi dans les calculs. Ce genre de modèle est réservé aux synthèses de bassin sédimentaire et les résultats pourraient être assimilés à la représentation de la figure 16 (p. 68). Les simulations permettent aussi de contrôler les hypothèses de sédimentation formulées au cours de l'élaboration du modèle conceptuel. La publication de Paola [2000] propose une synthèse des différents modèles et résultats de simulations de bassins. Le code de calcul "DIONISOS" de l'IFP fait référence dans ce genre d'approche ;
- équations basées sur des lois physiques ou empiriques plus fines où la géométrie d'un cours d'eau peut-être un facteur prépondérant dans ce genre d'approche [Sun *et al.*, 1996 ; Lopez *et al.*, 2001 ; Lopez, 2003 ; Teles *et al.*, 2001].

D'une manière générale, les approches génétiques produisent des résultats plus intéressants que les approches statistiques mais nécessitent souvent un changement d'échelle (upscaling).

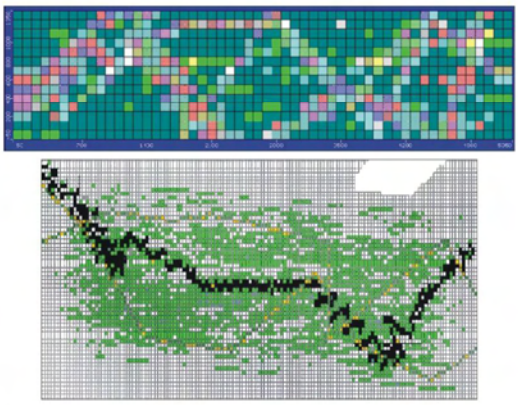
[1] L'analogie pourrait être faite avec le domaine de l'hydrogéologie entre l'équation de Navier-Stockes et celle de Darcy.



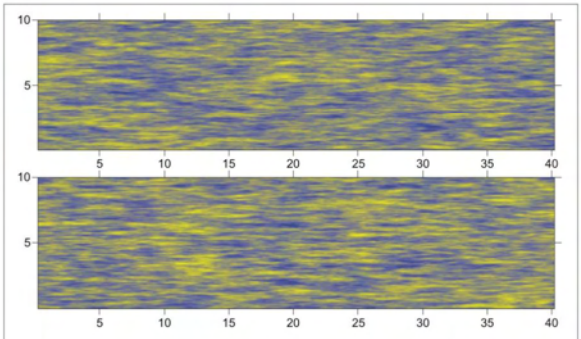
Exemple d'image d'entrainement potentiellement utilisée lors d'**approches géostatistiques** multipoints [Kerrou *et al.*, 2004]. Ci-dessus, le dessin du réseau est inspiré d'une photo aérienne. Les distributions des perméabilités à l'intérieur et à l'extérieur des chenaux suivent toutes deux une loi log-normale.



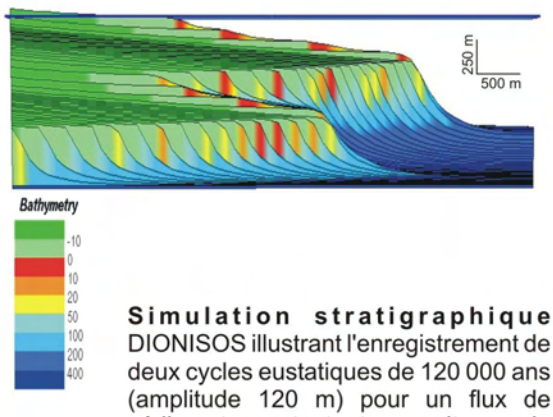
Modèle booléen d'un faciès sédimentaire. Propriétés physiques et relations de connectivités sont attribuées aux différentes unités. Une approche géostatistique peut-être utilisé lors de la distribution des unités.



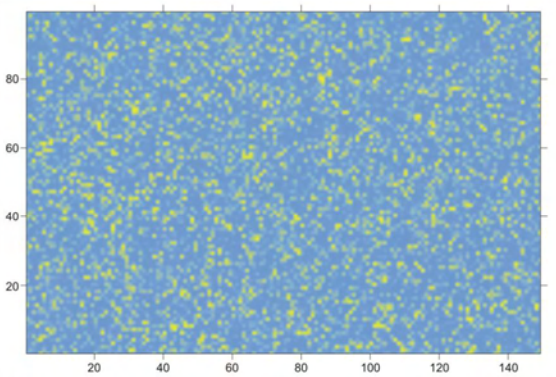
Vues planaires à différentes échelles d'une des couches de structures méandriformes modélisée par des **approches génétiques** [reproduit à partir de Teles *et al.*, 2004 - avec la permission d'Elsevier]



Champ de perméabilité aléatoire contraint par une **approche géostatistique :** fonction de covariance exponentielle.
Anisotropie = 0.1
Les deux réalisations sont générées à partir d'HYDRO_GEN [Bellin & Rubin, 1996]



Simulation stratigraphique DIONISOS illustrant l'enregistrement de deux cycles eustatiques de 120 000 ans (amplitude 120 m) pour un flux de sédiment constant et une vitesse de subsidence constante et uniforme dans l'espace et le temps [Rohais, 2007].



Exemple de champ de perméabilité aléatoire sans contrainte géométrique. La **distribution statistique** de la perméabilité suit une loi log-normale.
Réalisation générée à partir d'ASM [Kinzelbach & Rausch, 1995 ; Frenzel, 1995]

Figure 35 - Quelques exemples de spatialisation de l'hétérogénéité

4.2. De la théorie statistique à la plaine du Roussillon

Les interprétations conventionnelles de la géologie sont souvent trop détaillées dans le cas de simulations appliquées et ne reproduisent pas fidèlement les performances des réservoirs [Slatt & Hopkins, 1990].

a. Une question d'échelle…

Plus d'une quinzaine d'années plus tard, les auteurs de cette affirmation n'ont pas complètement tort. En effet, l'intégration directe de la géologie dans des simulations numériques à objectif pétrolier ou hydrogéologique reste un exercice complexe.

Kostic *et al.* [2005] ont réussi à mener à bien cette opération sur une géométrie de type Gilbert Delta. Après avoir étudié scrupuleusement une zone de quelques centaines de mètres carrés grâce à la réalisation de cinq forages et de plusieurs profils radar, un modèle faciologique "déterministe" a été construit. Ce dernier reproduit fidèlement les géométries et la distribution des perméabilités sur un bloc en 3D de dimensions : 13.5×12 m sur 26 m d'épaisseur [Becht *et al.*, in press, corrected proof].

Dans les cas plus fréquents, l'approche de l'hétérogénéité conserve un caractère expérimental théorique assez marqué. Riches d'informations, les modèles simulant l'hétérogénéité peuvent atteindre plusieurs centaines de milliers de mailles. Par exemple, Ababou & Al-Bitar [2004] analysent la position de l'IEDS en fonction de l'hétérogénéité sur un modèle d'un million de mailles. Ces approches scientifiques ne peuvent être que difficilement appliquées lors de modélisations régionales et nécessitent l'utilisation de méthodes de changement d'échelle (upscaling). Pour une revue de littérature sur le thème du changement d'échelle, voir Renard & de Marsily [1997] et Noetinger *et al.* [2005].

b. Bilan des données traitées concernant la plaine du Roussillon

Afin de se recentrer sur la problématique du Roussillon qui s'étend sur 800 km^2 et plus de 200 mètres de profondeur, les différentes données disponibles sont énumérées ci-dessous :

- géologie : information géologique corrélée de points à points définissant des unités sédimentologiques. Néanmoins, le découpage en unités sédimentologiques présente un inconvénient à prendre en considération : il n'existe pas de distinction au sein du Pliocène continental alors que ce dernier abrite deux nappes réputées indépendantes (en Salanque : "nappe 3" et "nappe 4") ;
- connaissance des axes de drainage, des zones de subsidence et d'accommodation [Duvail *et al.*, 2001] ;
- informations qualitatives sur les propriétés hydrogéologiques des unités sédimentologiques (*eg* : P3sab semble productif tandis que PTQ2arg ne l'est pas) grâce à l'étude des crépines et des diagraphies de production ;
- hétérogénéités intrinsèque et extrinsèque de la production des unités sédimentologiques (*eg* : sur une même verticale, P2sab n'est pas toujours productif et lorsqu'il est productif, les arrivées d'eau peuvent être hétérogènes ou homogènes) ;

> valeurs de transmissivité sur l'ensemble de la plaine, mais ne caractérisant pas les unités sédimentologiques de manière indépendante, sauf cas exceptionnel. Toutefois, une méthode quantitative aurait pu être développée à partir des diagraphies de production : lorsque l'ensemble d'un forage est crépiné de manière continue, la perméabilité peut-être déduite du débit spécifique radial. Cette méthode n'a pas été développée en raison de la variabilité spatiale de la perméabilité ;

> exploitation commune de plusieurs unités sédimentologiques sur un même ouvrage.

Au vu de ces informations et du fait de l'exploitation de 29 unités sédimentologiques, bien que certaines conservent un caractère marginal ou soient semblables à d'autres unités (tableau 3, p. 103), il s'avère nécessaire d'adopter certaines hypothèses[1] afin de conceptualiser le modèle hydrogéologique.

Certaines approximations sont toujours nécessaires afin d'avancer dans la compréhension d'un système. Ces étapes doivent intégrer (i) les limitations liées à la puissance de calcul, (ii) les problèmes de calage (caler un modèle de 29 couches sans données précises sur chaque couche n'est pas prudent), (iii) le lissage et l'homogénéisation de la connaissance, (iv) et dans le cas du Roussillon, la présence de forages recoupant plusieurs unités sédimentologiques.

Les approximations suivantes pourront être admises :

> la structure sédimentologique du littoral doit être conservée, afin de déterminer la vulnérabilité des aquifères face aux intrusions salines, mais il est difficile d'intégrer l'ensemble des données sur les prismes quaternaires marins ;

> P5 est toujours exploité avec le PC. Pour plus d'homogénéité, cette unité doit être regroupée avec le PC ;

> P2cont (deux observations au nord de Rivesaltes **10911x0148** et **10911x0166**) correspond à des niveaux du Pliocène continental liés au prisme sableux 2. Pour plus d'homogénéité, cette unité doit être regroupée avec le PC ;

> PT1sab (une observation sur le forage de Thuir **10963x0019**) présente une incertitude d'interprétation. Pour plus d'homogénéité, cette unité sera rattachée à P1sab ;

> dans la partie Ouest du bassin, les prismes marins pliocènes sont très souvent exploités de manière concomitante. En fonction du logiciel utilisé (fonction multiwell aquifer disponible ou non), il faudra regrouper l'ensemble de ces prismes. Les zones où les prismes sableux se superposent sont représentées sur la figure 23 (p. 86) ;

> dans la partie Est du bassin, les prismes sableux pliocènes ne sont pas souvent exploités et semblent être peu productifs. Ces formations devront être regroupées dans un ensemble potentiellement peu perméable ;

> une anisotropie de la perméabilité devra être attribuée sur l'ensemble du bassin afin de reproduire l'existence de couches peu perméables horizontales. Dans le Pliocène continental, en raison de l'existence de systèmes chenalisés individualisés, le tenseur de perméabilité devra présenter des valeurs plus fortes dans la direction Est-Ouest. Cette valeur devrait diminuer dans l'axe nord-sud et être faible sur l'axe vertical. Pour le

[1] Toutes les évolutions conceptuelles sont intégrées en complément dans les BD. L'information originelle est conservée et reste accessible au sein de la même BD.

Pliocène marin sableux, dans les zones de superposition de prismes, il sera aussi pertinent d'intégrer un tenseur de perméabilité déformé par l'anisotropie.

c. Enseignements des études pétrolières

Bien que l'exploitation d'un champ pétrolier diffère de l'exploitation d'un système aquifère, certaines analogies doivent être soulignées.

A la suite de l'inventaire de nombreuses données hydrogéologiques, une situation paradoxale est mise en évidence à l'échelle du bassin du Roussillon : la stratigraphie séquentielle ne permet pas de construire un modèle conceptuel hydrogéologique car les écoulements d'eau ne sont pas seulement contraints par la structure et la géométrie des unités sédimentaires. Dans le cas du Roussillon, il apparaît clairement que certains processus annexes, non identifiés par étude de type stratigraphie séquentielle, influencent nettement l'hydrodynamique.

Il semble que les limites classiquement utilisées par les sédimentologues (Maximum Flooding Surface, Sequence Boundary…) ne soient pas directement adaptées à la détermination de formations aquifères.

Pourtant, Larue & Legarre [2004] comparent différentes modélisations d'exploitation pétrolière d'un réservoir deltaïque présentant des similitudes avec celui du Roussillon. Trois méthodes de spatialisation et de modélisation ont été mises en parallèle :

- méthode géostatistique, basée sur les informations de forages (proportion argile / sable et porosité effective) afin d'en déduire une perméabilité maille par maille ;
- méthode faciologique, basée sur les données ci-dessus et incluant une cartographie de la qualité des sables (calcul basé sur les courbes gamma-ray et densité) ;
- méthode de stratigraphie séquentielle, basée sur les données ci-dessus et intégrant aussi l'épaisseur et l'extension des différentes paraséquences.

Il apparaît que seule la troisième méthode reproduit très fidèlement l'historique d'exploitation du champ pétrolier, car les zones cibles ont été identifiées en tenant compte de la localisation des plaines d'inondation.

d. Problème du choix de la méthode utilisée dans le cas du Roussillon

Dans le cadre de l'étude du bassin du Roussillon, la méthodologie du "stacking pattern" a été utilisée (voir p. 52), mais malheureusement sans quantification numérique des données de puits[1]. En effet, les données de diagraphie ont toutes été décrites de manière relative appuyées sur des descriptions lithologiques de fiabilité variable.

Par exemple, la succession verticale d'argile, de silt puis d'argile pourrait être corrélée avec une succession de silt, de sable puis de silt car le signal sédimentaire de la diagraphie est identique. Dans ce cas, il s'agit d'une baisse suivie d'une remontée relative du niveau de base.

Les implications en terme d'hydrogéologie ne peuvent être négligées en raison de la divergence entre la définition des unités sédimentologiques et les informations de production des forages. Il est alors logique de se poser la question de l'utilité des limites subjectives basées

[1] Les diagraphies utilisées lors de la présente étude ne sont constituées que de "données papier".

sur une même dynamique sédimentaire mais regroupant des faciès variables à l'origine d'une hétérogénéité au sein des écoulements.

Il apparaît que la stratigraphie séquentielle est pertinente pour la délimitation de diverses unités à dynamique sédimentaire commune, mais au sein de ces unités une hétérogénéité persiste, qui peut être liée à une diagenèse différentielle (cimentation, compaction…) ou à l'influence du forage (boue de forage mal utilisée, perturbation lors du forage…). Rappelons qu'une variation mineure dans la porosité entraîne des changements très significatifs sur la perméabilité : la taille des particules d'argile est similaire à l'espace inter-granulaire [Poston *et al*., 1983].

En conclusion, pour plus de clarté, une cartographie des faciès fondée sur une étude quantitative (porosité, proportion sable / argile) des diagraphies aurait dû précéder et contraindre l'élaboration des corrélations de stratigraphie séquentielle.

4.3. Nomenclature historique du Roussillon

La correspondance entre les dénominations historiques de l'hydrogéologie de la plaine du Roussillon et les unités sédimentologiques sont présentées dans le tableau ci-dessous. Pour la description détaillée des nappes, il sera nécessaire de se référer au chapitre II de la partie I (p. 38).

Unités sédimentologiques	Description succincte	Localisation géographique	Age	Dénomination du référentiel hydro-géologique	Nappes Historiques du Roussillon (de la plus superficielle à la plus profonde)
HC	Nappe libre localisée dans la zone littorale. Sans réelles perspectives hydrogéologiques. Exploitée pour l'irrigation des campings littoraux.	Littoral	Holocène	146	Nappe 1
HC - TQ	Nappe libre alluviale. Exploitée par les forages d'irrigation et pour l'AEP dans certains secteurs (S^t-Féliu d'Amont, S^t-Cyprien).	Particulièrement développée autour des lits des fleuves	Pléistocène indifférencié	146	Nappe 2
Prismes marins quaternaires - Chenaux supérieurs du Pliocène Continental	Première nappe captive d'une vingtaine de mètres de puissance en moyenne. Se développe entre les cotes 40 et 80 mètres. Productivité très intéressante.	Très souvent spécifique à la Salanque. Ce terme est quelque fois utilisé sur l'ensemble de la plaine afin de désigner la "nappe intermédiaire", localisée entre nappe libre et nappes profondes.	Pléistocène - Pliocène	225	Nappe 3
Chenaux inférieurs du Pliocène continental - Prismes marins pliocènes - Miocène	Ensemble des nappes captives profondes, utilisées majoritairement pour l'AEP. Productivité intéressante.	Sous toute la plaine du Roussillon. Profondeur croissante d'Ouest en Est.	Pliocène - Miocène	225	Nappe 4

Tableau 10 - Nomenclature hydrogéologique des nappes du Roussillon

*

* *

Base de données, stratigraphie séquentielle et hydrogéologie

L'élaboration des bases de données hydrogéologiques et hydrodynamiques a permis une mise à jour des opérations de forage menées dans le Roussillon. Ces données sont utilisées afin de déterminer les propriétés aquifères des différentes unités sédimentologiques.

A la suite de ces investigations, les unités suivantes peuvent être considérées comme aquifères :

> TQ (terrasses quaternaires) : à proximité des fleuves côtiers. Cette unité sédimentologique correspond à l'aquifère 146 (référentiel hydrogéologique) et à la nappe 2, sur le point de vue historique ;

> PC (Pliocène continental) : au sein des systèmes chenalisés confinés dans une matrice de plaine d'inondation dominante. Les forages sont principalement localisés dans l'Est de la plaine du Roussillon, à proximité de la côte. Cette unité sédimentologique correspond à l'aquifère 225 et aux nappes 3 et 4. La nappe 3 est uniquement définie en Salanque ;

> P4sab - P3sab - P2sab - P1sab (Pliocène marin sableux) : exploités régulièrement de manière concomitante. Les forages sont principalement localisés dans l'Ouest de la plaine du Roussillon. Cette unité sédimentologique correspond à l'aquifère 225 et à la nappe 4 ;

> dans une moindre mesure, P4pal et P3pal : niveaux palustres associés aux prismes du PMS.

A la suite du croisement des données d'hydrogéologie et de géologie, il paraît difficile de baser la géométrie des aquifères en utilisant uniquement les données de stratigraphie séquentielle. D'après la littérature pétrolière, la cartographie et la spatialisation des faciès sont nécessaires lors de l'élaboration des modèles intégrant les études de stratigraphie séquentielle.

Chapitre II

Analyse fonctionnelle des aquifères de la plaine du Roussillon

L'analyse des chroniques piézométriques permet de caractériser le fonctionnement hydrogéologique d'un aquifère. Les investigations menées au cours du présent travail de recherche sont basées (i) sur une approche classique, visant à déterminer la nature de l'aquifère exploité (périodes de recharge et caractéristiques qualitatives), (ii) sur une approche fonctionnelle des aquifères par analyses corrélatoires et spectrales et (iii) sur une approche de modélisation non-déterministe à l'aide du logiciel Tempo du Brgm [Pinault, 2001]. L'objectif des investigations est de caractériser le fonctionnement hydrogéologique des aquifères du Roussillon à partir des chroniques piézométriques, pluviométriques et de la marée. Il s'agira principalement d'estimer leurs interconnexions, en termes d'unités sédimentologiques, tout en prenant en considération l'influence de la mer.

1. Description des données disponibles

Les données disponibles utilisées dans le cadre de ce travail de recherche concernent la piézométrie, la météorologie, les variations du niveau de la mer. Les suivis en continu de la conductivité et de la température[1] n'ont pu être pris en considération lors de l'approche fonctionnelle, car l'ordre de grandeur des variations des valeurs mesurées est inférieur à l'erreur de mesure de l'appareil (10 µS/cm).

1.1. Piézométrie

Dans le cadre de la surveillance de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon, le Brgm s'est vu confier, par le Conseil Général des Pyrénées-Orientales, le suivi technique et l'exploitation du réseau piézométrique de la plaine du Roussillon. Les données de suivi piézométrique de la mission précitée ont été utilisées dans le cadre de la présente étude.

Depuis 1994, les caractéristiques techniques des piézomètres et des appareils de mesure sont inventoriées dans les rapports rédigés par le Brgm visant à établir la synthèse des observations pour chaque année de suivi en continu [2] [Blaise & Marchal, 2007].

Les premières mesures de charge sur piézomètres remontent à 1968. Les variations de la charge journalière de vingt-trois[3] piézomètres sont sauvegardées par le Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (SANDRE). Elles peuvent être visualisées sur le site du réseau piézométrique Languedoc-Roussillon[4].

De plus, le suivi des charges au pas de temps de trois heures sur la période 2005-2006 a pu aussi être intégré à la présente étude.

La localisation des piézomètres est représentée sur la figure 36, ci-dessous. Les informations relatives aux piézomètres et à la mesure (aquifère et unité sédimentologique) sont listées dans le tableau 11, ci-dessous. Le code aquifère utilisé est issu du référentiel hydrogéologique national (Partie I - Chapitre II - 2, p. 38). Le code 146 est attribué aux aquifères localisés dans les alluvions quaternaires superficielles et le code 225 aux aquifères d'âge pliocène [Marchal & Blaise, 2004].

Le positionnement GPS ainsi que le nivellement de l'ensemble des points a été effectué en 2005. La précision altitudinale est de l'ordre du centimètre.

La totalité des courbes de variations de charges hydrauliques est présentée en annexe 11.

---

[1] Suivis effectués par la société Hydro-Assistance et le Brgm SGR/LRO

[2] Ces rapports sont téléchargeables sur le site du Brgm (http://www.brgm.fr/publication/rapportpublic.jsp).

[3] Il est fait abstraction du piézomètre de Bompas N4 en raison de l'insuffisance du nombre de mesures effectuées.

[4] http://lro.brgm.fr/

Commune	Diminutif (carte)	Désignation Brgm	Indice BSS	Aquifère	Unité sédimentologique
Alenya	Alen	Alenya	10972X0003	146	HC
Argelès-sur-Mer	Arge	Pont du Tech	10972X0137	225 N4	PC
Le Barcarès	Bar3	Plage N3	10912X0112	225 N3	PC
Le Barcarès	Bar4	Plage N4	10912X0111	225 N4	PC
Le Barcarès	Sau_Q	Station Sautlebar IV	10912X0134	146	PQ2sab
Le Barcarès	Sau_P	Station Sautlebar N4	10912X0024	225 N4	PC
Bompas	Gaff3	Mas Gaffard N3	10915X0255	225 N3	PC
Bompas	Gaff4	Mas Gaffard N4	10915X0254	225 N4	PC
Canet-en-Roussillon	Phar	Canet phare	10916X0090	225 N4	PC
Corneilla-del-Vercol	Corne	PD 5 Corneilla	10971X0155	225 N4	PC ; P3sab
Millas	Mill_Q	C2-1 (Q)	10906X0039	146	TQ
Millas	Mill_P	C2-2 (P)	10906X0038	225 N4	P2sab
Ortaffa	Brou	Brouilla	10971X0198	146	TQ
Perpignan	Perp	Figuère	10908X0263	225 N4	P3sab
Pia	Pia	F3	10915X0316	225 N4	PC ; P4pal
Ponteilla	Nyls	Nyls	10964X0119	225 N4	PC ; P3sab
Saint-Feliu-d'Amont	Feliu	Mas Conte	10907X0129	225 N4	PC ; P2sab ; P1sab
Saint-Hippolyte	Hippo	Hippo 2	10911X0219	146	TQ
St-Laurent-de-la-Salanque	StLau	F3N4	10912X0061	225 N4	P4sab ; P3sab
Sainte-Marie	Mar3	Sainte Marie N3	10916X0062	225 N3	PC
Sainte-Marie	Mar4	Sainte Marie N4	19016X0061	225 N4	PC
Saint-Nazaire	Nazai	Golf	10972X0098	225 N4	PC
Terrats	Terra	Médalus	10963X0059	225 N4	PC ; P2sab
Torreilles	Torr	F3	10912X0110	225 N4	PC ; P4sab ; P3sab

Tableau 11 - Piézomètres de la plaine du Roussillon

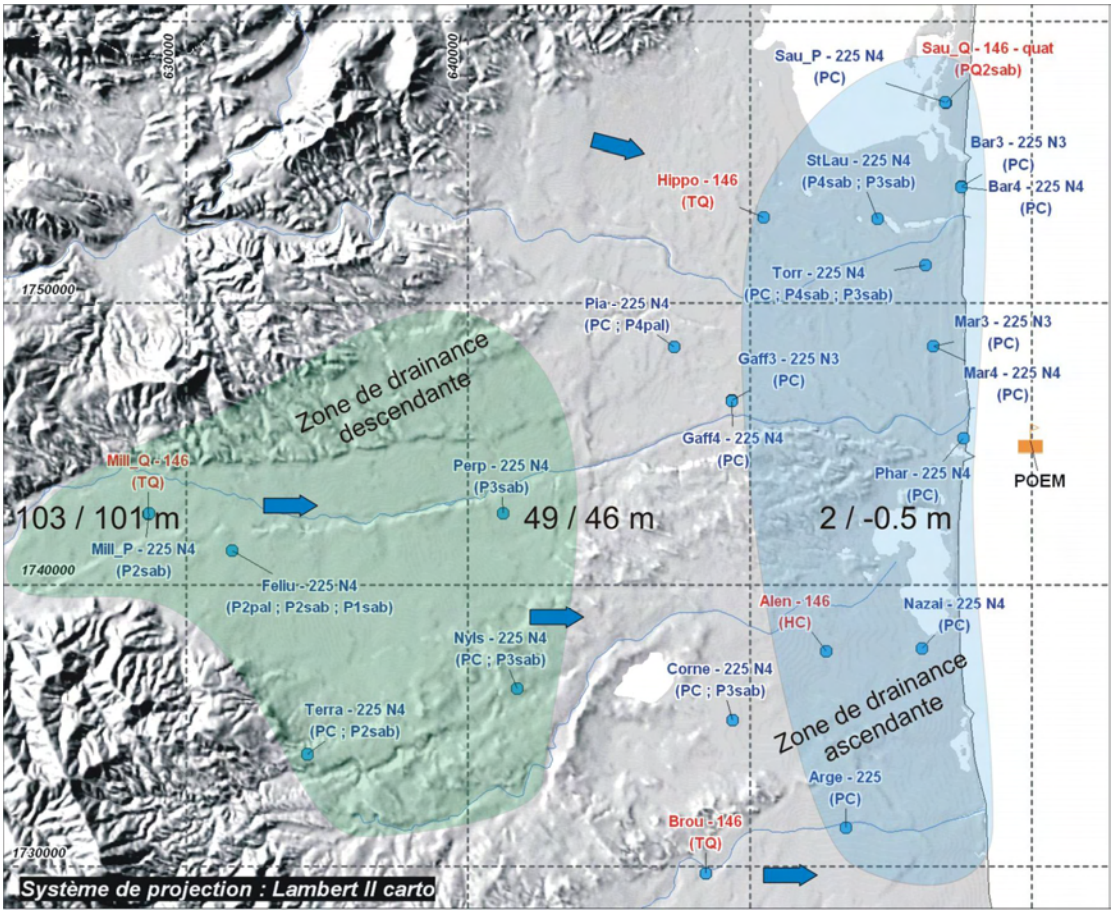


Figure 36 - Localisation géographique des piézomètres de la plaine du Roussillon et de la Plateforme d'Observation de l'Environnement Méditerranée (POEM)

En rouge : aquifère 146 - en bleu : aquifère 225. Les valeurs numériques en noir représentent un aperçu des charges hydrauliques observées actuellement en hautes-eaux / et basses-eaux dans l'aquifère Pliocène. Les flèches bleues indiquent le sens d'écoulement général.

1.2. Météorologie

Les données de pluviométrie et d'évapotranspiration (ETP) au pas de temps journalier proviennent de Météo France sur la période de janvier 1996 à décembre 2005. Les stations de mesure des précipitations sont présentées sur la figure 4 (p. 30). Les stations de mesure de l'ETP sont localisées à Thuir et à l'aéroport de Perpignan-Rivesaltes.

Ces données sont utilisées afin de déterminer les relations entre les précipitations et les variations de charge hydraulique.

1.3. Variation du niveau marin

Différentes données de marégraphes (données SONNEL) ont été recensées, mais les données de la "Plateforme d'Observation de l'Environnement Méditerranée" (bouée POEM) se sont révélées plus pertinentes à utiliser. Ces données ont été acquises dans le cadre du travail de thèse de François Bourrin (Cefrem - Université de Perpignan - UMR5110 - programme Sys-CoLag).

Les variations du niveau marin sont calculées à partir de la distance entre la bouée et le fond de la mer. Cette distance est mesurée[1] deux fois par seconde puis moyennée sur 90 minutes. Les données utilisées dans le cadre de la présente étude se répartissent de septembre 2004 à novembre 2005 au pas de temps de 90 minutes. La bouée POEM se localise à environ 2.5 km de l'embouchure de la Têt (figure 36, ci-dessus).

Sur la côte du Roussillon, l'ordre de grandeur des variations des marées n'excède pas 30 à 40 centimètres. Cependant, les variations du niveau marin peuvent atteindre plus d'un mètre dans le cas de vents violents (surcotes marines).

Ces données sont utilisées afin de déterminer s'il existe des interactions entre les variations du niveau marin et celles de la charge hydraulique.

[1] Mesure effectuée par un "Acoustic Doppler Current Profiler de RD Instruments Sentinel 600kHz" équipé d'un capteur de pression.

2. Caractéristiques qualitatives des chroniques piézométriques

L'évolution des charges piézométriques caractérise le comportement des aquifères "surveillés". Les tendances observées sur le long terme décrivent l'évolution de l'exploitation des ressources en eau ; les tendances annuelles déterminent les périodes de recharge et de sollicitation.

La minéralisation des eaux est "normale" et constante (300 < conductivité électrique < 600 µS/cm). Elle n'est pas considérée comme influente sur les variations de charge.

2.1. Comportement de l'aquifère superficiel quaternaire

Les cinq points d'observations de l'aquifère superficiel quaternaire (codé 146) enregistrent les variations piézométriques des aquifères contenus dans les unités sédimentaires suivantes :

- PQ2sab (Le Barcarès),
- HC (Alenya),
- TQ (Brouilla, Millas, S^{t} Hippolyte).

Dans ces zones, l'épaisseur de sol à faible perméabilité (silt) isolant l'aquifère est faible (< 1 m) ou inexistante. D'une manière générale, l'influence des précipitations est assez marquée sur les variations de charge de la nappe superficielle (figure 37). Les périodes de recharge, fréquemment distribuées entre janvier et mai, sont fonction des précipitations. Dans les zones irriguées (Millas), la charge de l'aquifère est fortement influencée par le "retour à la nappe" en relation avec l'irrigation agricole (Partie I - Chapitre II - 3.2. - b, p. 44).

Au cours des dix dernières années, le niveau moyen de ces piézomètres **ne semble pas varier de manière significative**.

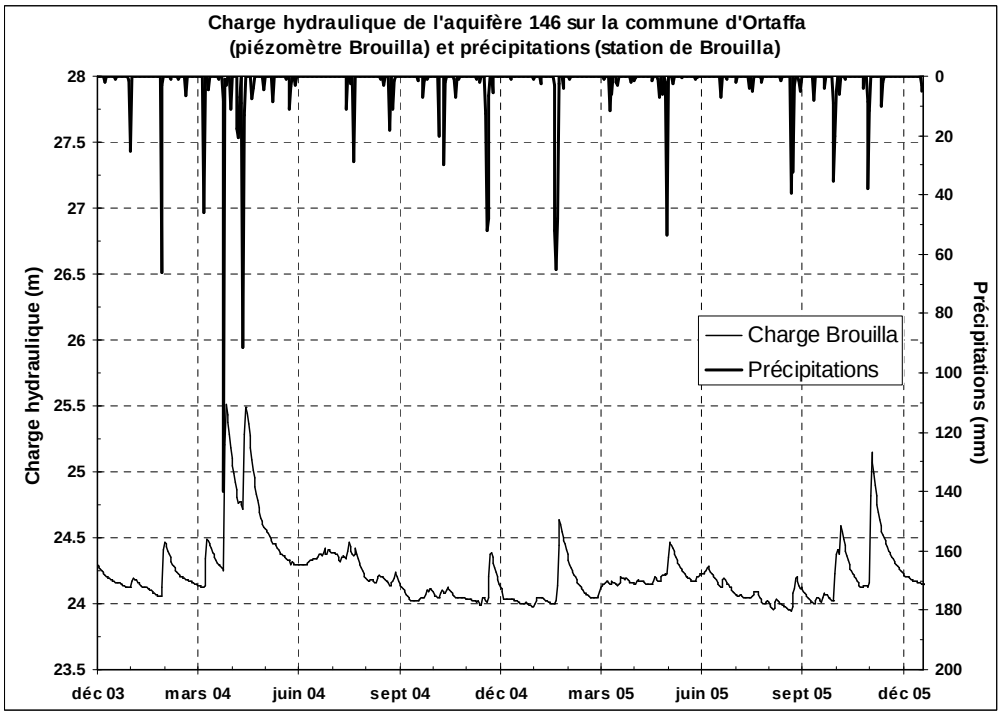


Figure 37 - Charge hydraulique de l'aquifère 146 et précipitations

2.2. Comportement des aquifères du Pliocène (225)

En Salanque, l'aquifère 225 est subdivisé en deux nappes, la "nappe 3" et la "nappe 4". Elles sont toutes deux contenues dans l'unité sédimentologique du Pliocène continental.

La "nappe 4" est définie comme sous-jacente à la "nappe 3" en Salanque. Dans les autres secteurs de la plaine du Roussillon, la "nappe 4" regroupe les nappes souterraines captives indifférenciées. Elles sont contenues dans les unités sédimentologiques du Pliocène continental et du Pliocène marin sableux.

a. Observations sur le long terme

Sur les 18 piézomètres suivis, 11 présentent des mesures de la charge hydraulique depuis plus de 15 ans. Sur cette période, presque toutes les charges sont en baisse plus ou moins marquée. Cette tendance est liée à l'augmentation de l'amplitude de variation annuelle (de moins de deux mètres en 1975 à plus de quatre mètres actuellement). Les écarts de charge entre période de hautes eaux et de basses eaux sont de plus en plus importants sur l'ensemble des piézomètres suivis (figure 38). L'augmentation de l'amplitude est la conséquence d'une baisse marquée des minimas de charge et d'une baisse un peu moins marquée des maximas. Cette observation signifie que l'augmentation des prélèvements tend à croître d'année en année, spécifiquement au cours des périodes estivales.

Afin de connaître l'évolution réelle sur le long terme, il est préférable de s'intéresser aux maximas des charges pour chaque année (figure 39). Il apparaît que la baisse moyenne des maximas des charges est égale à 5 cm par an (moyenne des pentes depuis le début de l'acquisition des données).

Sur les dix dernières années, les niveaux baissent un peu plus qu'ils ne remontent. D'une manière générale, le niveau piézométrique baisse assez fortement au début de l'exploitation. Puis, ce niveau tend à atteindre un équilibre subhorizontal, visible sur les cinq dernières années. Cette observation est peut-être influencée par le fait que les précipitations annuelles sont au-dessus de la moyenne depuis 2002 (précipitations annuelles représentées sur la figure 39).

b. Cas particuliers

Torreilles - La charge hydraulique de Torreilles augmente depuis le début de l'acquisition des données (courbe bleue, croissante entre 2000 et 2005, figure 39). Les données originelles ont été vérifiées : elles peuvent être validées. Deux points sont à souligner :

- il existe une augmentation ponctuelle de charge de l'ordre de 50 cm entre 1994 et 1995 ; avant et après cette période, la charge est beaucoup plus constante ;
- hormis la légère croissance des charges, l'évolution temporelle de la série est similaire aux autres enregistrements de la plaine (à l'échelle pluriannuelle, les hauts et bas niveaux de Torreilles sont synchrones aux charges des autres piézomètres).

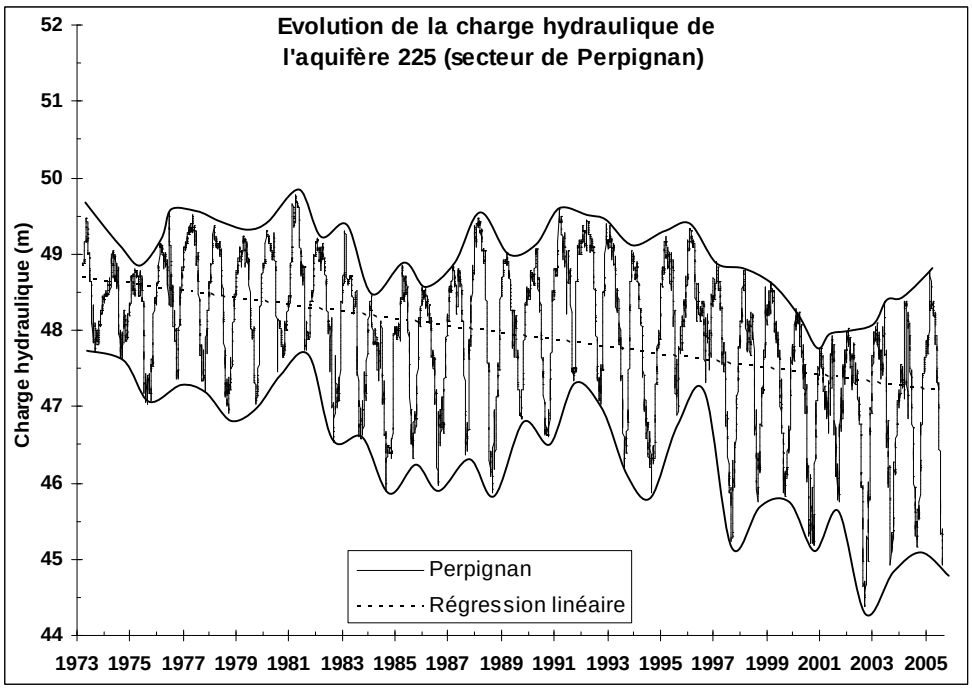


Figure 38 - Evolution décroissante de la charge hydraulique de l'aquifère 225 sur le long terme
La courbe des maximas et minimas caractérise l'augmentation de l'amplitude des prélèvements. Chaque "pic haut" marque approximativement l'hiver et, inversement, chaque "pic bas" marque la saison estivale.

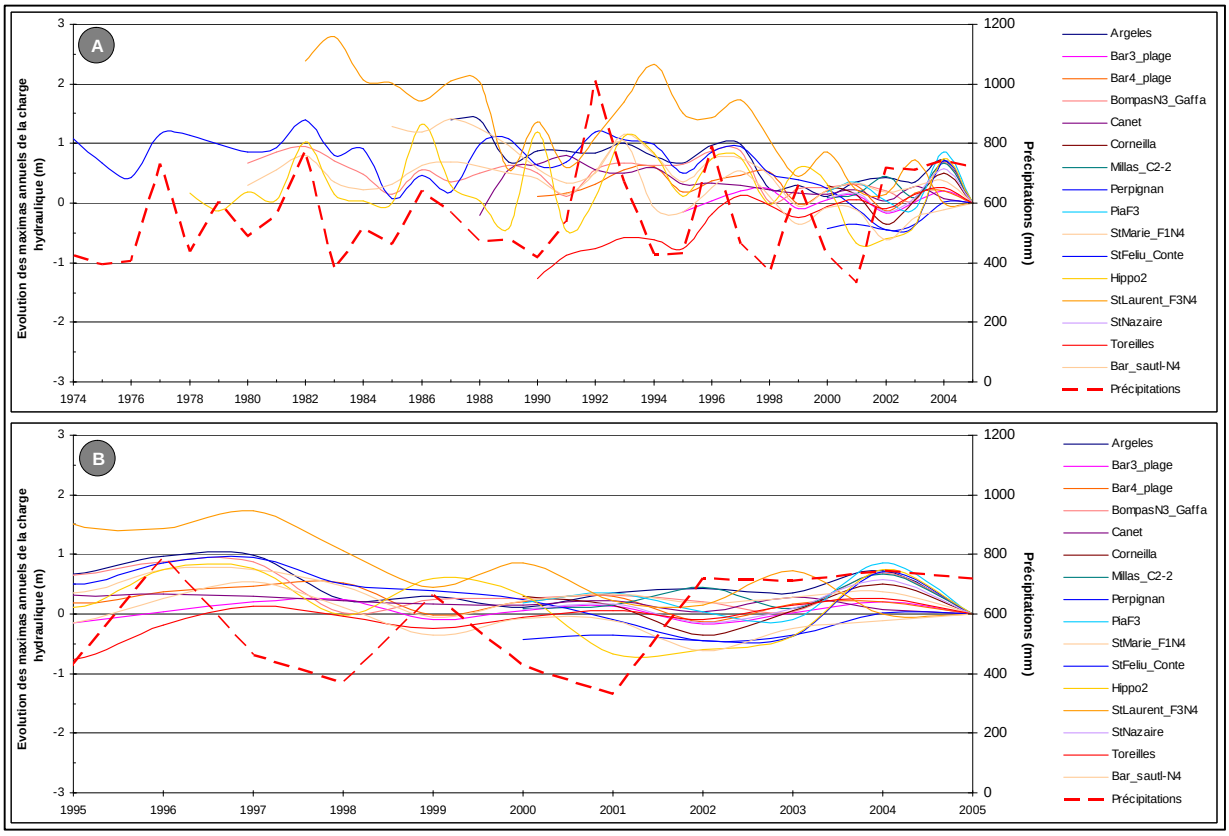


Figure 39 - Evolution des maximas annuels de charge
Le niveau maximum atteint en 2005 constitue le niveau zéro. Les données "Précipitations" sont constitués par les valeurs annuelles des pluies de la station de Perpignan [Météo France]. A : 1974-2005 - B : 1995-2005

c. Observations à l'échelle annuelle

Les aquifères du Pliocène, regroupés sous la dénomination "225", présentent un comportement inertiel marqué avec une période de basses eaux située entre le début et la fin de l'été (figure 40). La remontée des niveaux piézométriques ne correspond pas aux précipitations, mais fait suite au ralentissement des pompages d'irrigation (remontée au début de l'été) et d'AEP (remontée à la fin août, lors du départ des estivants).

En première approximation, le comportement des nappes supérieures et inférieures à S^{te} Marie (annexe 11), toutes deux appartenant à l'unité sédimentologique du Pliocène continental, est similaire (même charge hydraulique et même comportement).

Dans une moindre mesure, le comportement des deux nappes de Millas est aussi similaire (P2sab et TQ). Les variations de charges suivent la même dynamique mais il existe une différence de charge constante entre les deux chroniques piézométriques : la charge de la nappe supérieure quaternaire est supérieure d'un mètre cinquante à la nappe inférieure pliocène.

Quelques zones de la plaine du Roussillon se révèlent particulièrement singulières. Sur les piézomètres de Terrats et de Nyls-Ponteilla, bien que les niveaux aquifères soient captifs et éloignés de zones d'irrigation, les périodes de hautes eaux se situent entre avril et juin et les basses eaux en décembre. Deux hypothèses peuvent être formulées : (i) localisés à proximité des calcaires dévoniens, on peut supposer que les aquifères pliocènes soient rechargés en profondeur par les systèmes karstifiés. De plus, le massif du Canigou se situe en amont du piézomètre de Terrats : la fonte des neiges pourrait contribuer à influencer le système. (ii) Les niveaux de Terrats et Nyls se corrèlent assez bien avec ceux de Millas. Bien qu'éloignées, les zones d'irrigation pourraient influencer aussi ce secteur.

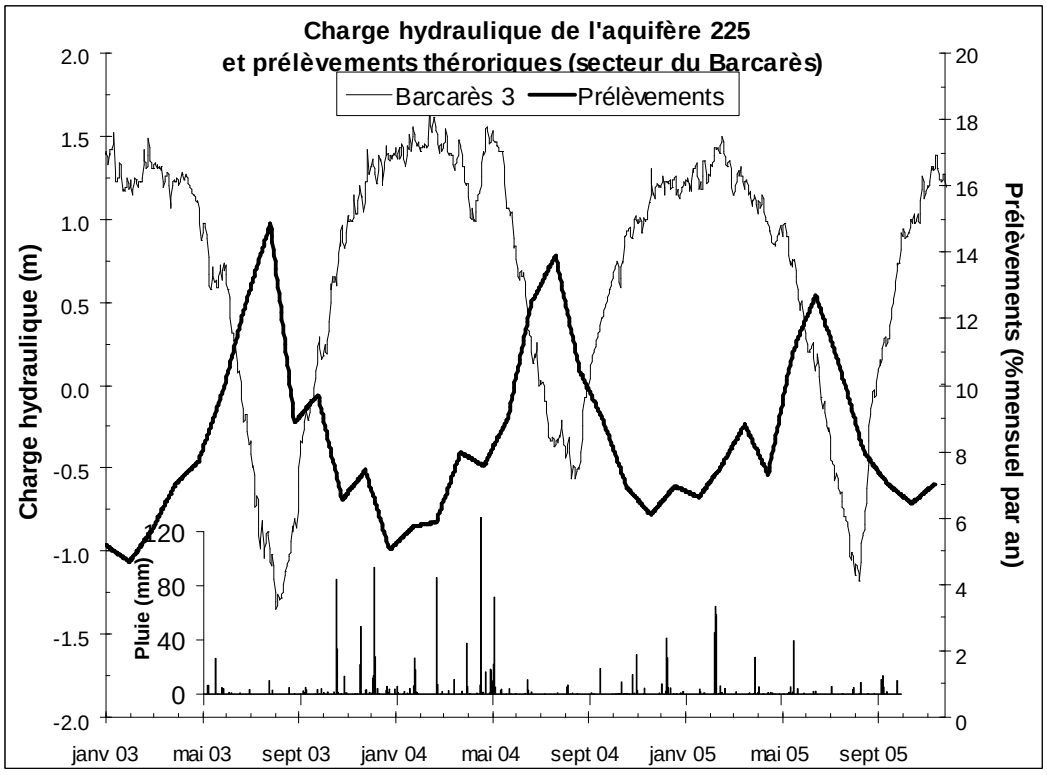


Figure 40 - Evolution de la charge hydraulique de l'aquifère 225 (Pliocène continental) sur le court terme

Sur le graphique, les prélèvements sont exprimés par la moyenne mensuelle des volumes pompés du secteur du Barcarès, est ramenée à l'échelle 0-100 pour chaque année.

3. Approche fonctionnelle descriptive du système aquifère de la plaine du Roussillon par traitement du signal

Les analyses fonctionnelles ont été menées avec l'aide du logiciel Tempo du Brgm [Pinault, 2001]. Le descriptif du logiciel, ainsi qu'une présentation de la méthodologie d'étude des aquifères par les analyses corrélatoires et spectrales figurent en annexe 11.

Un travail de DEA, réalisé par Patrick Guilleminot en 2005, encadré par Alain Mangin (Laboratoire Souterrain du CNRS - Moulis) et David Labat (Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie - Université Paul Sabatier Toulouse III), a été mené sur le traitement des chroniques piézométriques par approche fonctionnelle sur la plaine du Roussillon. L'objectif du présent travail ne vise pas à reproduire les résultats obtenus par des méthodes numériques différentes[1], mais s'intéresse plutôt au prolongement de ce qui a été réalisé, tout en intégrant les données de la géologie.

Sauf indication contraire, l'ensemble des résultats ci-dessous a été obtenu au cours du présent travail de recherche.

3.1. Fonctionnement sur le "long terme" : analyses corrélatoires simples

a. Méthode

L'objectif de ces analyses est de quantifier l'effet mémoire d'un hydrosystème par la récurrence de phénomènes périodiques. Les valeurs des colonnes "1 an" et "2 ans" caractérisent l'autocorrélation[2] des séries temporelles (tableau 12). Une valeur proche de "1" dans ces colonnes signifie que le système présente un effet mémoire marqué (c'est-à-dire qu'au temps "t = 1 année", la valeur de charge dépend de celle mesurée au temps "t = 0 année").

Afin de pondérer les observations, il est nécessaire de bien différencier l'effet mémoire et l'inertie d'un hydrosystème. Sur la figure 40 (p. 147), la charge hydraulique de l'aquifère 225 est nettement influencée par les prélèvements. Si ces prélèvements sont réguliers et répétitifs d'année en année, l'effet mémoire du système sera important pour chaque période annuelle. L'inertie correspond au temps de réponse suite à la sollicitation de l'hydrosystème.

Les traitements sont effectués sur l'ensemble des chroniques piézométriques au pas de temps journalier. Lorsque les chroniques sont trop courtes ($\approx < 5$ ans), le système ne peut être correctement caractérisé car la période des phénomènes recherchés est de l'ordre de l'année.

[1] Selon les méthodes développées par Alain Mangin, le logiciel Matlab a été utilisé dans le cadre de l'étude de Guilleminot [2005].

[2] L'autocorrélation est la mesure d'une corrélation d'une chronique par rapport à elle-même, selon un décalage temporel de plus en plus grand [Pinault, 2001].

b. Résultats

Les points d'observation des aquifères superficiels (HC, PQ2sab et TQ - 146) présentent un effet mémoire peu marqué (en moyenne 0.3 sur une autocorrélation de période annuelle, tableau 12) : ce résultat est logique en regard du caractère aléatoire des précipitations. Ce caractère aléatoire est illustré sur la figure 41, où le corrélogramme de la pluviométrie à Torreilles présente une allure de Dirac.

La majorité des points d'observation des aquifères pliocènes (continental et marin sableux - 225) présentent un effet mémoire marqué sur une période de deux ans (0.7 en moyenne, tableau 12 et figure 41). Il apparaît que les ouvrages très influencés par les pompages estivaux présentent un effet mémoire marqué.

Afin d'éliminer l'influence des pompages, le corrélogramme peut-être réalisé en ne considérant que les périodes hivernales. Dans ce cas, les taux de corrélation sont de l'ordre de 0.5.

Dans le cas d'un effet mémoire moindre (autocorrélation < 0.5), il semblerait que le système soit influencé par des phénomènes non périodiques ou que le niveau soit moins dépendant des pompages estivaux.

Commune	Désignation	Aquifère	Unité sédimento-logique	Autocorrélation Période 1 an	Autocorrélation Période 2 ans
Alenya	Alenya	146	HC	0.45	0.27
Argelès-sur-Mer	Pont du Tech	225 N4	PC	**0.735**	**0.655**
Le Barcarès	Plage N3	225 N3	PC	**0.787**	**0.736**
Le Barcarès	Plage N4	225 N4	PC	**0.863**	**0.709**
Le Barcarès	Sautlebar IV	146	PQ2sab	0.314	-
Le Barcarès	Sautlebar N4	225 N4	PC	**0.765**	**0.656**
Bompas	Mas Gaffard N3	225 N3	PC	0.547	0.376
Canet-en-Roussillon	Canet phare	225 N4	PC	**0.797**	**0.714**
Corneilla-del-Vercol	PD 5 Corneilla	225 N4	PC ; P3sab	-	-
Millas	C2-1 (Q)	146	TQ	0.291	-
Millas	C2-2 (P)	225 N4	P2sab	0.308	0.271
Ortaffa	Brouilla	146	TQ	-	-
Perpignan	Figuère	225 N4	P3sab	**0.749**	**0.67**
Pia	F3	225 N4	PC ; P4pal	0.244	0.47
Ponteilla	Nyls	225 N4	PC ; P3sab	0.292	-
Saint-Feliu-d'Amont	Mas Conte	225 N4	PC ; P2sab ; P1sab	0.237	0.354
Saint-Hippolyte	Hippo 2	146	TQ	0.347	0.208
St-Laurent-de-la-Salanque	F3N4	225 N4	P4sab ; P3sab	**0.809**	**0.745**
Sainte-Marie	Ste Marie N3	225 N3	PC	**0.672**	0.504
Sainte-Marie	Ste Marie N4	225 N4	PC	**0.737**	0.651
Saint-Nazaire	Golf	225 N4	PC	**0.672**	0.548
Terrats	Médalus	225 N4	PC ; P2sab	-	-
Torreilles	F3	225 N4	PC ; P4sab ; P3sab	**0.783**	**0.667**

Tableau 12 - Synthèse des résultats obtenus par analyses corrélatoires simples des chroniques piézométriques

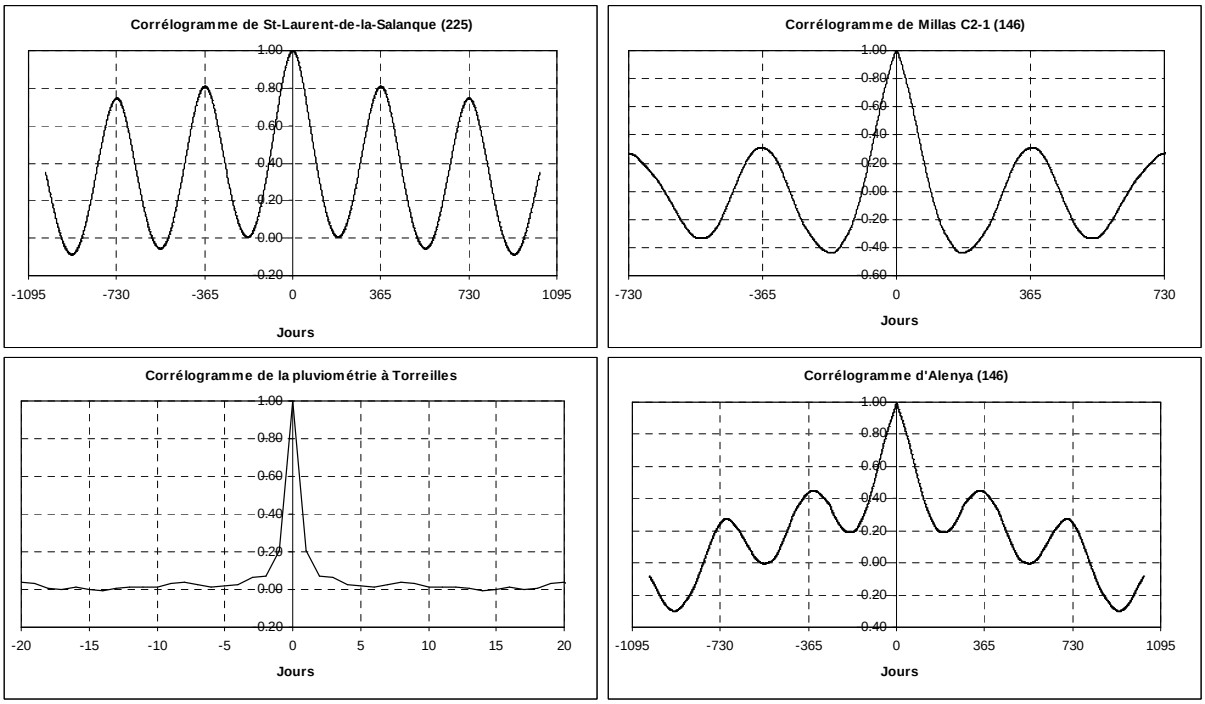


Figure 41 - Exemples d'analyses corrélatoires simples (autocorrélogramme)
Périodes de corrélation en abscisses - Indice de corrélation en ordonnées.
La pluviométrie ne présente aucun caractère périodique.

3.2. Fonctionnement sur le "long terme" : analyses corrélatoires et spectrales croisées

Les investigations fonctionnelles sur le "long terme" ont été traitées par Guilleminot [2005]. Les points suivants, entre autres, ont été mis en évidence :

> les aquifères superficiels sont influencés par les précipitations ;

> dans le Nord du bassin, la contribution du karst des Corbières se fait ressentir sur certains points, qu'ils appartiennent ou non à des aquifères captifs (piézomètres de la Salanque) ;

> la drainance est un phénomène marqué sur l'ensemble de la plaine du Roussillon, que cela soit entre aquifères captifs ou d'aquifères captifs à aquifères libres ;

> à l'échelle pluriannuelle, l'ensemble tend à se comporter comme un aquifère unique ;

> la majeure partie des variations piézométriques de la plaine est influencée par les pompages.

Les analyses corrélatoires croisées entre piézométrie et pluviométrie permettent aussi d'établir une première estimation du temps de transfert de la recharge par les précipitations. Ce temps varie entre 2 à 4 jours pour les aquifères superficiels quaternaires (146) et oscille entre 20 et 60 jours pour les aquifères pliocènes, captifs et profonds (figure 42). Ce temps est variable pour chaque fenêtre d'observation (saturation du sol) et pour chaque piézomètre.

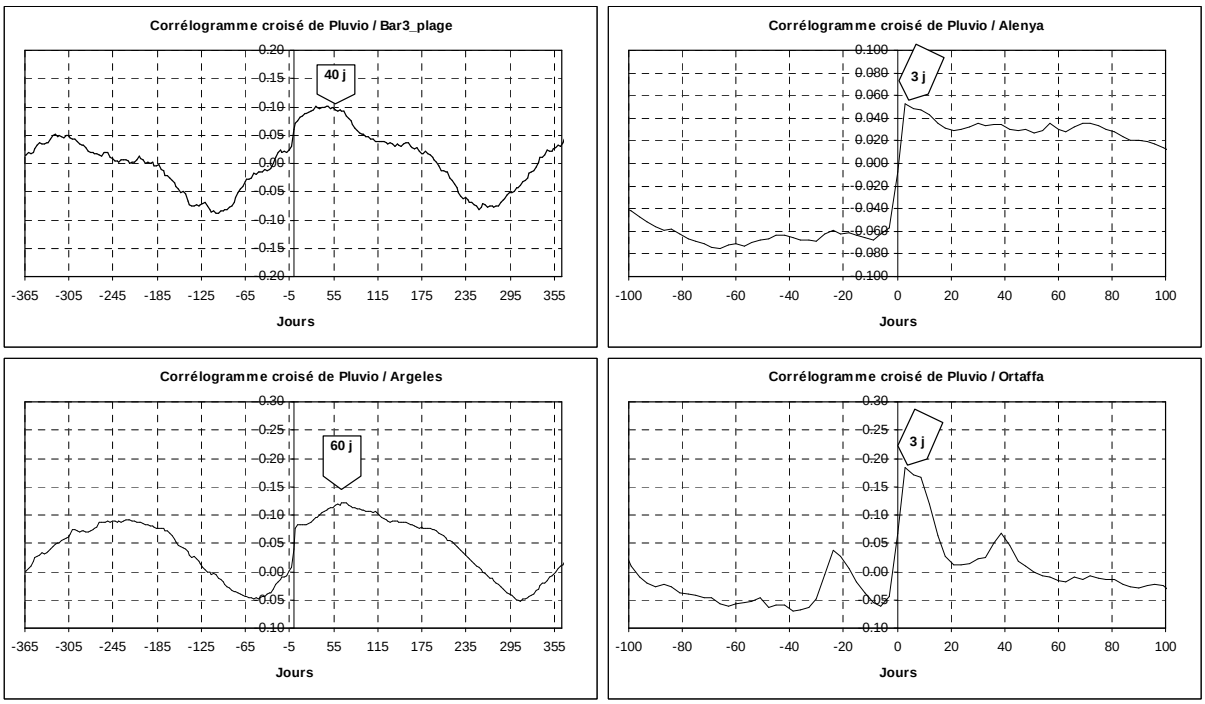


Figure 42 - Exemples d'analyses corrélatoires croisées entre charge hydraulique et pluviométrie

3.3. Fonctionnement sur le "court terme" : analyses spectrales simples et croisées

L'objectif de cette approche est de caractériser le fonctionnement du système par l'estimation de la vulnérabilité des différents aquifères côtiers en déterminant si la mer Méditerranée constitue une condition aux limites des systèmes. Les analyses ont été menées sur les chroniques piézométriques au pas de temps de trois heures et sur l'enregistrement des variations du niveau marin (bouée POEM).

a. Méthode

Les phénomènes périodiques s'expriment sur le diagramme de densité spectrale de puissance (DSP)[1] par des pics plus ou moins marqués observables à des fréquences caractéristiques.

Les phénomènes périodiques à 24h et 12h matérialisent l'aspect captif d'un aquifère, influencé (i) par les effets de marée terrestre ou (ii) par les effets de marée maritime. Lorsque les périodes à 24h et à 12h sont liées à la marée maritime, on peut conclure que les conditions aux limites de l'aquifère sont contrôlées par la mer. Deux méthodes complémentaires permettent de différencier les origines des périodes : (i) le signal lié à la marée maritime s'exprime par un double pic sur la période de 24h et ainsi que celle de 12h (figure 43), et (ii) l'étude de l'amplitude du carré de la cohérence[2] des variations du niveau marin et de la charge hydraulique quantifie la relation entre les signaux (figure 43) [Pinault, 2001].

b. Résultats

Les piézomètres localisés jusqu'à huit kilomètres de la côte enregistrent le signal de la marée marine avec plus ou moins de précision (figure 44). Ce phénomène signifie qu'il existe un transfert de pression entre la mer et les aquifères côtiers. Ce transfert de pression est relativement direct en ce qui concerne les piézomètres à fort carré de cohérence (entre 0.9 et 0.6), localisés à proximité du littoral (figure 43). Lorsque le signal de la marée est atténué (carré de la cohérence < 0.6), il est probable que l'aquifère ne soit pas directement en contact avec la mer ou que la structure hétérogène de l'aquifère amortisse le signal [Pinault, 2001].

[1] La DSP croisée de deux séries se définit comme la transformée de Fourier du corrélogramme croisé de ces deux séries [Pinault, 2001].

[2] La cohérence décrit le degré de liaison entre deux signaux de même période. Le carré de la cohérence est compris entre 0 et 1 [Pinault, 2001].

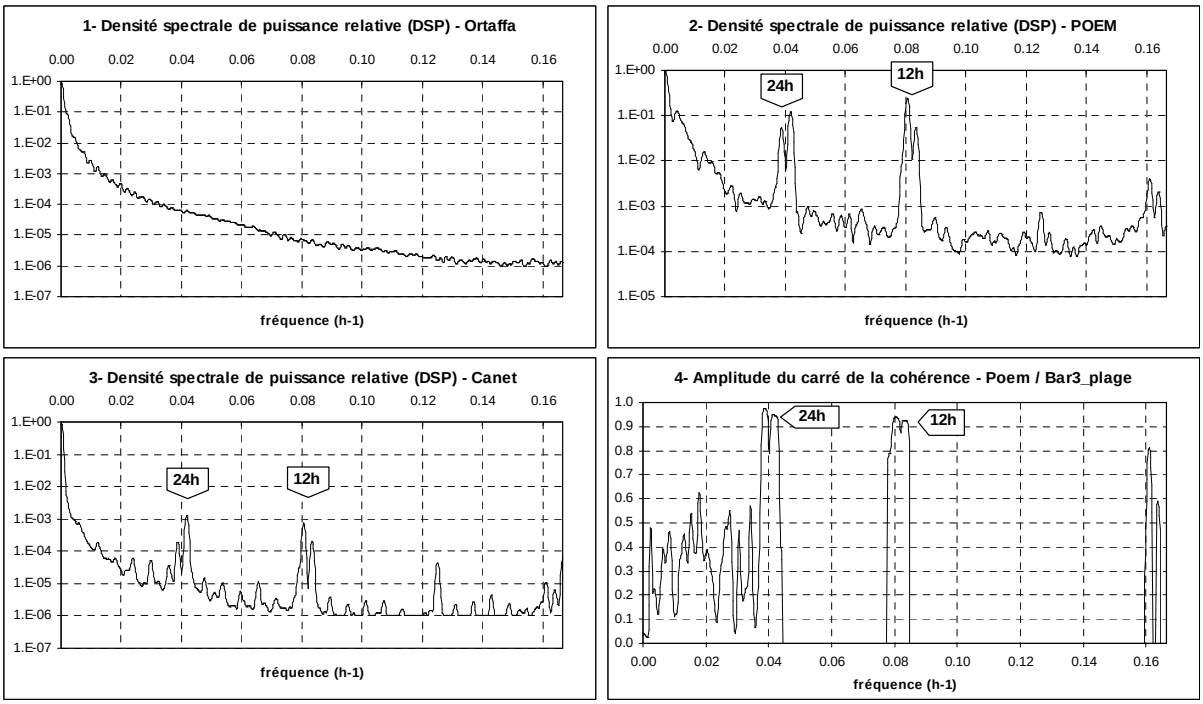


Figure 43 - Détermination de l'influence de la mer

1- DSP de la charge de l'aquifère 146 : aucun phénomène périodique n'est mis en évidence.
2- DSP des variations du niveau marin : période matérialisée par deux doubles pics à 12 et 24h
3- DSP d'un aquifère captif côtier (Canet) : l'influence de la mer est marquée
4- Amplitude du carré de la cohérence du périodogramme croisé entre les variations du niveau marin et celles de la charge d'un aquifère captif côtier (Barcarès plage 3) : la forte cohérence des pics à 12h et 24h démontre un net transfert de pression

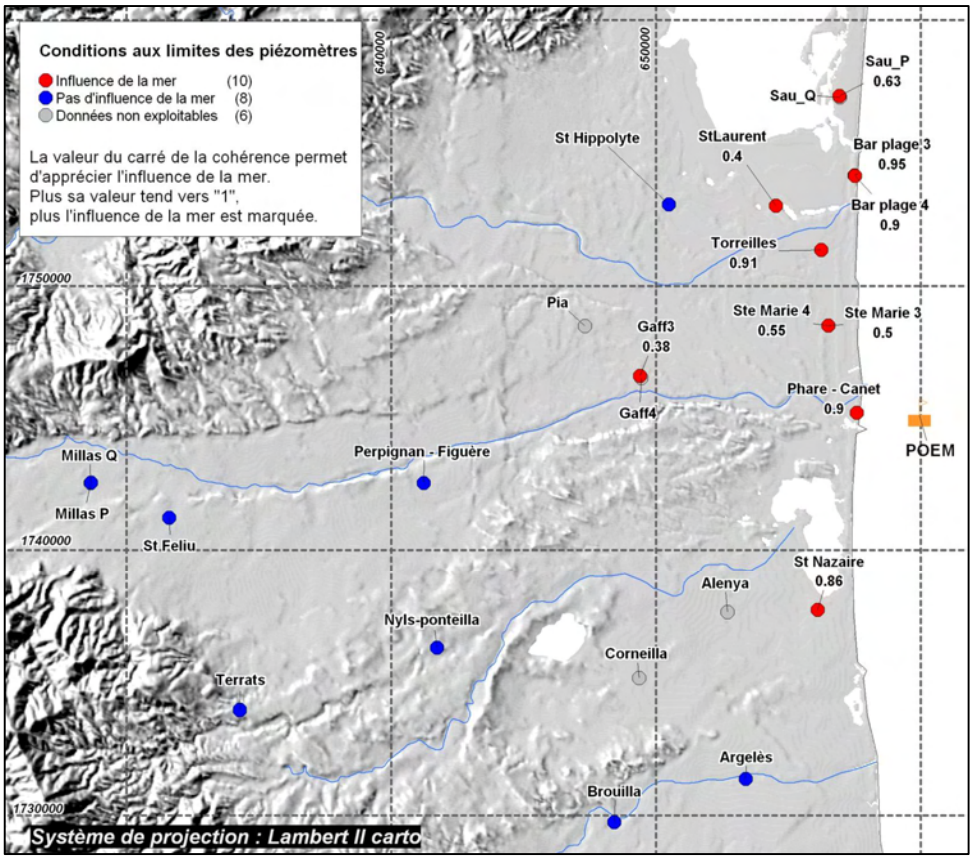


Figure 44 - Localisation géographiques des piézomètres dont la charge est influencée par les variations du niveau marin

c. *Estimation des propriétés hydrodynamiques*

Le déphasage entre signaux de marées et piézométrie est compris entre 3.5h et 6h. Ce déphasage correspond au temps de transfert de l'onde "marée" au sein de l'aquifère. Le temps de transfert est fonction des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère et ne peut être interprété avec Tempo.

Une estimation de la diffusivité D ($D = T/S$) peut-être réalisée lorsque le déphasage (t_τ) des signaux marée et charge hydraulique est connu [Jacob, 1950].

$$t_\tau = x\sqrt{\frac{t_0 S}{4\pi T}} \qquad \text{est équivalent à :} \qquad D = \left(\frac{x}{t_\tau}\right)^2 \frac{t_0}{4\pi}$$

t_0 Période entre deux pics de marée (12h)

x Distance entre la mer et le point de mesure[1] [m]

Le tableau 13, ci-dessous présente les différents résultats. La valeur t_τ correspond à la moyenne du déphasage observé à 12h et à 24h. Ces deux valeurs sont différentes en raison d'un pas de temps des charges hydrauliques (3h sur une période de un an) trop long pour effectuer avec précision ce type de traitement. La transmissivité peut-être estimée à partir du coefficient d'emmagasinement moyen (0.03) de la zone Ouest du Roussillon [Marchal, 1990].

Les valeurs de diffusivité (D) calculées pour les piézomètres localisés à proximité de la plage semblent cohérentes (tableau 13). Par exemple, pour le piézomètre "Barcarès plage 3", les propriétés hydrodynamiques de ce secteur ont été estimées par essais de pompage [Marchal, 1990] et donnent pour résultat $T \approx 5\times10^{-3}$ m^2/s et $S \approx 0.03$, donc $D_{(pompage)} = 0.16$ (sachant que $D_{(estimée)} = 0.18$).

En ce qui concerne les données incohérentes, toujours issues de piézomètres beaucoup plus éloignés de la mer, il semble que le déphasage utilisé dans les calculs soit inférieur et décalé d'une ou plusieurs périodes par rapport au déphasage réel. Aucune méthode ne s'est avérée pertinente lors de l'identification de déphasages supérieurs à 12h.

Commune	Désignation	t_τ	X (m)	D (-)	T (m^2/s)	Cohérence
Le Barcarès	Plage N3	3.9	100	0.18	5.3×10^{-3}	Oui
Le Barcarès	Plage N4	4.8	100	0.12	3.5×10^{-3}	Oui
Le Barcarès	Sautlebar N4	2.8	800	21.79	-	Non
Bompas	Gaffard N3	3	8340	1023.66	-	Non
Canet	Canet phare	3.9	90	0.14	4.2×10^{-3}	Oui
S^{te}-Marie	S^{te} Marie N3	2.9	1050	33.80	-	Non
S^{te}-Marie	S^{te} Marie N4	3.0	1050	33.43	-	Non
S^{t}-Nazaire	Golf	4.2	1300	25.45	-	Non
Torreilles	F3	3.4	1360	43.15	-	Non

Tableau 13 - Calcul de la diffusivité à partir du déphasage des signaux de marée

[1] L'estimation de ce paramètre est très complexe car la zone de transfert n'est pas déterminée précisément. Dans le cas présent, cette zone a été fixée au niveau du littoral.

4. Analyse du fonctionnement hydrogéologique de la plaine du Roussillon par approche de modélisation non-déterministe

La connaissance géologique et hydrogéologique conduisent à des concepts similaires : la protection des ressources en eau souterraine face à une intrusion saline augmente avec l'accroissement de la profondeur des aquifères côtiers [Marchal & Chery, 1995]. Deux phénomènes distincts sont à l'origine de la salinisation des aquifères du Roussillon : (i) une intrusion classique des eaux marines denses (flux horizontaux dominants) et (ii) une contamination des ressources en eau par drainance descendante depuis les aquifères superficiels pollués, vers les aquifères profonds originellement sains. En conséquence, une des problématiques majeures de la plaine du Roussillon est la détermination des interactions entre les différents aquifères. Cette détermination est effectuée à l'aide d'une approche de modélisation non-déterministe.

4.1. Choix de la zone d'investigation

La modélisation (logiciel Tempo [Pinault, 2001]) est réalisée entre les données de charges hydrauliques de la nappe 3 et celles de la nappe 4 dans le secteur du Barcarès (piézomètres Bar-plage3 Bar-plage4 - Pliocène continental). Ces données sont complétées par les autres facteurs pouvant influencer le système : les volumes prélevés par pompage, la recharge constituée par la pluviométrie et par l'évapotranspiration.

Dans le secteur de la Salanque, les nappes 3 et 4 sont individualisées par leur charge et leur inertie différente (figure 45). La charge de la nappe 4 est supérieure à celle de la nappe 3. Ce phénomène a pour conséquence une drainance ascendante. La nappe 4 semble réagir plus lentement aux diverses influences.

Les piézomètres sont localisés à une vingtaine de mètres l'un de l'autre et recoupent deux chenaux différents du Pliocène continental. Les crépines du piézomètre de la nappe 3 sont positionnées entre 65 et 73 mètres dans du sable jaune fin. Les crépines du piézomètre de la nappe 4 sont positionnées entre 96 et 131 mètres dans des sables moyens et des argiles. Dans cette zone, les nappes 3 et 4 sont séparées par une vingtaine de mètres de sable argileux. De plus, cette zone est la seule où la distinction hydrogéologique entre nappe 3 et nappe 4 est bien établie.

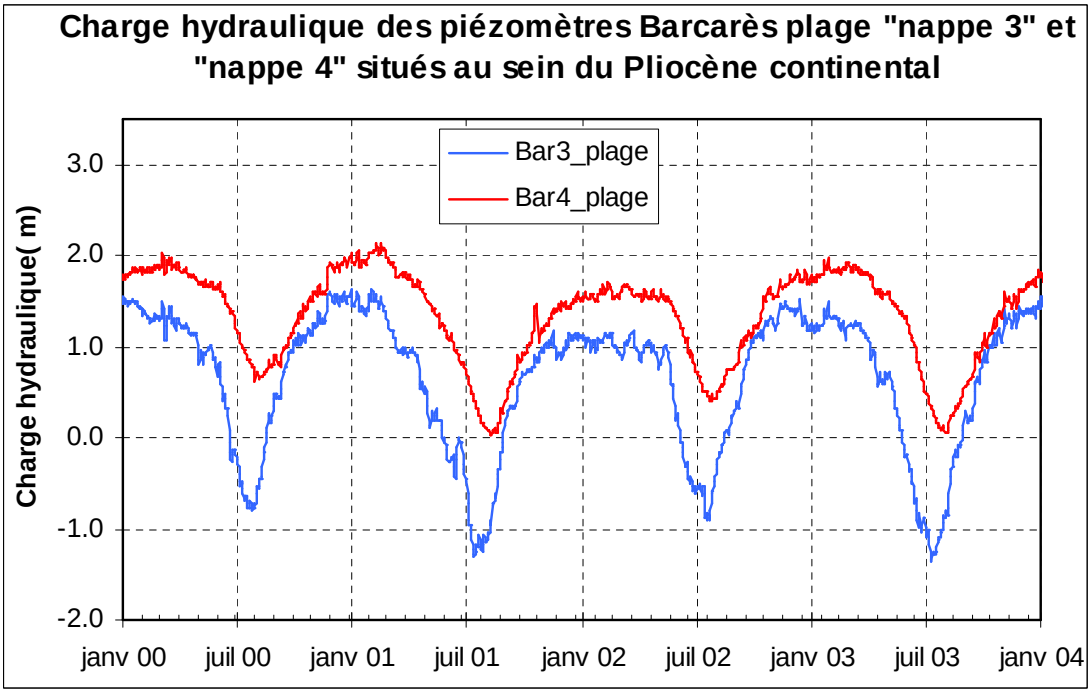


Figure 45 - Variations de charges hydrauliques de la nappe 3 et de la nappe 4 sur le site du Barcarès - plage

4.2. Corrélation des séries temporelles

Le corrélogramme croisé des variations de charge de la nappe 3 et de la nappe 4 a été réalisé afin d'obtenir une première estimation des temps de transfert (figure 46). En raison de la différence de charge entre les nappes, la nappe 4 a été considérée en tant qu'entrée du système et la "nappe 3", en tant que sortie. Curieusement, un déphasage négatif de 21 jours est mis en évidence (figure 46 - 1). Ce phénomène est lié à la réaction plus longue de la nappe 4 face aux sollicitations : suite à la baisse des prélèvements en fin d'été, la nappe 4 met plus de temps à retrouver un niveau d'équilibre. Le taux de corrélation annuel et biannuel (pic à ≈ 360 et ≈ 720 jours) est particulièrement bien marqué. Il illustre parfaitement le poids prépondérant des prélèvements estivaux sur les autres facteurs influençant le système.

Afin de contrecarrer l'effet des prélèvements réalisés sur les deux aquifères, le corrélogramme croisé est réalisé uniquement sur les périodes hivernales (figure 46 - 2). Il apparaît que le temps de réaction à une sollicitation est quasiment instantané, ou du moins, inférieur à la résolution des données (pas de temps journalier). Le même résultat est obtenu avec les données au pas de temps de 3 heures.

Ce transfert de pression, quasiment instantané, est la preuve d'une réponse identique de la nappe 3 et de la nappe 4 face aux sollicitations extérieures.

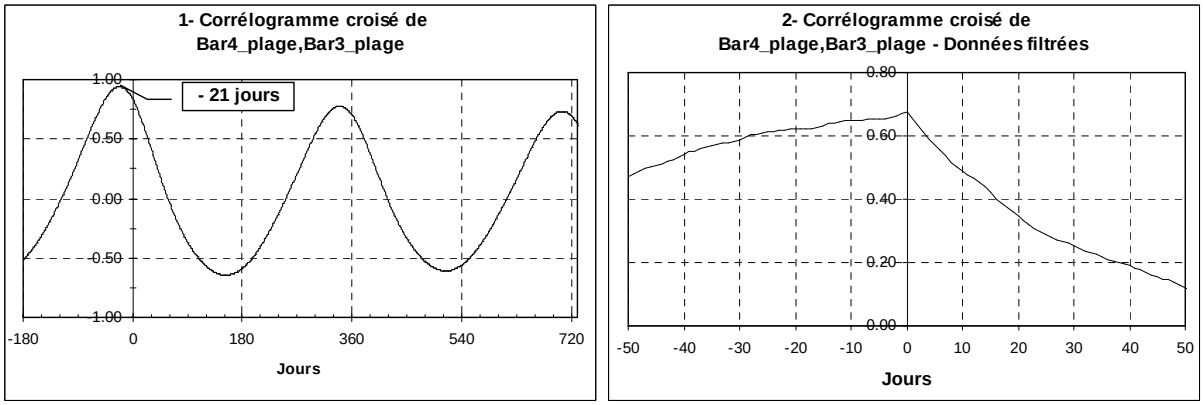


Figure 46 - Corrélogrammes croisés des variations de charge hydraulique de la nappe 3 et la nappe 4

1 : Corrélogramme réalisé sur l'ensemble de la chronique - 2 : Corrélogramme réalisé avec les données de variations de charges peu influencées par les prélèvements estivaux (Entrée : nappe 4 - Sortie : nappe 3)

4.3. Modélisation des séries temporelles

Une première modélisation de la nappe 4 a été effectuée avec la pluie, l'ETP et les variations de charge de la nappe 3 en entrées du système. Les prélèvements ont été omis dans un premier temps.

Cette modélisation a permis de confirmer une très forte relation entre les nappes 3 et 4 (figure 47). En effet, plus de 97% des variations de charge de la nappe 4 sont expliquées par les évolutions piézométriques de la nappe 3. Cependant, une fois de plus, il apparaît clairement que les prélèvements d'eau influencent très fortement le système, que cela soit au niveau de la nappe 3 ou de la nappe 4. Ces deux séries temporelles sont ainsi contrôlées par une même entrée très prépondérante sur la recharge du système.

Les écarts observés entre les variations piézométriques et le modèle ont vraisemblablement pour origine les différences d'exploitation entre la nappe 3 et la nappe 4. Dans ce secteur, les volumes prélevés dans la nappe 3 et la nappe 4 ne sont pas identiques. Sans pouvoir les quantifier, il semble qu'un volume plus important des prélèvements soit effectué dans la nappe 4.

Dans un second temps, une chronique théorique de prélèvements a été intégrée dans les données d'entrée du système. Cette chronique a été élaborée à partir des prélèvements réels du secteur Salanque. L'objectif était de quantifier la part des variations de charge liées à la drainance inter-nappe et la part liée aux prélèvements. Toutefois, en l'absence de données locales non-influencées par les prélèvements, les signaux d'entrée du système ne peuvent être distingués de manière précise. Une approche pourrait consister à modéliser uniquement les périodes hivernales, mais le pas de temps journalier est trop élevé pour parvenir à des résultats pertinents.

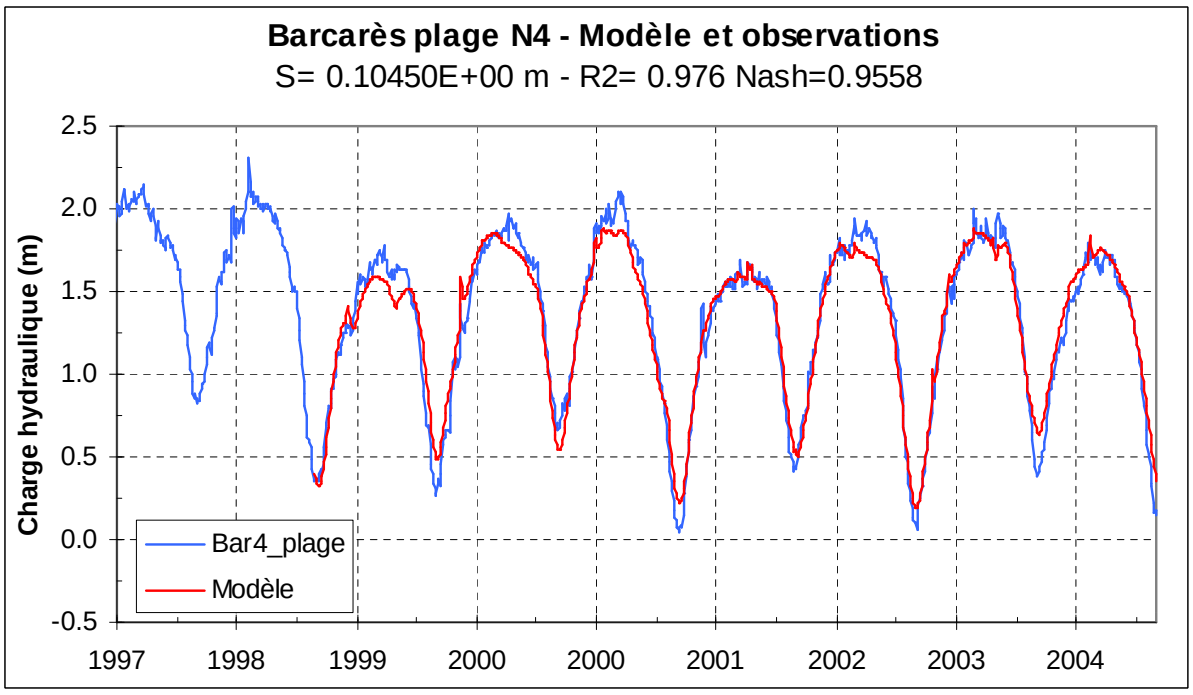


Figure 47 - Résultat de modélisation non-déterministe

*

* *

L'analyse fonctionnelle des aquifères de la plaine du Roussillon

Le système hydrogéologique naturel de la plaine du Roussillon est influencé par les prélèvements en forages. Ces derniers induisent un comportement identique à l'ensemble des nappes souterraines :

> au cours de la période estivale, la baisse de la recharge combinée au rabattement induit par les forages atteint des valeurs de 1 à 5 mètres sur la charge hydraulique. D'une manière générale, les charges hydrauliques des aquifères profonds sont en légère baisse depuis le début de l'exploitation des aquifères (≈ 5 cm/an) ;

> au cours de la période hivernale, le comportement conserve un caractère inertiel avec des temps de recharge compris entre 20 et 60 jours pour les aquifères captifs ;

Le comportement identique des aquifères exploités pour l'AEP de la plaine est aussi lié à la présence de forages recoupant plusieurs unités sédimentologiques.

En ce qui concerne les aquifères superficiels (TQ), leur charge semble approximativement constante sur le long terme, avec des temps de recharge de quelques jours.

Sur le court terme, l'influence de la mer est mise en évidence sur la zone littorale. Cela signifie que ces aquifères possèdent effectivement une condition aux limites avec la mer. La nature de cette condition aux limites (directe ou indirecte) n'a pu être déterminée par les méthodes analytiques abordées dans ce chapitre. Cependant, la nature lithologique du domaine offshore tend à prouver qu'il existe une certaine épaisseur, entre 20 et 40 m [Duvail *et al.*, 2001], de sédiments à faible perméabilité entre le fond de la mer et les chenaux sédimentaires aquifères.

Enfin, il apparaît clairement qu'un pas de temps de trois heures est insuffisant pour réaliser une bonne approche fonctionnelle des aquifères côtiers. De même, dans le cas d'aquifères influencés par des prélèvements, un pas de temps journalier ne parait pas suffisant. Il serait nécessaire d'enregistrer les données à un pas de temps inférieur ou égale à l'heure pour exploiter pleinement les approches fonctionnelles.

Chapitre III

Qualité des eaux de la plaine du Roussillon

Depuis plus d'une dizaine d'années, la qualité des eaux de l'aquifère Pliocène (225) est surveillée par analyse de la concentration en chlorures. L'objectif est de prévenir ou de déterminer les zones de contamination par intrusion saline.

En complément de ces données, des mesures de conductivité électrique ont été effectuées dans le cadre du présent travail de recherche. Il s'agissait d'estimer la minéralisation des eaux souterraines de faible profondeur dans la zone littorale.

1. Suivi annuel des concentrations en chlorures des aquifères pliocènes

Pour les eaux destinées à la consommation humaine, la valeur de la concentration en chlorures doit être inférieure ou égale à 200 mg/l (Directive Cadre Européenne). Une eau issue d'un mélange de 1% d'eau mer pour 99% d'eau de douce n'est plus potable.

Une surveillance de la qualité de l'eau souterraine circulant dans les formations pliocènes (aquifère 225 ; nappes 3 et 4) et, dans une moindre mesure, pléistocènes (aquifères 146 et 225 ; nappes 2 et 3) est assurée par le Brgm depuis 1982 sur 100 à 130 forages situés à moins de 5 kilomètres des étangs littoraux ou de la mer, entre l'étang de Salses Leucate et l'embouchure du Tech.

1.1. Acquisition des données

Cette surveillance consiste à mesurer la conductivité électrique et à analyser chimiquement la concentration en chlorures des eaux échantillonnées. Cette opération est menée une fois par an, en fin de période estivale[1], lorsque les charges des aquifères sont au plus bas.

Tous les prélèvements sont réalisés après pompage afin d'obtenir un échantillon d'eau représentatif de l'aquifère.

Le compte-rendu de ces analyses qui a débuté en 1982, est présenté dans le rapport annuel de "Surveillance de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon" [Blaise & Marchal, 2007].

[1] Depuis le début de l'opération de suivi et jusqu'en 1986, les échantillons étaient prélevés et analysés en avril (hautes eaux) et en août (basses eaux). Aucune différence significative des concentrations n'ayant pu être mise en évidence, en conséquence, la périodicité des mesures est devenue annuelle.

1.2. Localisation et tendance des pollutions inventoriées

A titre indicatif, la concentration en Na-Cl de la mer est égale à 32.3 g/l pour une conductivité électrique de l'ordre de 54 000 µS/cm. Les étangs sont un peu moins salés : 20 à 30 g/l de Na-Cl pour une conductivité de 30 000 à 50 000 µS/cm. En raison de la présence de sources karstiques sous-marines dans le secteur de Salses, la salinité de l'étang de Salses-Leucate est variable. Le débit moyen de ces sources est approximativement égal à 2.5 à 3 m^3/s. La conductivité moyenne est de l'ordre de 8 000 à 9 000 µS/cm pour Fontestramar et de 3 000 µS/cm à 7 000µS/cm pour Fontdame. Des émergences d'eau douce existent aussi, dans une moindre mesure, au sein même de la lagune (au niveau du linéament de la faille de Salses-Leucate) [Ladouche et al., 2000].

Sur la figure 48 (p. 163) est présentée la distribution géographique des analyses de concentration en chlorures. Sur la figure 49 (p. 164) est présentée l'évolution annuelle de la concentration en chlorures dans quelques secteurs littoraux de la plaine du Roussillon.

D'après les dernières analyses chimiques [Blaise & Marchal, 2007], les concentrations les plus fortes en chlorures (≈ 1 à 3 g/l) se localisent dans la zone côtière de la Salanque (unités sédimentologiques du Pliocène continental et des prismes marins quaternaires - nappe 3 - commune du Barcarès) et autour de l'étang de Salses-Leucate (Pliocène continental - commune de Salses). Sur l'ensemble des secteurs précités, les concentrations sont en augmentation (entre 5 et 15% par an).

Bien que les concentrations ne soient pas excessivement élevées dans les secteurs de Leucate (≈ 100 à 200 mg/l au sein du Pliocène continental et des prismes marins quaternaires), autour de l'étang de Canet (S^t-Nazaire) et dans un forage à Torreilles (PC), une augmentation de la concentration en chlorures est bien visible (de l'ordre de 10% par an, figure 49).

La qualité des eaux de la nappe 4 en Salanque est correcte et approximativement constante (C_{Cl} < 100 mg/l). De même, dans les secteurs de S^t-Cyprien, Elne, Alenya, Saleilles, S^{te}-Marie, S^t-Laurent-de-la-Salanque et S^t-Hippolyte, l'eau demeure exempte d'augmentation de chlorures (unités sédimentologiques du Pliocène continental et du Pliocène marin sableux).

La distribution des concentrations en chlorures ne semble pas suivre d'organisation cohérente : les différences de concentration d'un échantillon à un autre situé à proximité dans le même aquifère sont souvent significatives. De plus, pour un même point échantillonné, la concentration peut varier fortement d'une année à l'autre (figure 49). Cette remarque sera développée en fin de chapitre.

Dans les aquifères regroupés sous le terme 225, ce sont principalement les unités sédimentologiques des prismes marins quaternaires et de la partie supérieure du Pliocène continental qui abritent les eaux aux plus fortes teneurs en chlorures.

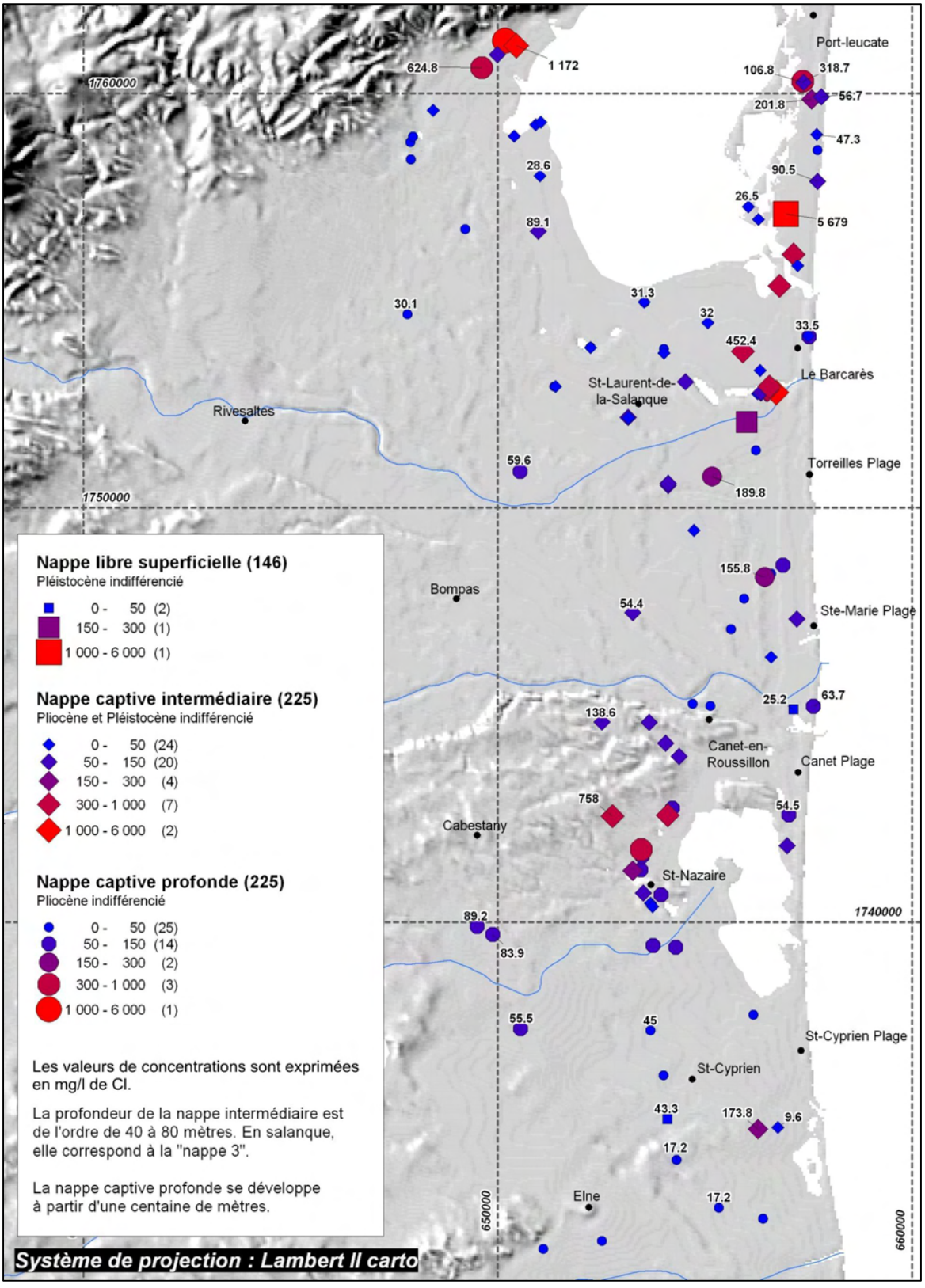


Figure 48 - Concentration en chlorures des aquifères côtiers de la plaine du Roussillon
Septembre 2006 [données Brgm - CG66]
La nappe superficielle correspond à la nappe de subsurface (aquifère 146). La nappe intermédiaire est la première nappe captive la plus proche de la surface du sol (aquifère 225). La nappe captive profonde est constituée de l'ensemble des nappes plus profondes que la nappe intermédiaire (aquifère 225). Ce découpage totalement subjectif, permet de différencier les différents aquifères sur une même verticale.

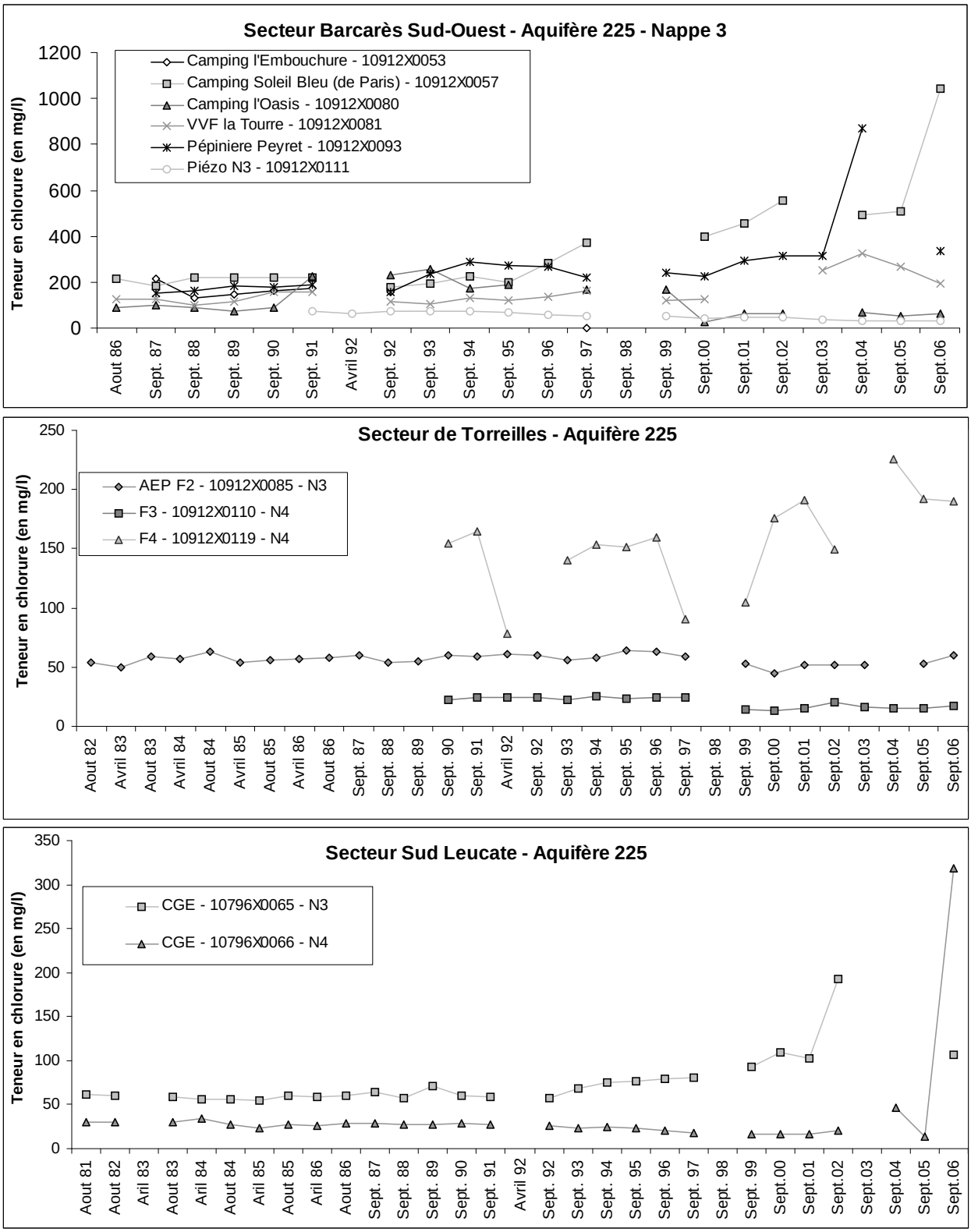


Figure 49 - Evolution annuelle de la concentration en chlorures dans quelques secteurs littoraux de la plaine du Roussillon

1.3. Origine de la salinité

En 1971, Plégat & Pouzancre ont proposé un bilan de l'influence des eaux salées marines sur les nappes aquifères du Roussillon. A partir de mesures de résistivité (géophysique électrique) et de mesures de conductivité *in-situ*, les auteurs indiquent que la nappe de surface (historiquement N1 - codée 146) est salée sur une bande littorale d'environ un kilomètre de largeur, depuis le nord du bassin jusqu'à Saint-Cyprien. Ensuite, plus au Sud, de Saint-Cyprien à Argelès, la nappe est exempte d'eau salée. La nappe de surface présente aussi une salinité significative dans la zone de la Salanque (800 Ω.cm soit 1250 µS/cm). Dans les autres secteurs, les nappes 2 (codée 146), 3 et 4 (codées 225) sont exemptes de résistivités faibles. En 1976, Marchal a signalé que la qualité des eaux de la nappe 3 en Salanque était bonne.

Cependant, depuis plus d'une quinzaine d'années, ces mêmes eaux ont tendance à se dégrader localement. Cette dégradation de la qualité des eaux est due à l'existence de flux verticaux descendants via certains forages défectueux [Marchal & Chery, 1995] ou par drainance naturelle. En effet, la vulnérabilité des nappes profondes du Roussillon est liée à la présence de transferts d'eau saumâtre ayant pour origine les terrains superficiels.

Depuis 1990, les situations de contamination inventoriées en Salanque ont été résolues par le remplacement de la colonne de captage des forages concernés. C'est le cas par exemple du forage des Portes du Roussillon sur la plage du Barcarès (**10912X0073** remplacé par le **10912X0131**). A la suite des travaux, la concentration en chlorures a chuté de plusieurs grammes par litres à 100 mg/l.

Cependant, ces opérations se soldent de moins en moins souvent par une nette réussite. Ainsi, l'eau issue du forage du stade du Barcarès (**10912X0075** remplacé par le **10912X0145**) présentait des teneurs en chlorures de l'ordre de 700 mg/l. Une endoscopie avait permis d'identifier d'importantes perforations sur le tube en acier : cet ouvrage défectueux a été injecté de ciment puis remplacé par un ouvrage neuf. A la suite de cette opération, la concentration en chlorures a été réduite de moitié (345 mg/l), mais l'eau n'a pu retrouver sa qualité d'origine (< 100 mg/l).

La salinisation progressive de la nappe 3 résulte en partie des faits suivants [Marchal, communication personnelle ; Marchal & Chery, 1995] :

- existence de forages défectueux. Ces forages sont cimentés mais des flux peuvent perdurer autour de l'ancienne colonne de captage ;
- existence d'un certain nombre de forages abandonnés mais non injectés de ciment (entre autres, le forage **10912X0062**) qui facilitent nettement les flux d'eau dense superficielle vers de l'eau douce plus profonde si le gradient hydraulique le permet (à la faveur d'un rabattement induit par un pompage par exemple).

Cette connaissance historique a été corroborée par des observations personnelles de terrain : plus d'une vingtaine d'ouvrages privés sont abandonnés en raison d'une minéralisation excessive. Ces ouvrages, dont l'état est particulièrement dégradé, atteignent régulièrement l'horizon de la nappe 3. En zone littorale, les équipements des forages vieillissent prématurément : la salinité altère le ciment et accélère la corrosion des tubes en acier.

De plus, l'ensemble des formations géologiques délimitant les différentes nappes de la zone littorale présentent des lithologies à caractère argileux de plaines d'inondation (sable argileux ou argile silteuse). L'ordre de grandeur de la conductivité hydraulique de ces formations est compris entre 10^{-5} et 10^{-7} m/s. En conséquence, les flux verticaux de ces formations ne peuvent être négligés lors d'une inversion de gradient hydraulique.

2. Minéralisation de l'aquifère de subsurface

Bien que l'importance économique des nappes superficielles (146) soit moindre sur le littoral, car non exploitées pour l'AEP, il ne faut pas négliger le fait qu'elles sont souvent à l'origine de la contamination d'aquifères plus profonds. Dans le cadre de la surveillance de la qualité des eaux de la plaine du Roussillon, seuls quatre points appartiennent à l'aquifère 146.

Une campagne de mesures de conductivité[1] électrique a été réalisée début septembre 2004 lorsque les nappes étaient au plus bas. L'objectif était d'identifier la minéralisation de l'eau circulant dans les formations de surface. Une estimation de la concentration en chlorures peut-être déduite des analyses chimiques et des mesures de conductivité effectuées par le Brgm (figure 50, page suivante).

Dans la plaine du Roussillon, la conductivité électrique naturelle de l'eau est de l'ordre de 400 à 500 µS/cm. Une conductivité supérieure à 1000 µS/cm dénote une minéralisation anormale.

L'origine de la minéralisation, marquée par de fortes conductivités, peut être la conséquence de différents contextes géologiques ou différentes influences anthropiques [Custodio, 1997].

- présence de "paléo-intrusions salines" ou de "paléo-étangs" liés, entre autres, à d'anciens niveaux marins plus élevés ;
- concentration et infiltration de sels par évaporation, amplifiées par les phénomènes de "retour à la nappe" lors d'irrigation intensive ;
- infiltration d'embruns ;
- présence de roches évaporitiques ;
- migration d'anciennes eaux sur-salées provenant d'aquifères profonds par failles, advection naturelle ou convection thermique ou par exploitation intense d'un aquifère superficiel ;
- pollution anthropique : rejets d'eaux issues de stations d'épuration ou d'activités industrielles.

Si l'infiltration d'embruns, la présence de roches évaporitiques et la migration d'anciennes eaux sur-salées provenant d'aquifères profonds par failles peuvent être exclus dans le cas du Roussillon, les autres origines sont probables.

Toutefois, il est à noté que les précipitations en domaine côtier présentent des concentrations en chlorures assez élevées, de l'ordre de 20 mg/l [Ladouche *et al.*, soumis ; et voir Chapitre IV - 2.3]. Cette concentration est naturellement enrichie par évaporation avec un facteur de concentration de l'ordre de 1.8 [Aquilina *et al.*, 2005].

[1] La conductivité électrique normalisée à 25°C est mesurée avec un conductivimètre étalonné. Pour les conductivités moyennes mesurées dans le Roussillon, une solution tampon à 1413 µS/cm a été utilisée.

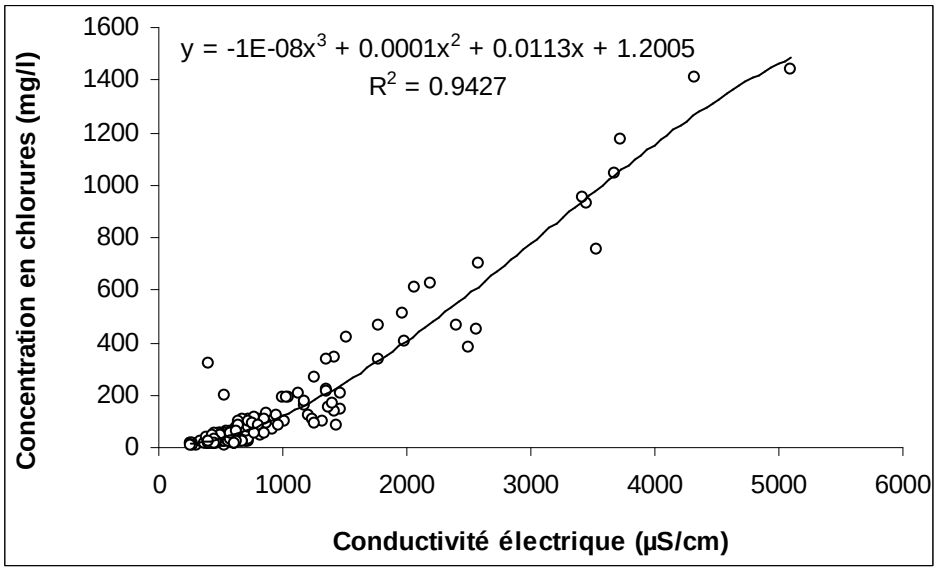


Figure 50 - Concentration des eaux en chlorures en fonction de la conductivité électrique

2.1. Mesures ponctuelles de la conductivité électrique

Au cours de la campagne de terrain (août-septembre 2004), une centaine de points d'eau potentiellement intéressant pour des mesures de minéralisation ont été repérés. Des mesures de conductivité électrique d'eau s'écoulant dans les formations superficielles ont pu être réalisées sur 39 de ces points[1] (figure 51). Les autres points d'eau appartenaient soit à des aquifères plus profonds, soit étaient comblés, non accessibles ou encore le propriétaire de l'éventuel forage ne souhaitait pas voir son eau "analysée".

D'après Marchal [communication orale], la concentration en chlorures de la nappe de surface est assez faible, hormis la zone localisée à proximité du littoral.

[1] Différents log de conductivité ont été aussi réalisés au cours de la campagne de terrain. Pour différentes raisons, cette méthodologie d'étude s'est révélée peu efficace sur le littoral de la plaine du Roussillon. La mesure de conductivité des ouvrages non pompés (piézomètre ou forage abandonné) a mis en évidence une stratification naturelle de la colonne d'eau qui n'était pas représentative de l'aquifère. Les valeurs de conductivité sont souvent largement plus élevées que celles mesurées à la suite du renouvellement de l'eau dans la colonne par pompage. Une petite pompe de surface à moteur thermique a été utilisée lors de la campagne de terrain

a. Résultats

La répartition des points est surtout liée à la présence de campings (≈ 90 % des campings possèdent au moins un forage). La conductivité électrique des eaux issues des forages d'irrigation agricole est difficilement mesurable : les exploitants y sont souvent opposés.

La figure 51 présente les résultats de cette campagne de terrain. Les conductivités sont très fortes dans la zone de Leucate et du Barcarès (de 1000 à 5000 µS/cm) et ce jusqu'au niveau de S^{t}-Laurent-de-la-Salanque, à 4 km des côtes et à 3 km au sud de l'étang de Salses-Leucate.

Dans les autres zones, les conductivités électriques élevées se situent à quelques centaines de mètres du littoral. Lorsque plusieurs mesures ont été effectuées selon un transect E-W depuis le littoral, les conductivités décroissent : ce cas a été observé à Torreilles-Plage (de 1453 à 1108 µS/cm - figure 51).

Dans le secteur du Barcarès, il a été aussi remarqué une légère décroissance de la minéralisation en s'éloignant du fleuve littoral Agly.

De même que pour les fortes concentrations en chlorures, la distribution des conductivités élevées ne semble pas suivre une organisation cohérente. L'eau de certains points localisés à proximité du littoral présente une plus faible conductivité électrique que celle de points situés à l'intérieur des terres.

Le sud de la plaine du Roussillon semble être un peu épargné par les concentrations élevées en sel : à Argelès-Plage, les conductivités électriques ne dépassent pas 400 µS/cm bien que les forages soient situés à une distance de 400 mètres de la côte.

b. Bilan

Cette campagne a eu pour objet de déterminer les zones où la contamination peut s'effectuer par drainance verticale naturelle ou anthropique.

Là où il existe des teneurs en chlorures anormales dans les aquifères profonds, de fortes conductivités existent aussi en surface (*eg* : secteur du Barcarès). La règle inverse n'est pas vraie. C'est-à-dire que de fortes teneurs en surface n'impliquent pas forcément une pollution des aquifères sous-jacents.

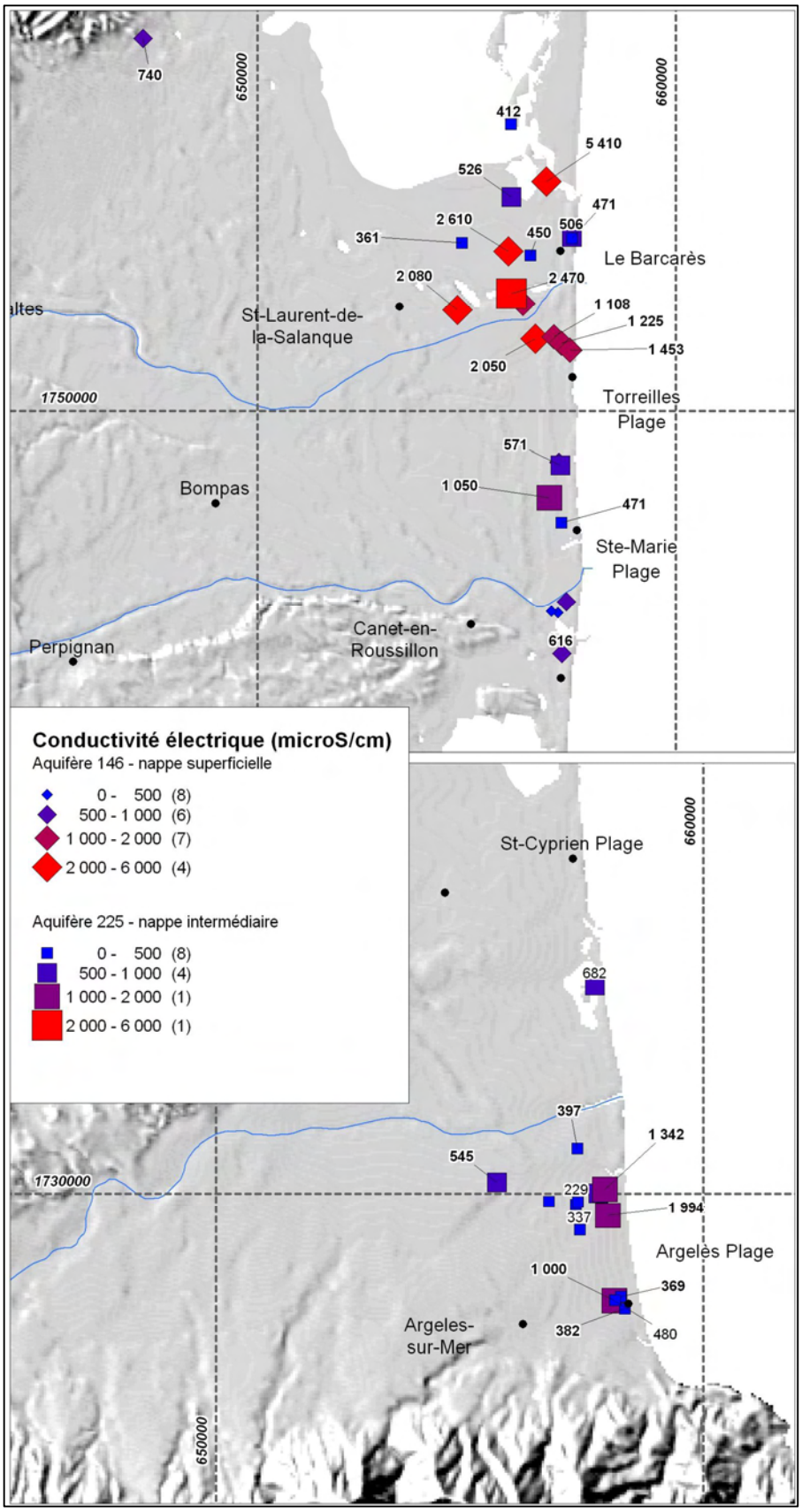


Figure 51 - Carte des conductivités électriques des points d'eau littoraux

La nappe superficielle correspond à la nappe de subsurface (aquifère 146). La nappe intermédiaire est la première nappe captive la plus proche de la surface du sol (aquifère 225). La nappe captive profonde est constituée de l'ensemble des nappes plus profondes que la nappe intermédiaire (aquifère 225). Ce découpage totalement subjectif, permet de différencier les différents aquifères sur une même verticale.

3. Distribution hétérogène de la salinité

Comme cela a été évoqué ci-dessus, la distribution des concentrations en chlorures ou des conductivités élevées ne semble pas seulement être contrainte par la présence de la mer. En théorie, les concentrations en chlorures devraient décroître en s'éloignant du littoral. Cette théorie est confirmée très localement, sur la bande littorale, mais pas dans les zones plus éloignées du littoral.

L'hétérogénéité de perméabilité des aquifères de subsurface est relativement modérée et n'est vraisemblablement pas à l'origine de la distribution désordonnée de la salinité[1].

L'Histoire permet de dresser quelques pistes d'interprétation : en effet, la Salanque est un terme désignant au Moyen Âge des marécages salés. De même, le nom de la commune de Salses-le-Château évoque une étymologie saline.

Dès 1971, alors que les ressources en eau souterraines étaient peu exploitées, Plégat & Pouzancre ont souligné la salinité de la nappe superficielle de la Salanque. Les sols de cette zone ont été drainés et assainis afin de pouvoir être exploités : cependant, une salinité résiduelle existe probablement dans ces terrains. Ce phénomène a déjà été observé, entre autres, dans le marais de Rochefort [Ladouche & Weng, 2005].

Sur la figure 52[2] est présentée une cartographie des secteurs considérés comme sources potentielles de salinité. Les différentes entités géographiques ont été reportées :

- les plans d'eau salés (mer, étang, lagune, rivière littorale, marais salant…) ;
- les zones marécageuses actuelles (sagne[3], marécage), déterminées comme ci-dessus ;
- les anciennes zones humides qui ont été assainies ;
- le cordon littoral sableux, qui présente une certaine vulnérabilité en termes de perméabilité.

Ces données ont été déterminées à partir de la cartographie actuelle (base de données géographiques Corine Land Cover (1990) et cartes topographiques IGN 25 000ème) et déduites de la comparaison des cartes de Cassini, datant de la fin du XVIII^{ème} siècle, avec les données actuelles.

Une limite d'extension des sources de salinité a été dessinée de manière subjective en fonction des données ci-dessus. Des mesures de la concentration en sel des rivières littorales (figure 53) et des analyses de sols plus poussées permettraient de préciser l'extension des secteurs pouvant contaminer les aquifères.

---

[1] Dans le cas de forts contrastes de perméabilité, la distribution spatiale des concentrations en sels varie fortement.

[2] La carte est présentée en grand format en annexe 13.

[3] Terme local dont la signification est "terre marécageuse" et dont l'origine provient du roseau des marais (*Phragmite communis*). Synonyme de "sanya".

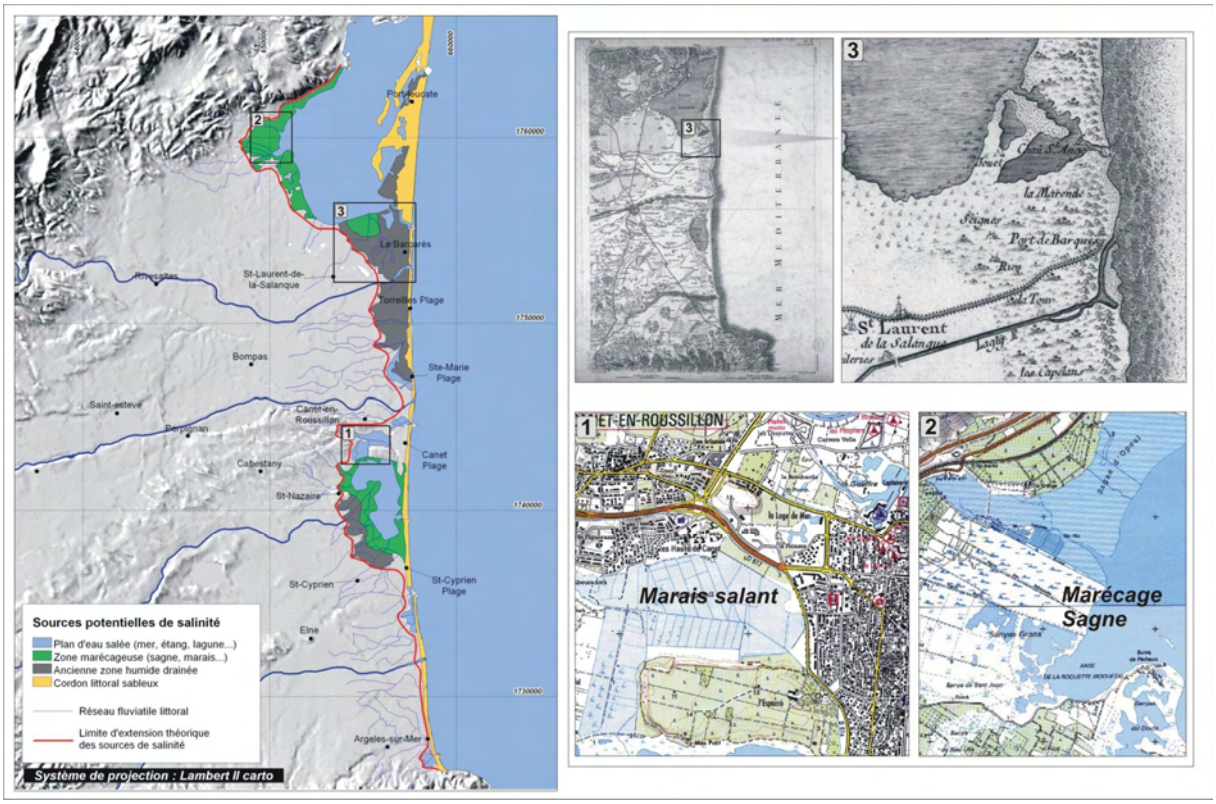


Figure 52 - Carte des sources potentielles de salinité
(1 et 2 : extrait des cartes topographiques IGN 25000ème ; 3 : extrait de la carte de Cassini)

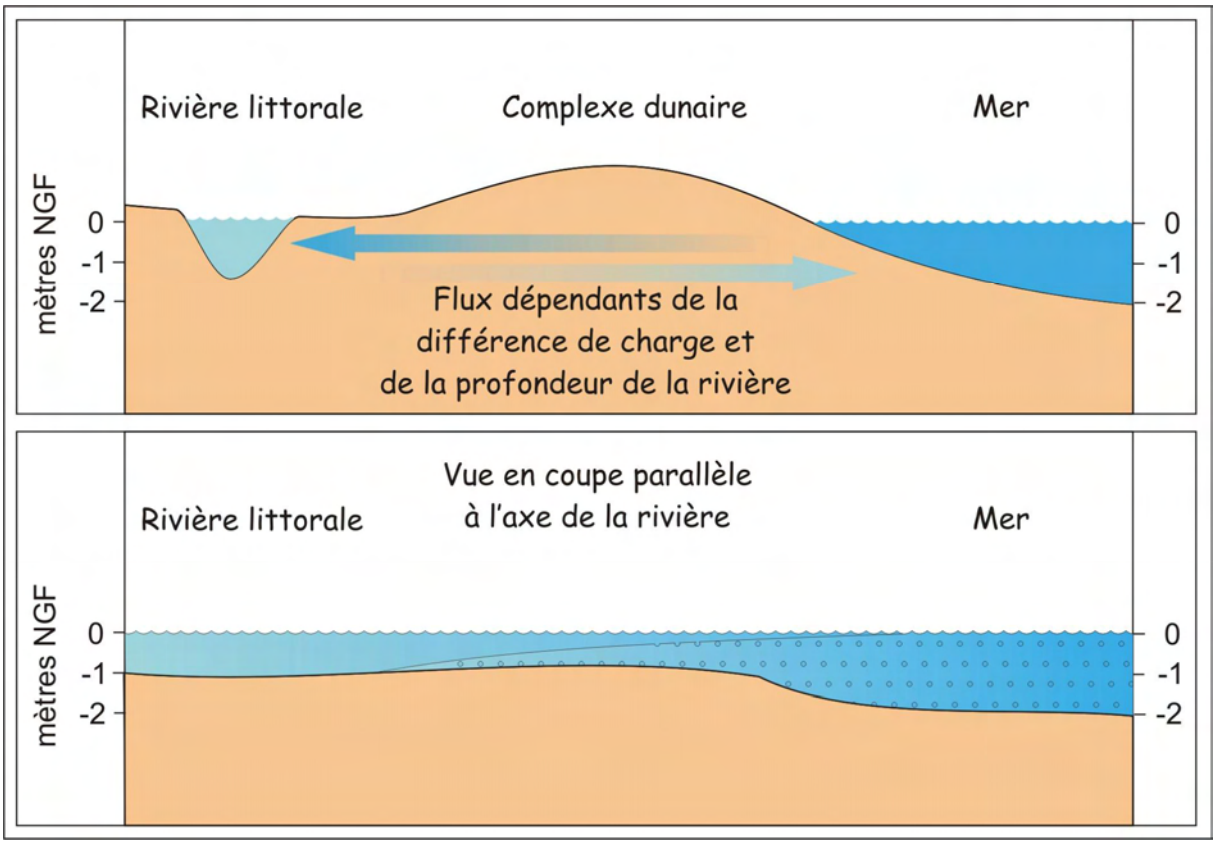


Figure 53 - Schéma simple de salinisation des rivières littorales
Au cours des périodes estivales, la mer peut pénétrer de plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres (eg : chaque été, le Vidourle, fleuve côtier héraultais et gardois est salé sur six kilomètres environ).

*

* *

La qualité des eaux de la plaine du Roussillon

La qualité des eaux réservées à l'AEP dans le secteur littoral de la plaine du Roussillon est satisfaisante. Cependant, de plus en plus d'anomalies de teneurs en chlorures sont recensées, notamment dans la nappe 3 en Salanque.

Ces anomalies sont dues, la plupart du temps, à l'existence de flux verticaux descendants. Ces flux sont favorisés par l'existence de forages défectueux ou par des zones plus perméables. Ils ne peuvent exister que lorsque la charge des aquifères profonds est moins élevée que celle des aquifères de subsurface. Naturellement, la charge des aquifères est croissante avec la profondeur. En Salanque, la différence entre la charge hydraulique des nappes 3 et 4 est métrique : le cône de rabattement d'un forage d'exploitation est suffisant pour inverser la drainance ascendante naturelle.

La qualité de eaux issues des aquifères de subsurface est médiocre sur le pourtour des étangs littoraux et à proximité du littoral. Seul le sud de la bande littorale de la plaine du Roussillon présente des eaux de meilleure qualité.

L'origine de la salinisation des aquifères de subsurface en Salanque et sur le pourtour de l'étang de Canet est vraisemblablement due à une salinité résiduelle résultant de la présence passée de marécages aujourd'hui asséchés. Ces secteurs, à salinité résiduelle, ont été cartographiés. Ils doivent être considérés, dans une moindre mesure que la mer, comme une source de contamination potentielle.

Chapitre IV

Contribution des études hydrochimiques

Les objectifs des analyses chimiques des eaux s'écoulant dans les aquifères de la plaine du Roussillon étaient doubles.

Dans un premier temps, il s'agissait de caractériser la composition chimique des eaux des différentes unités sédimentologiques définies par C. Duvail. Les forages et piézomètres où les prélèvements ont été effectués devaient présenter deux particularités : d'une part, le log géologique du point de prélèvement était parfaitement connu et, d'autre part, le forage n'était, en principe, crépiné que sur une seule unité sédimentologique afin d'éviter tout mélange d'eau. En réalité, certains forages étaient crépinés sur plusieurs unités car l'interprétation géologique a évolué entre la période de prélèvement et la rédaction du présent manuscrit.

Dans un second temps, l'outil "hydrochimie" a été utilisé dans le cadre d'une problématique de caractérisation hydrochimique des eaux : cet outil permet de déterminer l'origine et l'évolution des eaux d'un aquifère. Ces interprétations hydrochimiques seront prises en compte dans l'élaboration du modèle conceptuel hydrogéologique du Roussillon.

1. Démarche adoptée

1.1. Déroulement de la campagne de terrain

Une campagne de terrain s'est déroulée du 20 au 23 septembre 2005 afin de prélever les échantillons d'eau en vue d'analyses chimiques. Le protocole d'acquisition des échantillons est détaillé en annexe 14.

Les responsables techniques de la SAUR, de la CGE et de la Communauté des Communes Sud Roussillon ont contribué aux prélèvements en facilitant l'accès aux sites de forages d'exploitation.

Au cours de cette campagne, 29 échantillons ont été prélevés (dont un échantillon "mer" et un échantillon "étang de Salses-Leucate"). Le choix des prélèvements a principalement été déterminé en fonction de la connaissance géologique. Ainsi, l'eau contenue dans chaque formation géologique potentiellement aquifère a été échantillonnée et analysée. Les prélèvements ont été plus nombreux en Salanque, là où l'augmentation chronique des chlorures dans les forages est la plus significative.

1.2. Analyses chimiques

Les éléments majeurs (cations : Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+} ; Anions : HCO_3^{2-}, NO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}) ont été analysés au laboratoire de la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier par chromatographie ionique. L'alcalinité totale (TAC) a été mesurée par titration acide selon la méthode de "Gran". L'équipement d'analyse était constitué par une sonde "Dionex ICS 1000 Anions" et "Dionex ICS 1000 Cations". L'erreur relative à la mesure sur ces appareils est inférieure à 5% en moyenne.

Les éléments traces (Li, B, Br, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, U) ont été analysés au service commun "ICP-MS" du département recherche T3E de l'Université de Montpellier II. Ces analyses ont été effectuées par le spectromètre de masse quadripolaire à source plasma (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer) dénommé "Plasma Quad 2 Turbo+". L'erreur relative à la mesure sur chaque élément est variable suivant les éléments mais reste inférieure à 3%.

La balance ionique des analyses a été vérifiée : elle est égale à 0.2% en moyenne avec des valeurs comprises entre -0.64% et 0.61%. En conséquence, les analyses chimiques peuvent être jugées de bonne qualité.

1.3. Description des échantillons prélevés

Le descriptif ainsi que la localisation géographique de chaque échantillon prélevé sont présentés dans le tableau 14 et sur la figure 54. Les données brutes des analyses chimiques figurent en annexe 15.

Le tableau 14, page suivante, décrit l'aquifère et les différentes unités sédimentologiques d'où proviennent les eaux échantillonnées.

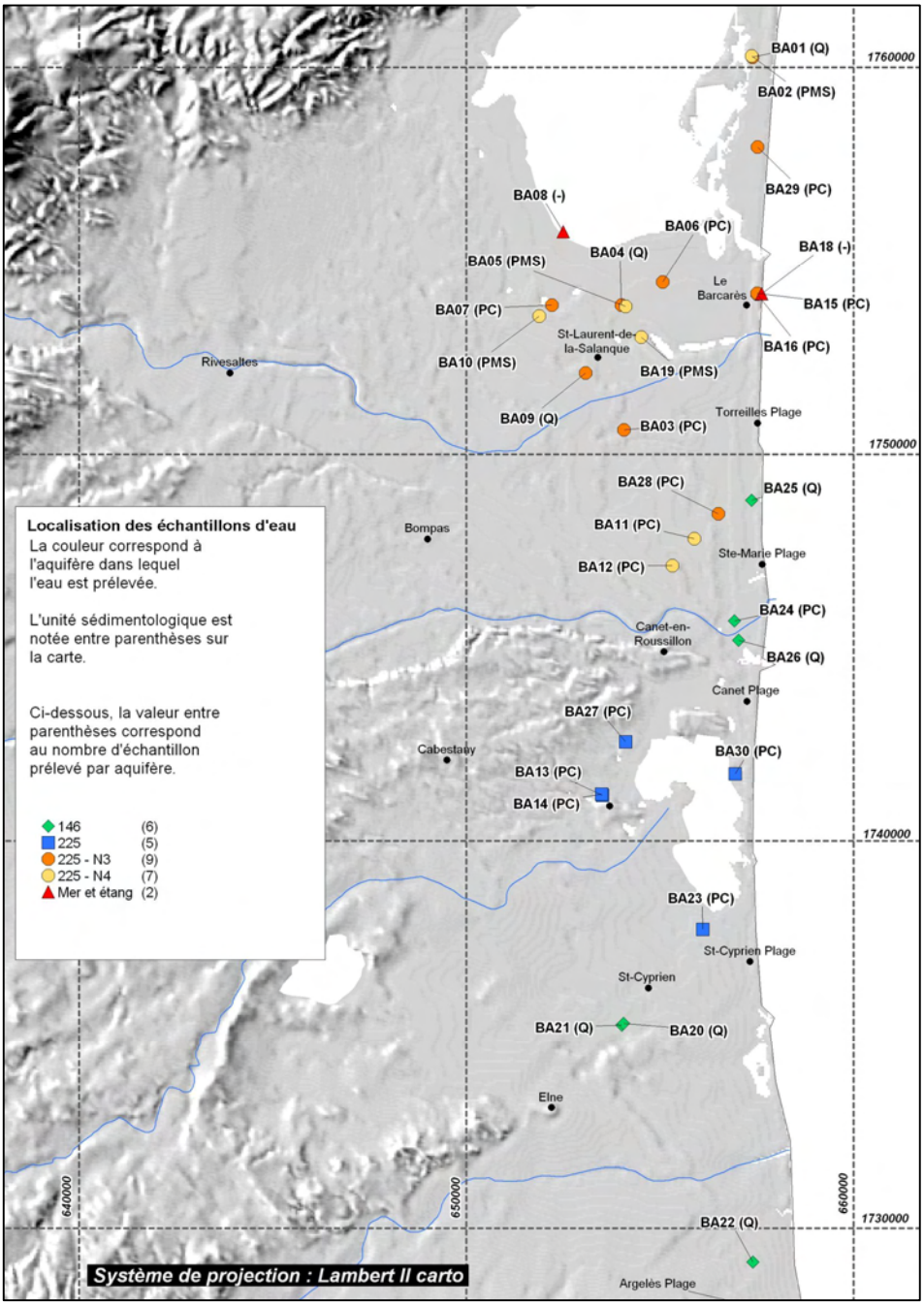


Figure 54 - Localisation des échantillons d'eau prélevés en vue d'analyses chimiques

Indice BSS	Echantillon	Dénomination BSS	Unité sédimento-logique crépinée	Aquifère	Commune	Nature de l'ou-vrage	Profondeur de l'ou-vrage
10796X0065	BA01	CF3	PQ1arg ; PTQ1sab	225 - N3 (Salanque)	Leucate	Forage	75
10796X0066	BA02	CF4	P4sab ; P3sab ; P3arg	225 - N4 (Salanque)	Leucate	Forage	170
10912X0040	BA03	TORREI	PC	225 - N3 (Salanque)	Torreilles	Forage	118
10912X0060	BA04	F2N3	TQ1pi et TQ1	225 - N3 (Salanque)	S^{t}-Laurent-de-la-Salanque	Forage	48.8
10912X0133	BA05	F2N4BI	P4pal ; P4sab	225 - N4 (Salanque)	S^{t}-Laurent-de-la-Salanque	Forage	175
10912X0074	BA06	F4N3	PC	225 - N3 (Salanque)	S^{t}-Laurent-de-la-Salanque	Forage	67
10912X0086	BA07	F6	PC	225 - N3 (Salanque)	S^{t}-Hippolyte	Forage	60
Etang	BA08	Etang	-	-	S^{t}-Hippolyte	Etang	-
10912X0079	BA09	F2	PTQ1sab ; TQ1PI ; TQ1	225 - N3 (Salanque)	S^{t}-Laurent-de-la-Salanque	Forage	60
10912X0140	BA10	F2	P4sab ; P3sab ; P3arg	225 - N4 (Salanque)	S^{t}-Hippolyte	Forage	150
10916X0073	BA11	F3	PC	225 - N4 (Salanque)	S^{te}-Marie	Forage	205
10916X0015	BA12	F2	PC	225 - N4 (Salanque)	S^{te}-Marie	Forage	150.6
10916X0013	BA13	F	PC	225	S^{t}-Nazaire	Forage	149
10916X0059	BA14	F3	PC	225	S^{t}-Nazaire	Forage	137.7
10912X0112	BA15	BAR3	PC	225 - N3 (Salanque)	Le Barcarès	Piézo.	85
10912X0111	BA16	BAR4	PC	225 - N4 (Salanque)	Le Barcarès	Piézo.	210
Mer	BA18	Mer	-	-	Le Barcarès	Mer	-
10912X0061	BA19	F3N4	P4sab ; P4arg ; P3sab	225 - N4 (Salanque)	S^{t}-Laurent-de-la-Salanque	Forage	165
10972X0151	BA20	F6	PTQ2pal	146	S^{t}-Cyprien	Forage	20
10972X0139	BA21	P4	PTQ2pal	146	S^{t}-Cyprien	Forage	20
10976X0024	BA22	MARSOI	PQ2sab	146	Argelès-sur-Mer	Forage	13
10972X0098	BA23	FE1	PC	225	S^{t}-Nazaire	Forage	197
10916X0115	BA24	MARIE	TQ2	146	S^{te}-Marie	Forage	27.5
10916X0066	BA25	ILLES	TQ2	146	S^{te}-Marie	Forage	26.5
10916X0052	BA26	PEUPLI	PQ2sab	146	Canet-en-Roussillon	Forage	28
10916X0040	BA27	F	PC	225	Canet-en-Roussillon	Forage	97
10916X0062	BA28	F1N3	PC	225 - N3 (Salanque)	S^{te}-Marie	Piézo.	64
10912X0073	BA29	PORTES	PC	225 - N3 (Salanque)	Le Barcarès	Forage	62.5
10916X0075	BA30	ESTANG	PC	225	Canet-en-Roussillon	Forage	32

Tableau 14 - Description des différents échantillons

2. Classification des résultats

Afin d'étudier les résultats des analyses chimiques, des regroupements d'échantillons sont effectués. Ils sont fondés sur les critères suivants :

> critères hydrogéologiques : proximité géographique, profondeur du ou des horizons échantillonnés, connaissance géologique (nature génétique et pétrographique de la formation), connaissance hydrogéologique (hauteur piézométrique, répartition en nappe 3 / nappe 4) ;

> critères hydrogéochimiques : comportement similaire dans les graphiques classiques de type Piper et Schöeller-Berkaloff ;

> critères statistiques : indice de similarité marqué (matrice de corrélation, Pearson et Classification Ascendante Hiérarchique…) ;

> critères hydrochimiques : diagrammes binaires afin de déterminer l'évolution des groupes d'échantillons en fonction de référentiels connus tels que mer, eau de pluie ou eau polluée par les effluents de stations d'épuration.

L'utilisation conjointe de l'ensemble de ces outils permet de préciser la détermination des différents faciès d'eau d'une part, mais aussi de déceler les limites de l'interprétation géologique, d'autre part.

Le chimisme des eaux est aussi fonction de l'encaissant dans lequel elles transitent. Dans le cas de la plaine du Roussillon, il est nécessaire de rappeler que les eaux circulent dans des faciès géologiques similaires : graviers, sables, argiles marines ou de plaines d'inondation. Les eaux de différents aquifères peuvent donc avoir un faciès hydrochimique très similaire.

2.1. Approches hydrogéologique et hydrogéochimique

Sur le diagramme de Piper (figure 55), les échantillons ont été regroupés en fonction de leur localisation géographique et de leur appartenance aux diverses unités sédimentologiques. Les eaux se répartissent selon divers types :

- les "eaux chlorurées, sulfatées, calciques et magnésiennes" (eaux superficielles et Salanque) ;
- les "eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes" (eaux plus profondes) ;
- un échantillon appartient au type "eau chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique".

Le tableau 15 présente les différents groupes d'eau identifiés. Les échantillons sont aussi représentés sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff (figure 56).

Les groupes 3, 5 et 8 sont homogènes sous tous les aspects : chimisme de l'eau, localisation géographique et unité sédimentologique.

La composition chimique et les unités du groupe 4 sont beaucoup plus hétérogènes. Ces échantillons ont été regroupés car ils sont tous issus de la Salanque et leur faciès chimique, bien que variable, reste assez proche. Au sein de ce groupe 4, les échantillons BA01 et BA29 présentent un faciès chimique proche, mais l'eau de ces deux échantillons est issue d'unités sédimentologiques différentes.

N° groupe	Descriptif groupe	Diminutif	Echantillon	Remarque
1	Mer et étang	Mer	BA08 - BA18	Chimie homogène
2	Quaternaire (146) - Argelès-sur-mer	Arg-146	BA22	échantillon unique
3	Pliocène marin sableux (225 N4)-Salanque	PMS-slq	BA02 - BA05 - BA10 - BA19	Chimie et géologie homogène
4	Quaternaire (146) et Pliocène marin sableux - Salanque	PC-slq	BA01 - BA03 - BA04 - BA06 - BA07 - BA09 - BA11 - BA12 - BA15 - BA24 - BA25 - BA26 - BA28 - BA29	
5	Pliocène continental - autour de l'étang de Canet	PC-Can	BA13 - BA14 - BA27 - BA30	Chimie et géologie homogène
6	Pliocène continental (225N4) - S^t-Nazaire	PC-StNaz	BA23	échantillon unique
7	Pliocène continental - 225	PC-slq4	BA16	échantillon unique
8	Quaternaire (146) - S^t-Cyprien	146-StCyp	BA20 - BA21	Chimie et géologie identiques

Tableau 15 - Classification hydrochimique et hydrogéologique et des eaux échantillonnées dans la plaine du Roussillon

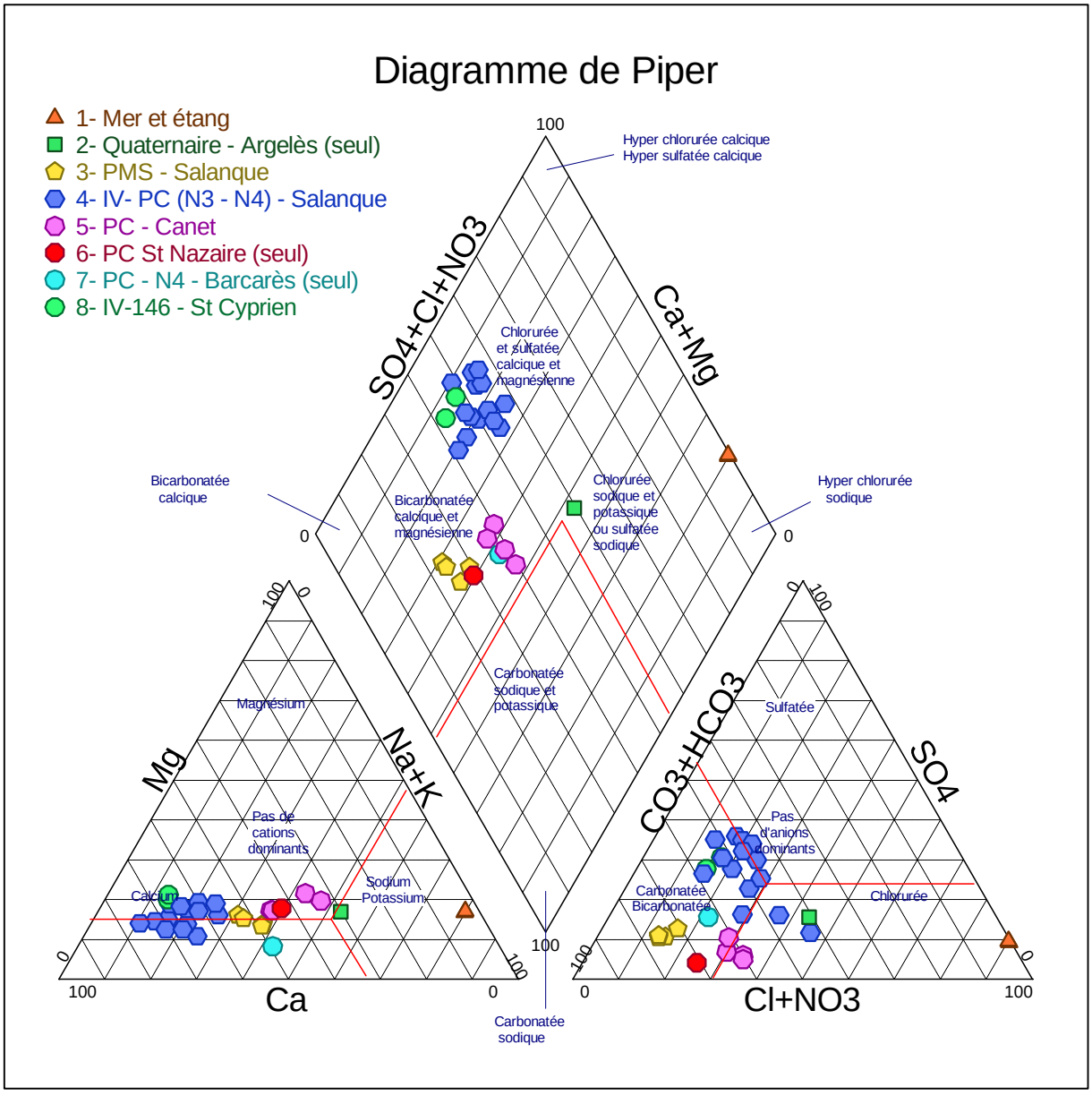


Figure 55 - Diagramme de Piper des eaux échantillonnées
(Logiciel "Diagrammes" - R. Simler - Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon)

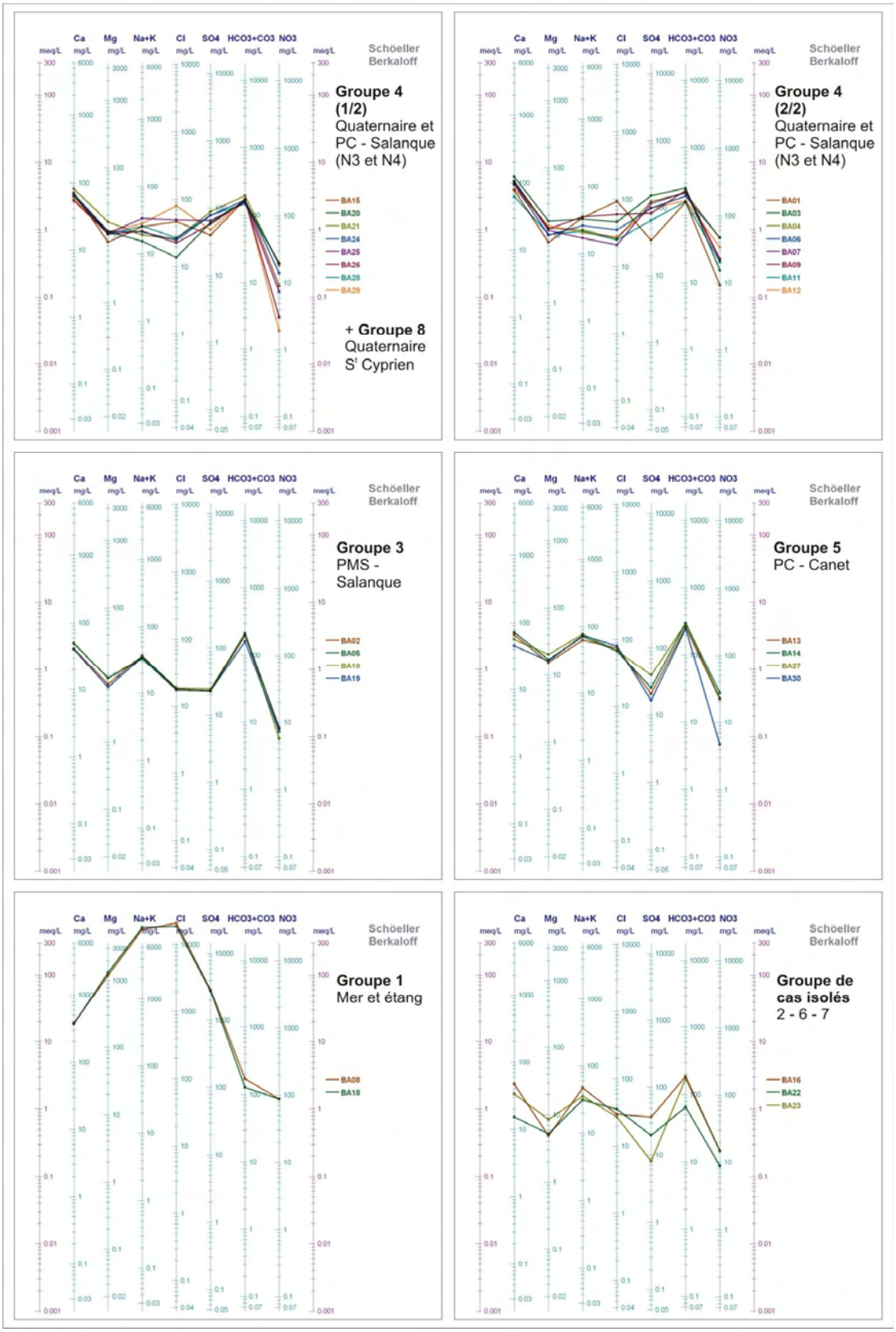


Figure 56 - Matrice de diagrammes de Schöeller-Berkaloff des eaux échantillonnées
L'échelle est constante sur tous les graphiques. (Logiciel "Diagrammes" - R. Simler - Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon)

2.2. Approche statistique

Différents groupes d'eau ont été identifiés sur la base de critères hydrogéologiques. Quelques tests statistiques ont été menés afin de préciser ces premiers résultats, tout en intégrant les analyses des éléments traces.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une méthode de classification itérative. On commence par calculer la dissimilarité entre les N objets en considérant l'ensemble des analyses chimiques (traces et majeurs). Puis on regroupe les deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets. On calcule ensuite la dissimilarité entre cette classe et les N-2 autres objets en utilisant le critère d'agrégation. Puis on regroupe les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation. On continue ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés [manuel de l'utilisateur XLSTAT-Pro, 2004].

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Le degré de similitude entre échantillons est mentionné en abscisse.

Une classification ascendante hiérarchique a été réalisée sur les analyses chimiques d'éléments majeurs et d'éléments traces contenus dans les eaux de la plaine du Roussillon.

D'une part, le dendrogramme (figure 57) confirme les points suivants :

- forte similarité au sein des eaux du groupe 3 (eaux circulant dans le Pliocène marin sableux de la Salanque - couleur violette sur la figure) ;
- forte similarité au sein des eaux du groupe 5 (eaux circulant dans le Pliocène continental autour de l'étang de Canet - couleur verte sur la figure) ;
- les échantillons BA20 et BA21 (groupe 8 - aquifère 146 à S^t-Cyprien) se corrèlent assez bien (couleur bleue sur la figure) ;

D'autre part, une matrice de corrélation[1] a été réalisée sur le groupe 4 afin d'identifier des différences d'eau entre le Quaternaire et le Pliocène (tableau 16).

- bien que n'appartenant pas à la même unité sédimentologique, les échantillons BA01 et BA29 sont similaires et relativement différents des autres échantillons. Ils se localisent dans le secteur du lido entre Leucate et le Barcarès ;
- les autres échantillons se corrèlent assez bien. En conséquence, la distinction entre les eaux issus de différentes unités sédimentologiques ne peut-être effectuée par cette méthode.

L'analyse en composante principale ne fournit pas d'information nouvelle par rapport aux résultats statistiques et au diagramme de Piper.

[1] Coefficient de corrélation de Pearson (voir p. 30)

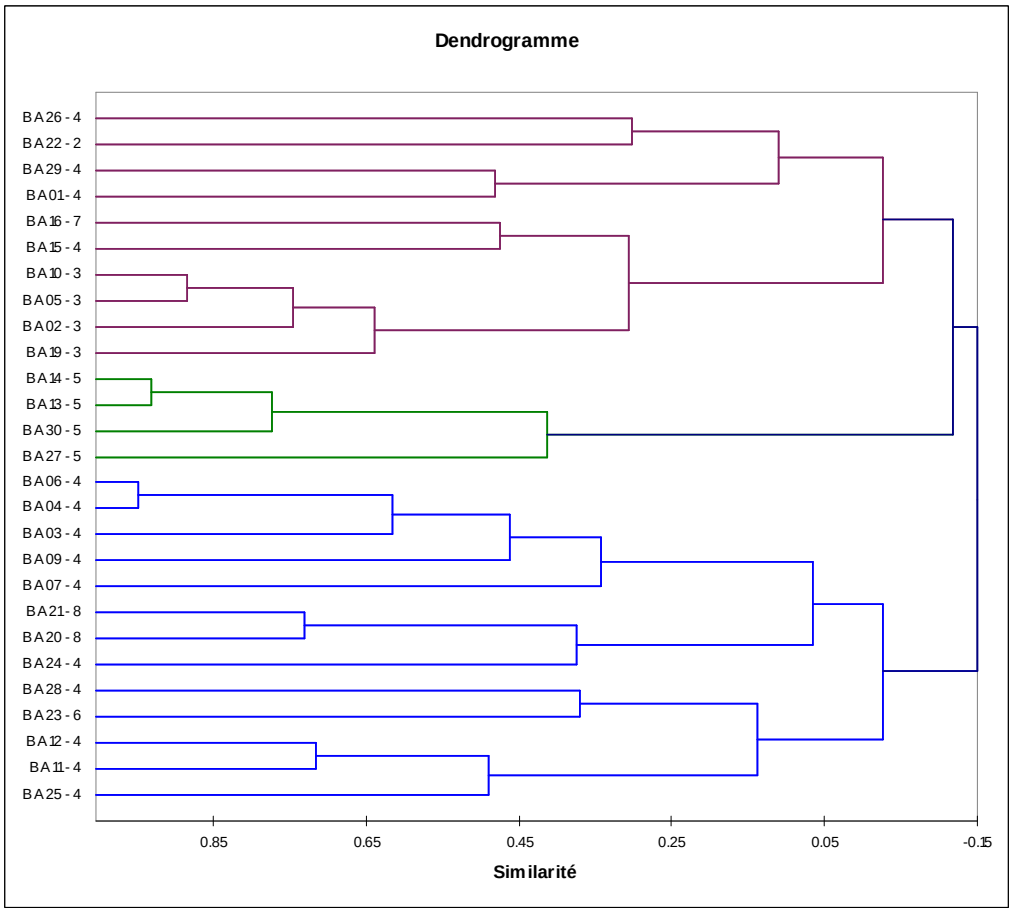


Figure 57 - Classification ascendante hiérarchique des résultats d'analyses chimiques
Les différents groupes définis dans le paragraphe précédent sont notés à côté du nom de l'échantillon

	BA 01	***BA 03***	***BA 04***	***BA 06***	***BA 07***	***BA 09***	***BA 11***	***BA 12***	***BA 15***	***BA 24***	***BA 25***	***BA 26***	***BA 28***	***BA 29***
BA 01	**1**													
BA 03	0.882	**1**												
BA 04	0.855	**0.990**	**1**											
BA 06	0.890	**0.985**	**0.996**	**1**										
BA 07	0.865	**0.995**	**0.994**	**0.989**	**1**									
BA 09	0.949	0.974	0.966	0.980	0.974	**1**								
BA 11	0.907	**0.986**	**0.986**	**0.991**	**0.990**	**0.993**	**1**							
BA 12	0.869	**0.993**	**0.999**	**0.997**	**0.993**	0.970	**0.986**	**1**						
BA 15	0.964	0.946	0.933	0.953	0.949	**0.993**	0.976	0.938	**1**					
BA 24	0.897	**0.992**	**0.987**	**0.988**	**0.994**	**0.990**	**0.998**	**0.988**	0.971	**1**				
BA 25	0.954	0.977	0.958	0.970	0.965	**0.994**	**0.984**	0.966	**0.984**	**0.983**	**1**			
BA 26	0.908	0.975	0.963	0.968	0.979	**0.990**	**0.993**	0.964	**0.982**	**0.994**	**0.983**	**1**		
BA 28	0.895	**0.995**	**0.993**	**0.994**	**0.992**	**0.985**	**0.995**	**0.995**	0.959	**0.996**	**0.984**	**0.983**	**1**	
BA 29	**0.982**	0.921	0.894	0.918	0.908	0.975	0.946	0.905	**0.982**	0.941	0.979	0.956	0.934	**1**

Tableau 16 - Matrice de corrélation des échantillons du groupe 4

2.3. Approche hydrochimique

a. Remarques préliminaires

La méthodologie d'interprétation hydrochimique consiste à déterminer les origines de l'évolution de la concentration en ions de l'eau à l'aide de différents diagrammes binaires.

La littérature traitant de la chimie des aquifères littoraux est particulièrement abondante. Le chapitre hydrochimie [Jones *et al.*, 1999] de l'ouvrage de synthèse de Bear *et al.* [1999] permet d'aborder les concepts primaires. En parallèle, de nombreux laboratoires ont développé des méthodes spécifiques en fonction de leur problématique d'étude et de recherche.

En première approximation, l'ensemble des eaux échantillonnées dans les aquifères sont douces en raison d'une teneur totale en matières dissoutes[1] toujours inférieure à 650 mg/l. La teneur totale en matières dissoutes de l'eau de mer et de l'étang est de l'ordre de 35 000 mg/l, ce qui correspond à des eaux salées.

L'ensemble des échantillons analysés (hormis mer et étang) étant constitués d'eau douce, les processus chimiques complexes de type dissolution / précipitations, œuvrant dans les aquifères côtiers, ne seront pas abordés dans l'interprétation des analyses. De même, les processus d'oxydoréduction, non négligeables en zone littorale, ne seront pas traités, car l'échantillonnage des eaux n'a pas été prévu pour ce type d'étude. Les objectifs initiaux des analyses chimiques étaient de caractériser les différentes unités géologiques et non d'étudier finement le chimisme des eaux en zone littorale.

En conséquence, seuls les processus chimiques de type échange ionique (interactions eau / roche / contamination) et concentration par ETP seront pris en considération par la suite.

[1] Teneur totale en matières dissoutes = Salinité Totale (ST) = Total Dissolved Solids (TDS). Valeur de TDS compris entre 0 et 1 000 mg/l : eau douce ; 1 000-10 000 mg/l : eau saumâtre ; 10 000-100 000 mg/l : eau salée ; > 100 000 mg/l : eau sursalée [Fetter, 2001].

b. Interprétations hydrochimiques

Quelques diagrammes binaires sont représentés sur les figures 58, 59 et 60. La pluie locale n'a pas été échantillonnée mais est néanmoins représentée sur ces figures à partir des données de la littérature scientifique pour un contexte méditerranéen. Les études régionales montrent qu'elle prend toujours place à proximité du pôle peu minéralisé des diagrammes binaires [Ladouche *et al.*, soumis]. Sa teneur naturelle en chlorures n'excède pas 20 mg/l. Il est possible que la concentration par évapotranspiration fasse doubler cette teneur naturelle [Aquilina *et al.*, 2005]. En conséquence, les eaux dont le taux de chlorures dépasse significativement 40 mg/l ont été enrichies, soit par contamination anthropique, soit par contamination marine.

Les interprétations hydrochimiques seront présentées en fonction des groupes déterminés au cours des paragraphes précédents.

i. Groupe 1

Le groupe 1 (mer et étang) est matérialisé sur chaque diagramme par la droite de dilution de l'eau de mer.

ii. Groupe 2

Le groupe 2, représenté par un unique échantillon : BA22 - Quaternaire (146) à Argelès-sur-Mer présente une très faible conductivité (275 µS/cm) et une faible minéralisation. Cet échantillon a été prélevé dans un puits non exploité, où le renouvellement de l'eau par pompage s'est avéré difficile en raison de l'important volume d'eau à pomper. Il est logique de penser que cette analyse n'est pas représentative de l'aquifère et que l'eau analysée serait représentative d'une eau diluée par la pluie.

iii. Groupe 3

Le groupe 3 est constitué par quatre échantillons d'eau (BA02 - BA05 - BA10 - BA19) s'écoulant dans le Pliocène marin sableux en Salanque (225 - N4). Le chimisme des différents échantillons d'eau conserve un caractère similaire sur l'ensemble des diagrammes. L'eau de cette formation est peu minéralisée. Les interactions eau / roche sont matérialisées par un enrichissement en potassium, sodium, calcium et bicarbonates par rapport à l'eau de pluie. Cet enrichissement est moins marqué que sur les autres groupes : les eaux du groupe 3 conservent des propriétés chimiques assez proches de l'eau de pluie.

L'eau de ce groupe circule au sein de formations marines sableuses propres, riches en quartz, ce qui pourrait expliquer ce caractère peu minéralisé. Ces eaux sont exemptes d'indices de pollution anthropique, ce qui leur confère une qualité remarquable.

La seule anomalie notable est une concentration en lithium anormalement élevée (en moyenne, $C_{Li} = 1.6\times10^{-2}$ µg/l). Ce point sera développé à la fin des interprétations hydrochimiques.

iv. Groupe 4

Le groupe 4 est constitué par divers pôles des eaux de la plaine de la Salanque. Cependant, quelques distinctions peuvent être envisagées au sein de ce groupe.

Les eaux de l'aquifère 146 (BA24 - BA25 - BA26) sont moins minéralisées que celles des nappes plus profondes, ce qui suggère des temps de circulation et de résidence plus faibles que ceux des aquifères plus profonds. L'eau des trois points échantillonnés est de bonne qualité au point de vue de la salinité. La concentration élevée en bore ($C_B = 7.24\times10^{-2}$ µg/l) de l'échantillon BA24 (S^{te}-Marie) est vraisemblablement liée à une pollution anthropique (les agents de blanchiment utilisés dans les lessives sont riches en bore).

Les eaux du Pliocène continental - nappe 3 (BA01 - BA03 - BA04 - BA06 - BA07 - BA09 - BA15 - BA28 - BA29) se distinguent des autres échantillons par une teneur en strontium plus élevée (en moyenne, $C_{Sr} = 0.49$ mg/l), éventuellement liée à une matrice plus argileuse. La teneur élevée en sulfates (en moyenne, $C_{SO4^{--}} = 87.4$ mg/l) de ces échantillons confirme un chimisme influencé par la circulation au sein d'une matrice argileuse.

Une légère contamination marine pourrait être crainte sur l'échantillon BA01, en raison d'une anomalie en chlorures ($C_{Cl} = 93.9$ mg/l), en brome ($C_{Br} = 0.35$ mg/l) et en potassium ($C_K = 1.28$ mg/l). La concentration élevée en chlorures pourrait aussi être la conséquence d'une pollution anthropique (eaux usées). De même, la concentration en brome pourrait être expliquée par l'utilisation de pesticides. Mais l'absence de nitrates tend à prouver que les teneurs en chlorures et en brome sont dues à une influence marine. De plus, dans ce secteur du lido du Barcarès, différentes anomalies en chlorures ont déjà été recensées [Blaise & Marchal, 2007]. Cependant, l'absence d'anomalie en bore ne permet pas de confirmer avec certitude cette contamination.

Enfin, les eaux du Pliocène continental - nappe 4 (BA11 - BA12) présentent une minéralisation plus faible que celles de la nappe 3. Bien que cet aquifère soit captif et profond (de l'ordre d'une centaine de mètres dans la zone d'échantillonnage), une anomalie en nitrates ($C_{NO^{3-}} = 20$ et 34 mg/l) caractérise ces eaux. Ce fait souligne la connexion de cet aquifère avec la surface.

La qualité des eaux du groupe 4 est variable en fonction des échantillons. Sur le graphique nitrates / chlorures (figure 59), les échantillons influencés par une pollution anthropique d'origine agricole s'alignent selon une même verticale (15 mg/l < $C_{NO^{3-}}$ < 45 mg/l). De même, les échantillons influencés par une pollution anthropique de type station d'épuration s'alignent horizontalement (40 mg/l < C_{Cl} < 90 mg/l). Enfin, certains échantillons présentent une double influence, celles des STEP et de l'agriculture.

v. Groupe 5

Le groupe 5 est constitué par quatre échantillons d'eau (BA13 - BA14 - BA27 - BA30) appartenant au Pliocène continental dans un secteur situé autour de l'étang de Canet (aquifère 225).

Le chimisme des différents échantillons d'eau conserve un caractère similaire sur l'ensemble des diagrammes. Par rapport aux autres groupes, ces eaux présentent des indices d'interactions eau / roche marqués (moyenne des concentrations des quatre échantillons : C_{HCO3-}= 278 mg/l ; C_{Ca2+} = 60.1 mg/l ; C_{Na2+} = 71.2 mg/l ; C_{Mg2+} = 17.4 mg/l).

Bien que ces échantillons soient la plupart du temps regroupés au sein des différents diagrammes binaires, une vulnérabilité différentielle face aux pollutions d'origine agricole est mise en évidence sur le diagramme nitrates / chlorures. En effet, la teneur en nitrates de l'échantillon BA30 est très faible (C_{NO3-} = 4.7 mg/l) par rapport aux autres échantillons du même groupe (en moyenne C_{NO3-} = 24.2 mg/l). Cet échantillon, peu pollué, est localisé sur le côté Est de l'étang de Canet, c'est-à-dire dans une zone dépourvue d'agriculture.

Tout comme pour le groupe 3, une concentration en lithium anormalement élevée caractérise ces eaux (moyenne de $C_{Li} = 1.7\times10^{-2}$ µg/l).

vi. Groupe 6

Le groupe 6 n'est représenté que par un unique échantillon : BA23 issu des eaux de l'aquifère 225 circulant dans le Pliocène continental dans le secteur de Saint-Nazaire. Cet unique échantillon est peu minéralisé et ne présente pas de particularités majeures, à l'exception d'une concentration élevé en lithium ($C_{Li} = 1.58\times10^{-2}$ µg/l) par rapport aux autres ions.

vii. Groupe 7

Le groupe 7 n'est représenté que par un unique échantillon : BA16 issu des eaux de l'aquifère 225 - N4 circulant dans le Pliocène continental dans le secteur de la Salanque sur la commune du Barcarès. Cet échantillon correspond à un mélange entre la chimie des eaux du Pliocène continental de la Salanque nappe 3 (groupe 4 en noir sur les diagrammes) et celles du Pliocène marin sableux nappe 4 (groupe 3 en bleu sur les diagrammes). Cet échantillon est caractérisé par une concentration en lithium élevée ($C_{Li} = 1.7\times10^{-2}$ µg/l).

L'origine de ce mélange n'a pu être déterminée : flux verticaux favorisés par la présence de forages défectueux dans le secteur ou de zones plus perméables au sein des plaines d'inondation du Pliocène continental.

viii. Groupe 8

Deux échantillons d'eau du groupe 8 ont été analysés (BA20 - BA21). Ils proviennent des horizons quaternaires exploités pour l'AEP de la commune de Saint-Cyprien.

Bien que relativement superficielles, ces eaux sont caractérisées par une minéralisation ayant deux origines : (i) la présence d'ions bicarbonates, calcium, sodium, magnésium souligne les interactions eau / roche tandis que (ii) les ions potassium et nitrates indiquent la présence d'une composante d'origine anthropique.

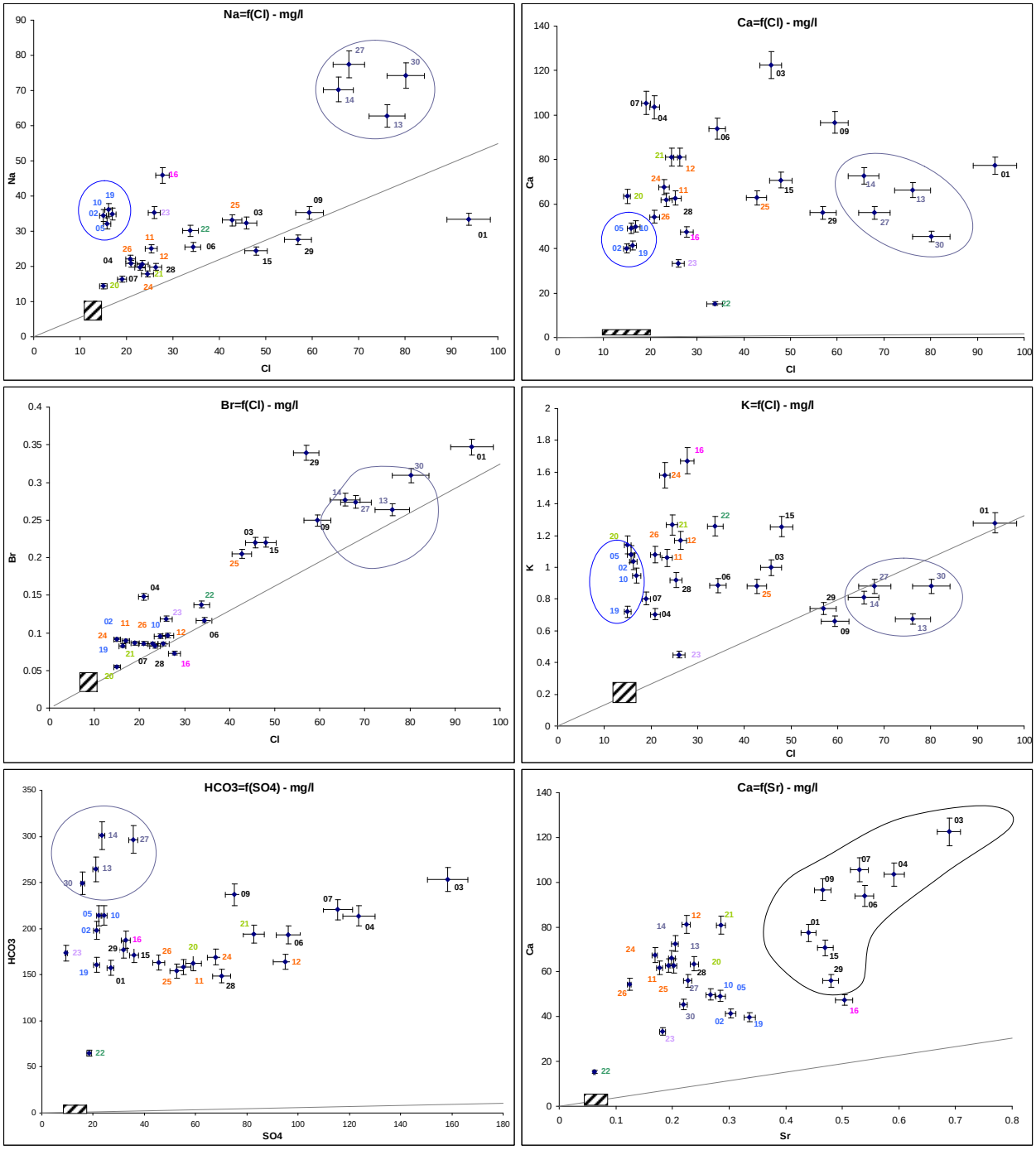
ix. Cas de l'enrichissement lithium

D'une manière générale, sur l'ensemble des analyses chimiques réalisées dans la plaine du Roussillon, les aquifères les plus profonds présentent un taux de lithium élevé. Les concentrations en lithium de ces échantillons "profonds" sont comprises entre 1.54×10^{-2} et 1.7×10^{-2} µg/l, alors que la moyenne de l'ensemble des analyses est égale à 9.2×10^{-3} µg/l.

Le diagramme baryum / lithium (figure 60) permet d'expliquer le chimisme de ces eaux. L'origine du baryum et du lithium est à chercher au sein de formations détritiques issues de l'érosion des granites. Des temps de circulations du même ordre de grandeur sont à l'origine de l'alignement vertical des échantillons "profonds" (ovoïde bleu de la figure 60). Les variations de concentration en baryum sont dues à la nature de la formation géologique dans laquelle les eaux circulent.

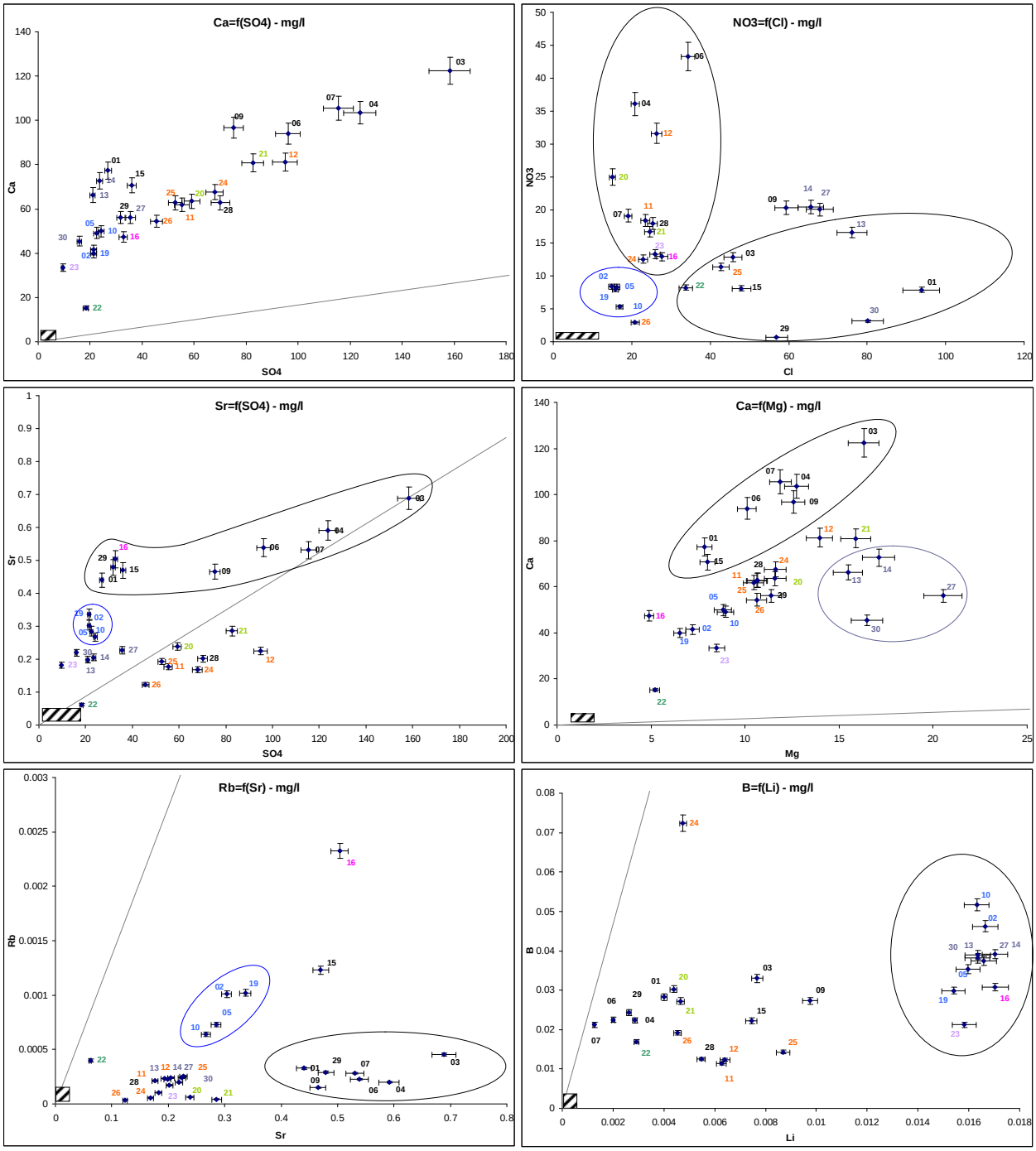
Une partie des échantillons moins profonds (≈ 50 à 100 mètres de profondeur) s'alignent selon une droite marquée par une forme ovoïdale noire (figure 60). Cet alignement suggère la présence d'une droite de dilution entre les échantillons d'eau profonde et ceux des eaux plus superficielles (ovoïde gris). En d'autres termes, Les eaux circulant dans les aquifères "intermédiaires" semblent être issues d'un triple mélange entre (i) les eaux profondes via des flux ascendants par drainance naturelle, (ii) les eaux de surface via des flux descendants confirmés par la présence de nitrates et (iii) les eaux ayant suivi une circulation "normale" subhorizontale au sein de l'aquifère.

Cette hypothèse ne pourrait être confirmée que par des analyses isotopiques, non effectuées dans le cadre de la présente étude.



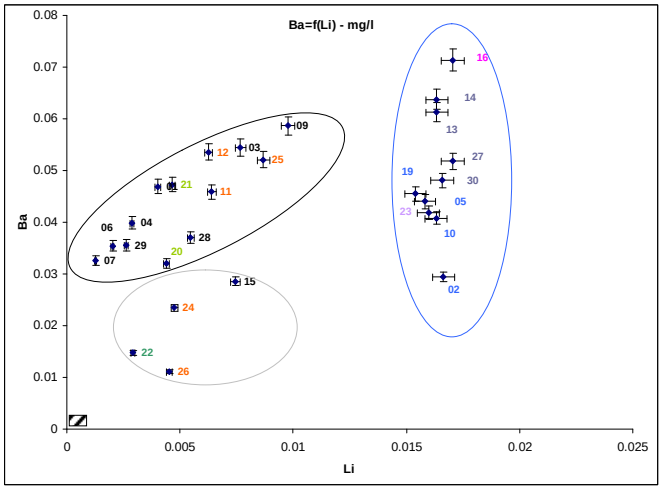
01-PC-slq / 03-PC-slq / 04-PC-slq / 06-PC-slq / 07-PC-slq / 09-PC-slq / 15-PC-slq / 28-PC-slq / 29-PC-slq
02-PMS-slq / 05-PMS-slq / 10-PMS-slq / 19-PMS-slq
11-PC-slq / 12-PC-slq / 24-PC-slq / 25-PC-slq / 26-PC-slq
13-PC-Can / 14-PC-Can / 27-PC-Can / 30-PC-Can / 20-146-StCyp / 21-146-StCyp
16-PC-slq4 / 22-Arg-146 / 23-PC-StNaz
Composition chimique de la pluie :

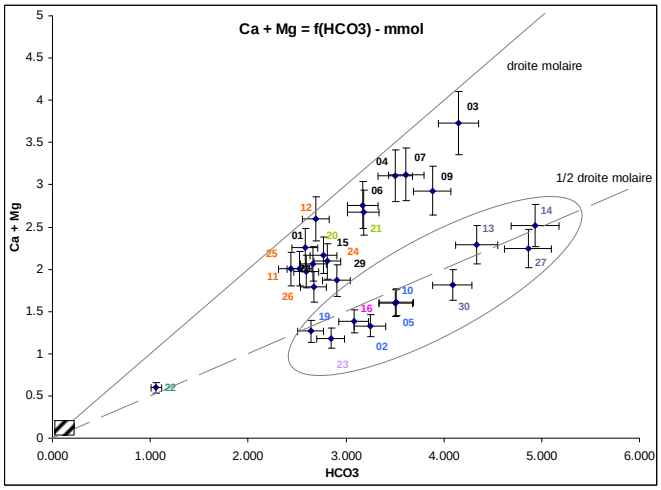
Figure 58 - Diagrammes binaires des analyses chimiques (1/3)

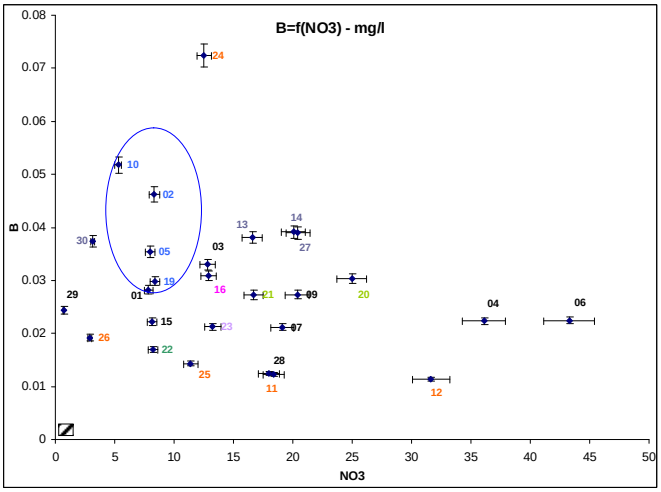


01-PC-slq / 03-PC-slq / 04-PC-slq / 06-PC-slq / 07-PC-slq / 09-PC-slq / 15-PC-slq / 28-PC-slq / 29-PC-slq
02-PMS-slq / 05-PMS-slq / 10-PMS-slq / 19-PMS-slq
11-PC-slq / 12-PC-slq / 24-PC-slq / 25-PC-slq / 26-PC-slq
13-PC-Can / 14-PC-Can / 27-PC-Can / 30-PC-Can / 20-146-StCyp / 21-146-StCyp
16-PC-slq4 / 22-Arg-146 / 23-PC-StNaz
Composition chimique de la pluie :

Figure 59 - Diagrammes binaires des analyses chimiques (2/3)







01-PC-slq / 03-PC-slq / 04-PC-slq / 06-PC-slq / 07-PC-slq / 09-PC-slq / 15-PC-slq / 28-PC-slq / 29-PC-slq
02-PMS-slq / 05-PMS-slq / 10-PMS-slq / 19-PMS-slq
11-PC-slq / 12-PC-slq / 24-PC-slq / 25-PC-slq / 26-PC-slq
13-PC-Can / 14-PC-Can / 27-PC-Can / 30-PC-Can / 20-146-StCyp / 21-146-StCyp
16-PC-slq4 / 22-Arg-146 / 23-PC-StNaz
Composition chimique de la pluie :

Figure 60 - Diagrammes binaires des analyses chimiques (3/3)

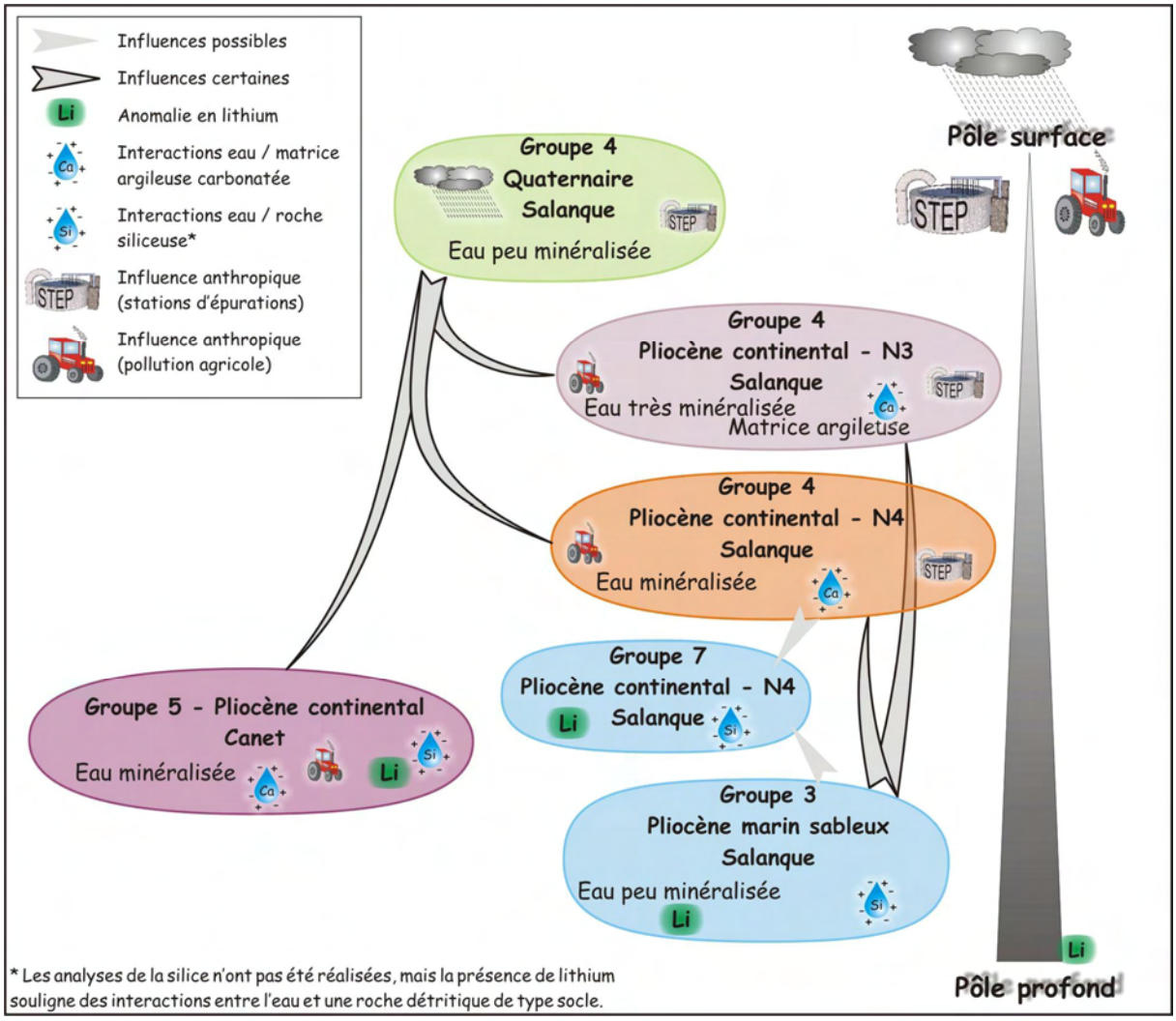


Figure 61 - Synthèse schématique des interprétations hydrochimique

*

* *

L'hydrochimie appliquée aux aquifères côtiers

Des regroupements d'eaux ont été réalisés sur des critères chimiques, géologiques et hydrogéologiques. Dans le cas de la plaine du Roussillon, l'eau circulant dans les différentes unités sédimentologiques, présente des caractères chimiques originaux.

En effet, si du point de vue hydrodynamique, il est complexe de différencier les eaux de chaque unité sédimentologique, la composition chimique permet de caractériser des eaux dont les propriétés varient en fonction de la lithologie, des modalités et du temps de cheminement au sein des différents aquifères.

Ainsi, plusieurs types d'eau ont été chimiquement identifiées :

> les eaux du Pliocène marin sableux en Salanque (aquifère 225 - N4) sont peu minéralisées ;

> les eaux du Pliocène continental dans le secteur de Canet sont plus minéralisées que les eaux des mêmes unités dans d'autres secteurs ;

> la distinction des eaux des unités du Pliocène continental et du Pléistocène en Salanque (225 - N3 et N4) est plus difficile, puisque toutes présentent des caractéristiques communes. Cependant, les eaux issues de la nappe 3 sont caractérisées par une circulation au sein de sédiments argileux, qui se traduit par des concentrations élevées en strontium et sulfates ;

> le chimisme des eaux permet de mettre en évidence des circulations profondes et des temps de transit assez longs pour les eaux du Pliocène marin sableux et du Pliocène continental dans le secteur de Canet. Ces eaux semblent contribuer à la recharge des aquifères supérieurs dans la zone littorale.

Quelques hypothèses, non confirmées, ont été émises sur une contamination éventuelle par une composante marine. Un échantillonnage et des analyses chimiques complètes des eaux, dont les teneurs en chlorures sont supérieures à 100 mg/l, permettraient de mieux contraindre l'origine de la salinité.

Chapitre V

Contribution des études géophysiques

La géophysique électrique constitue une méthode reconnue pour la localisation et la cartographie des intrusions salines. D'abord par sondage électrique [voir, entre autres, Ginsberg & Levanton, 1976 ; Frohlich *et al.*, 1994 ; Choudhury *et al.*, 2001], puis, plus récemment, par la méthode des panneaux ou profils électriques [voir, entre autres, Nowroosi *et al.*, 1999 ; Nassir *et al.*, 2000 ; Manheim *et al.*, 2004].

Dans le cadre de la présente étude, trois profils ont été réalisés sur le littoral roussillonnais afin de (i) déterminer la position et l'extension de l'interface eau douce / eau salée et (ii) de valider l'hypothèse de superposition de l'eau salée sur l'eau douce. La majorité des études hydrogéologiques d'aquifères côtiers présentent des problématiques où l'eau douce se situe au-dessus de l'eau salée. Dans le cas du Roussillon, comme cela a été évoqué précédemment, l'eau salée d'un premier aquifère superficiel se superpose à l'eau douce localisée dans un second aquifère inférieur.

1. Méthodologie d'étude

La géophysique électrique, et notamment le système des panneaux électriques (ou tomographie électrique), a été retenue afin de déterminer la position de l'interface eau douce / eau salée sur le littoral de la plaine du Roussillon. La théorie géophysique des panneaux électriques est présentée en annexe 16.

Divers dispositifs de mesure ont été testés lors de la campagne de terrain. A "espacement" et rang égaux, la méthode dipôle-dipôle présente la plus faible profondeur d'investigation, mais le meilleur pouvoir de résolution, en comparaison avec d'autres dispositifs de mesure type pôle-pôle tel que la méthode Wenner-Schlumberger.

Dans le cas de la plaine du Roussillon, aucun résultat pertinent n'a pu être obtenu à la suite des mesures réalisées à l'aide de ce dernier dispositif : la majorité des valeurs a dû être éliminée lors du processus de contrôle de la qualité des mesures.

2. Investigation géophysique de terrain

2.1. Sélection des profils

La mise en œuvre de panneaux électriques présente quelques contraintes. Afin d'optimiser la prospection géophysique, les zones d'intérêt doivent être ciblées en considérant les données suivantes :

> la lithologie et la profondeur du sous-sol doivent être connues au moins de manière schématique ;

> l'existence de logs de forage localisés à proximité des profils ou tracés géophysiques facilite l'interprétation géologique et hydrogéologique ;

> de même, la présence de forages ou de piézomètres localisés à proximité des profils permet de connaître la conductivité de l'eau souterraine.

Après détermination de zones cibles potentielles, une reconnaissance doit être menée afin de vérifier que les profils sont réalisables sur le terrain, c'est-à-dire qu'ils ne recoupent ni route, ni ligne électrique enterrée, ni conduite d'eau souterraine. Enfin, il est nécessaire d'obtenir les autorisations en cas de traversée de propriété privée.

La figure 62 illustre la localisation des trois profils : "Profil 1 LAR - Mas Larrieu" sur la commune d'Argelès-sur-Mer, "Profil 2 MAR - Sainte-Marie" et "Profil 3 TOR - Torreilles".

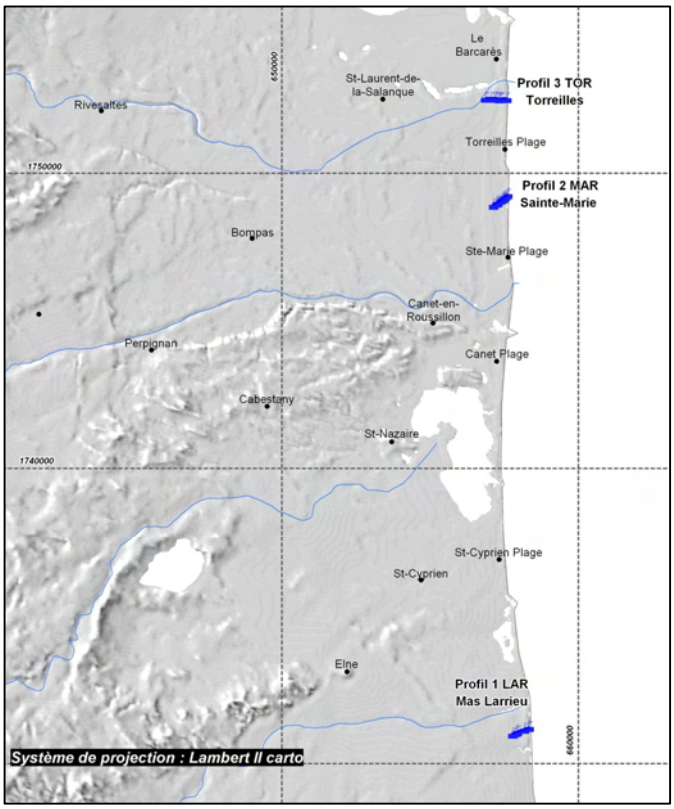


Figure 62 - Localisation des trois profils géophysiques

2.2. Compte-rendu de la campagne de terrain

La campagne de mesures géophysiques s'est déroulée du 04/10/2005 au 07/10/2005. F. Mathieu, géophysicien au Brgm, a supervisé la logistique du matériel, l'acquisition des mesures et la phase d'interprétation géophysique des trois profils.

L'espacement des électrodes pour chaque séquence de mesures "dipôle-dipôle", était de 5, 10 et 20 mètres. Le shift latéral des profils était de 120 mètres. Il a été décidé de privilégier la qualité des mesures sur le nombre de mesures. Des essais de séquences Wenner-Schlumberger, dont l'espacement était de 20 mètres et les shifts de 180 mètres se sont révélés inexploitables.

Ce constat est lié aux limites de la méthode des panneaux électriques. En effet, le terrain présente des conditions de mesure difficiles. La superposition d'une surface très résistive (sable sec) sur un milieu souterrain très conducteur (eau salée) est à l'origine de phénomènes de couplages électromagnétiques. De même, si la surface est trop conductrice (marécages littoraux), le courant injecté ne pénètre pas dans le sous-sol, mais reste en surface par phénomènes de court-circuit. D'une manière générale, les forts contrastes de résistivité sur une même verticale, comme c'est le cas des aquifères littoraux, réduisent l'exactitude des mesures.

Ce fort contraste peut être lié à l'hétérogénéité intrinsèque des sols ou à l'alternance d'eau douce et d'eau salée. Un autre problème persiste lors de l'étude des aquifères côtiers : la résistivité électrique d'argiles ou de sables envahis par de l'eau salée est très similaire, leur distinction est difficile.

L'ensemble des problèmes soulevés ci-dessus a pour conséquence une qualité d'interprétation géophysique moyenne. Le pourcentage d'erreur de vérification entre les "pseudosections" de résistivité apparente mesurée et les "pseudosections" de résistivité apparente calculée atteint de fortes valeurs : 17,3% (Mas Larrieu), 27,9% (Sainte-Marie) et 31,5% (Torreilles).

2.3. Résultats

a. Profil 1 LAR - Mas Larrieu

Sur ce profil, l'influence de la mer sous le domaine continental est particulièrement bien marquée par la présence d'eau saumâtre (résistivité apparente ≈ 5 Ω.m). Celle-ci s'étend dans un aquifère superficiel qui se développe entre 5 et 10 mètres de profondeur environ. Des venues d'eau salée avaient été notées entre 0 et 7 mètres de profondeur lors de la réalisation, en 1970, du forage du "Camping Le soleil" (**10972X0058**). Ce forage est localisé à 500 mètres au Sud du profil.

L'aquifère superficiel, cité ci-dessus, correspond à l'unité sédimentologique du PQ2sab (prisme quaternaire marin 2). L'eau saumâtre est visible sur une distance d'une centaine de mètres à l'intérieur des terres. La zone de transition entre l'eau douce et l'eau saumâtre se développe sur une dizaine de mètres. La répartition classique "eau douce sur eau salée" en forme de biseau s'observe difficilement dans cet aquifère superficiel peu épais. Néanmoins, un fin horizon moins salé semble se dessiner au-dessus des eaux salées.

D'après la base de données géologiques, l'unité sédimentologique du PQ2arg devrait se développer entre 10 et 15 mètres de profondeur environ (figure 63). Cette unité n'est pas identifiable sur le profil car la confusion entre des sables envahis d'eau salée et des argiles représente l'inconvénient majeur de l'usage des panneaux électriques. Toutefois, l'isolement des unités inférieures vis-à-vis de l'eau saumâtre contenue au sein des horizons superficiels est bien visible sur la figure 64, et prouve l'existence d'un horizon à faible perméabilité.

Sous l'unité sédimentologique du PQ2arg, se développent les sables grossiers du PTQ2pal (prisme transgressif), caractérisés par une résistivité élevée. Cette unité semble exempte de minéralisation importante. Les variations de résistivité au sein de cet horizon peuvent être mises en relation avec l'hétérogénéité de la formation palustre (faciès subcontinental à variation de faciès très locale).

Enfin, à une vingtaine de mètres de profondeur, se localise le toit du Pliocène continental. Ce dernier est constitué par une matrice argileuse abritant un réseau de chenaux fluviatiles. La base du Pliocène continental, approximativement localisée vers 125 mètres NGF, n'est pas atteinte par l'investigation géophysique.

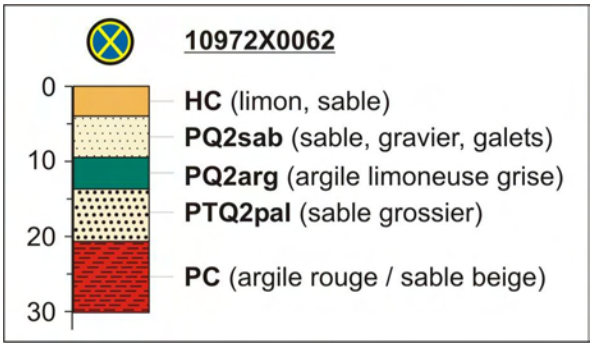


Figure 63 - Coupe sédimentologique du forage 10972X0062 localisé à proximité du profil 1
La localisation du forage est indiquée sur la figure suivante

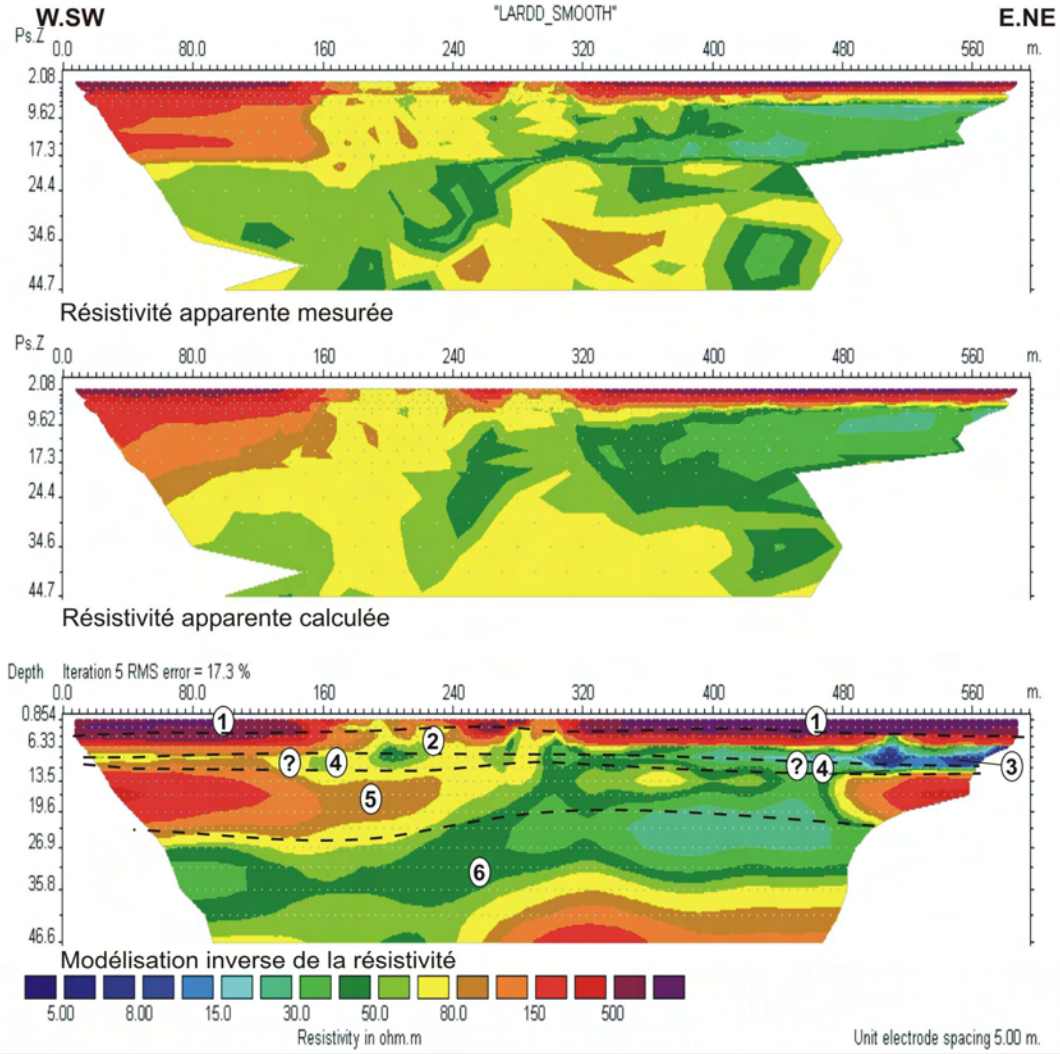
Profil 1 LAR - Mas Larrieu

Localisation : Au sud du Tech, sur la réserve naturelle du Mas Larrieu, commune d'Argelès-sur-Mer.

Longueur : 590 mètres

Orientation : N°80

D'Ouest en Est, le profil débute depuis la clôture du camping Equinoxe, traverse un champ avant de rejoindre une route en terre limoneuse puis l'entrée de la réserve. Il suit ensuite le chemin piéton de la réserve (terre limoneuse devenant sableuse) jusqu'à la dune et la mer (sable non induré).



1- Sable sec de surface - forte résistivité (HC)
2- Aquifère superficiel (PQ2sab)
3- Eau saumâtre (faible résistivité)
4- Niveau argileux supposé isolant les horizons inférieurs d'une éventuelle intrusion d'eau de mer (PQ2arg)
5- Niveau à résistivité élevée - sable grossier (PTQ2pal)
6- Résistivité moyenne - argile continentale et sable (PC)

Figure 64 - Fiche descriptive du profil 1 : LAR - Mas Larrieu

b. Profil 2 MAR - Sainte-Marie

Sur ce profil, l'ensemble des terrains saturés en eau est envahi par de l'eau saumâtre ou de l'eau salée (≈ 1 Ω.m). La partie supérieure du profil se développe dans les prismes marins sableux quaternaires dont la profondeur du mur est égale à 18 mètres (figure 65). La limite inférieure pentée vers l'Ouest entre les terrains à faible résistivité et ceux à forte résistivité ne correspond, a priori, à aucune réalité géologique, et demeure difficile à expliquer si ce n'est par des problèmes méthodologiques liés à de forts contrastes de conductivités.

La conductivité de l'eau du marécage traversé dans la zone centrale du profil (figure 66) atteint 50 000 µS/cm (eau de mer ≈ 55 000 µS/cm ou 0,18 Ω.m). Cette valeur élevée a sensiblement perturbé les mesures lors de la campagne de terrain en raison de la formation de courts-circuits dans le dispositif de mesure.

La rivière jouxtant la partie nord-ouest du profil est assez minéralisée : la conductivité croit d'amont en aval de 3 100 à 3 500 µS/cm. Aucune analyse chimique n'a permis de déterminer s'il existe une intrusion saline dans cette rivière ou si la minéralisation est liée à une autre origine. L'augmentation de la conductivité d'amont en aval permet néanmoins de supposer que la mer contribue à la minéralisation de la rivière.

D'après le profil géophysique, le niveau piézométrique de la nappe est proche de celui de la rivière. D'après la nature limoneuse et sableuse des terrains, il est probable que des flux existent entre la rivière et la nappe superficielle lorsque les gradients le permettent.

Au sud du profil, deux mesures de conductivité électrique avaient été effectuées en 2004 dans les forages superficiels des campings "Le Palais de la Mer" (**non déclaré en BSS**) et "Municipal (ou Plage)" (**10916X0066**). Les valeurs étaient respectivement égales à 750 µS/cm et 535 µS/cm (campings portés sur la carte - figure 66).

De telles valeurs de conductivité sont inférieures à celles observées au niveau du profil. Il semblerait donc que l'aquifère superficiel soit minéralisé par la présence conjuguée de la rivière, de la mer et de la zone marécageuse. L'influence spatiale respective de ces différentes sources de sels ne peut-être clairement distinguée sur le profil.

La superposition d'horizons superficiels à très forte résistivité (sable sec) ou à très faible résistivité (sable imprégné d'eau saumâtre ou salée) masque toute information relative à la structure des terrains inférieurs.

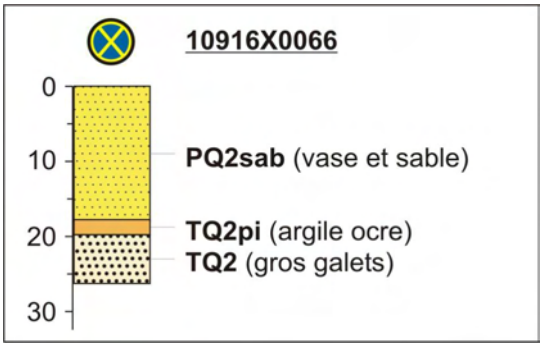


Figure 65 - Coupe sédimentologique du forage 10916X0066 localisé à proximité du profil 2
La localisation du forage est indiquée sur la figure suivante

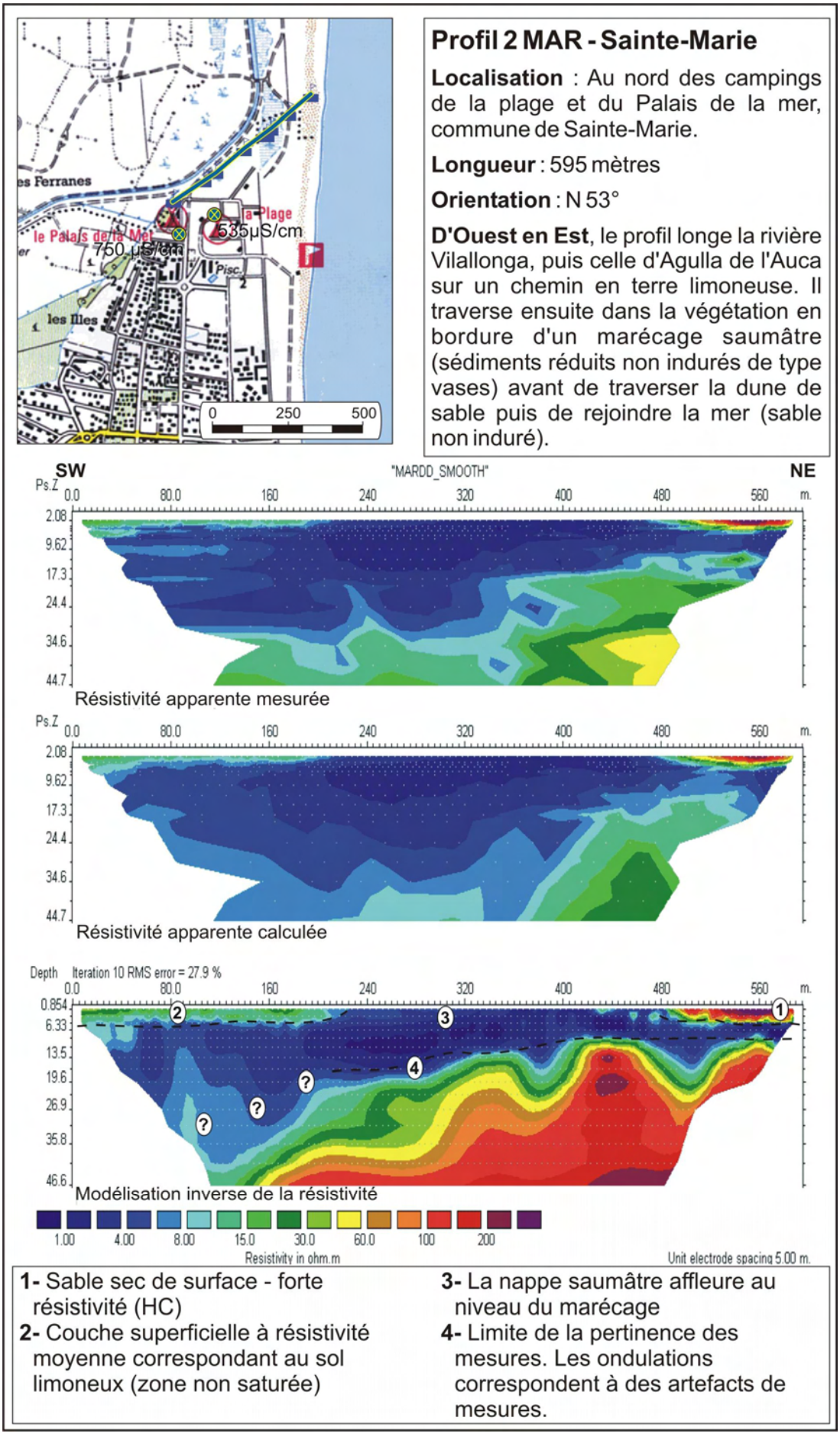


Figure 66 - Fiche descriptive du profil 2 : MAR Sainte-Marie

c. *Profil 3 TOR - Torreilles*

Sur ce profil, le sol constitué de sable sec de la zone non saturée est particulièrement bien identifié par sa très forte résistivité. Sous cet horizon se localise une formation à faible résistivité : vraisemblablement, l'unité sédimentologique PQ2sab envahie par de l'eau saumâtre ou salée. D'après la figure 67, le mur de cette formation, c'est-à-dire le toit du Pliocène continental, devrait se positionner vers 20 mètres de profondeur. Cette interface se devine sur la figure 68. En dessous, les structures convolutées et les fortes résistivités ne correspondent pas à la géologie locale : les problèmes de la méthode géophysique électrique soulevés sur le profil 2 se répètent sur le profil 3. Un premier horizon à forte résistivité masque l'information relative à la partie inférieure du profil.

La limite ouest du profil est constituée par l'Agly. La conductivité électrique du fleuve au jour de la campagne était de 11 000 µS/cm[1]. Le point de mesure de la conductivité se situait à environ un kilomètre de l'embouchure du fleuve, dans la prolongation du profil. De même que pour le profil précédent, la cause de la forte conductivité électrique des rivières littorales n'est pas déterminée mais semble fortement liée à un mélange entre eau de mer et eau de rivière. Un profil de conductivité de la rivière permettrait de confirmer cette hypothèse, en considérant que le fonctionnement du système nappe-rivière est probablement variable au cours d'un même cycle hydrologique.

Sur la rive gauche de l'Agly, de fortes conductivités électriques (> 1 500 µS/cm) et des teneurs en chlorures élevées (de 300 à 1 000 mg/l) ont été observées [Blaise & Marchal, 2007]. La densité des mesures chimiques ne permet pas de spatialiser correctement l'information, mais il semblerait que la concentration en chlorures décroît en s'éloignant des rives de l'Agly vers le Nord.

Dans la partie superficielle et centrale du profil, la résistivité décroît fortement. Sur le terrain, cette zone correspond à des sables plus indurés et plus argileux. Le problème relatif à la confusion de la réponse d'argiles ou de sables envahis par l'eau de mer est parfaitement bien illustré dans le cas présent. La réponse géophysique de la couche superficielle constituée par des sables argileux est identique à la réponse de la couche inférieure constituée par des sables envahis par de l'eau salée.

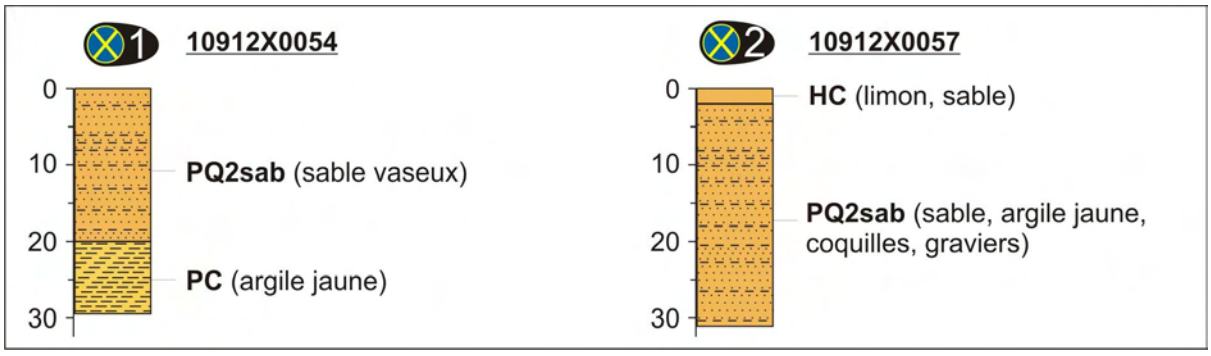
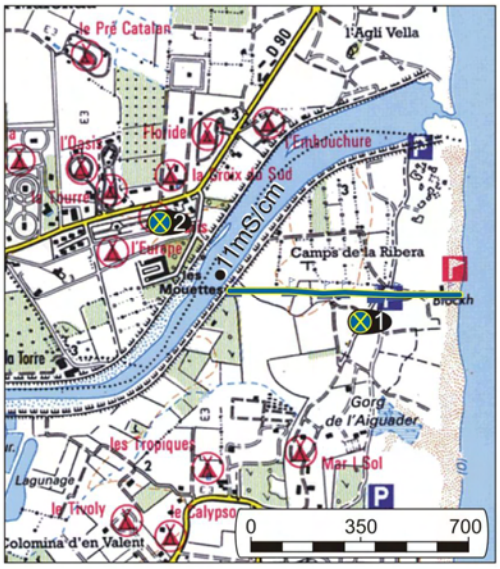


Figure 67 - Coupes sédimentologiques des forages 10912X0054 et 10912X0057 localisés à proximité du profil 3
La localisation du forage est indiquée sur la figure suivante

[1] Cette mesure ponctuelle est peu représentative car fonction de nombreux facteurs tels que le débit de l'Agly, la direction du vent, la présence de houle…



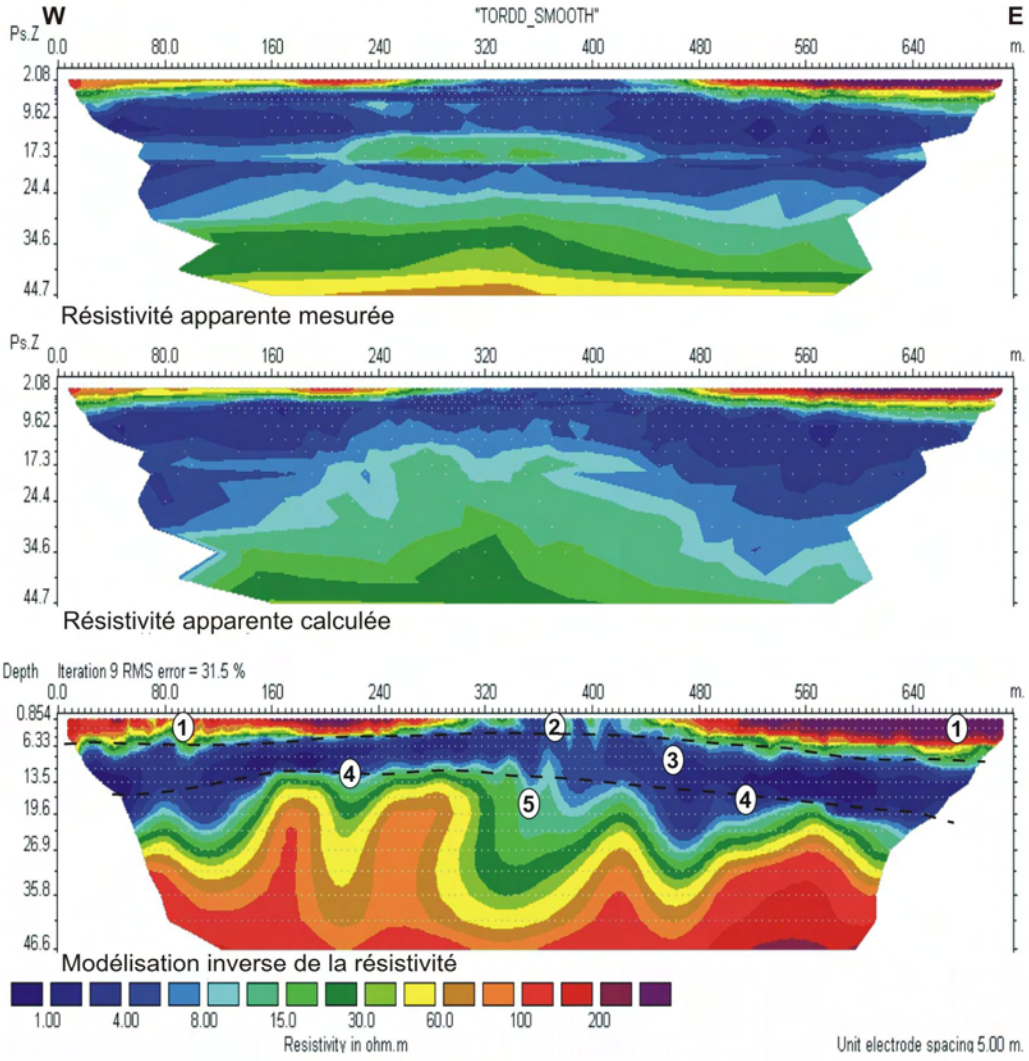
Profil 3 TOR - Torreilles

Localisation : Au nord de la commune de Torreilles. Entre l'Agly et la mer.

Longueur : 715 mètres

Orientation : N 90°

D'Ouest en Est, le profil débute de la route qui longe l'Agly. Il traverse un terrain de motocross sauvage en sable plus ou moins induré avant de rejoindre un parking (remblais et graviers). Il passe ensuite à la gauche du blockhaus juste avant la dune et rejoint la mer (sable non induré).



1- Sable sec de surface - forte résistivité (HC)
2- Sable argileux affleurant
3- Aquifère salé par un mélange d'eau saumâtre et d'eau de mer (PQ2sab)
4- Base supposée du PQ2sab
5- Limite de la pertinence des mesures

Figure 68 - Fiche descriptive du profil 3 : TOR - Torreilles

*

* *

La géophysique appliquée aux aquifères côtiers de la plaine du Roussillon

Trois secteurs ont été investigués par la méthode de géophysique électrique sur le littoral de la plaine du Roussillon.

Bien que le contexte du littoral soit particulièrement difficile pour ce genre d'étude en raison de forts gradients de résistivité, les résultats suivants ont pu être mis en évidence :

> un horizon fortement conducteur est sus-jacent à un horizon caractérisé par une résistivité plus élevée. Cette observation correspond en toute logique à l'aquifère des prismes marins quaternaires influencé par la présence de la mer (PQ2sab), car directement en contact avec la mer. Sous cette première zone fortement minéralisée se développent des horizons potentiellement aquifères sans contact direct avec la mer. Le rôle "protecteur" de la partie argileuse du prisme quaternaire apparaît sur le profil 1 ;

> les trois profils ont été implantés à proximité de rivières littorales. L'influence très probable de ces rivières sur la qualité des nappes superficielles a été mise en évidence dans le présent travail de recherche. Cette influence pourrait être mieux définie par d'autres études : éventuellement de type hydrochimiques afin de comparer les eaux des rivières à celles des aquifères. De même, une mesure longitudinale de la conductivité des rivières en période estivale constituerait un premier indicateur d'une pénétration des eaux marines dans le domaine des eaux continentales superficielles ;

> dans la partie Sud du bassin du Roussillon, une pénétration d'eau saumâtre au sein de l'aquifère superficiel est identifiée par géophysique électrique sur une centaine de mètres environ ;

> d'une manière générale, une attention particulière doit être prise lors de campagne de terrain géophysique dans les domaines littoraux hétérogènes. Il semble que la localisation des interfaces, déduite des profils géophysiques, soit perturbée par la faible résistivité des terrains investigués.

Chapitre VI

Synthèse des données hydrogéologiques

Le présent chapitre a pour objectif de synthétiser l'ensemble des données et des résultats présentés dans les chapitres précédents. Cette synthèse est illustrée par des schémas explicatifs des différents concepts géologiques et hydrogéologiques. Ce chapitre marque aussi la transition vers la partie III, axée sur la thématique de la conceptualisation et de la modélisation. Certaines hypothèses formulées dans le présent chapitre pourront ainsi être validées par l'approche de modélisation.

1. Géologie et hydrogéologie de la zone littorale du Roussillon

Les différents concepts géologiques et hydrogéologiques sont illustrés par les figures 69 et 70, pages suivantes.

La figure 69 illustre la géologie du domaine littoral du Roussillon (schéma 1) et les conditions initiales hydrogéologiques, c'est-à-dire avant exploitation des ressources en eaux souterraines (schéma 2).

La figure 70 présente les phénomènes de dégradation de l'aquifère par exploitation croissante depuis le schéma 3 au schéma 5.

Cette figure se veut quelque peu alarmante afin de mettre en évidence la contamination des aquifères par augmentation de la salinité.

1.1. Contexte géologique et hydrogéologique

La géologie de la zone littorale du Roussillon est constituée de différentes entités sédimentaires mises en place au cours du Pliocène et du Quaternaire, selon une organisation singulière héritée d'un contexte géodynamique particulier postérieur à la crise de salinité messinienne.

Dans la zone littorale comprenant notamment la zone des lagunes et du cordon littoral, les **prismes marins quaternaires** sont présents, séparés des formations continentales par un horizon d'argiles (figure 69, schéma 1, -a-). Ce prisme quaternaire marin est double en Salanque.

A proximité du littoral, les formations du Pliocène occupent le plus grand volume sédimentaire ; elles sont constituées de plusieurs unités à dynamique sédimentaire différente et renfermant diverses lithologies en fonction de leur position par rapport au bassin de dépôt.

Ainsi les formations **continentales du Pliocène (PC)** sont caractérisées par la présence de chenaux sableux au sein d'une matrice argilo-silteuse. Ils sont représentés de manière arbitraire sur le schéma 1 -c- de la figure 69. Ces unités continentales sont sous-jacentes aux **terrasses quaternaires étagées (TQ)** et sus-jacentes aux prismes du **Pliocène marin sableux (PMS)**. Un horizon palustre sépare le PMS du PC, noté **transitionnel marin continental (TMC)**. Souvent constitué d'argiles, de débris de végétaux et d'inter-lits sableux, le contexte de sédimentation était celui d'un environnement similaire aux étangs littoraux actuels.

Depuis le Pliocène, la sédimentation de la plaine du Roussillon et de la marge du Golfe du Lion est en subsidence. En conséquence, les unités sédimentologiques sont toujours plus pentées que le fond de la mer. Ces unités sont recoupées au niveau du talus de la marge, c'est-à-dire, à une distance située entre 25 et 50 kilomètres des côtes.

La traduction en aquifères, aquitards, aquicludes et aquifuges des formations sédimentaires est donnée dès le schéma 2 de la figure 69. Les niveaux argileux constituent des aquifuges ou aquicludes. Le niveau palustre (TMC) est d'une part, discontinu à l'échelle de la plaine du Roussillon et, d'autre part présente des faciès sableux. En conséquence, il ne peut être caractérisé qu'à une échelle locale.

Les schémas 2 à 5 des figures 69 et 70 illustrent différents contextes hydrogéologiques naturels et anthropiques, ainsi que les mécanismes de migration de l'interface eau douce/eau salée. Ces schémas synthétisent les différentes observations effectués dans le cadre de ce travail de recherche, à l'aide notamment des analyses hydrochimiques et des investigations géophysiques

1.2. Conditions initiales hydrogéologiques

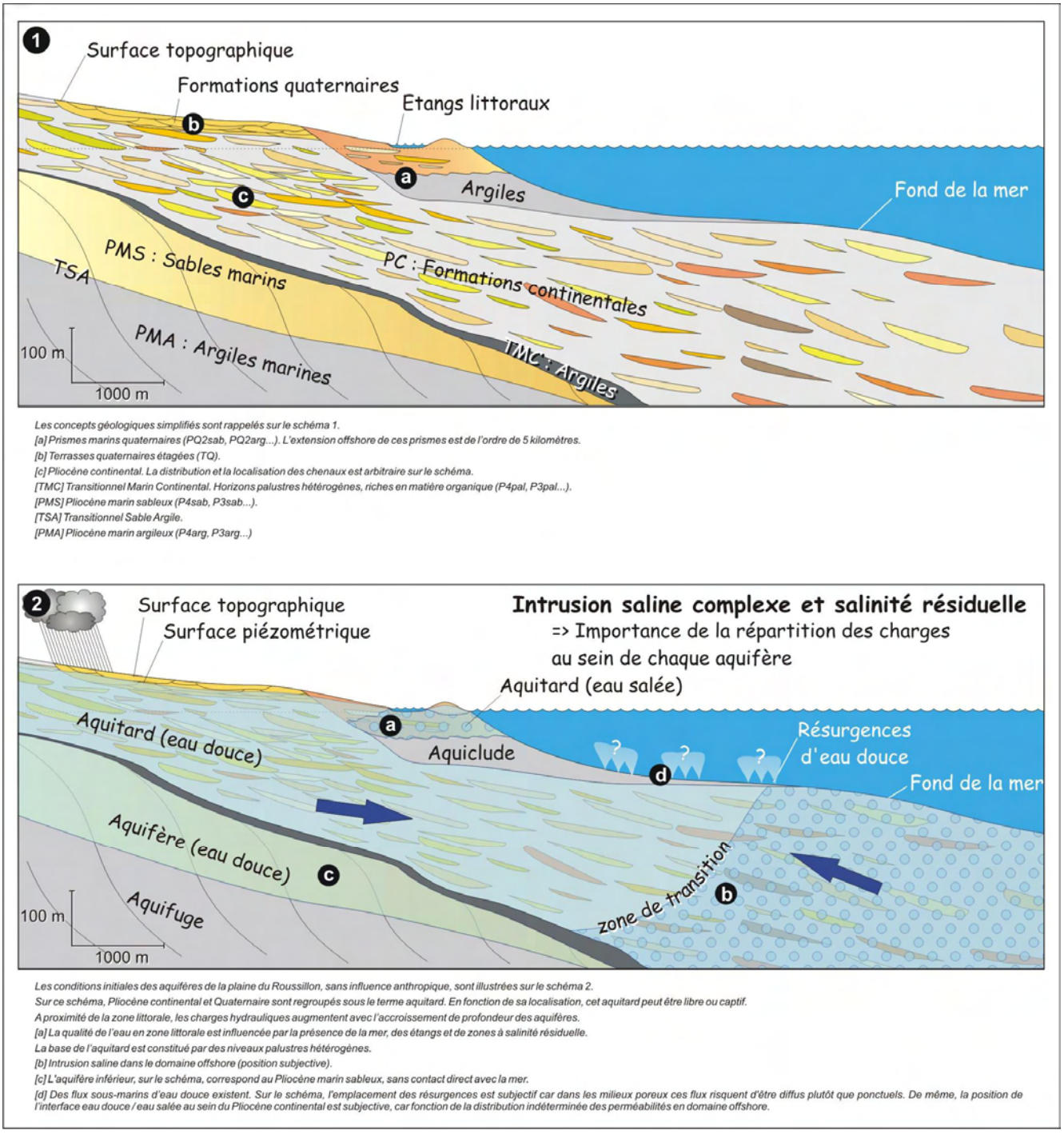
Considérons tout d'abord, les aquifères de la plaine du Roussillon lors de leur état initial sans effets anthropiques par pompage, schéma 2 (figure 69).

Le Pliocène continental et le Quaternaire sont regroupés sous le terme aquitard (pour la terminologie, cf. p. 102). D'une manière générale, les nappes du Quaternaire sont libres ou très légèrement captives tandis que celles du Pliocène continental sont captives. A proximité de la zone littorale, les charges hydrauliques augmentent avec l'accroissement de profondeur des aquifères.

La qualité de l'eau en zone littorale est influencée par la présence de la mer, mais également par les étangs et les zones à salinité résiduelle, telles que les anciennes zones humides asséchées au cours du temps (-a-). Le prisme marin quaternaire joue un double rôle : protecteur des ressources profondes et vecteur de contamination pour les ressources superficielles comme l'ont montré les investigations géophysiques.

Dans le domaine offshore, l'intrusion saline prend vraisemblablement place au niveau du Pliocène continental (schéma 2 -b-). D'après l'extension du prisme marin argileux quaternaire, cette intrusion se développe entre 2 et 5 kilomètres de la côte. La position de l'interface eau douce / eau salée au sein du Pliocène continental ne peut être déterminée avec précision car elle dépend de la distribution indéterminée des perméabilités et des charges dans le domaine offshore.

L'aquifère inférieur (-c-), correspond au Pliocène marin sableux, qui n'est pas en contact direct avec la mer. Des émergences sous-marines d'eau douce existent (-d-). En toute logique, leur position est fonction de la charge hydraulique et des perméabilités du Pliocène continental et du prisme Quaternaire marin argileux.



Les concepts géologiques simplifiés sont rappelés sur le schéma 1.
[a] Prismes marins quaternaires (PQ2sab, PQ2arg...). L'extension offshore de ces prismes est de l'ordre de 5 kilomètres.
[b] Terrasses quaternaires étagées (TQ).
[c] Pliocène continental. La distribution et la localisation des chenaux est arbitraire sur le schéma.
[TMC] Transitionnel Marin Continental. Horizons palustres hétérogènes, riches en matière organique (P4pal, P3pal...).
[PMS] Pliocène marin sableux (P4sab, P3sab...).
[TSA] Transitionnel Sable Argile.
[PMA] Pliocène marin argileux (P4arg, P3arg...)

Les conditions initiales des aquifères de la plaine du Roussillon, sans influence anthropique, sont illustrées sur le schéma 2.
Sur ce schéma, Pliocène continental et Quaternaire sont regroupés sous le terme aquitard. En fonction de sa localisation, cet aquitard peut être libre ou captif.
A proximité de la zone littorale, les charges hydrauliques augmentent avec l'accroissement de profondeur des aquifères.
[a] La qualité de l'eau en zone littorale est influencée par la présence de la mer, des étangs et de zones à salinité résiduelle.
La base de l'aquitard est constitué par des niveaux palustres hétérogènes.
[b] Intrusion saline dans le domaine offshore (position subjective).
[c] L'aquifère inférieur, sur le schéma, correspond au Pliocène marin sableux, sans contact direct avec la mer.
[d] Des flux sous-marins d'eau douce existent. Sur le schéma, l'emplacement des résurgences est subjectif car dans les milieux poreux ces flux risquent d'être diffus plutôt que ponctuels. De même, la position de l'interface eau douce / eau salée au sein du Pliocène continental est subjective, car fonction de la distribution indéterminée des perméabilités en domaine offshore.

Figure 69 - Géologie et hydrogéologie de la zone littorale du Roussillon avant exploitation des ressources en eau souterraine

1.3. Début de l'exploitation des ressources en eau souterraines

Le schéma 3 (figure 70) permet d'expliquer l'augmentation de la salinité. L'aquitard du Pliocène continental est exploité par un pompage situé en amont du contact entre l'aquitard PC et l'aquifère PQ. L'interface eau douce/eau salée se déplace vers le domaine terrestre et la salinité résiduelle contribue à augmenter la minéralisation des forages, par diffusion.

Ces phénomènes ne sont pas quantifiés dans le cas du Roussillon, la salinité résiduelle étant prépondérante sur les phénomènes d'intrusion saline, comme il a pu être observé à l'aide des mesures ponctuelles de conductivité électrique et d'analyses hydrochimiques.

Le cas illustré par le schéma 3 est représentatif de la plaine de la Salanque, où l'eau de certains forages situés à 2 kilomètres des côtes est minéralisée ($C_{Cl} \approx 1$ à 4 g/l). Le flux d'eau transitant dans le domaine offshore du PC (a) est illustré par une flèche, tout comme les effets de densité (b).

Lorsque les aquifères sont exploités, les émergences d'eau douce tendent à diminuer.

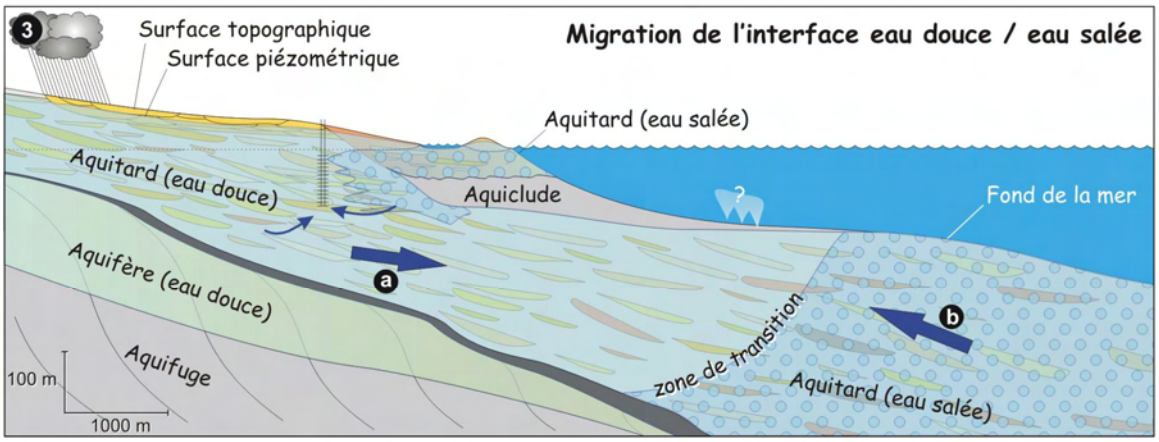
1.4. Intensification de l'exploitation des ressources en eau souterraines

Le schéma 4 (figure 70) illustre l'effet d'approfondissement des forages dans la zone littorale tel qu'il est en Roussillon. En effet, le phénomène classique du recul des forages vers les terres, souvent observé au sein d'aquifères côtiers contaminés, n'est pas constaté en Roussillon.

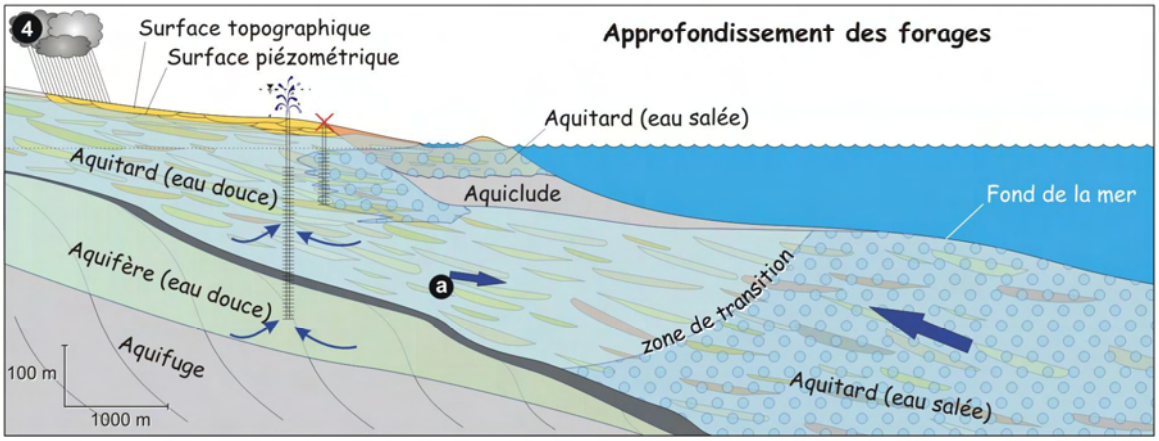
Lors de la contamination par des eaux salées d'un ouvrage, celui-ci est abandonné et remplacé par un forage plus profond. Cependant, le manque de connaissances hydrogéologiques entraîne une exploitation indifférenciée des aquifères. Ainsi, la conséquence de l'exploitation de plusieurs aquifères superposés contribue à la vulnérabilité des ressources en eau.

La conséquence de l'abandon des forages est décrite sur le schéma 5 (figure 70). Les forages abandonnés ou défectueux (-a-) mettent en contact plusieurs aquifères dont la qualité de l'eau est initialement différente. Si la charge de l'aquifère (PMS) est inférieure à celle de l'aquitard du PC, une drainance verticale descendante peut exister (-a-), comme cela a été démontré sur certains ouvrages du Barcarès [Marchal & Chery, 1995]. Cette drainance peut aussi exister lorsque les horizons palustres sont mois argileux (flèches rouges -b-). La différence de charge entre la nappe superficielle et la première nappe captive est de l'ordre du mètre au niveau du Roussillon.

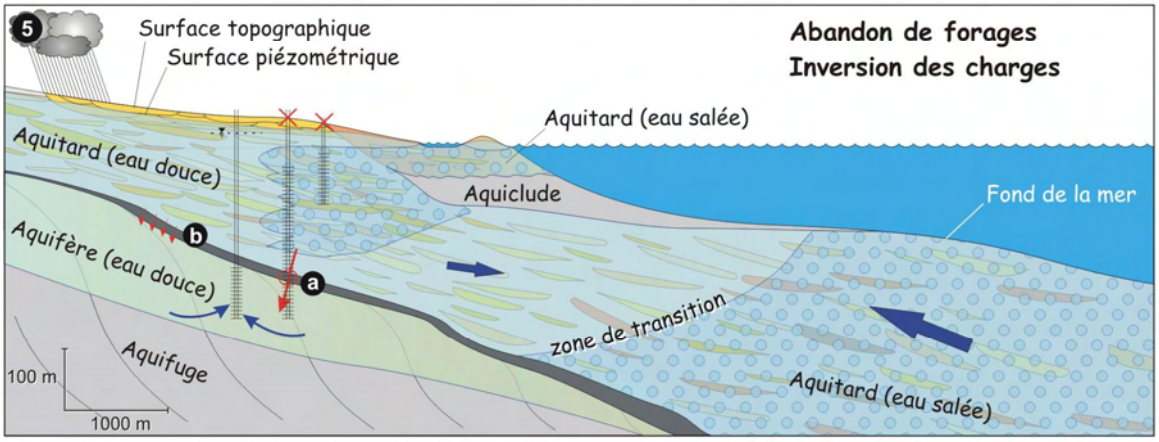
Ces flux descendants s'initient seulement lorsque la charge des aquifères captifs profonds est inférieure à celle des aquifères de subsurface, c'est-à-dire localement, au droit des cônes de rabattement, ou à plus grande échelle, au cours des périodes estivales de pompages intensifs.



Une première sollicitation de l'aquitard superficiel par pompage est illustrée sur le schéma 3.
L'interface eau douce / eau salée se déplace vers le domaine terrestre et la salinité résiduelle contribue à augmenter la minéralisation des forages (phénomènes de diffusion).
Ces phénomènes ne sont quantifiés dans le cas du Roussillon car, d'après nos observations, la salinité résiduelle des terrains est prépondérante sur les phénomènes d'intrusion saline.
[a] Le flux d'eau transitant vers le domaine offshore est illustré par cette flèche.
[b] Les effets de densité sont matérialisés par cette flèche.



Une sollicitation plus marquée de l'ensemble des aquifères et aquitards est illustrée sur le schéma 4.
Le premier pompage est arrêté du fait de sa salinité croissante. Le nouveau pompage effectue des prélèvements de manière indifférenciée dans l'ensemble des aquifères.
Le recul des forages vers les terres, phénomène classique des zones envahies d'eau de mer, ne caractérise pas la plaine du Roussillon. Sur le présent terrain d'étude, les forages contaminés sont remplacés par des ouvrages plus profonds.
L'exploitation de plusieurs aquifères superposés contribue à la diffusion de la salinité résiduelle.
[a] Le flux d'eau transitant vers le domaine offshore est réduit.



Le fait qu'il puisse exister de manière naturelle ou anthropique des flux depuis les ressources d'eau souterraines de subsurface vers des aquifères plus profonds est illustré sur le schéma 5.
[a] Les forages abandonnés ou défectueux mettent en contact plusieurs aquifères dont la qualité de l'eau est initialement différente.
[b] Si la charge de l'aquifère est inférieure à celle de l'aquitard, une drainance verticale descendante peut exister. Elle est matérialisée par les flèches rouges.
La différence de charge entre l'aquifère supérieur et inférieur est de l'ordre du mètre. En conséquence, cette drainance peut s'initier au droit des cônes de rabattement des ouvrages exploitant les ressources plus profondes.

Sur les schémas ci-dessus, les secteurs où l'eau salée est présente correspondent à des zones de mélange entre eau douce et eau salée. Dans la zone littorale, ce mélange n'excède pas 10% d'eau salée.

Figure 70 - Géologie et hydrogéologie de la zone littorale du Roussillon après le début de l'exploitation des ressources en eau souterraine
Sur les schémas ci-dessus, les secteurs où l'eau salée est présente correspondent à des zones de mélange entre eau douce et eau salée. Dans la zone littorale, ce mélange ne comprend pas plus de 10% d'eau salée.

2. Conceptualisation de la problématique d'intrusion saline

Au cours des chapitres précédents, il a été montré que la salinité des aquifères du Roussillon était la conséquence de flux verticaux descendants, favorisés par la présence de forages défectueux. Ainsi, les résultats de Marchal & Chery [1995] sont confirmés par les approches développées au cours du présent travail.

De plus, une condition aux limites avec la mer a aussi été mise en évidence pour les aquifères captifs du Pliocène continental (225 - nappe 3 et 4).

La complexité naturelle géologique de la plaine du Roussillon ne permet pas de représenter ou de conceptualiser l'intrusion saline selon les concepts classiques développés par Badon-Ghyben [1888] et Herzberg [1901] ; les formations sédimentaires sont pentées en direction de la mer d'une part, et d'autre part, l'aquifère du Roussillon ne peut être considéré comme homogène et libre (schéma 1, figure 71).

De même, l'intrusion saline au sein des aquifères captifs du Pliocène continental du Roussillon ne peut être appréhendée à l'aide d'un principe de Glover [1964] appliqué à un aquifère captif (schéma 2, figure 71).

Ainsi, dans le cas de bassins sédimentaires subsidents, il semble que la problématique de l'interface eau douce / eau salée soit fonction de la géométrie (pendage) et des propriétés hydrodynamiques des zones peu perméables, isolant les aquifères profonds. Ces aquifères sont relativement bien isolés des intrusions salines directes, mais la préservation des ressources en eau nécessite une connaissance spécifique du domaine offshore. L'interface eau douce / eau salée s'initie dans des formations géologiques immergées depuis 2 à 3 millions d'années (Pliocène continental) ou dans des formations argileuses, plus récentes mais dont l'origine est marine.

Sur le schéma 3 (figure 71), sont matérialisés les échanges entre la mer et les ressources en eau douce. Lorsque la charge de l'aquifère est supérieure à celle de la mer, les flèches bleues prédominent sur les flèches rouges et des émergences d'eau douce se forment probablement dans le domaine offshore. Dans le cas inverse, lorsque la charge de l'aquifère est plus faible que celle de la mer, l'IEDS progresse vers le domaine continental.

La charge et la perméabilité des milieux sont les facteurs qui contrôlent majoritairement ces échanges. Mais la diffusion moléculaire et des phénomènes de convection sont aussi envisageables dans ces zones de transition influencées par des différences de densité marquée.

Enfin, la position d'éventuels secteurs d'émergence d'eau douce et les flux associés à ces débits feront l'objet de modélisations dans la troisième partie selon le schéma ci-dessous.

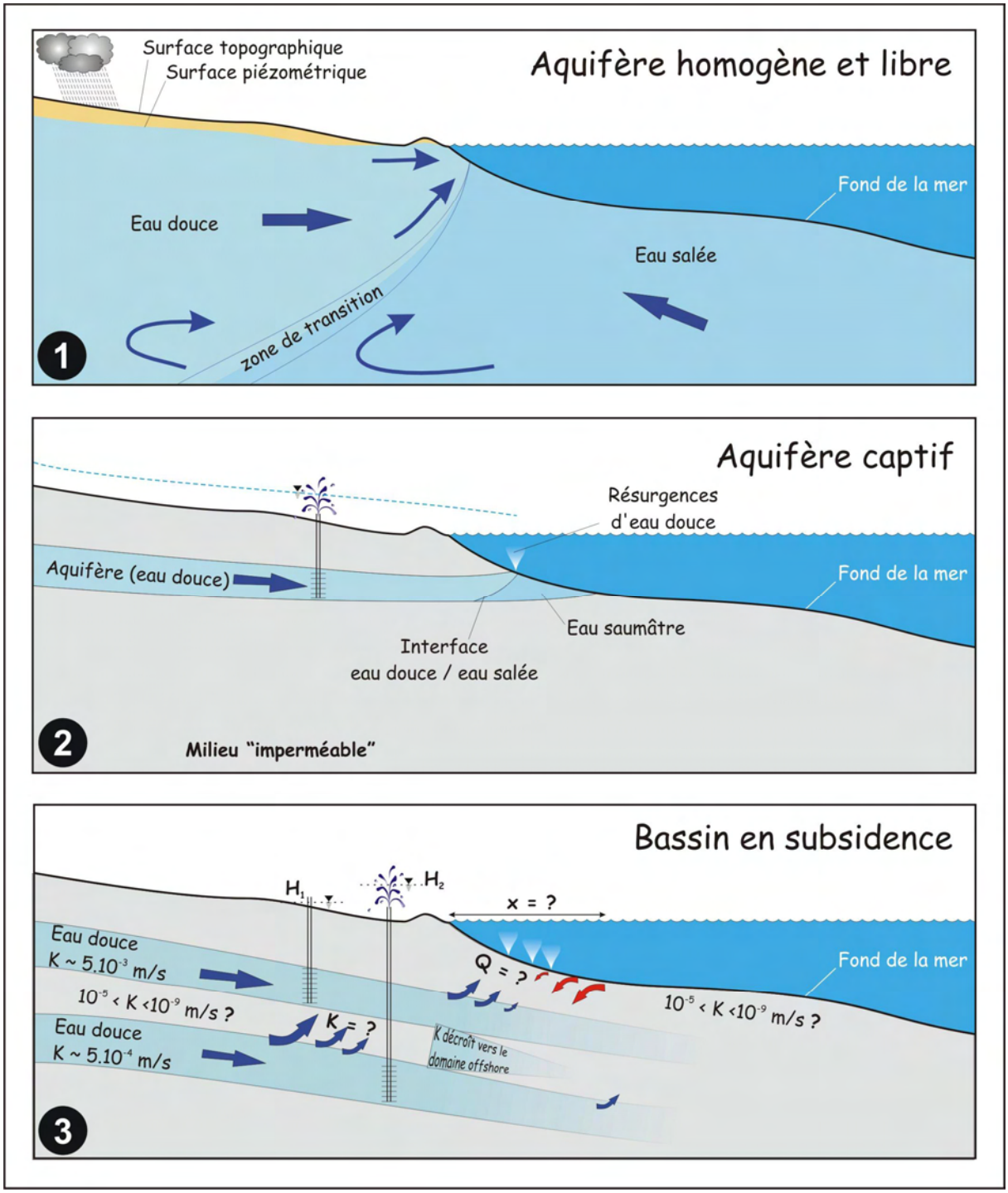


Figure 71 - Problématique de l'intrusion saline au sein d'aquifères captifs profonds

3. Indicateur de risque de salinisation des aquifères profonds

Le projet Syscolag a pour objectif de proposer des indicateurs pertinents de suivi des milieux et des usages. Dans le cadre du présent travail un indicateur simple est proposé afin d'estimer la progression de l'interface eau douce / eau salée dans les aquifères profonds[1].

Avant toute évaluation quantitative de modélisation, il apparaît que l'interface eau douce / eau salée progresse vers le domaine continental dans le domaine offshore, lorsque la charge des aquifères est inférieure à celle du niveau marin (flèches rouges, schéma 3 de la figure 71, ci-dessus). Afin d'effectuer cette évaluation, les charges observées sur les piézomètres ont été converties en "charge équivalente d'eau de densité égale à la mer", selon l'équation ci-dessous.

$$h_s = \frac{\rho_s}{\rho_f} h_f$$

h_s et h_f charges hydrauliques en eau salée et eau douce [m]

ρ_s et ρ_f masse volumique de l'eau salée et de l'eau douce [kg/m^3]

Dans le cas de la plaine du Roussillon, la masse volumique de l'eau de mer (ρ_s) a été calculée à partir de l'application "IES80"[2] qui résout l'équation d'état de l'eau de mer à partir de la salinité (36.6 g/l d'après les analyses chimiques), la température (10°C) et la pression (10 bars). La masse volumique ainsi calculée est égale à 1 028,7 kg/m^3.

Ainsi, cinq des dix piézomètres littoraux (figure 36, p. 142) présentent des charges négatives au cours de la période estivale. Il s'agit des piézomètres suivants : Barcarès plage-N3 (PC), Canet (PC), S^t-Laurent-de-la-Salanque (PMS), S^{te} Marie-N3 (PC) et S^{te} Marie-N4 (PC).

Le nombre de jours par année et par piézomètre où la charge, en équivalent d'eau salée, est inférieure à zéro mètre NGF est présenté sur la figure 72. La densité de l'eau des piézomètres est considérée constante compte tenu de variations de température et de minéralisation non significative. Plus ce nombre de jours est important, plus l'IEDS située dans le domaine off-shore progresse vers les ressources en eau douce.

[1] Cet indicateur ne prend pas en considération les contaminations dont la cause est la salinité résiduelle des sols ou les flux verticaux descendants inter-aquifères.

[2] IES80 : "International Equation of State of Seawater" - application développée par Olivier Le Calvé - Maître de Conférences - Option Ingénierie Marine - Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var.

Sur la figure 73 est présenté un indicateur du risque de progression de l'interface eau douce / eau salée : il s'agit simplement de la somme des charges sur une année. Cet indicateur prend en compte les variations du niveau piézométrique et le nombre de jours où la charge est négative. Ce calcul simple, qui **ne prend pas en compte la diffusion et la dispersion**, ne remplace en aucun cas une approche de modélisation[1].

Cet indicateur permet de déterminer, année par année, si les flux sortant de l'aquifère dans le domaine offshore ont été supérieurs aux flux entrants. Par exemple, lorsque la charge est égale à 10 cm pendant dix mois de l'année et est égale à - 60 cm pendant les deux mois de l'été, la somme des charges sur l'année est négative ($10\times0.1 - 2\times0.6 = -0.2$). Dans ce cas, les flux d'eau salée entrants dans l'aquifère sont supérieurs aux flux sortants et l'IEDS progresse vers le domaine continental, altérant la qualité des ressources en eau.

La valeur zéro signifie que les flux entrants et sortants ont été égaux sur une même année. Le zéro indique une limite à ne pas dépasser pour la préservation des aquifères profonds. Dans la troisième partie, la pertinence de cet indicateur sera discutée.

Sur la figure 73, la baisse des courbes dénote une augmentation des jours où l'IEDS progresse au sein de formations peu perméables.

[1] Au sein de milieux perméables la vitesse des écoulements contraint la distribution des concentrations en solutés (convection). Dans les milieux peu perméables, la diffusion moléculaire et de la dispersion deviennent des paramètres prépondérants de la distribution des concentrations.

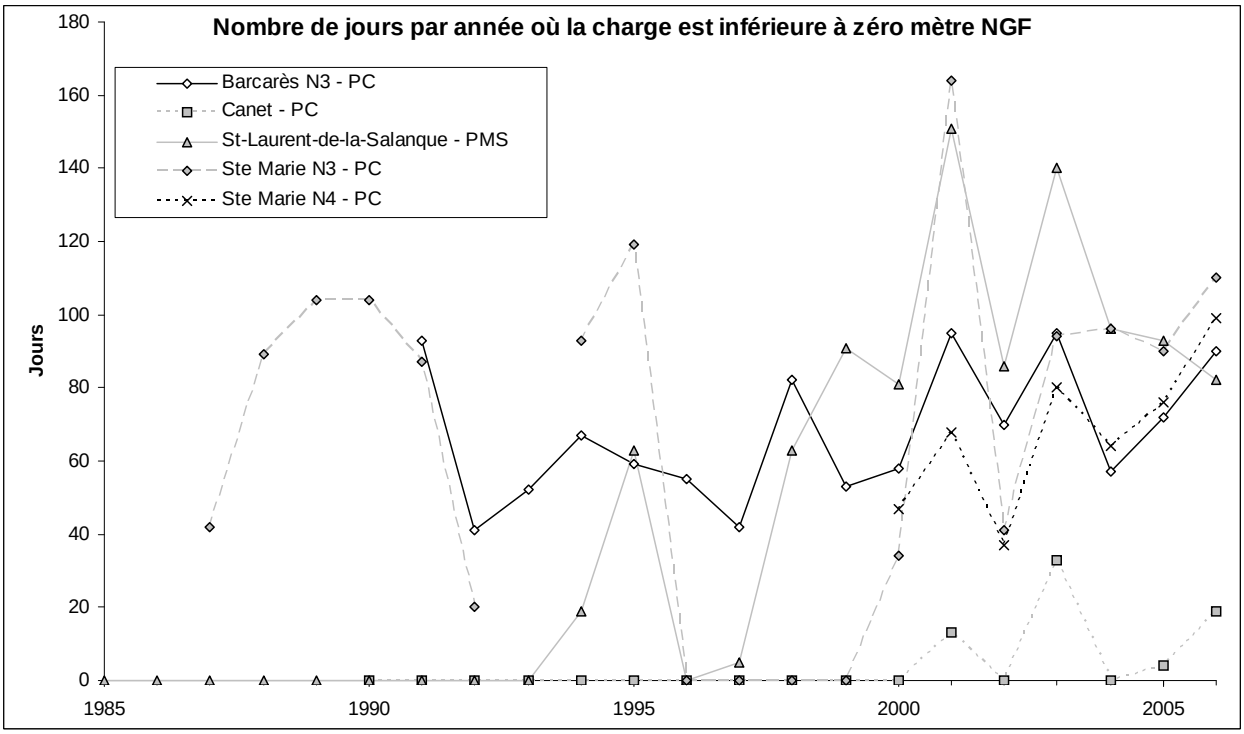


Figure 72 - Nombre de jours par année où la charge est inférieure à zéro mètre NGF

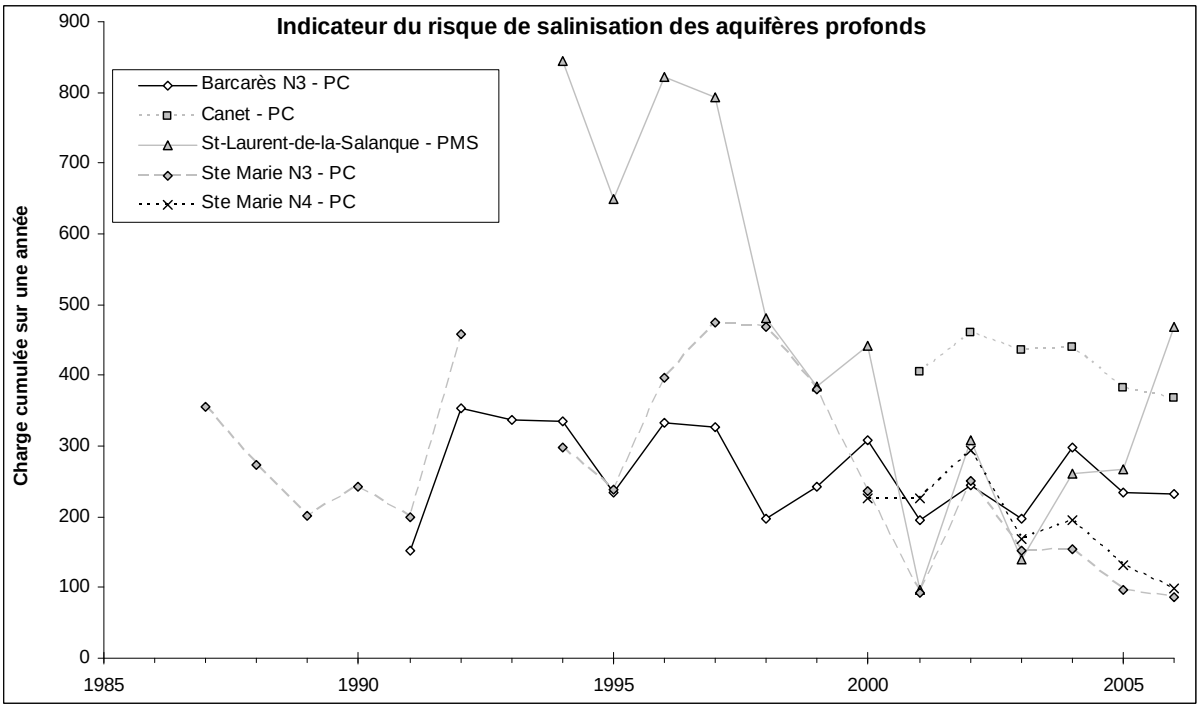


Figure 73 - Indicateur de risque de salinisation des aquifères profonds
Estimation de la migration de l'interface eau douce / eau salée au sein des aquicludes isolant les aquifères profonds

*

* *

Schématisation des résultats hydrogéologiques

Dans ce chapitre, les différents résultats hydrogéologiques ont été présentés sous forme de schémas.

Un indicateur simple est proposé en termes de gestion de la ressource en eau sur le littoral de la plaine du Roussillon.

Ce chapitre constitue la fin de la seconde partie du présent travail de recherche. Cette partie s'est attachée à démontrer les corrélations entre hydrogéologie et géologie par l'étude statistique de la distribution des crépines et de la productivité des forages.

Enfin, des méthodes variées et complémentaires ont été évaluées afin d'obtenir une caractérisation fine des phénomènes hydrogéologiques de la plaine du Roussillon. Cette caractérisation a été réalisée sur des données préexistantes (piézométrie, analyses chimiques, mesures et évaluation de la concentration en chlorures…) et des données acquises (géophysique électrique, analyses chimiques complètes…). L'ensemble de ces données ont été examinées en tenant compte des nouvelles interprétations géologiques [Duvail, à paraître]. Ainsi, la distinction historique des nappes 1 à 4 du Roussillon et la dichotomie des aquifères 146 et 225 du référentiel hydrogéologique ont pu être expliquées par un déterminisme géologique. Toutefois, la stratigraphie séquentielle dévoile ses limites dans les milieux continentaux où l'identification et la corrélation de systèmes chenalisés ne peut-être réalisée à l'échelle de notre travail.

Les hypothèses formulées au sein de cette seconde partie feront l'objet d'une modélisation hydrogéologique au cours de la dernière partie du présent travail de recherche.

Partie III

Modèle conceptuel et numérique du Roussillon

Cette troisième partie a pour objectif la vérification, par modélisation, de la cohérence des résultats obtenus dans les deux parties précédentes. Ces résultats seront conceptualisés dans le premier chapitre, puis modélisés dans le second.

L'ensemble des phénomènes à l'origine de l'augmentation de salinité ne pourra être appréhendés par modélisation. Notamment, la pollution diffuse par salinité résiduelle au sein des terrains ne fera pas l'objet de modélisations dans le présent travail.

Seuls les écoulements à l'échelle du bassin depuis l'amont jusqu'à la plateforme off-shore seront la cible de nos investigations.

Chapitre I

Le modèle conceptuel hydrogéologique du Roussillon

Après l'étude fine et l'interprétation des données de géologie et d'hydrogéologie, le modèle conceptuel des flux d'eau prenant place au sein de la plaine du Roussillon apparaît relativement bien contraint à l'échelle envisagée. Ces concepts seront introduits de manière schématique selon une coupe Ouest-Est parallèle à la direction d'écoulement régionale.

1. De la stratigraphie séquentielle à l'hydrodynamique des aquifères littoraux

Sur la figure 74 sont présentés les différents aquifères et aquitards identifiés sur le modèle génétique de la plaine du Roussillon. Les résultats synthétiques de la partie II sont rappelés ci-dessous :

> la géométrie des prismes pliocènes marins sableux P1, P2, P3 et P4 est conservée sur le modèle conceptuel (historiquement N4). Ces prismes sont séparés par un horizon de plus faible perméabilité matérialisant les unités sédimentologiques palustres. Bien que les unités palustres du Pliocène abritent localement des niveaux productifs, leur lithologie conserve un caractère majoritairement argilo-silteux ;

> faute de connaissances plus poussées, l'hétérogénéité verticale du Pliocène continental est matérialisée par la présence de deux horizons productifs en Salanque (historiquement N3 et N4) et un seul niveau dans le reste de la plaine. Ces horizons productifs sont confinés dans une matrice peu perméable (plaine d'inondation) ;

> la géométrie des prismes marins quaternaires sera réduite aux unités sableuses, argileuses et palustres (historiquement N1). La bande littorale nord de Leucate à Torreilles est pourvue de deux prismes. Au Sud de Torreilles, un seul prisme quaternaire a été reconnu ;

> les terrasses quaternaires superficielles (historiquement N2) abritent une nappe alluviale dont le niveau piézométrique suit approximativement la surface topographique.

La distribution des propriétés hydrodynamiques est fonction des données de transmissivité [Marchal, 1990] et de la cartographie des différents faciès. Les transmissivités des zones d'aquifères s'échelonnent entre 10^{-2} et 10^{-4} m^2/s. Les transmissivités des zones d'aquitards et d'aquicludes, moins perméables, seront testées avec des valeurs comprises entre 10^{-5} et 10^{-9} m^2/s.

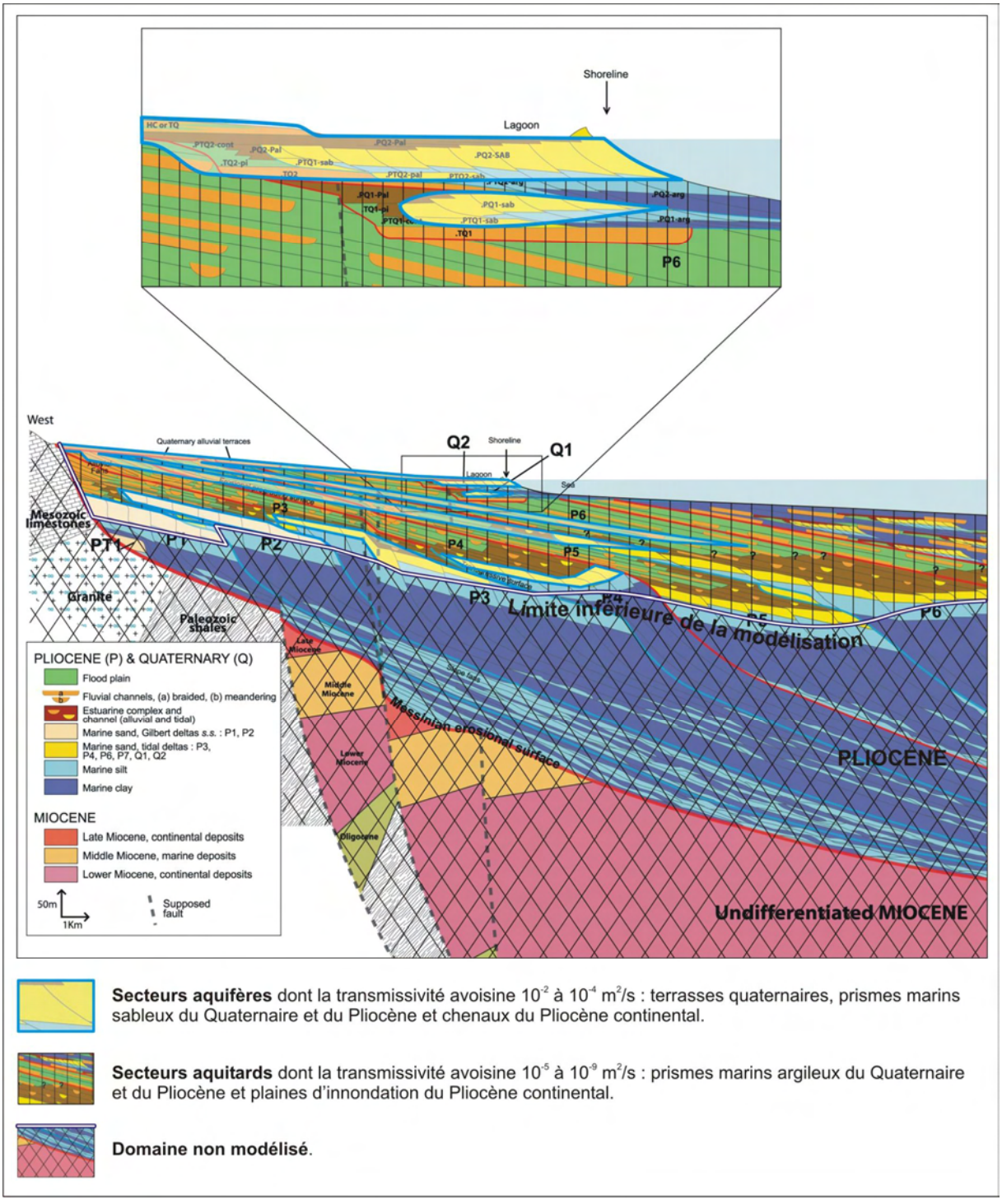


Figure 74 - Détermination des aquifères et aquitards sur le modèle génétique de la plaine du Roussillon

2. Données complémentaires

2.1. Morphologie de la plateforme du Golfe du Lion

La morphologie de la plateforme du Golfe du Lion est représentée sur la figure 75. Cette plateforme est très légèrement pentée (entre 0.1 et 1 %) vers le bassin profond. La profondeur de la plateforme au droit du Roussillon n'excède pas 130 mètres.

Les premiers canyons reliant la plateforme au bassin profond se localisent à une trentaine de kilomètres du littoral de la plaine du Roussillon.

Depuis le Pliocène, la sédimentation de la plaine du Roussillon et de la marge du Golfe du Lion est en subsidence. En conséquence, les unités sédimentologiques sont toujours plus pentées que le fond de la mer au niveau de la marge. Ces unités sont recoupées par le fond de la mer au niveau du talus de la marge, c'est-à-dire à une distance comprise entre 25 et 50 kilomètres des côtes.

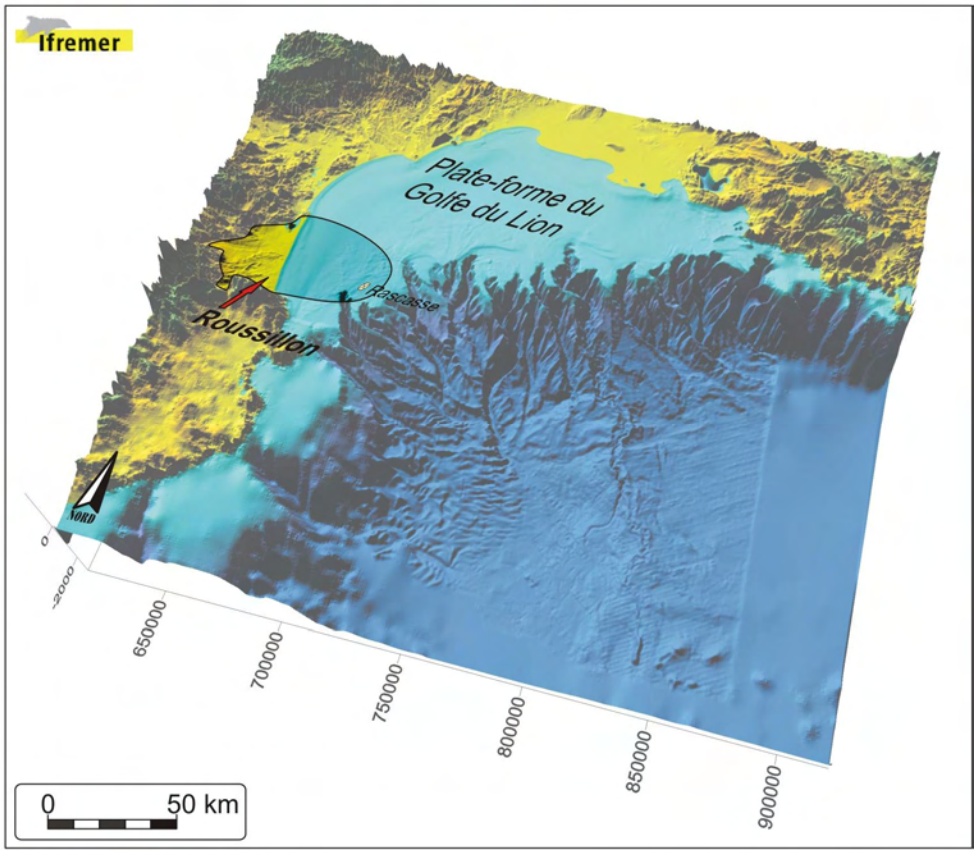


Figure 75 - Morphologie de la plateforme du Golfe du Lion
[Données Ifremer]

2.2. Géologie du domaine offshore

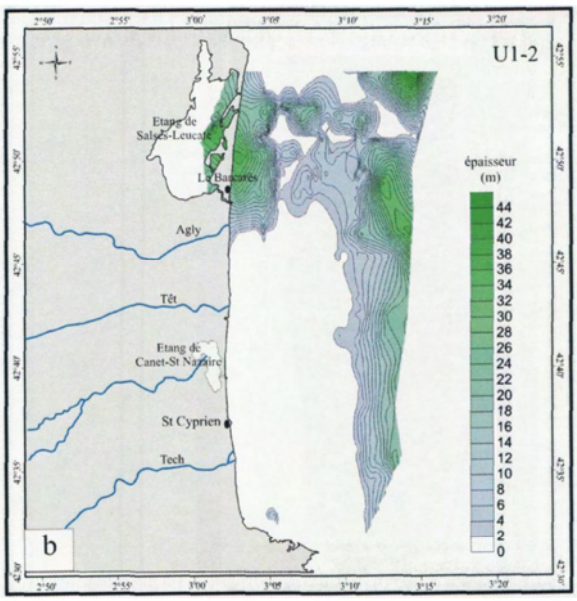
Les résultats de Duvail *et al.* [2001] et Labaune [2005] sont utilisés afin d'évaluer les épaisseurs des prismes quaternaires dans le domaine offshore.

Au droit de la Salanque, l'épaisseur des sédiments argileux quaternaires atteint une vingtaine de mètres. Dans la zone centrale et méridionale du lido, cette épaisseur est inférieure à 2 mètres. Localement, elle peut même être nulle. Cette différence est expliquée par la présence d'un double prisme quaternaire marin dans le Nord de la plaine de la Salanque.

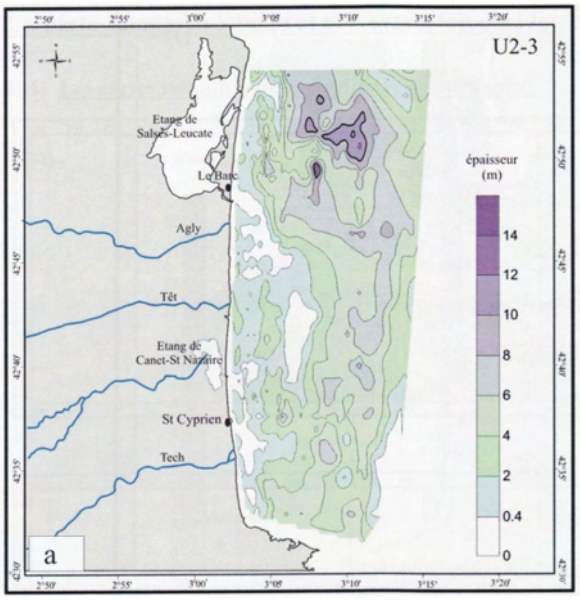
Toutefois, il semble que les prismes quaternaires ne soient pas les seuls à isoler les ressources en eau potable d'une éventuelle contamination. En effet, la partie supérieure du Pliocène continental est constituée par une couche d'argile dont l'épaisseur avoisine 20 à 30 mètres (forages littoraux de Canet **10916x0090** et du Barcarès **10912x0112**). Ces argiles, de couleur beige à jaune, confinent les premiers niveaux chenalisés productifs du Pliocène continental.

En zone distale de la plateforme, à proximité du talus de la marge, se localise le puits "Rascasse" réalisé en 1979 à 40 kilomètres au large de l'étang de Canet (figure 75, ci-dessus). Le toit des formations quaternaires se situe sous 130 mètres de tranche d'eau. Principalement constituées d'argile calcaire, ces formations quaternaires atteignent 849 mètres de puissance (mur = -979 m NGF). Le Pliocène se développe entre 979 et 1587 mètres de profondeur. L'ensemble des 608 mètres de Pliocène est majoritairement constitué de sédiments argileux.

Le fait que l'ensemble des formations quaternaires et pliocènes soient constituées d'argile dans la partie distale de la marge signifie que les canyons du talus ne recoupent pas de formations géologiques potentiellement aquifères.



Epaisseur de la formation "U1-2" regroupant les unités sédimentologiques PQ1arg et PQ1sab [Duvail, à paraître]. L'épaisseur de **PQ1arg** est calculée en réduisant de moitié l'épaisseur de la formation "U1-2".



Epaisseur de la formation argileuse "U2-3". L'épaisseur de **PQ2arg** est directement obtenue à partir de la carte ci-dessus.

Cartes issues des travaux de recherche de Labaune [2005]

Figure 76 - Epaisseur des prismes quaternaires marins argileux [Labaune, 2005]

3. Modèle conceptuel hydrogéologique

La distribution des écoulements au sein du bassin du Roussillon est présentée selon une coupe hydrogéologique interprétative (figure 78). L'emplacement de cette coupe a été déterminé selon plusieurs critères (figure 77) : (i) présence de piézomètres alignés selon l'axe Ouest-Est de la progradation des prismes pliocènes, (ii) existence de flux depuis l'amont vers l'aval du bassin et (iii) connaissances géologiques relativement bien contraintes.

Les interprétations hydrogéologiques relatives à la conception de la coupe ont été effectuées à partir des résultats obtenus au cours du travail de recherche.

A l'échelle du Roussillon, les relations entre aquifères peuvent être synthétisées de la manière suivante :

> le niveau piézométrique de la nappe superficielle (TQ - nappe 2 - 146) suit approximativement la topographie ;

> en amont, l'aquifère superficiel recharge les aquifères souterrains (eg : cas des forages AEP de Millas) ;

> en aval, c'est-à-dire en zone littorale, les charges hydrauliques sont plus importantes au sein des aquifères profonds qu'au sein des aquifères superficiels. La drainance naturelle est ascendante. La différence de charge entre chaque aquifère est d'ordre métrique. En conséquence, une drainance descendante peut s'initier au droit des cônes de rabattement des ouvrages exploitant les ressources plus profondes.

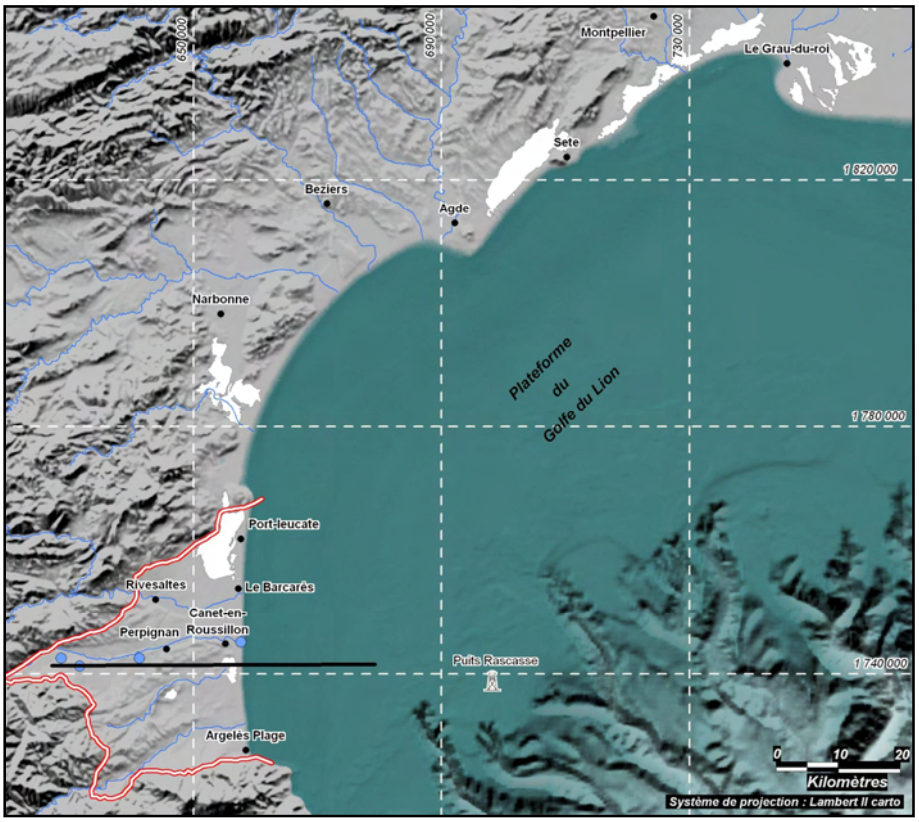
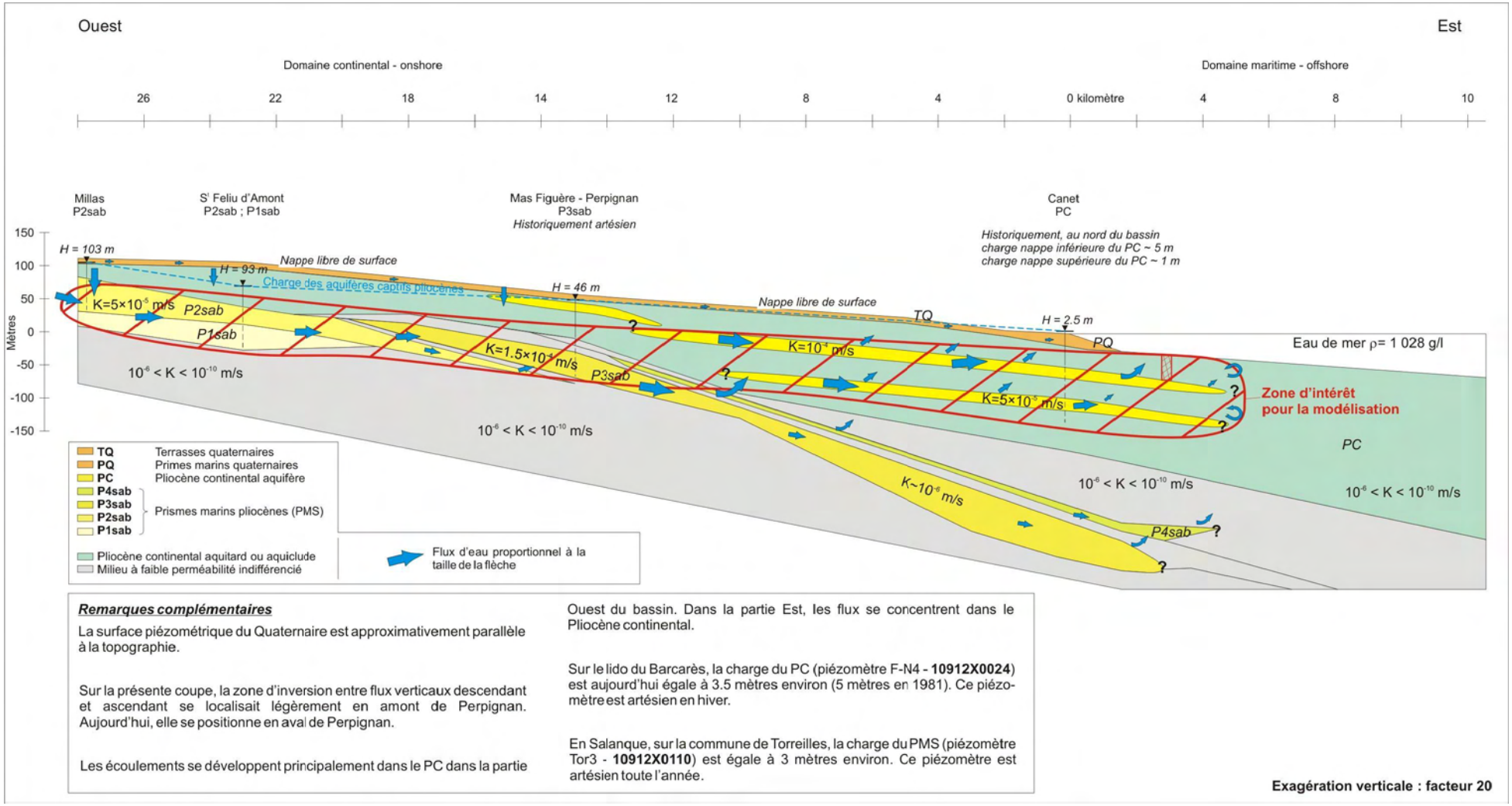


Figure 77 - Localisation de la coupe hydrogéologique dans le contexte du Golfe du Lion (trait noir continu)
Les piézomètres reportés sur la coupe ci-après, sont représentés par les points bleus



Remarques complémentaires

La surface piézométrique du Quaternaire est approximativement parallèle à la topographie.

Sur la présente coupe, la zone d'inversion entre flux verticaux descendant et ascendant se localisait légèrement en amont de Perpignan. Aujourd'hui, elle se positionne en aval de Perpignan.

Les écoulements se développent principalement dans le PC dans la partie Ouest du bassin. Dans la partie Est, les flux se concentrent dans le Pliocène continental.

Sur le lido du Barcarès, la charge du PC (piézomètre F-N4 - **10912X0024**) est aujourd'hui égale à 3.5 mètres environ (5 mètres en 1981). Ce piézomètre est artésien en hiver.

En Salanque, sur la commune de Torreilles, la charge du PMS (piézomètre Tor3 - **10912X0110**) est égale à 3 mètres environ. Ce piézomètre est artésien toute l'année.

Exagération verticale : facteur 20

Figure 77 - Coupe hydrogéologique interprétative des écoulements au sein de la plaine du Roussillon

*

* *

Le modèle conceptuel hydrogéologique du Roussillon

Le modèle conceptuel synthétise les données de géologie et d'hydrogéologie. La distribution des écoulements est identifiée :

> dans la partie amont du bassin, l'aquifère quaternaire de surface recharge les aquifères captifs des prismes sableux 1 et 2 du Pliocène ;

> en raison de la faible épaisseur des horizons palustres et argileux, les écoulements se répartissent indifféremment au sein des trois premiers prismes sableux Pliocène ;

> la zone centrale du bassin correspond vraisemblablement à la zone d'inversion de la drainance : descendante en amont puis ascendante en aval ;

> à une quinzaine de kilomètres du littoral, la baisse de la perméabilité des prismes pliocènes sableux et l'augmentation de la granulométrie du Pliocène continental favorise les écoulements au sein des systèmes chenalisés continentaux ;

> la problématique de l'interface eau douce / eau salée se développe dans la zone littorale, mais aussi dans le domaine offshore. La géométrie et la perméabilité des formations géologiques du domaine offshore sont prépondérantes pour déterminer la vulnérabilité des ressources en eau. De même, les propriétés hydrodynamiques des formations peu perméables et semi-perméables se situent au cœur de notre problématique.

Dans le chapitre suivant, on s'attachera à modéliser les écoulements au sein des aquifères pliocènes et leurs interactions avec le milieu marin.

Chapitre II

Modélisation et quantification hydrogéologique

L'objectif de ce chapitre est d'estimer les flux d'eau prenant place dans la zone littorale de l'aquifère du Roussillon. Les simulations numériques viseront principalement les processus hydrodynamiques et hydrodispersifs des horizons faiblement perméables protégeant les aquifères d'eau douce du Pliocène afin d'évaluer leur vulnérabilité face au risque d'intrusion saline. Le logiciel Feflow est utilisé afin de réaliser ces simulations.

1. Solutions analytiques et simulations numériques

1.1. Méthode analytique

En 1992, Auroux *et al.* avaient estimé, dans le cadre de l'étude des aquifères du Roussillon, le temps de transfert de solutés au sein d'une éponte semi-perméable. Les deux équations ci-dessous avaient permis, à partir de la vitesse microscopique en milieu poreux, de calculer un temps de transfert de l'ordre de 67 ans pour un milieu semi-perméable de 40 mètres d'épaisseur dont la perméabilité serait égale à 0.25×10^{-8} m/s. La porosité efficace, facteur important de ce calcul, avait été fixée à 1% et la différence de charge à 3 mètres.

$$v_x = \frac{q}{n_e} \qquad \text{où} \qquad q = K\frac{dh}{dl}$$

q vitesse de Darcy [m/s]

dh différence de charge [m]

dl longueur [m]

v_x vitesse linéaire moyenne ou vitesse microscopique en milieu poreux [m/s]

n_e porosité effective [-]

Ce calcul a été réalisé afin de déterminer la drainance entre aquifères dans le domaine continental. En revanche, il ne tient pas compte d'une part, des flux œuvrant dans le domaine offshore évoqués dans la partie précédente et d'autre part des effets densitaires.

1.2. Equation d'advection-dispersion

Dans les aquifères côtiers, les éléments dissous dans l'eau peuvent significativement influencer la densité de l'eau si leur concentration est suffisamment élevée. Dans ce cas, les écoulements de l'aquifère seront dépendants de la densité et ses effets devront être pris en considération. Le transport des éléments dissous dans l'aquifère est décrit par l'équation en deux dimensions d'advection-dispersion. L'équation, dans le cas d'un transport conservatif[1] peut-être écrite de la sorte [Oude Essink, 2001] :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(CV_i\right) + \frac{(C - C')W}{n_e D}$$

C concentration des éléments dissous [M/L^3]

D_{ij} coefficient de dispersion hydrodynamique [L^2/T]

Vi $= qi/n_e$ vitesse effective dans l'aquifère dans la direction x_i [L/T]

C' concentration du terme recharge [M/L^3]

W terme général de la recharge [L/T]

D épaisseur saturée de l'aquifère

n_e porosité effective [-]

Le logiciel de simulation aux éléments finies Feflow résout cette équation du transport couplée aux effets de la densité [Diersch & Kolditz, 2002[2]].

2. Détermination des paramètres de la dispersion

En règle générale, deux paramètres doivent être saisis lors de simulations du transport par les logiciels classiques de modélisations hydrogéologiques. La diffusion moléculaire et la dispersion cinématique.

Dans le cadre de la présente étude et d'une manière générale en hydrogéologie appliquée, en raison de la variabilité spatiale du milieu naturel, un certain nombre de paramètres ne peut être défini précisément. La perméabilité, la granulométrie et la porosité sont estimées à partir de connaissances de terrain et d'expériences hydrogéologiques. De même, les paramètres du transport seront estimés en fonction de la littérature scientifique présentée ci-après.

[1] Le chlore est un élément conservatif.

[2] Voir plus spécifiquement les "White Papers vol. II" sur http://www.wasy.de

2.1. Diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire résulte du mouvement brownien, c'est-à-dire de l'agitation moléculaire. Dans le milieu poreux, les valeurs de ce coefficient sont plus faibles que dans l'eau seule, du fait de la géométrie des pores qui limite la diffusion. Un coefficient de diffusion apparent, "Dm*" est alors défini comme [Banton & Bangoy, 1997] :

$$D_m^* = \frac{n}{a} D_m$$

D_m^* coefficient de diffusion apparente [m^2/s] spécifique au milieu poreux

D_m coefficient de diffusion dans l'eau [m^2/s] ($D_m = 1.3 \times 10^{-9}$ m^2/s pour NaCl dans une eau à 20°C)

n porosité totale

a coefficient fonction du milieu, compris entre 1 (sable) et 2 (argile)

En conséquence, avec une porosité totale comprise entre 45 et 55%, le coefficient de diffusion apparent peut-être estimé à 5.10^{-10} m^2/s pour la molécule de NaCl contenue dans des sédiments argileux. Pour plus de simplicité, ce coefficient sera nommé D_m par la suite.

La valeur de 5.10^{-10} m^2/s sera utilisée dans les calculs qui suivront.

2.2. Dispersion cinématique

Le phénomène de dispersion des différents traceurs en aquifère résulte de la convection hydrodynamique. Le coefficient de dispersion hydrodynamique dépend de la vitesse réelle de l'écoulement et des propriétés dispersives du milieu poreux. Il s'agit d'un phénomène de mélange essentiellement lié à l'hétérogénéité des vitesses microscopiques, qu'elle qu'en soit l'échelle d'observation, au sein du milieu poreux [de Marsily, 1981]. La propagation des éléments transportés est plus rapide dans l'axe des pores. On observe donc un étalement progressif des éléments par rapport au mouvement moyen.

Dans le domaine de la modélisation, les coefficients suivants sont utilisés :

- α_L = coefficient de dispersion intrinsèque longitudinal (dans la direction de l'écoulement) ;
- α_T = coefficient de dispersion intrinsèque transversal, environ 10 fois inférieur à α_L

Par expérience, la dispersion longitudinale α_L doit être au moins égale à la moitié de la longueur de la maille du modèle afin d'éviter tout problème de dispersion numérique.

2.3. Cas des milieux peu perméables

Pfankuch [1963] propose cinq régimes de transport des solutés qui sont fonction du rôle de la diffusion moléculaire et de la dispersion cinématique (figure 79). On définit pour cela un nombre de Péclet sans dimension [de Marsily, 1981]:

$$\mathrm{Pe} = \frac{|u^*|\sqrt{k}}{d_0} \qquad \text{ou} \qquad \mathrm{Pe} = \frac{|u^*|\ell}{d_0}$$

$|u^*|$ module de la vitesse microscopique moyenne

k perméabilité intrinsèque

d_0 coefficient de diffusion moléculaire

ℓ longueur caractéristique du milieu poreux (diamètre moyen des grains ou des pores). Argile < 2.10^{-6} m

La perméabilité intrinsèque est définie selon les équations suivantes :

$$k = \frac{K\mu}{\rho g} \qquad \text{avec} \qquad \upsilon = \frac{\mu}{\rho}$$

K conductivité hydraulique [m/s]

μ viscosité dynamique [kg/m/s]

ρ masse volumique [kg/m^3]

g accélération de la pesanteur [m/s^2] ($\approx$ 9.81 m/s^2)

υ viscosité cinématique ou coefficient de Poisson ($\approx 1.4\times10^{-6}$ m^2/s pour les ordres de grandeur de température et de densité de notre cas d'étude)

Le tableau 17 présente les nombres de Péclet calculés pour des milieux peu perméables. L'épaisseur est constante et égale à 20 mètres. Cette valeur représente l'épaisseur minimum de la formation géologique séparant les aquifères du fond de la mer dans le Roussillon.

La diffusion moléculaire est aussi constante, et égale à 5×10^{-10} m^2/s (calculée ci-dessus, p. 230).

Les nombres de Péclet figurant ci-dessous (tableau 17) sont faibles et caractérisent un **régime de diffusion moléculaire pure**.

L'estimation du nombre de Péclet en utilisant la longueur caractéristique du milieu poreux à la place de la perméabilité intrinsèque fournit des résultats supérieurs à ceux du tableau 17 (entre 10 et 100 fois supérieurs). Toutefois, quelle que soit la méthode de calcul choisie, le régime de transport correspond toujours à une diffusion moléculaire pure.

Cependant, le calcul du transport de solutés par des effets densitaires entraînent le développement de dispersion numérique générée par des logiciels de simulation numérique. Cette dispersion numérique, conduisant à la non-convergence des modèles, ne peut être évitée qu'en ajoutant un paramètre de dispersion cinématique non nul. En conséquence, les coefficients de dispersion α_T et α_L seront choisis les plus faibles possible.

Conductivité hydraulique [m/s]	Différence de charge [m]	Gradient hydraulique	Porosité	Vitesse de Darcy [m/s]	Vitesse microscopique en milieu poreux [m/s]	Perméabilité intrinsèque [m^2]	Nombre de Péclet
10^{-9}	1	0.05	0.01	5×10^{-11}	5×10^{-9}	1.43×10^{-16}	1.19×10^{-7}
10^{-8}	1	0.05	0.01	5×10^{-10}	5×10^{-8}	1.43×10^{-15}	3.78×10^{-6}
10^{-7}	1	0.05	0.01	5×10^{-9}	5×10^{-7}	1.43×10^{-14}	1.19×10^{-4}
10^{-6}	1	0.05	0.01	5×10^{-8}	5×10^{-6}	1.43×10^{-13}	3.78×10^{-3}
10^{-6}	5	0.25	0.01	2×10^{-7}	2.5×10^{-5}	1.43×10^{-13}	1.89×10^{-2}
10^{-6}	5	0.25	0.03	2.5×10^{-7}	8.33×10^{-6}	1.43×10^{-13}	6.30×10^{-3}

Tableau 17 - Estimation du nombre de Péclet

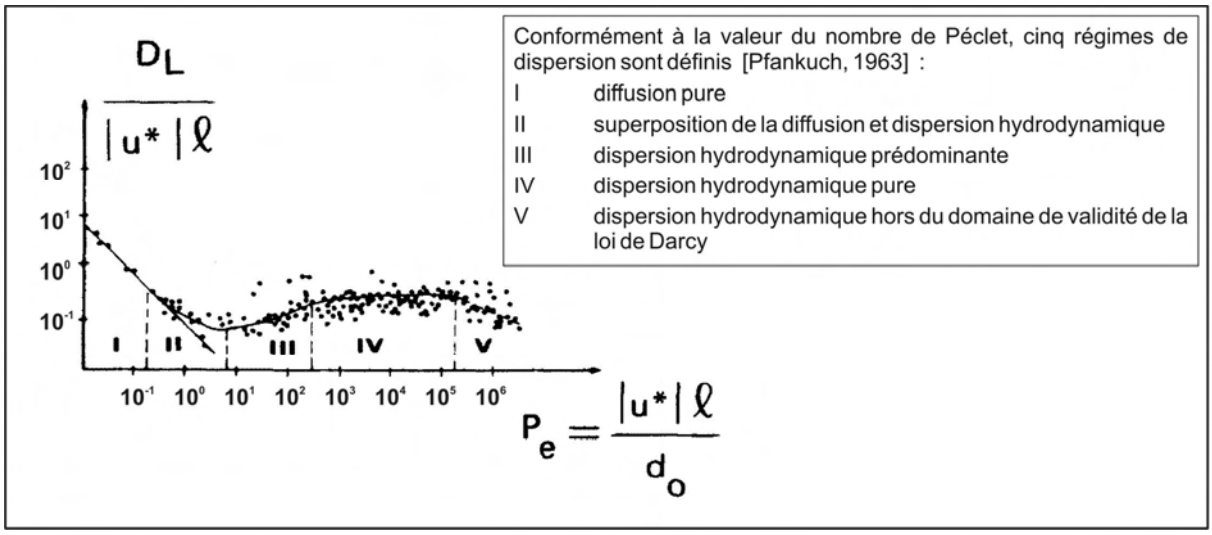


Figure 79 - Régimes de transport de solutés en fonction du nombre de Péclet [Pfankuch, 1963]

3. Evaluation de l'indicateur de progression de l'interface eau douce / eau salée

3.1. Description du modèle d'évaluation

Dans le dernier chapitre de la partie II, un indicateur de la progression de l'IEDS a été proposé. Cet indicateur avait pour objectif de comparer les flux entrants (intrusion saline) et les flux sortants (émergence d'eau douce) par la quantification de la différence de charge sur un même cycle hydrologique. Toutefois, comme cela avait été précisé dans le dernier chapitre de la partie II, cet indicateur ne tient pas compte des effets de la dispersion.

Un modèle simple a été élaboré afin de déterminer si, dans le cas d'un équilibre entre les flux entrants (intrusion saline) et les flux sortants (émergence d'eau douce), l'IEDS progresse ou reste stable au sein de sédiments peu perméables.

Le modèle d'évaluation simule les concentrations en eau dense[1] au sein d'une colonne verticale de sédiments très peu perméables ($K=10^{-9}$ m/s) sur laquelle sont appliquées des charges et concentrations aux extrémités (figure 80). La longueur de cette colonne est égale à un mètre.

Le haut de la colonne pourrait représenter les conditions aux limites avec la mer et le bas celle d'un aquifère. La concentration est constante aux deux extrémités. La charge varie cycliquement par créneaux de 182.5 jours entre -0.1 m et +0.1 m au niveau de la partie inférieure tandis qu'elle est constante sur la partie supérieure.

Ce créneau de 182.5 jours a été choisi afin de simuler une répartition égale des flux entrants et sortants dans le domaine offshore au cours d'un même cycle hydrologique.

3.2. Résultat et interprétation

Pour une période simulée de dix années, le pourcentage d'augmentation en eau dense est noté pour chaque point d'observation (figure 81). Les trois points d'observations sont placés au sein de la colonne simulée et sont représentés sur la figure 80.

Pour les conditions et propriétés du milieu modélisé, les pourcentages en eau dense sont en augmentation sur le long terme bien que les charges soient équilibrées sur un même cycle hydrologique.

Cela signifie que dans le cas de milieux peu perméables, la progression de l'IEDS est fonction d'autres processus physiques que ceux résultant du gradient hydraulique.

[1] 100% d'eau dense = 100% d'eau à densité 1.028 soit une salinité de 36.6 g/l.

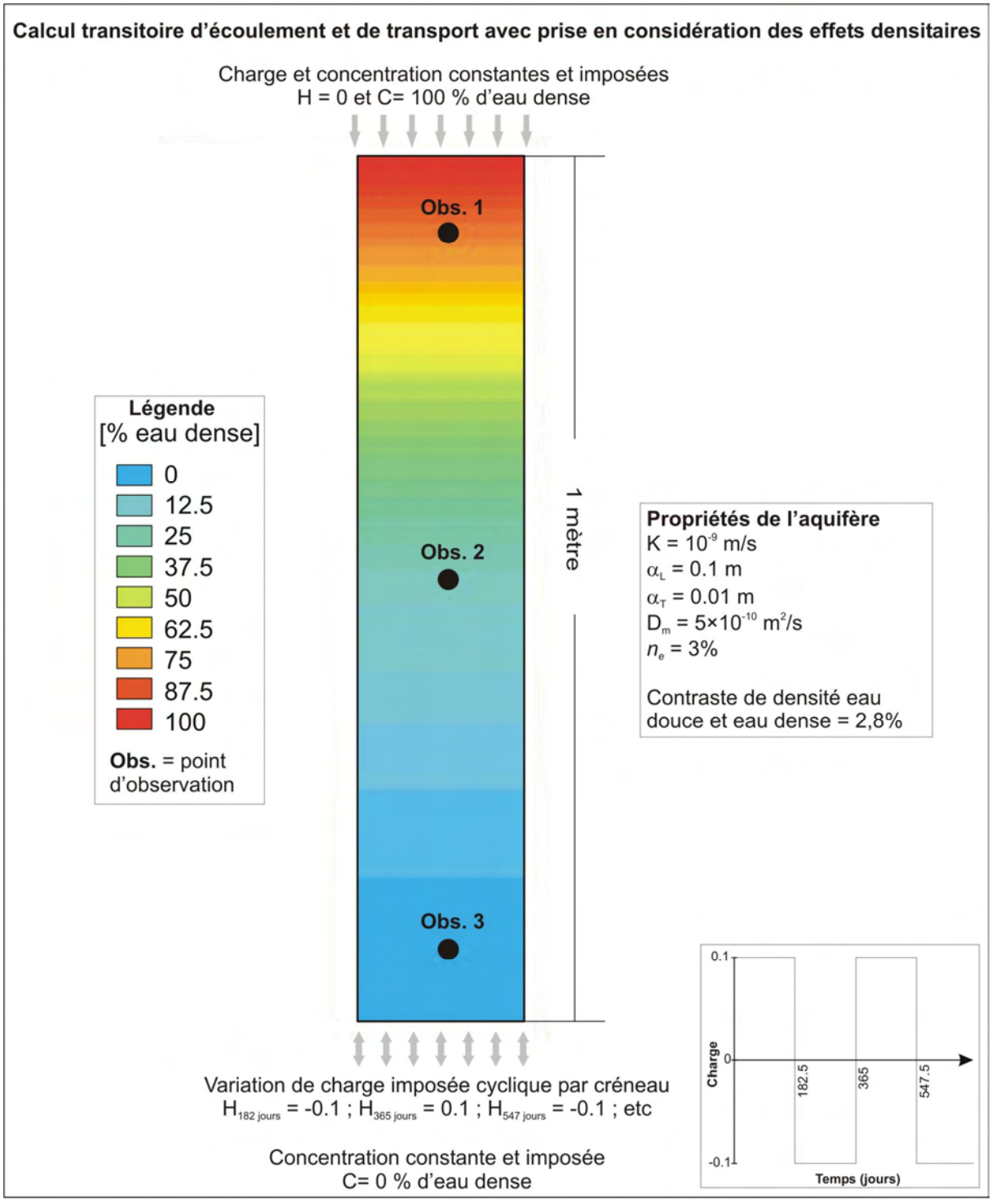


Figure 80 - Schéma du modèle d'évaluation de l'indicateur de progression de l'IEDS

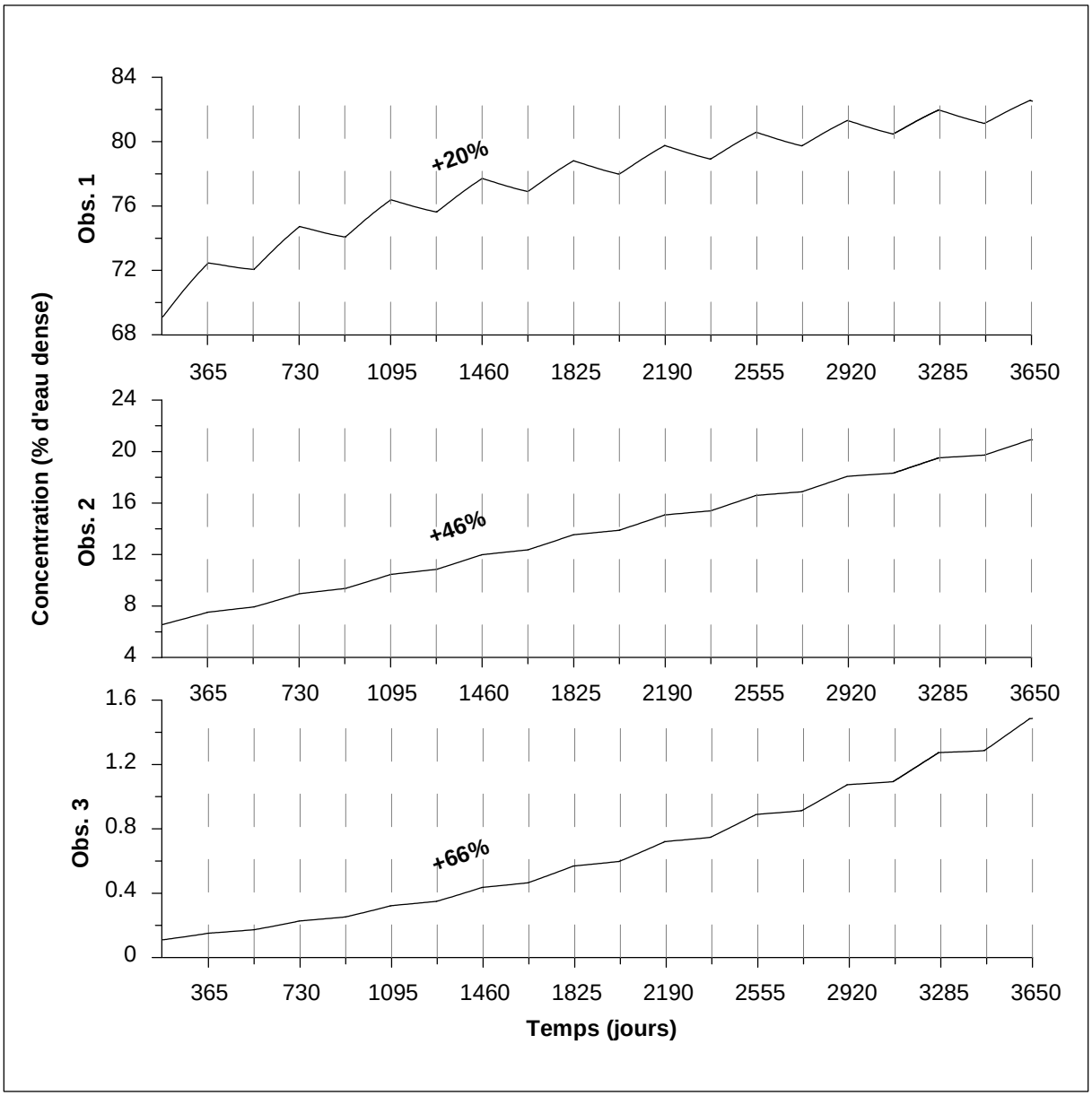


Figure 81 - Progression de l'IEDS par augmentation de la concentration observée au cours de dix années de simulation

Les points d'observations font références à la figure précédente.

4. Dispersion et perméabilité

Le fait que les effets de la dispersion soient prépondérants sur les effets du gradient hydraulique couplés aux effets densitaires est aussi illustré sur la figure 82. Un modèle, dont la géométrie est simple, a été utilisé en régime permanent. Les particularités de ce modèle sont décrites sur la figure 82, partie de droite.

Ce modèle est représentatif de l'épaisseur des sédiments argileux isolant le prolongement des aquifères dans le domaine offshore (20 mètres au minimum).

La partie de gauche de la figure présente les résultats des différentes simulations pour lesquelles la perméabilité était variable. Les interprétations et résultats sont spécifiques aux particularités du modèle, notamment, le choix des coefficients de dispersion. Ces résultats permettent néanmoins de visualiser les processus du transport au sein d'un milieu peu perméable.

Le pourcentage en eau dense établi entre les deux extrémités du modèle est tracé selon une coupe verticale du modèle.

Ce gradient est linéaire pour les perméabilités faibles ($K < 10^{-11}$ m/s), ce qui est dû à un régime de transport des solutés résultant uniquement de la dispersion. Dans ce cas, le transport lié aux flux est largement inférieur aux effets de la diffusion moléculaire.

Dans le cas de perméabilités plus élevées ($K > 10^{-11}$ m/s), la distribution de la concentration en eau douce résulte d'une combinaison des effets densitaires et dispersifs.

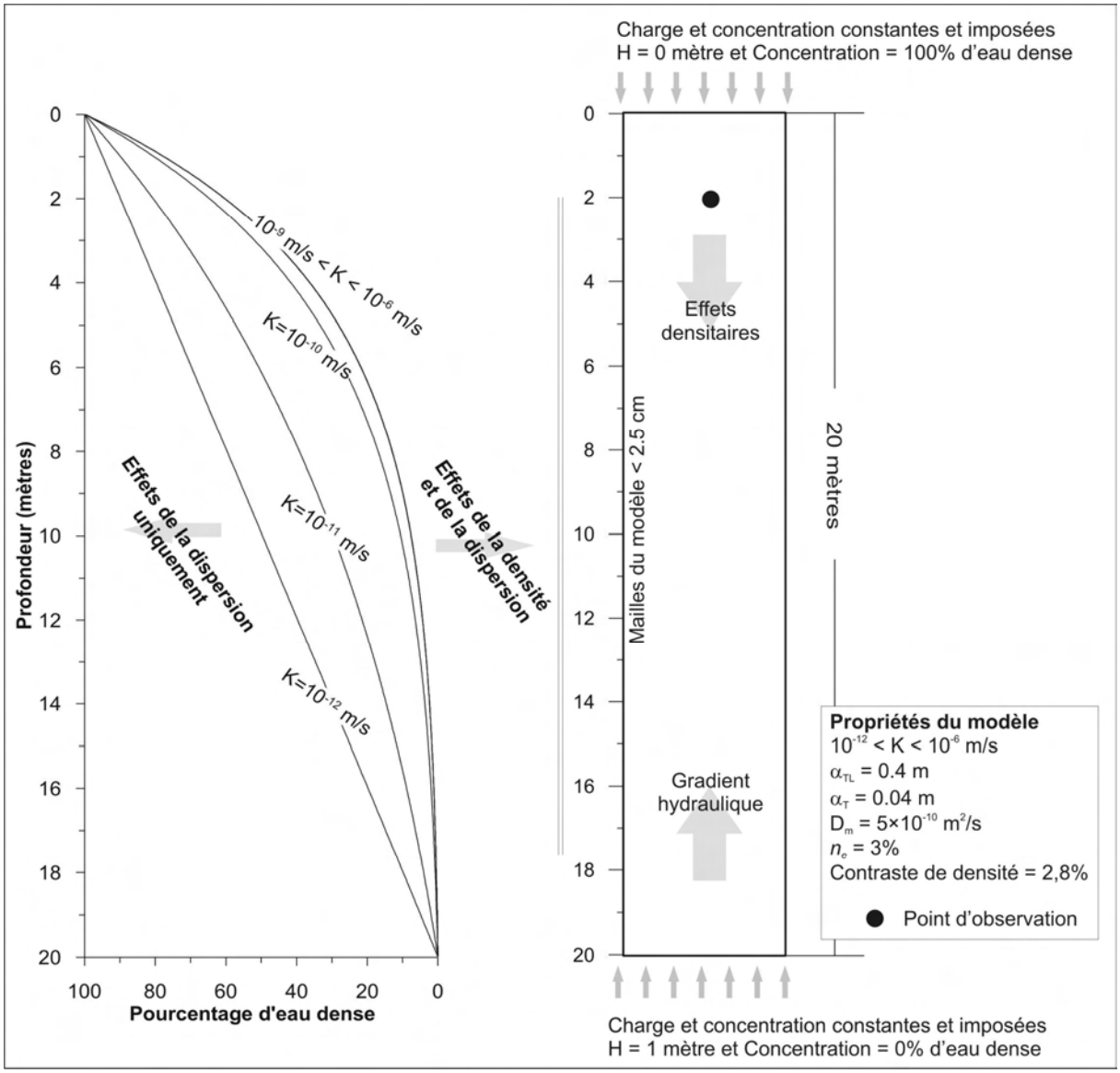


Figure 82 - Flux dispersifs et flux densitaires

5. Modélisation appliquées au Roussillon

5.1. Description du modèle

Un dernier modèle numérique a été créé afin de visualiser les flux au niveau du littoral et dans le domaine offshore (figure 83). Ce modèle est inspiré de la coupe hydrogéologique du bassin du Roussillon (figure 78, p. 225). Les dimensions du modèle correspondent à la réalité : le domaine continental s'étend sur 30 km et le domaine offshore sur 15 km. L'orientation du modèle correspond à celle de la coupe hydrogéologique du bassin du Roussillon : Ouest-Est, d'amont en aval.

Deux secteurs sont considérés : un premier assez perméable ($K = 10^{-4}$ m/s) représentant les aquifères du Pliocène marin sableux en amont, et ceux du Pliocène continental en aval. Il a été démontré que les ressources en eau étaient localisées pour l'essentiel dans ces deux formations géologiques.

Un second secteur, moins perméable ($10^{-9} < K < 10^{-6}$ m/s) représente les niveaux argileux du Pliocène continental ainsi que ceux des prismes marins quaternaires.

Les écoulements locaux des prismes sableux marins quaternaires et des terrasses alluviales ne seront pas intégrés au présent modèle qui s'intéresse plus spécifiquement aux flux à l'échelle du bassin sédimentaire.

Le pendage du modèle correspond à la pente de la plaine du Roussillon et à son prolongement en mer. Il est exprimé par la valeur "z" sur la figure 83.

Dans la partie continentale (gauche), les charges imposées sur la partie supérieure du modèle sont représentatives de la nappe superficielle libre s'écoulant au sein des formations quaternaires. Une charge est aussi imposée dans l'aquifère captif inférieur. Cette valeur correspond à la moyenne annuelle de la piézométrie à Millas.

Dans la partie offshore (droite), une charge égale à zéro représente le potentiel imposé par la mer. De plus, une concentration en eau dense est appliquée à l'ensemble de ces charges imposées. La différence de densité est égale à 2.8%.

Le régime d'écoulement calculé au cours des simulations est permanent.

5.2. Résultats interprétations

De nombreux problèmes de convergence ont été rencontrés lors des simulations : notamment, des phénomènes oscillatoires ont perturbé les résultats. Un coefficient de sous-relaxation a du être intégré aux calculs (dans Feflow : upwinding).

Les résultats des simulations sont présentés sur la figure 84. Dans la gamme des perméabilités testées pour l'aquiclude, une tendance identique se dessine. Plus la perméabilité de la partie supérieure de l'aquifère (aquiclude sur la figure 83) décroît et plus les flux d'eau douce ascendants se déplacent vers le domaine offshore. De même, lorsque la perméabilité de la partie supérieure de l'aquifère tend vers celle de la partie inférieure, la zone de drainance ascendante se concentre au niveau du domaine continental, à proximité du littoral.

Ces résultats resteront cependant qualitatifs en raison d'une divergence singulière des bilans, qui est fonction du choix du calcul de l'erreur et du coefficient de sous-relaxation.

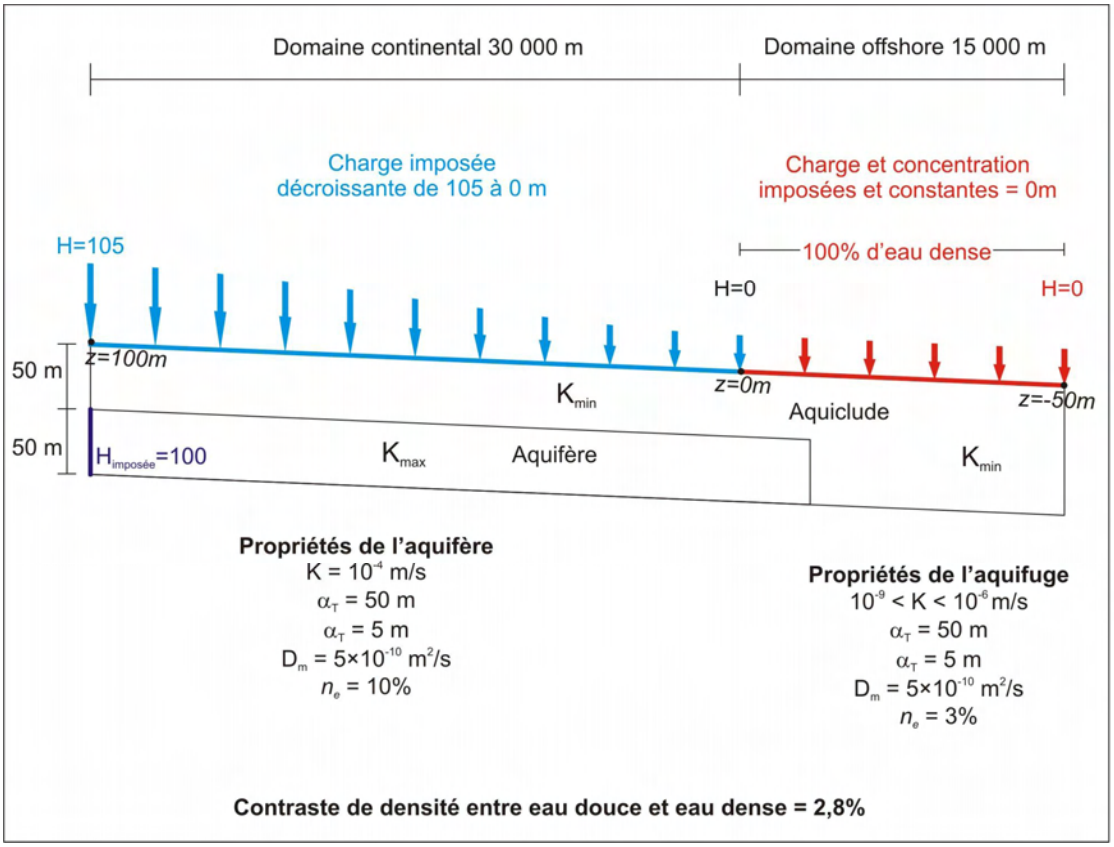


Figure 83 - Modèle de la coupe hydrogéologique du Roussillon

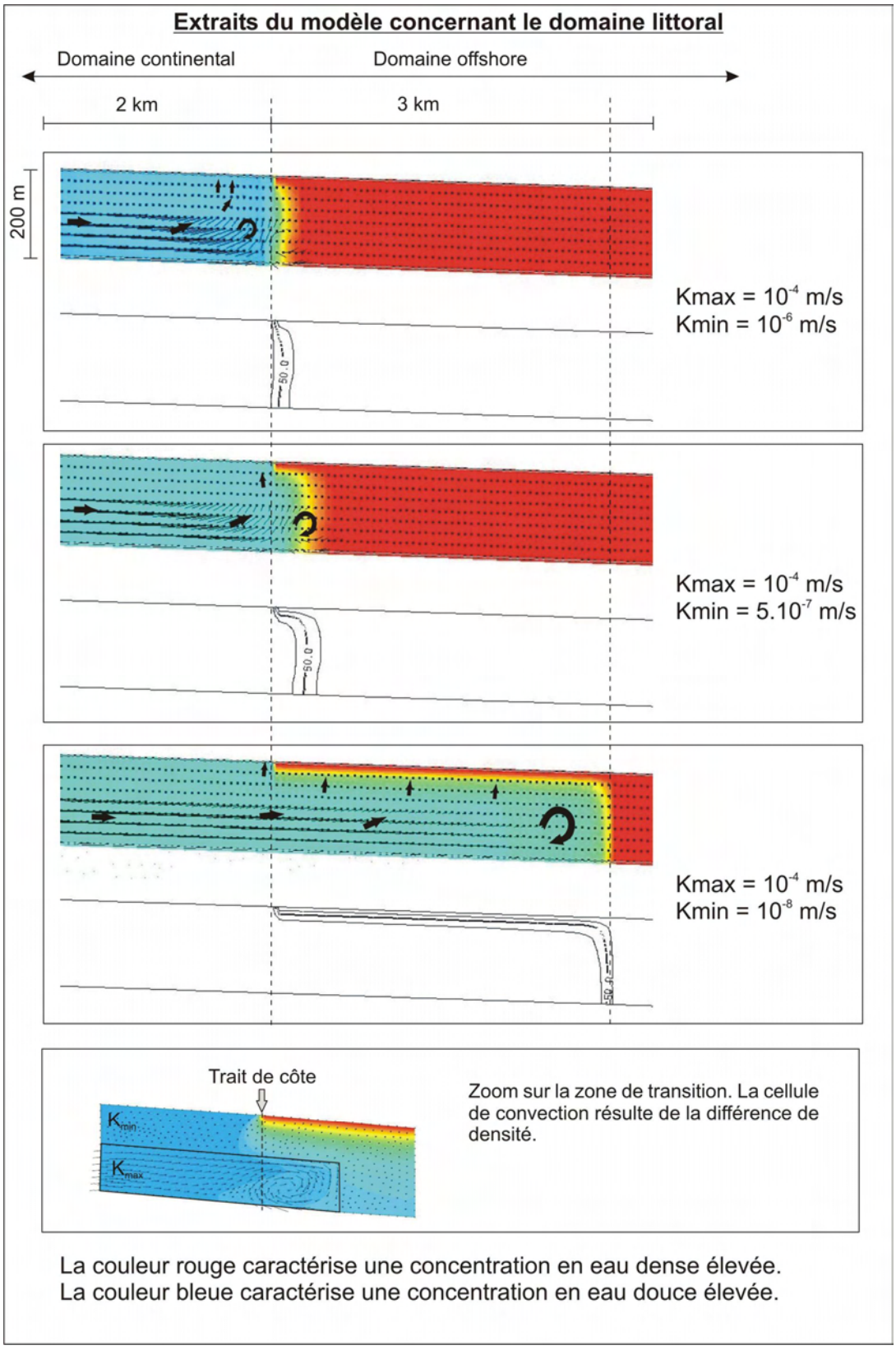


Figure 84 - Flux modélisés dans la zone littorale

*

* *

Modélisation et quantification hydrogéologique

La partie supérieure de l'unité sédimentologique du Pliocène continental est constituée d'une vingtaine de mètres d'argile. Ces sédiments isolent le prolongement probable des aquifères sous le domaine offshore d'un contact direct avec la mer.

A l'état naturel, la salinisation progressive de ces argiles est envisageable uniquement par diffusion moléculaire. En ce qui concerne les sédiments du domaine offshore, les flux de type Darcy engendrés par les gradients hydrauliques et densitaires sont largement inférieurs au régime de transport de type diffusion moléculaire pure.

La différence de charge entre le fond de la mer (H=0 m) et le premier aquifère captif du domaine offshore (H=1 m) est, naturellement, de l'ordre du mètre. Dans le cas d'une exploitation saisonnière intense, bien que la charge du premier aquifère du domaine offshore devienne négative, le régime de transport des solutés appartient toujours au domaine de la diffusion moléculaire pure.

Ce régime perdure aussi lorsque la charge est égale à -5 mètres pour des argiles dont la perméabilité avoisine 10^{-6} m/s. Toutefois, dans le cadre de la présente étude, les propriétés des sédiments argileux sont estimées et il ne peut-être envisagé d'élaborer une gestion des ressources en eau au vu de ces premiers résultats.

Les difficultés de convergence des calculs rencontrées dépendent vraisemblablement aussi de la nature du transport diffusif au sein des milieux peu perméables. En effet, un logiciel de type Feflow est plutôt dédié au transport advectif et dispersif. L'utilisation du logiciel PhreeqC, dédié au transfert de polluants par diffusion, eut été plus adaptée.

La seule certitude est que le risque d'intrusion saline via les sédiments peu perméables Quaternaire marin et Pliocène continental du domaine offshore est très peu probable dans l'état actuel de l'exploitation.

Conclusion générale : Synthèse des connaissances sur la gestion des aquifères côtiers et sur l'application à la plaine du Roussillon

1. Rappel de la problématique d'étude

L'intérêt que présentent les aquifères côtiers est multiple, tant du point de vue des gestionnaires des ressources en eau que du point de vue scientifique. La qualité des eaux souterraines comparée à celle des eaux de surface est souvent meilleure et le débit prélevé peut-être constant au cours d'une même année tant que les aquifères ne sont pas surexploités.

De même, les scientifiques trouvent, au sein des aquifères côtiers, une problématique singulière où l'écoulement des eaux est contraint par des différences de charge et de densité. On recense un nombre très important de communications scientifiques sur la thématique des ressources en eau des zones côtières, que cela soit dans des spécialités telles que la modélisation, la géophysique ou encore la hydrochimie.

Cependant, peu de productions scientifiques, mis à part Kooi [1999] et Kooi & Groen [2001, 2003], ont été consacrées spécifiquement à l'impact des structures et des dynamismes géologiques sur la position de l'interface eau douce / eau salée. Ce fait est lié à un défaut de connaissances géologiques sur cette zone de transition entre la mer et le continent.

La thématique de la géologie n'est pas souvent développée pour cette zone de transition, terrain hybride entre les études des "géologues du continent", des géologues pétroliers ou marins, exerçant loin des côtes, et des sédimentologues littoralistes, s'intéressant aux formations de surface. En toute logique, les spécialistes en géologie marine étudient le domaine offshore et travaillent peu avec les spécialistes du domaine continental.

Le présent travail de recherche repose sur une étude géologique portant tout particulièrement sur les corrélations entre le domaine continental et le domaine marin [Duvail, à paraître]. La méthodologie d'étude géologique s'organise autour de l'étude des modalités d'empilement (stacking pattern) [Cross *et al.*, 1993] et de la stratigraphie séquentielle.

La méthodologie développée dans le présent travail a consisté à convertir les données de stratigraphie séquentielle vers un modèle conceptuel hydrogéologique. Cette opération a été menée avec le maximum de précaution afin de mettre en évidence les points positifs et négatifs de la stratigraphie séquentielle. Ce modèle repose sur :

- l'étude statistique des points de prélèvement (distribution des crépines, productivité des forages…) ;
- l'analyse fonctionnelle (traitement du signal des chroniques piézométriques) ;
- l'hydrochimie des eaux ;
- la géophysique électrique ;

L'ensemble de ces données ont été synthétisées afin d'être utilisées pour l'élaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique des écoulements à l'échelle du bassin et de son prolongement vers le domaine offshore (figure 85).

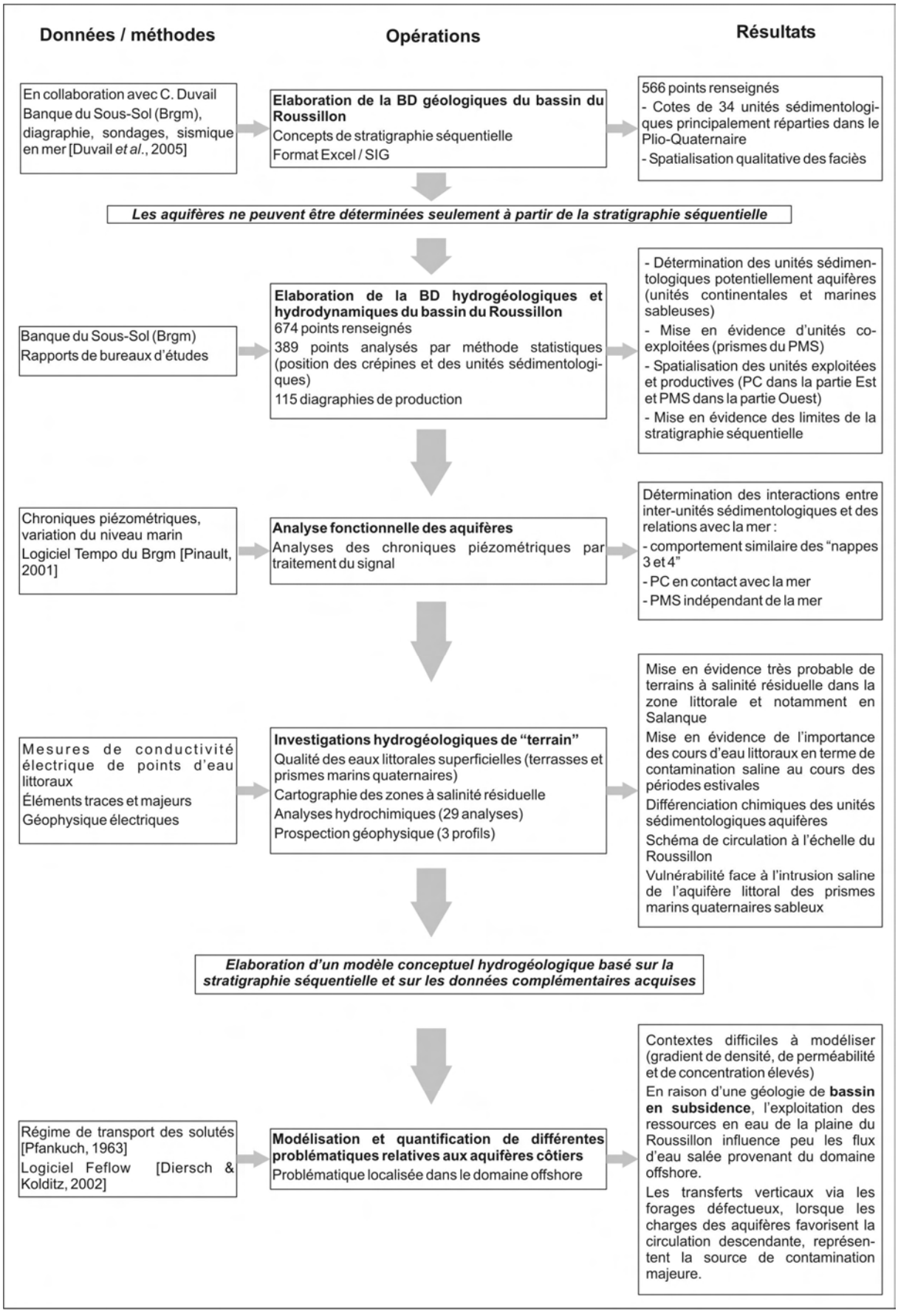


Figure 85 - Schéma de la méthodologie d'étude

2. Apport du travail de recherche sur les transferts de connaissances entre recherches géologiques et hydrogéologiques

Le dialogue entre géologues et hydrogéologues constitue une étape importante lors de la réalisation d'une étude hydrogéologique. Dans le cadre d'études scientifiques, ce dialogue est souvent rendu difficile en raison d'un "décalage" entre les connaissances des différents spécialistes.

Au cours du présent travail, il est apparu que les limites d'aquifères proposées à la suite d'une étude de stratigraphie séquentielle n'étaient pas adaptées à la détermination des formations aquifères. Cependant, au cours des différentes étapes de l'élaboration du présent travail, la stratigraphie séquentielle s'est révélée très pertinente, notamment lors de l'interprétation des analyses hydrochimiques. L'apport de la stratigraphie séquentielle au cours des différentes étapes d'une étude hydrogéologique est synthétisé dans le tableau 18.

D'une manière générale, les difficultés d'interactions existant entre la stratigraphie séquentielle et l'hydrogéologie sont dépendantes de **questions d'échelle**. Comme cela a été évoqué dans le premier chapitre de la seconde partie, Kostic *et al.* [2005] et Becht *et al.* [in press, corrected proof] mettent en évidence des relations intéressantes entre stratigraphie séquentielle et hydrogéologie sur une zone très restreinte (< 300 m^2), pourvue de nombreuses données.

Lors de la synthèse géologique d'un bassin, la stratigraphie séquentielle ne remplace pas une étude lithologique, uniquement basée sur la distribution des faciès et éventuellement des porosités, mais la complète.

Enfin, il est nécessaire de rappeler que l'élaboration d'un modèle de géologique basé sur des concepts de stratigraphie séquentielle nécessite d'une part, l'existence de nombreuses données (terrain, diagraphie, sismique, forages…) et d'autre part, un investissement de temps assez important.

Rappelons que malgré les investissements financiers considérables consacrés aux études pétrolières (reconnues pour être à la pointe de la technologie géologique), seuls 25 à 30 % des forages effectués actuellement sont productifs. Ce taux n'était que de 10 % 20 ans auparavant.

En comparaison, le taux élevé de succès des forages hydrogéologiques dépend du fait de la simplicité des aquifères : l'exploitation d'une nappe alluviale nécessite peu d'étude d'avant-projet. L'intérêt de la stratigraphie séquentielle ne réside donc pas dans la recherche de nouveaux aquifères, mais s'oriente principalement vers l'interprétation de phénomènes hydrogéologiques tels que la diffusion de pollution.

Apport de la stratigraphie séquentielle à…	Évaluation	Avantages par rapport à une étude lithologique classique	Insuffisances de la stratigraphie séquentielle
... la compréhension d'un bassin sédimentaire	Outil très pertinent qui permet de mettre en évidence les différents ensembles sédimentaires en fonction de la résolution géologique choisie (cycle de 1er, 2nd ou 3ème ordre) et des variations eustatiques. Les corrélations, basées entre autres, sur l'eustatisme mondial, permettent la comparaison fine de bassins à dynamique sédimentaire commune sur de grandes distances.	Les corrélations réalisées respectent les processus naturels de sédimentation. La continuité entre unités sédimentologiques est respectée. Ainsi, les zones de subsidence, axes de transit, et l'organisation générale des faciès est mieux contrainte.	Dans le cas d'une densité insuffisante de données géologiques, la part d'interprétation du sédimentologue peut devenir importante. De plus, en l'absence de datation, cette interprétation peut être variable d'un sédimentologue à une autre.
… la connaissance du domaine offshore	Outil pertinent car l'absence de forage n'autorise aucune interprétation lithologique. Cependant, la part d'interprétation est assez développée et ne doit pas être négligée en cas d'application hydrogéologique.	Trop peu de données pour aboutir à des corrélations lithologiques. En domaine offshore, les forages sont peu fréquents.	Idem que ci-dessus
… la détermination des formations potentiellement aquifères	Outil moyennement pertinent. Les grands ensembles aquifères sont déterminés. Peu d'apports par rapport à une étude lithologique classique ont été mis en évidence à l'échelle du bassin du Roussillon. La définition des unités sédimentologiques doit être contrainte par l'échelle de travail (*eg* : la définition d'unités sédimentologiques métriques n'est pas pertinente à l'échelle d'un bassin sédimentaire).	Au sein, de sédiments marins, les corrélations entre unités sableuses ou argileuses sont rendues plus fiables grâce à la stratigraphie séquentielle. En ce qui concerne les sédiments continentaux, seule une approche lithologique ponctuelle permet d'aboutir à des corrélations.	Afin, de respecter le modèle génétique du bassin sédimentaire, certaines différences de faciès sont négligées au cours de l'interprétation. Ces différences peuvent se révéler importantes en termes d'hydrogéologie (*eg* : sédiments palustres ou argileux productifs).
… l'élaboration des limites des aquifères / aquitards / aquicludes	Outil peu pertinent localement si l'échelle de travail est celle d'un bassin sédimentaire. La stratigraphie séquentielle tend à regrouper des formations géologiques dont les propriétés hydrodynamiques différent singulièrement.	La stratigraphie séquentielle permet de déterminer la continuité des formations sédimentaires à l'échelle d'un bassin.	Idem que ci-dessus
… la détermination de propriétés hydrodynamiques	Outil non adapté à l'échelle d'un bassin sédimentaire où les hétérogénéités de sédimentation au sein d'une même unité influencent les écoulements.	Pas d'avantage particulier, sauf dans le cas d'étude très localisée (< 300 m^2) de type Kostic *et al.* [2005].	Les corrélations sur de grandes distances négligent les variations locales de faciès et ne permettent pas d'extrapoler des propriétés hydrodynamiques.
… l'interprétation de propriétés hydrodynamiques	Outil assez bien adapté. L'origine de la productivité singulière d'un secteur est souvent expliquée par la stratigraphie séquentielle (dépôt centre, axe de transit…)	Les interprétations basées sur la stratigraphie séquentielle apparaissent plus pertinentes.	Les variations locales de productivité ne sont pas expliquées.
… l'interprétation de résultats hydrochimiques	Outil pertinent. Les origines des sédiments sont connues et les grands axes de circulation, bien appréhendés.	La stratigraphie permet de replacer le chimisme de l'eau dans un contexte de bassin sédimentaire.	Difficultés de trouver une eau caractéristique pour chaque unité sédimentologique définie.
… l'interprétation de résultats de géophysiques électriques en domaine littoral	Outil plus ou moins pertinent. Les doutes relatifs aux interprétations géophysiques dans le cas de sédiments envahis d'eau de mer sont rapidement levés dans le cas de sédiments marins. Outil moins pertinent dans le cas de formations hétérogènes.	Lorsque la continuité des faciès est connue (faciès marins uniquement). Les interprétations géophysiques sont facilitées par rapport à une unique connaissance lithologique.	Limite d'interprétation lorsque les faciès sont hétérogènes.

Tableau 18 - Détermination de l'apport de la stratigraphie séquentielle au cours de la présente étude hydrogéologique

3. Synthèse hydrogéologique de la plaine du Roussillon

A la fin du second chapitre de la première partie, quelques questions soulevées par des gestionnaires des ressources avaient été citées. En conclusion du présent travail de recherche, des éléments de réponse peuvent être apportés :

Quel serait l'impact d'une augmentation des prélèvements sur la position de l'interface eau douce / eau salée?

La position de l'interface eau douce / eau salée n'est pas directement influencée par les prélèvements en raison d'écoulements contrôlés par des phénomènes de diffusion au sein de formations géologiques très peu perméables. Un risque d'intrusion saline dans les aquifères captifs du Pliocène est très peu probable.

Quelle est la continuité des aquifères vers le domaine offshore, c'est-à-dire sous le niveau de la mer?

Les prismes marins quaternaires sont recoupés par le fond de la mer et envahis d'eau salée, mais ces aquifères ne constituent pas des ressources potentielles en eau potable.

La continuité des aquifères du Pliocène continental est difficilement prévisible car les géométries de ces aquifères hétérogènes n'ont pas été déterminées dans le cadre de l'étude géologique [Duvail, à paraître]. Cependant, de nombreux forages localisés sur la bande littorale présentent d'intéressantes productivités : en conséquence, il est logique de penser que ces aquifères se prolongent sous le domaine marin.

Enfin, les aquifères du Pliocène marin sableux s'étendent sur plusieurs kilomètres vers le domaine offshore. Cependant, la productivité de ces aquifères décroît d'amont en aval du bassin. Le long de l'axe central du bassin, au large de Canet, il est probable que ces aquifères deviennent assez rapidement peu perméables dans le domaine offshore en raison de faibles productivités reconnues au sein du domaine continental. En revanche, dans le Nord du bassin, le Pliocène marin sableux est encore productif, notamment dans la commune de St-Laurent-de-la-Salanque. Il est donc envisageable qu'il existe des prismes productifs en mer.

Quelles sont les relations et interactions entre les aquifères dénommés "nappe 3" et "nappe 4"?

Le chapitre traitant de l'analyse fonctionnelle des aquifères de la plaine du Roussillon fait le point sur les relations entre la "nappe 3" et la "nappe 4". La nappe 4 présente une inertie plus marquée que la nappe 3. Les transferts de pression entre ces deux nappes sont quasiment instantanés mais la méthodologie employée ne permet pas de quantifier l'ordre de grandeur des transferts de masse. Cependant, les résultats d'analyses hydrochimiques tendent à prouver que l'eau des aquifères localisées à une soixantaine de mètres de profondeur, est issue d'un mélange entre les eaux profondes (Pliocène marin sableux) et les eaux de subsurface (terrasses et prismes marins quaternaires).

De plus, les relations entre les nappes 3 et 4 ne peuvent être déterminées sans aborder l'origine géologique de la nappe 4, appartenant indifféremment aux sédiments du Pliocène continental ou à ceux du Pliocène marin sableux. En Salanque, la nappe 3 s'écoule toujours dans l'unité du Pliocène continental.

Enfin, que cela soit du point de vu chimique ou dynamique, les résultats des investigations menées au cours du présent travail de recherche établissent une certaine indépendance entre les eaux de la nappe 4, s'écoulant au sein du Pliocène continental et celles s'écoulant dans le Pliocène marin sableux.

Ces hypothèses pourront être vérifiées par des tests hydrodynamiques de type essai de pompage entre les nappes 3 et 4.

Les aquifères du Roussillon sont-ils surexploités?

D'après l'étude des niveaux piézométriques, il est difficile d'affirmer que la plaine du Roussillon est surexploitée. La baisse annuelle des niveaux piézométriques est en moyenne égale à cinq centimètres par an. Cette valeur est une moyenne et dépend de nombreux facteurs (recharge par les précipitations, recharge par les rivières, drainance, prélèvements…), qui chacun, pris à part ne peuvent être utilisés à des fins prévisionnelles. De plus, d'une année sur l'autre, les charges maximales ne sont pas constamment en baisse.

Il apparaît que seul un modèle hydrodynamique régional permettrait d'estimer finement les volumes maximaux à prélever pour préserver un bon état quantitatif et chimique des eaux souterraines de la plaine du Roussillon. En raison d'un manque de temps et de la complexité à transformer les données de stratigraphie séquentielle en termes hydrogéologiques, ce modèle n'aura pu être élaboré dans le cadre du présent travail de recherche. Cependant, suite à l'expérience acquise, les remarques suivantes peuvent être formulées :

> à l'échelle du bassin du Roussillon, l'exploitation en concomitance, ainsi que la continuité des prismes marins sableux rend difficile la distinction des différents prismes. Le toit et le mur de l'ensemble des prismes marins sableux peuvent être considérés pour élaborer la géométrie de l'aquifère captif du pliocène marin sableux. L'existence d'interlits argileux palustres pourra être représentée par un facteur d'anisotropie ;

> en ce qui concerne, le Pliocène continental, il est nécessaire de développer une méthodologie permettant de déterminer la géométrie des niveaux aquifères (géostatistiques, étude de la distribution des crépines). En l'état actuel des connaissances, il ne peut être envisageable de conserver le toit et le mur de cette unité sédimentologique contenant environ 75 % de matériel argileux ;

- dans le domaine continental, l'augmentation des concentrations en chlorures doit être appréhendée telle une problématique de pollution diffuse entre les aquifères superficiels contaminés (zones à salinité résiduelle, présence de cours d'eau littoraux) et les aquifères inférieurs sains ;
- le recensement des secteurs où les flux verticaux sont favorisés par la présence de forages abandonnés pourrait permettre de déterminer les termes sources de la contamination. Chesnaud *et al*. [2006] proposent une méthode originale d'identification des forages défectueux ;
- dans le domaine continental, les données de suivis en continu de la charge des forages d'AEP permettront de déterminer les zones où les flux descendants sont favorisés. A partir de la charge, du débit prélevé et des propriétés des aquifères, il sera intéressant de calculer l'extension et l'ampleur du cône de rabattement des différents forages. Ce calcul permet de déterminer les zones favorisant la drainance descendante. De plus, il pourra être conseillé d'optimiser les prélèvements de manière à réduire ces flux ;
- des données estimées ont été utilisées afin de déterminer la géologie du domaine offshore, les conclusions du travail de C. Duvail devraient permettre d'appréhender plus précisément la zone de transition entre la géologie du domaine continental et celle du domaine marin. De nouveaux tests sur simulations simples pourront être envisagés afin de préciser la vulnérabilité offshore des aquifères du Pliocène.
- les propriétés de formations géologiques peu perméables du domaine offshore pourraient être quantifiées par modélisation du transfert de pression de la marrée. Ces modélisations nécessitent toutefois une acquisition des variations de charges piézométriques au pas de temps horaire (ou inférieur). L'objectif de ce type de modélisation est de reproduire, par analyse de sensibilité, l'amortissement du signal de la marée au travers des horizons peu perméables du Pliocène continental et des prismes quaternaires marins argileux.

Enfin, il sera difficile d'élaborer un modèle prédictif pertinent tant qu'aucun phénomène d'intrusion saline n'aura été directement observé au sein des aquifères profonds. La modélisation d'un phénomène ne peut être efficace que dans le cas où ce même phénomène a pu être décrit.

4. Apport du travail de recherche sur la connaissance des aquifères côtiers

La démarche du présent travail de recherche a permis de mettre en évidence l'importance d'une étude conceptuelle géologique et hydrogéologique avant toute opération de modélisation d'aquifère côtier. Cette étape permet d'identifier précisément les problématiques réelles et de simplifier la compréhension des hydrosystèmes (*eg* : l'utilisation d'une modèle diphasique ne peut-être adapté dans le cas du Roussillon).

Dans le cas des d'aquifères côtiers localisés au sein de marges subsidentes (bassin d'Aquitaine, delta du Rhône…), tels que les systèmes deltaïques aggradants, une attention particulière doit être portée sur la lithologie des formations peu perméables qui sont supposées "isoler" les ressources en eau de la mer. Les processus de sédimentation en milieu continental ou marin sont importants afin de déterminer les conditions initiales du système. En effet, des argiles marines quaternaires saturées en eau salée, dont la diagenèse se déroule actuellement, ne pourront pas protéger efficacement les ressources littorales en eau douce.

Toutefois, dans le cadre du Roussillon, de nombreuses inconnues subsistent sur le degré de compaction des argiles et les processus de diagenèse qui influencent la porosité et l'évolution des propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives.

Dans le cadre du présent projet de recherche, il a été démontré que la vitesse d'écoulement, paramètre souvent prépondérant dans les problématiques de transport d'éléments dissous, influence peu la distribution des concentrations en solutés. En effet, les interprétations hydrogéologiques tendent à prouver, dans le cas d'aquifère captif isolé de la mer, que le phénomène de diffusion moléculaire est supérieur au transport résultant de la convection.

Bibliographie

Ababou R. & Al-Bitar A. (2004) - Random field approach to seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers: unconditional simulations and statistical analyses. *In* "geoENV 2004 - Fifth European Conference on Geostatistics for Environmental Applications." University of Neuchâtel, Switzerland, October 13-15, 2004, University of Neuchâtel, Switzerland, pp. 267-284.

Accord-cadre. (2003) - Connaissance des eaux souterraines de la plaine du Roussillon "Accord Cadre pour la définition d'un programme global de protection et de gestion concertée des ressources en eau de l'ensemble aquifère multicouche plio-quaternaire de la plaine du Roussillon". Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC), Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Chambre d'Agriculture 66 (CDA 66), Conseil Général des Pyrénées-Orientales (CG 66), Direction Départementale de l'Agriculture et la Forêt (DDAF), Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS), Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) & Claude Bénech, ancien responsable de l'Hydrologie et des Barrages à la DDAF, 47 p.

AERMEC & SOCOTEC. (2003) - Impact environnemental de l'hôtellerie de plein air en région Languedoc-Roussillon. Agence de l'Eau - SOCOTEC Consulting Sud Est, 8 p.

Aquilina L., Ladouche B. & Dorfliger N. (2005) - Recharge processes in karstic systems investigated through the correlation of chemical and isotopic composition of rain and spring-waters. *Applied Geochemistry*, **20**, 12, pp. 2189-2206.

Aunay B., Duvail C., Giordana G., Dorfliger N., Le Strat P., Montginoul M. & Pistre S. - A pluridisciplinary methodology for integrated management of a coastal aquifer. Geological, hydrogeological and economic studies of the Roussillon aquifer (Pyrénées-Orientales, France). *Life & Environment*, 56, 4 pp. 275-285.

Aunay B., Duvail C., Le Strat P., Dörfliger N., Lachassagne P. & Pistre S. (2004) - Importance of a high resolution lithological and geometrical knowledge for mediterranean coastal sedimentary aquifers management. Application to the Roussillon basin, South of France. *In* "Groundwater and saline intrusion (selected papers from the 18th SWIM, Cartagena, 2004)." L. Araguas, E. Custodio, & M. Manzano, (Eds.), pp. 259-271. **15**, Hydrogeologia y aguas subterraneas. IGME.

Auroux F., Noyer M.-L., Marchal J.-P. & Martin J.-C. (1992) - Modèle mathématique de gestion de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon. BRGM, Montpellier, R34 981 LRO 4S 92. 31 p.

Avci C. B. (1992) - Parameter Estimation for Step-Drawdown Tests. *Ground Water*, **30**, 3, pp. 338-342.

Badon-Ghyben W. (1888) - Nota in verband de voorgenomen putboring nabij Amsterdam (Notes on the probable results of the proposed well drilling near Amsterdam). *Tijdschrift van let Koninklijk Institut van Ingenieurs*, pp. 8-22.

Banton O. & Bangoy L. M. (1997) - Hydrogéologie. Multisciences environementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec / Aupelf, Québec. 460 p.

Bear J., Cheng A. H.-D., Sorek S., Ouazar D. & Herrera I. (1999) - Seawater intrusion in coastal aquifers - Concepts, methods and practices. Theory and applications of transport in porous media, Kluwer, Dordrecht, Boston, London. 624 p.

Becht A., Bürger C., Kostic B., Appel E. & Dietrich P. - High-resolution aquifer characterization using seismic cross-hole tomography: an evaluation experiment in a gravel delta. *Journal of hydrology*, In Press, Corrected Proof.

Bellin A. & Rubin Y. (1996) - A new random number generator for correlated properties. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, **10**, 4.

Birsoy Y. K. & Summers W. K. (1980) - Determination of Aquifer Parameters From Step Tests and Intermittent Pumping Data. *Ground Water*, **18**, 2, pp. 137-146.

Biscaldi R. (1964) - Hydrogéologie du bassin inférieur du Tech (de Céret à la mer). Thèse 3ème cycle, Faculté des Sciences et Techniques du Languedoc - CERH, Montpellier. 133 p.

Blaise M. & Marchal J.-P. (2007) - Surveillance de l'aquifère plioquaternaire du Roussillon. Observations réalisées en 2005 et 2006. BRGM, RP-54842-FR. 149 p.

Box G. E. P. & Jenkins G. M. (1976) - Time series analysis, forecasting and control. Revised Edition Holden Day, San Francisco. 575 p.

Calvet M. (1996) - Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne ; les Pyrénées Orientales. Documents du BRGM n°255 (3 tomes), Orléans. 1177 p.

Chabart M. (1996) - La recharge de l'aquifère multicouche du Roussillon et les conséquences d'un éventuel changement climatique sur la gestion de la ressource en eau (Pyrénées-Orientales). Documents du BRGM n°257, Orléans. 299 p.

Chesnaux R., Chapuis R. P. & Molson J. W. (2006) - A New Method to Characterize Hydraulic Short-Circuits in Defective Borehole Seals. *Ground Water*, **44**, 5, pp. 676-681.

Choudhury K., Saha D. K. & Chakraborty P. (2001) - Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain. *Journal of Applied Geophysics*, **46**, 3, pp. 189-200.

Clauzon G. (1990) - Restitution de l'évolution géodynamique néogène du bassin du Roussillon et de l'unité adjacente des Corbières d'après les données écostratigraphiques et paléogéographiques. *Paléobiologie continentale*, **XVII**, pp. 125-155.

Cross T. A., Baker M. R., Chapin M. A., Clark M. S., Gardner M. H., Hanson M. S., Lessenger M. A., Little L. D., Mc Donough K. J., Sonnfeld M. D., Valasek D. W., Williams M. R. & Writter D. N. (1993) - Application of high resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis. *In* "Subsurface Reservoir Characterization from outcrop Observations." R. Eschard, & B. Doligez, (Eds.), pp. 11-33. Technip, Paris.

Custodio E. (1997) - Seawater intrusion in coastal aquifers - Guidelines for study, monitoring and control. FAO Water Reports, FAO. 152 p.

Dazy J. (1965) - Etude hydrogéologique du bassin inférieur de la Têt. Thèse 3ème cycle, Faculté des Sciences et Techniques du Languedoc - CERH, Montpellier. 174 p.

Delhomme J.-P. (1978) - Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. *Bulletin du BRGM*, **III**, 4, pp. 341-375.

Depéret C. (1885) - Description géologique du bassin tertiaire du Roussillon. Faculté des Sciences, Paris. 136 p.

Diersch H.-J. G. & Kolditz O. (2002) - Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances in Water Resources*, **25**, 8-12, pp. 899-944.

Duvail C. (à paraître) - Mécanismes, géométries et architecture des séries plio-quaternaires autour du golfe du lion selon un continuum Terre-Mer. Thèse de doctorat, Montpellier II - BRGM - SysCoLag, Montpellier.

Duvail C., Gorini C., Lofi J., Le Strat P., Clauzon G. & dos Reis A. T. (2005) - Correlation between onshore and offshore Pliocene-Quaternary systems tracts below the Roussillon Basin (eastern Pyrenees, France). *Marine and Petroleum Geology*, **22**, 6-7, pp. 747-756.

Duvail C. & Le Strat P. (2000) - Évolution géodynamique du bassin du Roussillon : Analyse des profils sismiques calibrés par des sondages profonds de Elne1 et de Canet1. GEOTER, Montpellier, GTR/BRGM/12000-137. 23 p.

Duvail C., Le Strat P. & Bourgine B. (2001) - Atlas géologique des formations plio-quaternaires de la plaine de Roussillon (Pyrénées-Orientales). BRGM, Montpellier, BRGM/R-51197-FR. 44 p.

Eden R. N. & Hazel C. P. (1973) - Computer and graphical analysis of variable discharge pumping tests of wells. *Civil Engineering, Trans. Inst. Eng.*Australia, pp. 5-10.

Edington D. & Poeter E. (2006) - Stratigraphic Control of Flow and Transport Characteristics. *Ground Water*, **44**, 6, pp. 826-831.

Fetter C. W. (2001) - Applied hydrogeology. Prentice Hall. 598 p.

Forkasiewicz J. (1978) - Essais de puits par paliers de débit. Analyse et interprétation des données. BRGM, Orléans, 78SGN040HYD. 31 p.

Frenzel H. (1995) - A field generator based on Mejia's algorithm. Institut für Umweltphysik, University of Heidelberg, Germany.

Frohlich R. K., Urish D. W., Fuller J. & O'Reilly M. (1994) - Use of geoelectrical methods in groundwater pollution surveys in a coastal environment. *Journal of Applied Geophysics*, **32**, 2-3, pp. 139-154.

Gadel F. (1966) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des Corbières orientales (Région Est) et des plaines de Rivesaltes, La Palme - Caves et Sigean. Thèse 3ème cycle, Faculté des Sciences et Techniques du Languedoc - CERH, Montpellier. 289 p.

Gelhar L. W. (1976) - Effects of Hydraulic Conductivity Variations on Groundwater Flows. *In* "Hydraulic Problems Solved By Stochastic Methods; Proceedings, Second International IAHR Symposium on Stochastic Hydraulics." Lund, Sweden August 2-4, 1976, pp. 409-431. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.

Gilbert G. K. (1890) - Lake Bonneville. *Monograph - U. S. Geological Survey, Report*, **M0001**, pp. 438.

Ginsberg A. & Levanton A. (1976) - Determination of saltwater interface by electrical resistivity sounding. *Hydrological Science Bulletin*, **21**, pp. 561-568.

Giordana G.-A. (à paraître) - Efficacité économique et environnementale des instruments de gestion de l'eau pour réguler les prélèvements diffus dans les aquifères côtiers. Thèse de doctorat, Univ. Montpellier I - Lameta - Cemagref - BRGM - SysCoLag.

Glover R. E. (1964) - The patern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *In* "Sea Water in Coastal Aquifers." H. H. Cooper, F. A. Kohout, H. R. Henry, & R. E. Glover, (Eds.), pp. C32-C35. **U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1613-C**.

Got H. (1965) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Feuilla-Fitou (Corbières) et de la Salanque (Roussillon). Thèse de 3ème cycle, Faculté des Sciences et Techniques du Languedoc- CERH, Montpellier. 158 p.

Gottis M. (1958) - L'apport des travaux de la Compagnie d'exploration pétrolière (C.E.P.) dans la connaissance du bassin tertiaire du Roussillon. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **8**, pp. 881-883.

Guilleminot P. (2005) - Traitement des chroniques piézométriques enregistrées dans l'ensemble aquifère plio-quaternaire de la plaine du Roussillon (Pyrénées-Orientales, France). Rapport de DEA, Université Paul Sabatier, Toulouse 3. 49 p.

Haldorsen H. H. & Chang D. M. (1986) - Notes on stochastic shales: from outcrop to simulation model. *In* "Reservoir Characterization." L. W. Lake, & H. B. Caroll, (Eds.), pp. 445-485. Academic Press, London.

Hardenbol J., Thierry J., Farley M. B., Jacquin T., de Graciansky P.-C. & Vail P. R. (1998) - Mesozoic and Cenozoic Sequence Chronostratigraphic Chart. Mesozoic and Cenozoic Sequence Chronostratigraphic Framework of European Basins. *In* "Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins." SEPM Special Publication, pp. 786. **60**.

Herzberg B. (1901) - Die Wasserversorgung einiger Nordseebader (The water supply of parts of the North Sea coast in Germany). *Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, **44 et 45**, pp. 815-819 et 842-844.

Homewood P., Mauraud P. & Lafont F. (2002) - Best practice in Sequence Stratigraphy for Explorationists and Reservoir Engineers. TotalFinaElf éd., Pau. 81 p.

Hsu K. J., Ryan W. B. F. & Cita M. B. (1973) - Late Miocene Desiccation of the Mediterranean. *Nature*, **242**, 5395, pp. 240-244.

Jacob C. E. (1947) - Drawdown test to determine effect radius of artesian well. *Transactions*, **ASCE**, pp. 1047-1070.

Jacob C. E. (1950) - Flow of ground water. *In* "Engineering hydraulics." H. Rouse, Ed. **321-86**. John Wiley, New York.

Jenkins G. M. & Watts O. G. (1968) - Spectral analysis and its applications. Edition Holden Day, San Francisco. 525 p.

Jones B. F., Vengosh A., Rosenthal E. & Yechieli Y. (1999) - Geochemical investigations. *In* "Seawater intrusion in coastal aquifers." J. Bear, A. H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, & I. Herrera, (Eds.), pp. 51-71. **14**. Kluwer, Dordrecht, Boston, London.

Kawecki M. W. (1995) - Meaningful interpretation of step-drawdown tests. *Ground Water*, **33**, 1, pp. 23-32.

Kinzelbach W. & Rausch R. (1995) - Grundwassermodellierung - Eine Einführung mit Übung. ISBN 3-443-01032-6, Bornträger, Berlin Stuttgart.

Knudby C. & Carrera J. (2006) - On the use of apparent hydraulic diffusivity as an indicator of connectivity. *Journal of Hydrology*, **329**, 3-4, pp. 377-389.

Kolterman C. E. & Gorelick S. M. (1996) - Heterogeneity in sedimentary deposits: a review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. *Water Resources Research*, **32**, pp. 2617-2658.

Koltermann C. E. & Gorelick S. M. (1992) - Paleoclimatic Signature in Terrestrial Flood Deposits. *Science*, **256**, 5065, pp. 1775-1782.

Kooi H. (1999) - Competition between topography- and compaction-driven flow in a confined aquifer: Some analytical results. *Hydrogeology Journal*, **7**, 3, pp. 245-250.

Kooi H. & Groen J. (2001) - Offshore continuation of coastal groundwater systems; predictions using sharp-interface approximations and variable-density flow modelling. *Journal of Hydrology*, **246**, 1-4, pp. 19-35.

Kooi H. & Groen J. (2003) - Geological processes and the management of groundwater resources in coastal areas. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw*, **82**, 1, pp. 31-40.

Kostic B., Becht A. & Aigner T. (2005) - 3-D sedimentary architecture of a Quaternary gravel delta (SW-Germany): Implications for hydrostratigraphy. *Sedimentary Geology*, **181**, 3-4, pp. 147-171.

Krishnan S. & Journel A. G. (2003) - Spatial Connectivity: From Variograms to Multiple-Point Measures. *Mathematical Geology*, **V35**, 8, pp. 915-925.

Labaune C. (2005) - Evolution du littoral du Languedoc Roussillon : évolution des stocks sédimentaires et de leurs dynamiques sous l'effet des facteurs physiques. Université de Perpignan.

Ladouche B., Aquilina L. & Dörfliger N. (soumis à Applied Geochemistry) - Chemical and isotopic investigation of rain water in southern France (1996-2002): implication for karstic input signal.

Ladouche B., Duvail C., Marchal J.-P., Le strat P. & Chery L. (2003) - Détermination de l'origine des nitrates dans l'aquifère du Roussillon par le traçage isotopique des sources d'azote (Commune de Pia, Pyrénées Orientales). Rapport BRGM/RP-52745-FR. 51 p.

Ladouche B., Le Bec C., Aquilina L., Bakalowicz M., Souchu P., Dörfliger N. & Anus S. (2000) - Recherche de l'origine de la contamination bactériologique de l'étang de Sales-Leucate. BRGM, Montpellier - Orléans, BRGM/RP-50003-FR. 64 p.

Ladouche B. & Weng P. (2005) - Hydrochemical assessment of the Rochefort marsh: Role of surface and groundwater in the hydrological functioning of the wetland. *Journal of Hydrology*, **314**, 1-4, pp. 22-42.

Larue D. K. & Legarre H. (2004) - Flow units, connectivity, and reservoir characterization in a wave-dominated deltaic reservoir; Meren reservoir, Nigeria. *AAPG Bulletin*, **88**, 3, pp. 303-324.

Lopez S., Cojan I. & Galli A. (2001) - Modélisation de réservoirs fluviaux chenalisés méandriformes une approche génétique et stochastique (Modeling of the channeled fluvial reservoirs with meander features : a genetic and stochastic approach). *In* "8e congrès français de sédimentologie." Orléans, 12-14 novembre 2001, France, Orléans, 12-14 novembre 2001, France, 37, pp. 231-232.

Mangin A. (1981) - Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *C.R.A.S., Paris*, **série II**, 293, pp. 1011-1014.

Manheim F. T., Krantz D. E. & Bratton J. F. (2004) - Studying ground water under delmarva coastal bays using electrical resistivity. *Ground Water*, **42**, 7, pp. 1052-1068.

Marchal J.-P. & Blaise M. (2004) - Actualisation de la synthèse hydrogéologique en région Languedoc-Roussillon. Rapport méthodologique. BRGM/RP-53020-FR. 31 p.

Marchal J.-P. & Chery L. (1995) - Contamination marine de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon (Pyrénées-Orientales). BRGM, BRGM R38604. 85 p.

Marchal J.-P. & coll. Baudon-Juvet A. (1991) - Caractéristiques hydrodynamiques des systèmes aquifères du département des Pyrénées-Orientales. BRGM, Montpellier, R33735LRO91. 7 p.

Marchal J.-P., coll. Garin H. & Moulin S. (1990) - Actualisation des données hydrogéologiques. BRGM, Montpellier, R31805LRO4S90. 20 p.

Marchal J.-P., Plegat R., Benech C., Biscaldi R., Bourgeois M., Juncy G., Ramil F. & Sauvel C. (1976) - Plaines du Roussillon. *Carte hydrogéologique de la France*. BRGM.

de Marsily G. (1981) - Hydrogéologie quantitative. Masson. Paris. 215 p.

de Marsily G., Delay F., Gonçalvès J., Renard P., Teles V. & Violette S. (2005) - Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology Journal*, **13**, 1, pp. 161-183.

Matheron G. (1967) - Eléments pour une théorie des milieux poreux. Masson, Paris.

Matheron G., Beucher H., de Fouquet C., Galli A., Guerillot D. & Ravenne C. (1987) - Conditional simulation of the geometry of fluvio-deltaic reservoirs. *In* "SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Reservoir Engineering." 27-30 September 1987, Dallas, Texas, pp. 591-599.

MEDD - Banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie. http://www.hydro.eaufrance.fr/

Montginoul M., Rinaudo J.-D., de Lajonquiere Y. L., Garin P. & Marchal J.-P. (2005) - Simulating the impact of water pricing on households behaviour: the temptation of using untreated water. *Water Policy*, **7**, 5, pp. 523-541.

Nassir S. S. A., Loke M. H., Lee C. Y. & Nawawi M. N. M. (2000) - Salt-water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys. *Geophysical Prospecting*, **48**, 4, pp. 647-661.

Neville C. J. & Tonkin M. J. (2004) - Modeling Multiaquifer Wells with Modflow. *Ground Water*, **42**, 6-7, pp. 910-919.

Noetinger B., Artus V. & Zargar G. (2005) - The future of stochastic and upscaling methods in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, **13**, 1, pp. 184-201.

Nowroozi A. A., Horrocks S. B. & Henderson P. (1999) - Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied Geophysics*, **42**, 1, pp. 1-22.

Oude Essink G. H. P. (2001) - Improving fresh groundwater supply-problems and solutions. *Ocean & Coastal Management*, **44**, 5-6, pp. 429-449.

Paola C. (2000) - Quantitative models of sedimentary basin filling. *Sedimentology*, **47**, s1, pp. 121-178.

Paternot C. (1964) - Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin du Réart. Thèse 3ème cycle, Faculté des Sciences et Techniques du Languedoc - CERH, Montpellier. 103 p.

Person M. A., Raffensperger J. P., Ge S. & Garven G. (1996) - Basinscale hydrogeologic modeling. *Reviews of Geophysics*, **34**, 1, pp. 61- 87.

Pfankuch H.-O. (1963) - Contribution à l'étude des déplacements de fluides miscibles dans un milieu poreux. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, **2**, 18, pp. 215-270.

Pinault J. L. (2001) - Manuel utilisateur de TEMPO - Logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. BRGM, RP51459-FR. 223 p.

Plan-Bleu. (2005) - Méditerranée - Les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement. Éditions de l'Aube et Plan Bleu. Dirigé par Guillaume Benoit et Aline Comeau, PNUE/ Plan d'action pour la Méditerranée, Valbonne. 432 p.

Plégat R. & Pouzancre H. (1971) - Influences des eaux salées marines sur les nappes aquifères du Roussillon. CERGA, Montpellier, Dossier n°147. 50 p.

Poston S. W., Berry P. & Molokwu F. W. (1983) - Meren field - The geology and reservoir characteristics of a nigerian offshore field. *Journal of Petroleum Technology*November, pp. 2095-2104.

Proce C. J., Ritzi R. W., Dominic D. F. & Dai Z. (2004) - Modeling Multiscale Heterogeneity and Aquifer Interconnectivity. *Ground Water*, **42**, 5, pp. 658-670.

Renard P. & de Marsily G. (1997) - Calculating equivalent permeability: a review. *Advances in Water Resources*, **20**, 5-6, pp. 253-278.

Séranne M. (1999) - The Gulf of Lion continental margin (NW Mediterranean) revisited by IBS : an overview. *In* "The Mediterranean Basins : Tertiary extension within the Alpine Orogen." B. Durand, L. Jolivet, F. Horvath, & M. Séranne, (Eds.), pp. 15-36. **156**. Geological Society Special Publications, London.

Slatt R. M. & Hopkins G. L. (1990) - Scaling geologic reservoir description to engineering needs. *Journal of Petroleum Technology*, **February**, pp. 202-210.

Sola C. (1977) - Contribution à l'étude hydrogéologique des nappes aquifères profondes du Pliocène du bassin inférieur de la Têt en Roussillon. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques du Languedoc - CERH, Montpellier. 67 p.

Stolz A.-K. & Graves R. M. (2005) - Choosing the Best Integrated Model for Reservoir Simulation. *In* "AAPG International Conference and Exhibition, 11-14 September 2005." Paris, France, Paris, France. Extended Abstract No. 99042.

Strebelle S. (2002) - Conditional Simulation of Complex Geological Structures Using Multiple-Point Statistics. *Mathematical Geology*, **V34**, 1, pp. 1-21.

Sun T., Meakin P. & Schwarz T. J., K. (1996) - A simulation model for meandering rivers. *Water Resources Research*, **32**, 10 - 96WR00998, pp. 3251.

Teles V., Bravard J. P., De Marsily G. & Perrier E. (2001) - Modelling of the construction of the Rhône alluvial plain since 15000 years BP. *Sedimentology*, **48**, 6, pp. 1209-1224.

Teles V., Delay F. & de Marsily G. (2004) - Comparison of genesis and geostatistical methods for characterizing the heterogeneity of alluvial media: Groundwater flow and transport simulations. *Journal of Hydrology*, **294**, 1-3, pp. 103-121.

UNEP/MAP/MEDPOL. (2001) - Meeting of the Informal Network on Regulation Compliance and Enforcement. Sorrento, 15-17 mars 2001.

Warren J. E. & Price H. S. (1961) - Flow in heterogeneous porous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **I**, pp. 153-169.

Zinn B. & Harvey C. F. (2003) - When good statistical models of aquifer heterogeneity go bad: A comparison of flow, dispersion, and mass transfer in connected and multivariate Gaussian hydraulic conductivity fields. *Water Resources Research.*, **39**, 3, pp. 1051.

Annexes

La pagination des publications ne correspond pas à la pagination de l'ensemble des annexes.

Annexe 1 - Communications et publications sur le développement d'une approche pluridisciplinaire pour la gestion optimisée des ressources en eau.....5
Annexe 2 - Localisation des communes du Roussillon.....7
Annexe 3 - Historique de la BSS 9
Annexe 4 - Cartes de profondeur et d'épaisseur des unités sédimentologiques du bassin du Roussillon 17
Annexe 5 - Cartes de faciès des formations argileuses et palustres du bassin du Roussillon ..53
Annexe 6 - Cartes de faciès de l'unité sédimentologique du pliocène continental (PC) 59
Annexe 7 - Données brutes de la BD hydrogéologique 71
Annexe 8 - Exploitation concomitante des unités sédimentologiques 73
Annexe 9 - Transmissivités de la plaine du Roussillon [Marchal, 1990].....75
Annexe 10 - Depôtcentres et structuration pliocènes déduits des cartes isohypses et isopaques [Duvail *et al.*, 2001].....77
Annexe 11 - Variations piézométriques des aquifères de la plaine du Roussillon 79
Annexe 12 - Présentation du logiciel TEMPO.....93
Annexe 13 - Cartographie des sources potentielles de salinité.....95
Annexe 14 - Protocole d'échantillonnage en vue d'analyses chimiques.....97
Annexe 15 - Résultats brutes des analyses chimiques.....99
Annexe 16 - Méthodes des panneaux électriques 101

Annexe 1 - Communications et publications sur le développement d'une approche pluridisciplinaire pour la gestion optimisée des ressources en eau

Les concepts méthodologiques abordés dans les notes ci-dessous représentaient un déroulement "idéal" des travaux de recherche. En raison de difficultés relatives à l'acquisition de diverses données, ces concepts ne correspondent plus forcément à la méthodologie suivie au cours des trois thèses.

Un état des lieux de la surexploitation des aquifères côtiers est présenté dans le 3ème article.

A **pluridisciplinary methodology for integrated management of a coastal aquifer. Geological, hydrogeological and economic studies of the Roussillon aquifer (Pyrénées-Orientales, France)**. Aunay, B., Duvail, C., Giordana, G., Dorfliger, N., Le Strat, P., Montginoul, M. & Pistre, S. *Life and Environment - Vie et Milieu*. 56 (4), 2006.

A multidisciplinary approach for assessing the risk of seawater intrusion in coastal aquifers: the case of the Roussillon Basin (France). Aunay B., Dörfliger N., Duvail C., Grelot F., Le Strat P., Montginoul M. & Rinaudo J.-D. Aquifer Systems Management: Darcy's legacy in a world of impending water shortage (Chery L. and de Marsily G. *eds*). Selected papers from the international meeting of the International Association of Hydrogeologist, Dijon, France, 30 May-1 June 2006. AA.balkema publishers.

Les défis pour une gestion durable de l'eau des aquifères côtiers. Application au bassin du Roussillon. Aunay B., Duvail C., Giordana G., Dörfliger N., Le Strat P., Montginoul M. & Rinaudo J.-D. Accepté pour publication dans *La Documentation Française*, à la suite du "Colloque Prospective Littoral", Paris, 1-2 mars 2005. (épreuve non corrigée)

VIE ET MILIEU - LIFE AND ENVIRONMENT, 2006, 56 (4) : 275-285

A PLURIDISCIPLINARY METHODOLOGY FOR INTEGRATED MANAGEMENT OF A COASTAL AQUIFER
Geological, hydrogeological and economic studies of the Roussillon aquifer (Pyrénées-Orientales, France)

B. AUNAY [1,2], C. DUVAIL [1,3], G. GIORDANA [4,5], N. DOERFLIGER [1], P. LE STRAT [1], M. MONTGINOUL [4], S. PISTRE [2]

[1] Brgm, Water Department, 1039, rue de Pinville, 34 000 Montpellier, France
[2] Hydrosciences Montpellier, UMR 5569, University of Montpellier II, France
[3] Laboratoire "Dynamique de la Lithosphère" UMR 5573 CNRS, University of Montpellier II, France
[4] Cemagref, UMR G-EAU, Montpellier , France
[5] Lameta, UMR 5474, University of Montpellier I, France
Corresponding author: b.aunay@brgm.fr

GEOLOGY
HYDROGEOLOGY
EXPERIMENTAL ECONOMY
WATER MANAGEMENT STRATEGIES
SEAWATER INTRUSION
COASTAL AQUIFER
ROUSSILLON BASIN
MEDITERRANEAN SEA
GROUNDWATER

ABSTRACT. – In order to study Mediterranean coastal water management, a pluridisciplinary approach is developed. Reservoir geology and some of its tools, used in oil prospecting, are applied to build a detailed sedimentary model. The analysis of depositional environments and sedimentary process allows the correlation of pre-existing data (outcrop, borehole, and seismic profile) using Genetic stratigraphy (onshore domain) and seismic stratigraphy (offshore domain). The interpretation results in a better knowledge of the sedimentary geometries following correlations between onshore and offshore domains. It is thus possible to differentiate the coastal groundwater aquifers precisely and to establish their relative connections. At the same time, hydrogeological investigations such as hydrochemistry and geophysical prospecting allow us to elaborate the hydrogeological conceptual model of the case studies. Variable-density flow and solute transport simulations constitute the hydrogeological work. Experimental economy constitutes the third part of this integrated methodology. It assesses the effectiveness of institutional arrangements to cope with aquifer overexploitation. Feed-back from these three fields of research will also authenticate our methodology. This approach applied on Roussillon basin (south-west of the French Mediterranean coastline) could be exported to many other coastal areas.

INTRODUCTION

From time immemorial, littoral zones are considered as important places for economic development. Today, 60% of the world population lives close to the sea (less than 60 kilometres). Economic development like population growth, tourism development and cultivated land expansion require more and more quantity of water in these coastal areas. Low quality surface water could be directly used by industry and farmer while drinking water must be treated and/or should be supplemented by groundwater. However, exploitation of deep natural water resources is problematic in coastal areas because of the geological, hydrogeological and economic context.

Most of the time, geology of coastal areas is complex because of the influence of eustasy, like a pronounced boundary condition. Aquifers, as a function of geology, are multilayered and vulnerable to seawater intrusion; conflicts of interest and overexploitation of aquifers can lead to economic losses. Thus, any conscientious coastal aquifer management strategy cannot disregard one of these aspects.

Consequently, the aim of our integrated study is to propose a new methodology to elaborate optimised groundwater management taking care of the geological, hydrogeological and economic context of coastal area. Then, the innovative side of our work lies in evaluating the hydrogeological and economic impacts of selected management strategies given a particular context (geological, hydrogeological and economic). In consequence, a pluridisciplinary approach is unavoidable. In this way, economical study needs quantitative hydrogeology to build realistic experimentation; and hydrogeological modelling needs scenario proposition stemming from socio-economic context. In the same way, geology assists hydrogeological studies by providing details of aquifer structure and architecture; and hydraulic head evolution, which could prove connections between different sedimentary units.

Since the main aim of the study is to develop a methodology which could be applied to other sites as well, the selected study area must be representative of the Mediterranean coastal areas. The selected study area for carrying out this interdisciplinary approach is the Roussillon basin, located along the southernmost part of the French Mediterranean coast, near the Spanish border. This 700 square kilometres sedimentary basin is bordered by the foothills of the Pyrenean Mountains in the South, the Corbières karst region in the North and the Mediterranean Sea in the East (Fig. 1). Influenced by "the Golfe du Lion" rift-

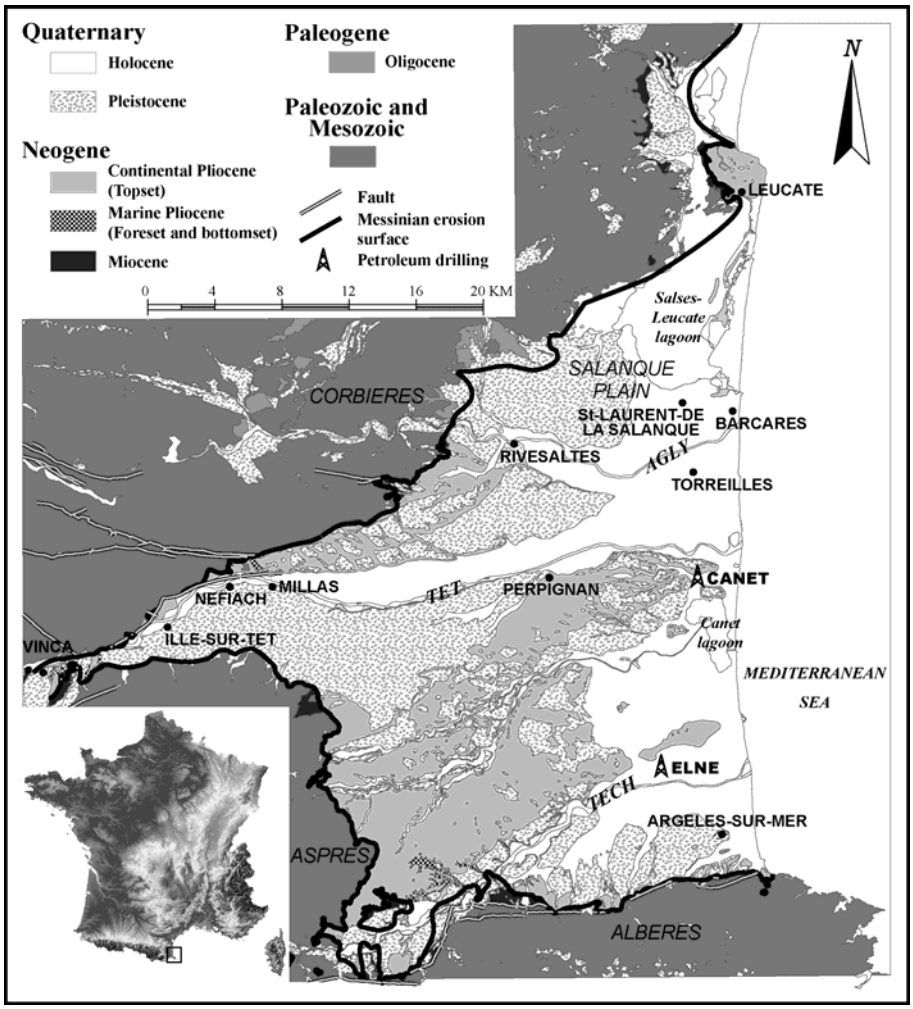


Fig. 1 – Geological view of the Roussillon basin

ing, by the Messinian salinity crisis and by Quaternary glacio-eustatic cycles, geology of the case study has undergone and recorded majority of high recent geological events. Also, the hydrogeological problem is common for this coastal area: water of the Roussillon basin is intensively used as water supply, for coastal tourism and its related activities and in agriculture for irrigating orchards and vegetable crops. Roughly speaking, the water needs of the Roussillon plain are satisfied by a well developed irrigation channel network (surface water) and a highly productive groundwater system. Decline of water tables which has been observed during the last 20 to 30 years is expected to continue as the population keeps growing and the farming sector progressively leaves ancient surface canal irrigation systems and relies more on groundwater use. As overexploitation could lead to local and then general seawater intrusion, policy makers are increasingly looking for means to reduce water abstraction and increase alternative water supply.

As a consequence of climate changes and the demographic growth, this situation could be worst in the future. The high population growth rate observed during the last 20 years, seems to keep accelerating (population has grown from 392 000 in year 1999 to 413 000 in 2005) and with an anticipated higher water demand for household consumption. In addition, climatic variations such as uncertainty about rain falls (principal recharge factor of the superficial layer) in addition to the existing problems such as high number of dry years, increases the dependence and demand of groundwater resources.

The paper develops the methodology related to its three major components (geology, hydrogeology and experimental economy) without further detailed explanation about the scenario conception issues. The paper is organised as follows: the first part deals with geological results obtained from the methodology applied on Roussillon basin. Coastal aquifer problematic and hydrogeological background are tackled in the second part. Then, experimental socio-economical aspects and associated tests are presented.

GEOLOGICAL APPROACH OF THE ROUSSILLON BASIN

The primary geological work involves the determination and location of the sedimentary units, and particularly those that could be potential aquifers. Below, we will see how these sedimentary units are spatially characterised by both their internal and external structure.

Trace the history of the Roussillon basin

Mediterranean coastal areas have many common geological characteristics because of the Messinian salinity crisis existence (Hsü *et al*. 1973). Defined by the drying up of the Mediterranean Sea in late Miocene this main event is linked to the closing of the Strait of Gibraltar (stopping connections between the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean (Benson *et al*. 1991)). Immediate effect was digging out of deep canyons by fluvial erosion (Clauzon, 1982, Guennoc *et al*. 2000). After Pliocene sea return, the huge accommodation explains on one hand the atypical Pliocene sedimentation and, on the other hand the homogeneity of Pliocene sediments structure all around the Mediterranean Sea.

The first aim of our geological study is to test the use of BRGM's (French Geological Survey) public underground database (French regulation requires to declare all wells deeper than 10 m). The aim of the exercise was to see if it was possible to build a high-resolution sedimentary model based on this existing database. More than one thousand wells having underground geological information have been taken into account. The first attempt of lithostratigraphic model (Duvail *et al*. 2001) arises from Clauzon's sedimentation model (Clauzon 1990) and new field works (Le Strat *et al*. 2001). This attempt gives a rough sketch of the basin lithostratigraphical structures. Geological basin analysis was further refined using geophysical borehole logging (gamma-ray and resistivity). First interpretative cross-sections arise, straight away correlated with offshore seismic petroleum profiles (Duvail *et al*. 2005).

Then, the "high-resolution" correlations were applied to the whole sedimentary basin integrating the assessment of 638 wells. This article summarises geological analysis methodology and presents the sedimentary model (Fig. 2): space distribution sketch of the Pliocene and Quaternary sedimentary units for the Roussillon basin.

Methodology

Geological methodology uses 6 main steps: they are (1) field observations leading to (2) geological map of the Roussillon basin and helping in (3) onshore borehole analysis. This analysis takes similar action with offshore seismic profile assessment. Correlations between offshore (4) and onshore domains (5) taking care of the correctness of all the selected data and without neglect (6) stacking evolutions patterns and chronostratigraphic framework. Finally, 2D cross-sections shows (7) spatial distribution of sedimentary prisms (Fig. 2) while isohypse maps (3D) outline the depth and thickness of sedimentary units.

Outcrop observation analysis: Lithology, sedimentary structure and biological contents make up sedimentary facies description. This step is based on many pre-existing field works and new observations/analysis, in the framework of a BRGM's project: "Geological map of France". Depositional environments are given according to the principles of sedimentary facies models (Walker 1984) and facies associations.

Geological map: All geological formations of the Roussillon basin are summarised in a lithostratigraphic synthesis (Duvail *et al*. 2001) based on the sedimentological model selected (Clauzon 1990) after the outcrop observations. This document constitutes the foundation stone of geological interpretations presented below.

Analysis of onshore well logging of the Roussillon basin: Boreholes having well logging are used as benchmark: the logged wells comprise mainly of public drinking water supply wells and two deep drilling wells (Elne 1 & Canet 1) from Petroleum Company. In total, 94 well logs are interpreted and 10 "high-resolution" cross sections were set up. With the aim of keeping maximum consistency, distance between two adjacent well logs must always be lower than 4 km in the case of Pliocene correlations or 2 km for Quaternary formations.

High-resolution geological study is based on genetic stratigraphy concepts (Guillocheau 1991, Homewood *et al*. 1992, Cross *et al*. 1993) which identify little stratigraphic units with isochronal boundaries. Depositional environments are given by usual methodology for well logging interpretation (Serra 1985, 1989, Walker 1984), helped by cutting description associated with outcrop observations. Paleoenvironmental evolutions define the stacking pattern. They are inferred from vertical sequences of depositional environments. These evolutions could be landward (transgressive) or seaward (regressive).

Cross sections provided from correlations between well logs allow an extrapolation to borehole without any logging. Consequently, more than 500 coherent lithological descriptions from driller observations are integrated in a GIS: top and base of 41 sedimentary units have been filled in.

Analysis of offshore seismic section: Data come from (i) "Total" petroleum company for continental margin scale and from (ii) University of Perpignan (BDSI) for superficial coastal prism. Geometries (Duvail *et al*. 2005, Labaune 2006) inferred from sequence stratigraphy concepts (Vail *et al*. 1987, Posamentier *et al*. 1988) in which evolution of stacking patterns is determined by both sharp study of offlap-break stacking patterns (Homewood *et al*. 2002) and kind of sedimentary surfaces.

Correlations between onshore and offshore domains: The correlation methodology consisted of examining the stacking

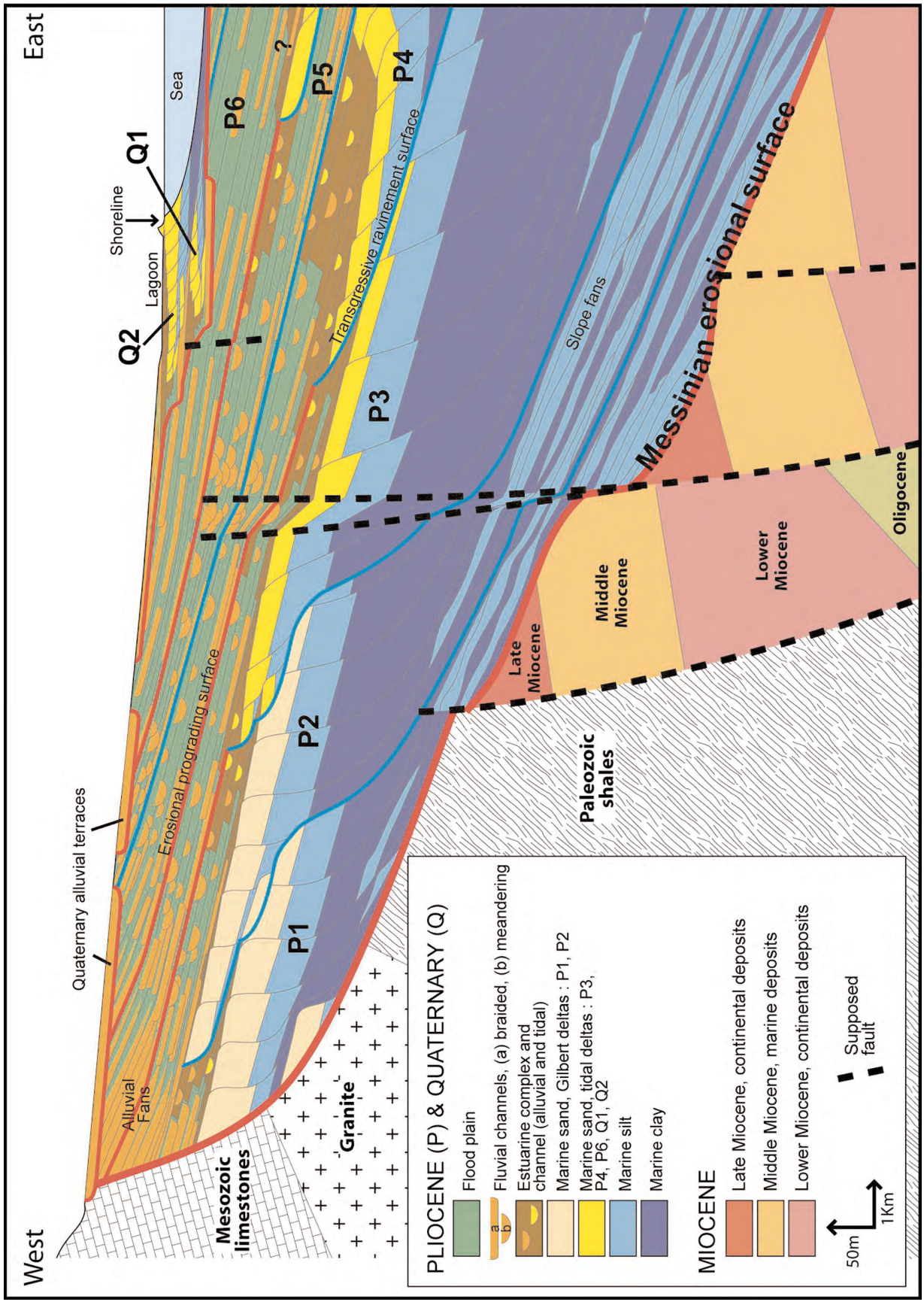


Fig. 2 – Schematic cross-section of the sedimentary fill-in of the Roussillon basin, providing from high-resolution onshore-offshore correlations based on outcrop observations, well logging, lithological borehole descriptions and seismic survey (BDSI and Total).

patterns between the onshore and offshore domains, considering most rigorous stratigraphic framework. This included the stacking patterns of the genetic units identified on the onshore well logs and the stacking patterns of the offlap breaks identified on the seismic profile offshore.

Roussillon basin summary illustration: General theoretical cross-section of the Roussillon basin shows Pliocene and Quaternary prisms with their internal geometry function of the sedimentary facies distribution (Fig. 2).

In the onshore domain, six prisms are identified: marine facies of P1 to P4 are well recognised while P5 and P6 show only continental facies. Quaternary sedimentation expressed by alluvial terraces, exists also with high sea level prisms. Q1 corresponds to the start of an interglacial stage particularly preservation (Salanque plain) during Pleistocene. Holocene Coastal sedimentation is represented by Q2. In onshore domain, 41 units are individualised by prisms geometry and sedimentary facies distribution. In the same way, isohypse maps point out facies distribution.

Multi-scale approach characterises original features of the geological study: outcrop observations and well logging (metric scale), high-resolution seismic surveying (decametric scale) and oil seismic prospecting (kilometric scale) are correlated with the best well-defined coherence. So, this Plio-Quaternary basin analysis underlines geological events of a Mediterranean coastal plain for a scattered scale as regional/margin scale. Moreover, it suggests new methodology for use and validation of geological database characterised by numerous kind of data of different quality.

ROUSSILLON'S GROUNDWATER: A COMPLEX MULTILAYERED COASTAL AQUIFER

Water management and preservation begins by increasing resource knowledge. Recording of water level and water quality time series makes up the first step to understand the functioning of coastal aquifers. Of course, chemical and hydraulic head evolutions must be integrated in a good geological framework. In the case of the Roussillon multilayered aquifer, geological database mentioned above is implemented by screening information: in fact, detailed and exact geological information is available in most cases for water abstraction wells. This information is of the utmost importance to the Roussillon basin considering recently as a multilayered aquifer (Chabart 1996). Historically, a numerical hydrodynamic model of the Roussillon basin was already elaborated (Auroux 1992), but no information were available about salt water intrusion risk and all of the deepest layers were simulated like a unique and homogeneous aquifer.

Moreover, knowledge of the lithology and geometry of the aquitards and aquicludes is as important as the ones of the aquifers particularly for interactions between aquifers on top of the other, for up-coning risk assessment, salt water encroachment dynamics through surfaces water bodies (rivers, lagoons,…) or directly through the sea, etc. For each aquifer, hydraulic head and density distribution constitute main parameters for characterising groundwater 3D flow.

Because water flow does not always follow sedimentologic boundaries, bringing together sedimentary units and hydrogeology is a necessary step. Transformation from geological model to hydrogeological model is based on chemical analysis, on pressure head observation and on field experience. In fact, from 41 geological units, less than 8 hydrogeological formations are kept for the step of modelling. This resolution cut is linked to many reasons: connexions existing between geological units underline by chemical analysis, lack of knowledge about hydrodynamic parameters, calculation limit for modelling and, the main one, majority of wells are fully screened thus, exploits several aquifers.

In the case of saltwater intrusion, the choice of hydrogeological model is important. For Roussillon basin case study, sharp interface model is not appropriate because the fifty-fifty concentration line is located close to seashore and, paradoxically, increase in salt content occurs five kilometres landward (from field electrical conductivity survey). Heterogeneity in geological formations and pumping variations contribute to the diffusion of salt in the contaminated area. So, the choice of using 3D variable-density flow and solute transport simulations allows determining vulnerable areas (freshwater becomes non-potable as soon as it mixes with seawater with the sea water exceeding 3%).

With the aim of clarifying, the Fig. 3 represents a conceptual hydrogeological model and its evolution through the groundwater development. Only three kinds of aquifers are presented, because the sketch focused on the coastal area.

Quaternary aquifers are mainly composed of alluviums (conglomerate, flood plain) and coastal deposits. The unconfined Quaternary aquifer lies along the main rivers and the coastline. It is mainly exploited by farmers, private and camping owners. Quaternary aquifer also supplies drinking water of Perpignan town. Water quality of the Quaternary upper aquifer is poor near the coast due to a high chloride concentration (e.g.: electrical conductivity can reach 5000 µS/cm at St-Laurent-de-la-Salanque - 5 km from the coastline).

The *Pliocene aquifers* (continental and marine), whose characteristics are linked to the Messinian event are built of fluvial deposits and marine sands and clays. Many wells in these aquifers were artesian thirty years ago. Now, artesian flowing wells are more and more uncommon. The confined Pliocene aquifers are mainly exploited for drinking-water supply and by farmers. Generally, both water quality and hydraulic head of the Pliocene aquifer increase with the depth of the exploiting well. Even under the beach barrier sand, water conserves a good quality:

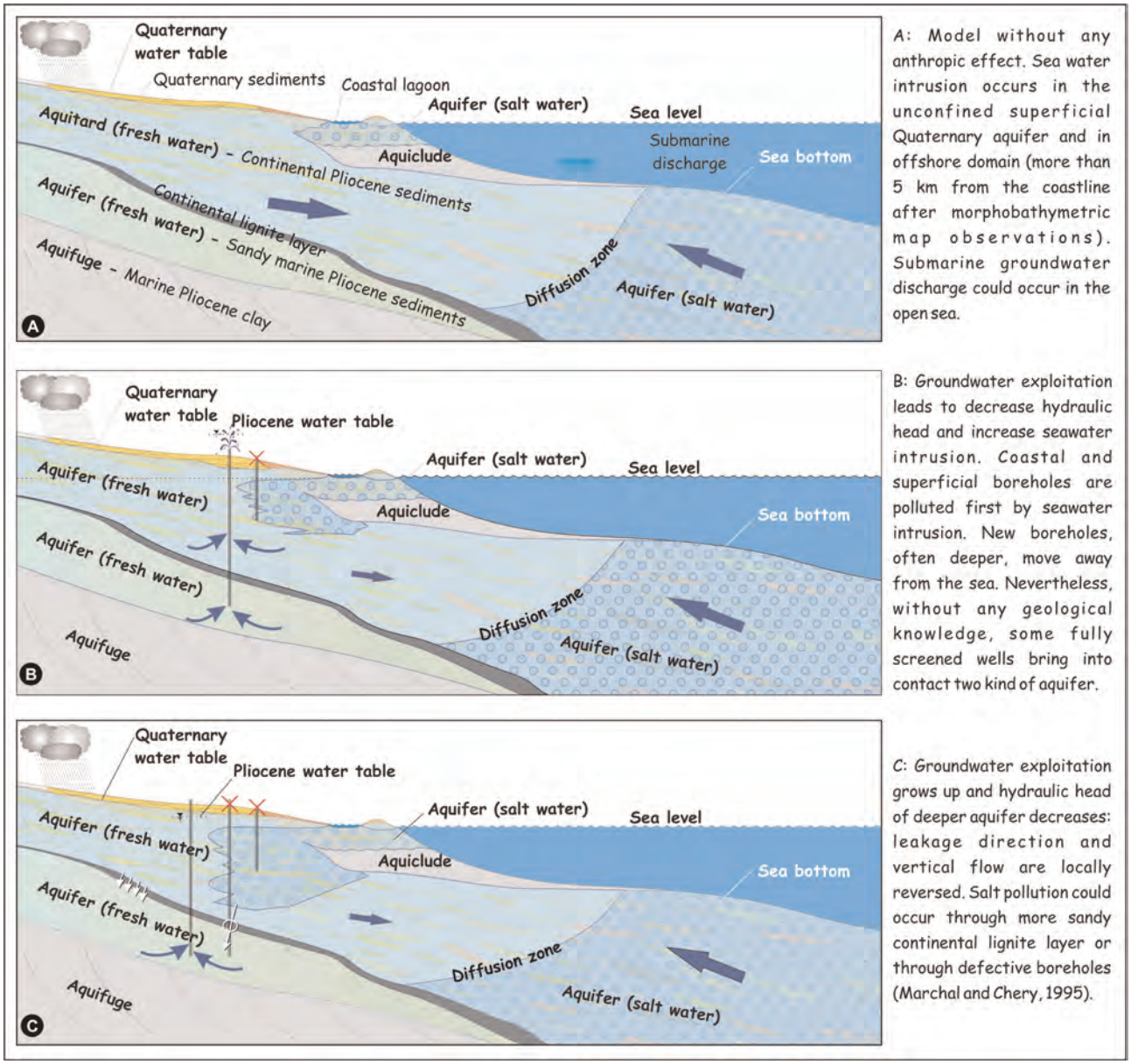


Fig. 3 – Hydrogeological conceptual model of Roussillon aquifer system without scale and location. This sketch presents historic groundwater development. The superficial layer has sea connections, meaning that overexploitation can generate sea water intrusion.

chloride concentrations are lower than 40 mg/l. Locally, some interconnections exist between the Quaternary and Pliocene aquifers, mainly because of two reasons: (i) leakage from pre-existing wells, (ii) incision of shift Pliocene aquifer by Quaternary channels. These interconnections tend towards decreasing Pliocene aquifer water quality.

Fluvial sands fill distributaries channels of deltaic complex constitute the *Continental Pliocene aquifer*. This aquifer contains excessive water mineralization only in the northern part of the basin, along the lagoon and even more so along the coast at Le Barcarès. The continental Pliocene aquifer is very productive, especially in the Salanque plain. Because of its geological setup (stream channel and flood plain alternations), this aquifer is considered like a heterogeneous aquifer: permeability tensor and salt water interface position could extremely vary in the three dimensions.

Usually, lignite layers alternating with marsh plastic clays are located beneath the Continental Pliocene aquifer. This non-continuous impervious layer separates continental Pliocene aquifer from sandy marine Pliocene aquifer.

Sandy marine Pliocene sediments correspond to the prograding deltaic shore face. Theoretically, this homogeneous aquifer is not connected to the sea and it is preserved from seawater intrusion. However, some area contains excessive mineralization. The origin of the contamination is the vertical leakage from the partially contaminated Quaternary aquifers to the Pliocene aquifers due to

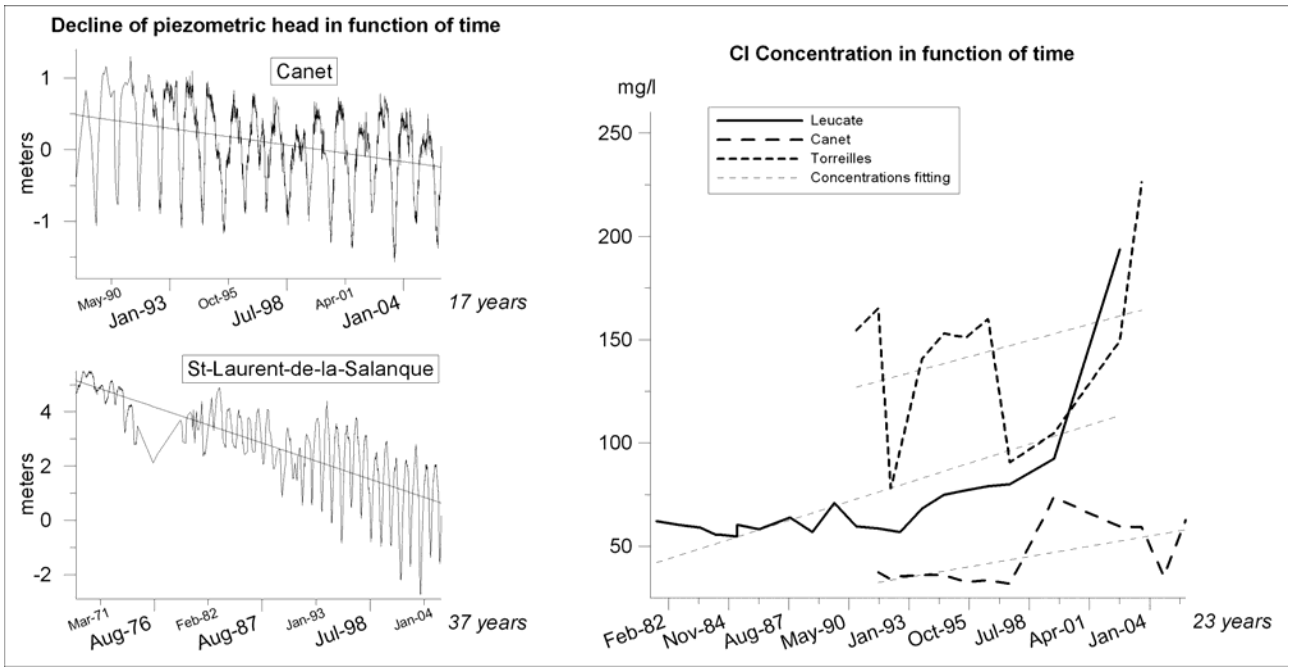


Fig. 4 – Piezometric head and chloride concentration both in function of time. All these observation points are located in the Pliocene aquifers close to the sea. Near the coast and since the beginning of exploitation, Pliocene aquifer water level have reached 0 meter more and more often during the year.

existence of defective boreholes (Fig. 4). New boreholes drilled next to the old ones show a strong decrease in the waters salt content. Without any water pumping, hydraulic head of the sandy marine Pliocene aquifer is higher than the continental Pliocene aquifers.

Sedimentary model provides geometry of aquifers and aquicludes for the modelling, while economic study suggests some management scenarios inspired by socio-economic context of the Roussillon basin.

MANAGING ROUSSILLON'S GROUNDWATER DEMAND: WHICH INSTRUMENTS TO IMPLEMENT?

Management of aquifer system exploitation requires detailed knowledge of demand and resource characteristics. On one hand, the demand information (type of use, extracted volume, demand price elasticity, the touched layer, etc.) allows establishing the socio-economic context. This, when combined with the resource characteristics, determines vulnerable zones (environmentally and/or economically) where policy instruments would prevent catastrophic consequences of overexploitation. On the other hand, given a particular socio-economic context, this information enables determining ex-ante efficiency of a policy instruments. However, a question remains open: which instrument among the plethora of management instruments to implement?

Usually in coastal areas, policies concerning the increase of water supply (dams, desalinization of seawater, aqueducts, etc.) have been already implemented, however, they might not be economically feasible (Groom *et al.* 2003, Giordana & Montginoul 2006). Then, demand reallocation policies emerge as the unique option. Many management solutions to control individual withdrawals like ranging from taxes (Baumol & Oates 1988), incentive mechanisms or regulations (Dasgupta *et al.* 1980) and facilities for self-organization (Ostrom 1990), have been suggested in the economic literature. To test these management solutions, the experimental economy method offers a workbench for different policy devices that would be implemented for real (Bohm 2003, Cummings 2001), avoiding some of the acceptability problems that a field test would imply as was observed in the Roussillon case.

The need for a smart integrated management of the water resource in the Roussillon plain has been early identified; self designed accords were passed between users (city governments and agricultural profession) and the water agency in order to preserve groundwater for human consumption. Then, between 1968 and 1995, three river dams and modern irrigation channels (pressure water network) were constructed to satisfy agricultural water demand (Connaissance des eaux souterraines de la plaine du Roussillon 2003). However, groundwater resources have allowed the development of modern irrigated agriculture outside the irrigation areas; they have also led to increasing non-potable water needs (swimming-pools, garden irrigation, etc.). Actually, the water authority has only partial information about the precise location of extraction points, the quality of the drills, and the quantity

of water being extracted. In order to record every extraction point and recover the payment charges stated in the 1992's Water Law, the Water Agency has implemented different policies in the last decade (i.e. subventions to the installation of volume meters). Nevertheless, these policies have not completely solved the problem. Then, the experimental method would be very useful in designing new policies or modifying to the existing ones.

Experimental economy

An experiment in economy consists of an artificial reconstitution of an economic situation in a laboratory, offering comparative advantages of control and measurement with respect to naturally occurring settings (Ostrom *et al.* 1994, Roth 1995). By implementing a particular protocol, the experimentalist can carefully create conditions in a laboratory that closely match those specified in a theoretical model aimed to explain real occurring phenomena. In those cases, the experimental method can be highly useful to the design of empirical institutions and policies (Ostrom *et al.* 1994, Shogren 2005).

An important aspect in the reliability assessment of laboratory experimentation as a test-bench of public policy measures is the subject pool. Participants to experiment are in general undergraduate students; a common criticism is then, that a student pool is not representative of "real" people behaviour. Nevertheless, when the protocol is sufficiently abstract, a student pool fairly represents behaviour of a larger population (Lichtenstein & Slovic 1973). A problem emerges when context affects behaviour; in those cases some kind of field experimentation is unavoidable (Harrison & List 2004).

Our experimental research program aims to assess the efficiency of various institution policies to manage groundwater extractions. Still far away from a decision-making end-user, we have developed an experimental protocol based on an heuristic model that represents quite well the choice to which agents are confronted in the field.

Experimental test of a tax system with random audit

Protocol and simplifications

As stated in the previous sections, groundwater in the Roussillon plain occurs in a complex multilayered coastal aquifer. The Quaternary and Pliocene aquifers represent imperfect substitute water resources for end-users (as each layer presents freshwater of different quality and productivity). Then, from a behaviour point of view, the exploitation of a multilayered aquifer breaks results in two decisions: choice of the layer (choice between substitute resources) and the extracted quantity. Details on the experimental protocol implemented to study the exploitation of substitute groundwater resources can be found in Giordana *et al.* (2006). However, depending on the location in the plain, different water resources can be acceded (surface water, Quaternary or Pliocene aquifer).

To illustrate how experiments can be used to assess the efficiency of groundwater demand management instruments, we briefly present the observations of two of the implemented treatments. Here we consider a protocol in which only one groundwater resource is available. This means that we care about a zone of the Roussillon plain where there is just one layer (i.e. the Pliocene aquifer in the south-west of the plain), with existing boreholes; there is no possibility to drill new boreholes at least in the short term. Implementation in the laboratory requires a simple model of the resource dynamics as it must be explained to participants (a good comprehension of the task in the lab reduces noise in the observations). Then, we have omitted some hydrogeological details that would be confusing for participants: (i) no 3D variable density flow model is considered; (ii) in the economic model, groundwater is represented by a 2D "bathtub aquifer" (infinite hydraulic conductivity); actual withdrawals automatically produce a homogenous reduction of the hydraulic head (no up-conning risk) on the whole aquifer. In particular, salt water encroachment dynamics are modelled in the simplest possible way: as the available stock (hydraulic head) diminishes with extractions the water quality deteriorates homogeneously over the whole aquifer. More details on the experimental protocol (the model, participants' selection, rewards, data treatments, etc.) can be found in Giordana & Willinger (2006).

Experimental observations

We first evaluate a baseline treatment where participants, during a ten period dynamic game, were asked to extract in each period the quantity of water they want from a stock. In Fig. 5 the dashed line shows the mean extracted quantities in each period for the baseline treatment. Provided that the profit of groundwater exploitation

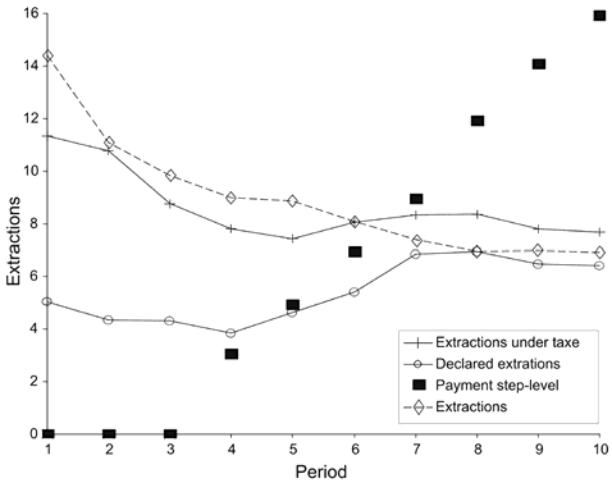


Fig. 5 – Mean extractions and declared extractions.

depends on the groundwater quality, as long as the stock decreases (as a result of excessive pumping), extractions also diminish because they are less profitable. Mean extractions are far to be optimal (the optimal extraction trajectory is indicated by the full square markers in Fig. 5); then, we say that the groundwater stock is overexploited.

We are aware about the efficiency of the tax system in encouraging a more sustainable use of groundwater. Thus, we test in the laboratory an incitation mechanism that consists of a unitary tax, applicable on the declared quantities. The tax would be paid only if the declared quantities exceed a step-level defined for each period (the full square marker in Fig. 5). In order to assure compliance, there is a fixed probability of audit. If declared quantities are controlled and came out to be less than those really extracted, a penalty is imposed. In the treatment exposed in figure 5, the penalty is very high. Nevertheless, the compliance rate (the ratio between the declared and the extracted quantities) remains quite low all along the time horizon (the circle marked full line lies under the diamond marked one). As a consequence, the extracted quantities have not been significantly reduced with the imposition of this tax system.

Questions as, how this incitation mechanism can be improved or whether a higher probability of audit raises the compliance rate or would another instrument out perform this mechanism, can be answered by the implementation of additional treatments in the laboratory. Finally, the coherence of the results can be assessed by an ex-post statistical analysis of data, and scenarios can be constructed on this basis.

SYNTHESIS

Pluridisciplinary approach of management of coastal aquifer is summarised by Fig. 6.

In the Roussillon basin, different geological methods applied on pre-existent data (BRGM's public underground database, logs from drinking water borehole, offshore seismic petroleum profiles,…) are used to determine spatial distribution of the sedimentary units, and particularly those that could be potential aquifers. Sedimentary units' characteristics like interconnections, granulometry and homogeneity are implemented in a hydrogeological study.

Coastal groundwater resources are frequently complex multi-layer aquifers, where the sensitivity of each layer to saltwater intrusion greatly depends on its geological characteristics and geometries (continuity between inland and offshore). Understanding this sensitivity is a prerequisite

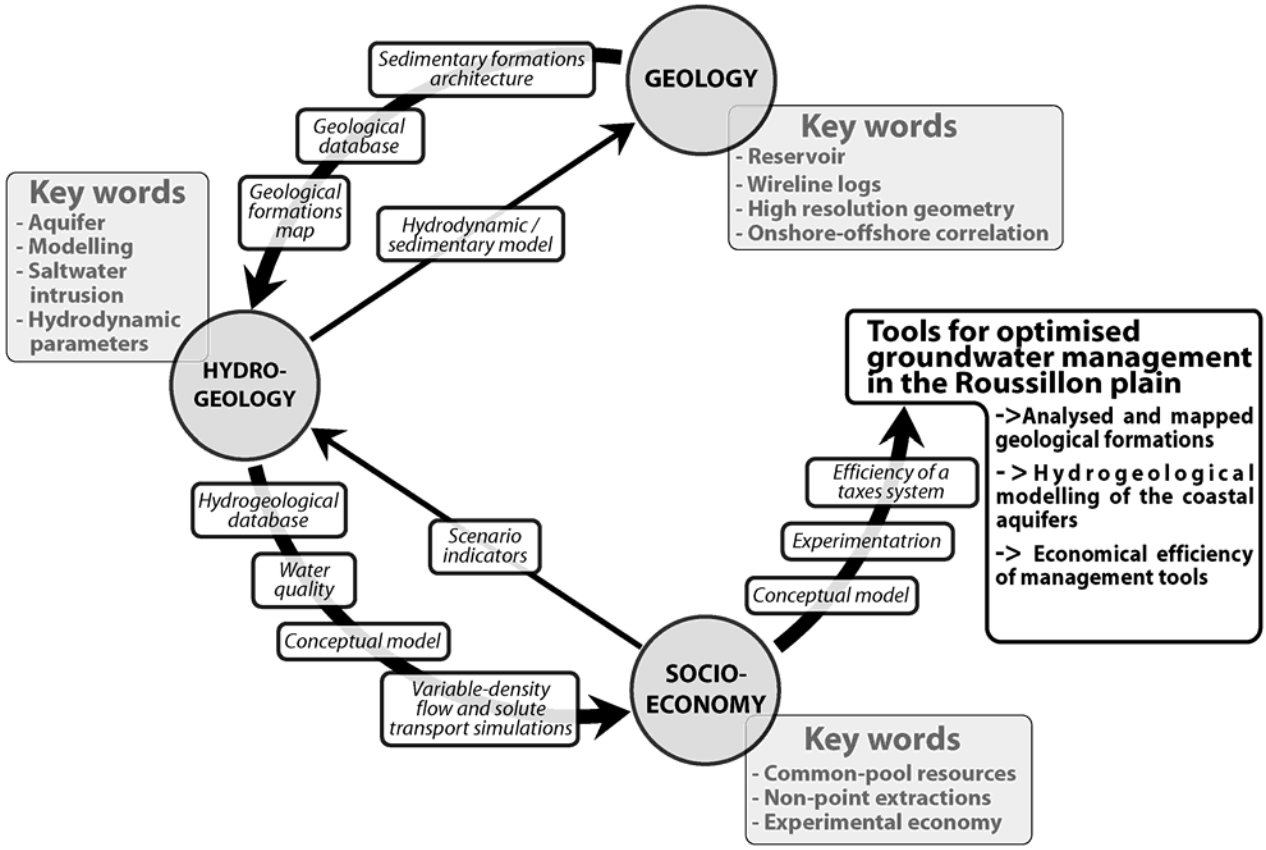


Fig. 6 – Synthetic sketch of the integrated methodology. Each step is dependent on the previous, but the study is led in parallel. Feedback between the three research fields also gives originality of the integrated methodology.

to design effective water management plans which would reduce abstraction in target aquifer layers. Built on a good sedimentary model, hydrogeological knowledge must be supplemented by long-time series observation (hydraulic head, hydraulic conductivity) and possibly hydrochemistry. However, numerous field measurements would be unused while screen locations in boreholes are unknown. So, the best way to understand how coastal aquifers work, is to observe and to be aware of what is observed. It's only later that modelling can answer water management issues. For reality sake, scenarios building must take into account the socio-economical framework of the studied area. So, experimental economy methodology offers a reliable way for ex-ante assessment of water management instruments. Predictions of the model resulting from coupling the economic dimension with the aquifer model could be tested and the efficiency of instruments assessed. However, in this paper the methodology is only illustrated with an example based on a heuristic economic model of groundwater extraction behaviour dynamics.

One of the aims of this paper is to demonstrate the importance of building studies based on relevant methodology that integrate most of groundwater resource problems encountered in coastal areas. For future prospects, methodology used in the case of the representative Roussillon basin could also be applicable to a certain extent to other coastal sedimentary basin.

ACKNOWLEDGEMENT. - This study is a part of three PhD at the University of Montpellier I and II (France), funded by the Regional Council of Languedoc-Roussillon (CPER - SYSCOLAG program), by the BRGM in the framework of the COMPLEX'AQUI project (EAU15) and by the CEMAGREF. This work has also benefited from the financial support of the French Ministry for Ecology and Sustainable Development.

REFERENCES

Auroux F 1992. Modèle mathématique de gestion de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon. Montpellier. *BRGM report*. R34 981 LRO 4S 92, 31 p.

Baumol WJ, Oates WE 1988. The theory of environmental policy. Cambridge University Press, 312 p.

Benson RH, Rakic-El Bied K, Bonaduce G 1991. An important current reversal (influx) in the Rifian Corridor (Morocco) at the Tortonian-Messinian boundary: the end of the Tethys Ocean. *Paleoceanography* 6 (1): 164-192.

Bohm P 2003. Experimental evaluations of policy instruments. *In* Environmental Degradation and Institutional Responses, M Karl-Göran, JR Vincent ed, Amsterdam: Elsevier.

Chabart M 1996. La recharge de l'aquifère multicouche du Roussillon et les conséquences d'un éventuel changement climatique sur la gestion de la ressource en eau (Pyrénées-Orientales). BRGM ed, Documents du BRGM 257, Orléans. 299 p.

Clauzon G 1982. Le canyon messinien du Rhône; une preuve décisive du "desiccated deep-basin model" (Hsü, Cita, Ryan, 1973). *Bull Soc Géol Fr* 24 (3): 597-610.

Clauzon G 1990. Restitution de l'évolution géodynamique néogène du bassin du Roussillon et de l'unité adjacente des Corbières d'après les données écostratigraphiques et paléogéographiques. *Paléobiol Cont* 17: 125-155.

Connaissance des eaux souterraines de la plaine du Roussillon 2003. Accord Cadre pour la définition d'un programme global de protection et de gestion concertée des ressources en eau de l'ensemble aquifère multicouche plio-quaternaire de la plaine du Roussillon. AERMC, BRGM, CDA 66, CG 66, DDAF, DDASS, DIREN report, 47 p.

Cross TA, Baker MR, Chapin MA, Clark MS, Garner MH, Hason MS, Lessenger MA, Little LD, Mc Donough KJ, Sonnenfeld MD, Valasek DW, Williams MR, Witter DN 1993. Application of High-Resolution Sequence Stratigraphy to Reservoir Analysis. *In* Eschard R, Doligez B eds, Subsurface Reservoir Characterization from Outcrop Observations, Technip, Paris: 11-33.

Cummings R, McKee M, Taylor L 2001. To whisper in the ears of princes: Laboratory experiments and public policy. *In* Frontiers of Environmental Economics, H Folmer, A Rose, S Gerking and H Gabel eds, Cheltenham UK: Edward Elgar.

Dasgupta P, Hammond P, Maskin E 1980. On imperfect information and optimal pollution control. *Rev Econ Studies* 47: 857-860.

Duvail C, Gorini C, Lofi J, Le Strat P, Cauzon G, Dos Reis AT 2005. Correlation between onshore and offshore Pliocene-Quaternary systems tracts below the Roussillon Basin (eastern Pyrenees, France). *Mar Petrol Geol* 22 (6-7): 747-756.

Duvail C, Le Strat P, Bourgine B 2001. Atlas géologique des formations plio-quaternaires de la plaine du Roussillon (Pyrénées Orientales). BRGM Publisher, RP-51197-FR, 44 p.

Giordana G, Montginoul M 2006. Policy instruments to fight against seawater intrusion: an overview. *Vie Milieu* 56(4): 287-294.

Giordana GA, Willinger M 2006. Designing Feasible Policies with Myopic Agents. *In* ESA North-American Meeting, Sept 2006, Tucson (USA).

Giordana GA, Montginoul M, Willinger M 2006. An experimental study on substitute common-pool resources in a dynamic framework: The Agricultural Exploitation of Groundwater. *In* IASCP European Meeting, March 2006, Brescia (Italy).

Groom B, Koundouri P, Swanson TM 2003. The watershed economics management approach: An application to Cyprus. *In* The Economics of Water Management in Developing Countries. P Koundouri, P Pashardes, TM Swanson, A Xepapadeas eds, Cheltenham UK, Northampton MA, USA: Edward Elgar.

Guennoc P, Gorini C, Mauffret A 2000. Histoire géologique du golfe du Lion et cartographie du rift oligo-aquitanien et de la surface messinienne. *Géol France* 3: 67-97.

Guillocheau F 1991. Modalités d'empilement des séquences génétiques dans un bassin de plate-forme (Dévonien Armoricain): nature et distorsion des différents ordres de séquences de dépôts emboîtées. *Bull Centr Rech Explor Prod Elf-Aquitaine* 15 (2): 383-410.

Harrison GW, List JA 2004. Field Experiments. *J Econ Liter* 42 (4): 1009-1055.

Homewood P, Guillocheau F, Eschard R, Cross TA 1992. Corrélations haute résolution et stratigraphie génétique: une démarche intégrée. *Bull Centr Rech Explor Prod Elf-Aquitaine* 16: 357-381.

Homewood P, Mauraud P, Lafont F 2002. Best practice in Sequence Stratigraphy for Explorationists and Reservoir Engineers. 25, Total ed, Pau, 81 p.

Hsü KJ, Cita MB, Ryan WBF 1973. The origin of the Mediterranean evaporites. *Initial Repts DSDP* 13 (2): 1203-1231.

Labaune C 2006. Architecture, genèse et évolution du littoral du Languedoc-Roussillon: Impact des facteurs physiques au cours du Quaternaire terminal. PhD Thesis, Univ Perpignan, 302 p.

Le Strat P, Duvail C, Clauzon G 2001. Présentation des travaux de cartographie du BRGM en Roussillon depuis 1996. *In* GDR Marges eds, Messinien dans le Golfe du Lion, Perpignan, 7-10 septembre 2001.

Lichtenstein S, Slovic P 1973. Response-Induced Reversals of Gambling: An extended Replication in Las Vegas. *J Exper Psych* 101: 16-20.

Marchal JP, Chery L 1995. Contamination marine de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon (Pyrénées-Orientales). *BRGM report*, 85 p.

Ostrom E 1990. Governing de Commons: the Evolution of Institutions for Collective Action: Cambridge University Press.

Ostrom E, Gardner, Walker J 1994. Rules, Games, and Common-Pool Resources: Ann Arbor, Michigan. The University of Michigan Press.

Posamentier HW Jerwey MT, Vail PR 1988. Eustatic control on clastic depositions. I - Conceptual framework. *In* Sea level changes, an integrated approach, *SEPM Sp Publ* 42.

Roth AE 1995. Introduction to Experimental Economics. *In* The Handbook of Experimental Economics, JH Kagel, AE Roth eds, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Serra O 1985. Diagraphies différées, bases de l'interprétation. T2: Interprétation des données diagraphiques. *Bull Centr Rech Explor Prod Elf-Aquitaine* 7.

Serra O 1989. Sedimentary environments from wireline logs. Schlumberger Publisher, 243 p.

Shogren JF 2005. Experimental Methods and Valuation. *In* Valuing Environmental Changes, M Karl-Göran, JR Vincent eds, Amsterdam: Elsevier.

Vail PR, Colin J, Du Chene RJ, Kuchly J, Mediavilla F, Trifilieff V 1987. La stratigraphie séquentielle et son application aux corrélations chronostratigraphiques dans le Jurassique du Bassin de Paris. *Bull Soc Géol Fr* 3 (7): 1301-1321.

Walker RG 1984. Facies Models. Geoscience Canada Publisher, 317 p.

Received July 6, 2006
Accepted October 25, 2006

A multidisciplinary approach for assessing the risk of seawater intrusion in coastal aquifers: the case of the Roussillon Basin (France)

Bertrand AUNAY[1,2], Nathalie DÖRFLIGER[1], Cédric DUVAIL[1,3], Frédéric GRELOT[4], Paul LE STRAT[1], Marielle MONTGINOUL[4] and Jean-Daniel RINAUDO[1]

1- BRGM EAU/RMD - 1039 rue de Pinville - 34 000 Montpellier - France - Email: b.aunay@brgm.fr

2- Hydrosciences Montpellier - University of Montpellier II, France

3- Laboratoire "Dynamique de la Lithosphère" UMR 5573 CNRS - University of Montpellier II, France

4- Cemagref - UMR G-EAU – Montpellier, France - Email: marielle.montginoul@montpellier.cemagref.fr

Abstract

Littoral zones are important places of economic development, often linked to intensive water needs. Geological, hydrogeological and socio-economic studies have been carried out as part of a multidisciplinary approach on a coastal Mediterranean aquifer - the Roussillon - in order to design effective water management strategies in areas sensitive to seawater intrusion risks. Geology provides the geometry and architecture of the different aquifers, hydrogeology assesses the seawater intrusion risk while the socio-economic study includes consulting stakeholders with the aim of suggesting water management and policy options acceptable to the majority of the population. This paper highlights the economic interests at stake, the diversity of viewpoints expressed by stakeholders and the political dimensions of the issue, which are likely to be encountered for all similar situations on both sides of the Mediterranean Sea.

1. Introduction

In many Mediterranean coastal areas, agriculture, drinking water supply, tourism and industry strongly depend on groundwater resources. As a result of significant economic development over the last three decades along the Mediterranean coast (growth in tourism, population migration and agricultural intensification), abstraction from coastal aquifers has greatly increased. This has often resulted in a significant decline in water tables that has, depending on the local geological context, increased the risk of seawater intrusion (Nixon *et al*., 2003, Plan Bleu, 2005). In a number of locations (in Spain, Italy and Greece for instance), although action is clearly needed to avoid any irreversible degradation of groundwater resources, the status quo often prevails and pumping fever does not seem to be affected by the threat of salt water intrusion (Aguillera-Klink *et al.*, 2000). As in many other "Tragedy of the Commons" (Hardin, 1968), this is often explained by the intensity of the interests at stake and the lack of appropriate institutions. We argue here that another key factor explains the absence of social response. Stakeholders, who are increasingly involved in water planning and management decisions, often do not share the same view of the nature and the intensity of the risk of salt water intrusion. Since they do not agree with the nature of the problem, its origin and its intensity, there can be no consensus on how it should be solved (Rinaudo and Garin, 2005). Clearly, constructing a common understanding of the risk of sea water intrusion is a prerequisite to defining a sustainable water management strategy.

However, assessing this risk is a difficult exercise for Mediterranean coastal aquifers, which are generally complex multi-layered systems. It requires extensive knowledge of the geology and the hydraulic conditions of the aquifer, both onshore and offshore. The first part of this paper illustrates, through a French case study, how the risk of seawater intrusion can be assessed using reservoir geology methods applied onshore (through genetic stratigraphy) and offshore (through seismic stratigraphy) (Cross *et al.*, 1993, Homewood *et al.*, 2002). The method applied – as well as some of the results – could be used elsewhere around the Mediterranean. In its second part, the paper illustrates that, as long as this risk is not assessed precisely by scientific experts, stakeholders may have very different perceptions of the risk and may promote very different groundwater management strategies.

2. Presentation of the case study area

The case study area selected for carrying out this multidisciplinary research is the Roussillon Basin, located along the southernmost part of the French Mediterranean coast, near to the Spanish border. This 700 km^2 sedimentary basin is bordered by the foothills of the Pyrenean Mountains to the south, the Corbières karstic region to the north and the Mediterranean Sea to the east (Fig. 1). The groundwater resources comprise several Pliocene confined aquifers, which are overlain by a Quaternary deposit aquifer and embedded within a Miocene structured margin (Fig. 1). These aquifers are intensively used for drinking water purposes, for tourism related activities along the coast and by agriculture for irrigating orchards and vegetables crops. Since the superficial aquifer was increasingly affected by diffuse pollution (nitrates and pesticides), the Pliocene aquifers have been increasingly exploited, in particular by municipalities but also by large vegetable producers. The resulting decline in the water tables, which has been observed over the last 20 to 30 years, is expected to continue as the population keeps growing and the farming sector progressively abandons ancient surface canal irrigation systems in favour of new drilled irrigation wells.

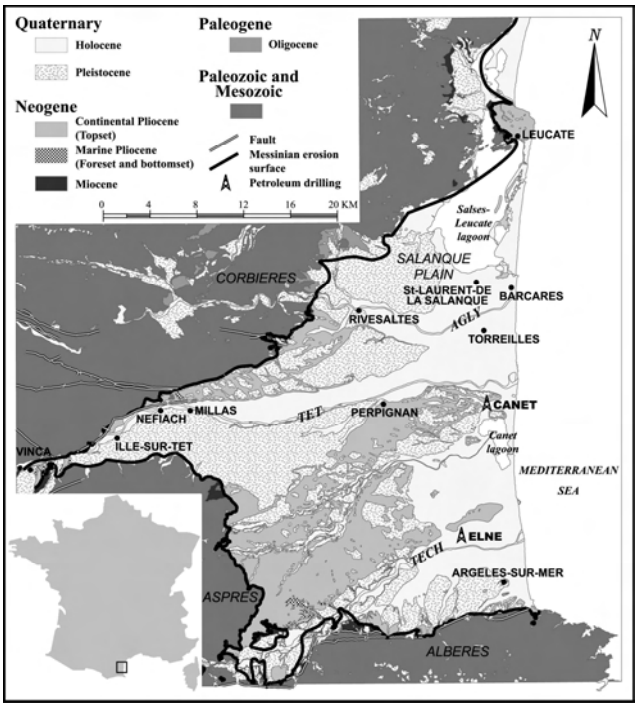


Figure 1 *Location of the Roussillon Basin*

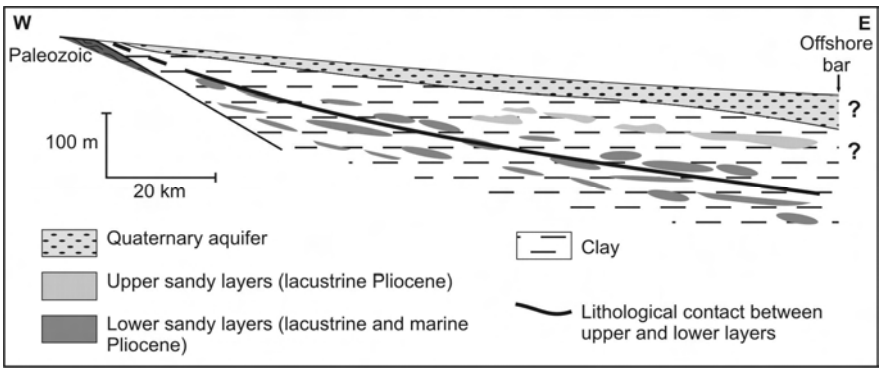


Figure 2 *Cross section of the traditional conceptual model of the Roussillon Basin (Marchal et al., 1976).*

Although high chloride concentrations have been reported in several wells located along the coast, it has not yet been proven that seawater intrusion actually takes place in the current situation. In particular, uncertainties remain concerning the relation between the Quaternary aquifer (which may be brackish in certain locations) and the Pliocene aquifers (Fig. 2). Also, experts had no information – before this research was initiated – on the geology offshore, which determines if sea water intrusion can or cannot take place in the Pliocene aquifers (Fig. 2). The mathematical model that was developed in the early 1990s (Auroux *et al*., 1992) has the same caveat. In a context of sustained growth in groundwater exploitation, policy makers decided there was an urgent need to improve our knowledge of the structure and functioning of the Pliocene aquifers and to identify possible strategies to mitigate the risk of groundwater deterioration. The following section presents an attempt to answer this demand.

3. Assessing the risk of seawater intrusion in the Roussillon Basin

In complex multi-layer aquifers, assessing the risk of sea water intrusion requires a detailed characterisation of aquifer boundary conditions and interconnections between aquifer layers. This detailed characterisation requires a good understanding of regional geological history (section (a) below) before applying classical hydrogeological methods (section (b)). These two items of information combined lead to the development of a conceptual model (section (c)) that can be used to assess the risk of sea water intrusion.

3.1 Geological history of the case study area

During the Late Miocene, a marine regression followed the partial drying of the Mediterranean Sea, (Messinian salinity crisis, approximately 5.8 Ma). A major erosion phase induced a depression of the fluvial networks and the creation of deep canyons that have been identified in the Roussillon (Clauzon *et al.*, 1987). During the Pliocene (5.3 Ma), the opening of the Gibraltar Straits allowed the return of seawater, which penetrated into the deep valleys and transformed the Roussillon Basin into a ria (fluvial canyon drowned by marine transgression). All the onshore Pliocene sediments were deposited within 1.7 My (i.e. 75 cm/1000 years, Clauzon *et al*., 1987). The Quaternary deposits were due to interglacial transgression and regression phases. The last transgression (sea level rise) resulted in some coastal constructions and a lagoon area from Leucate to Argelès. Today, only the Salses-Leucate and Canet lagoons remain.

The first part of this study consisted in developing a detailed lithological and geometric geological model of this basin, on the basis of reservoir geology methods (Duvail *et al*., 2005): (i) onshore, through genetic stratigraphy performed with the BRGM public geological database (more than 500 wells, with about 120 logs), the interpretation of well logs and cross-checking with the outcrops, (ii) offshore, through seismic stratigraphy (existing oil company sections and high-resolution seismic profiles from the University of Perpignan).

The result is a detailed mapping of the elevation of the top and bottom of the aquifers, the aquitards and aquicludes along with their lithology, their interrelationship with other aquifers (especially karstic, whose structure is also influenced by sea level variations). Lithological and geometrical knowledge of the aquifers makes it possible, in particular, to determine if coastal aquifers are directly or indirectly connected to the Mediterranean Sea.

3.2 Hydrogeology of the case study area

The second step of the analysis consisted in determining the link between the geology and the hydrogeology of the studied area (Fig. 3). Several small-size aquifers make up each aquifer layer, each one having different hydrogeological properties. For instance, marine Pliocene sediments are composed of stacks of five different sedimentary prisms (sand and clay).

The Quaternary aquifer is mainly composed of alluvium (flood plain or conglomerate) and coastal deposits, the geometry of which is linked to Pliocene-Quaternary glacio-eustatic variations. The unconfined Quaternary aquifer lies along the main rivers and the coastline. It is mainly exploited by farmers, private individuals and campsite owners. The water quality of the Quaternary upper aquifer is

poor near the coast due to a high chloride concentration (the electrical conductivity can reach 5000 µS/cm at St-Laurent-de-la-Salanque, 5 km from the coastline).

The Pliocene aquifers (continental and marine), whose characteristics are linked to the Messinian event, comprise fluvial deposits and marine sands and clays. Thirty years ago there were many artesian wells tapping these aquifers but, nowadays these wells are no flow naturally. The confined Pliocene aquifers are mainly exploited for drinking water supply and by farmers. Generally, both water quality and the hydraulic head of the Pliocene aquifers increase with the depth of the exploiting well. Even under the offshore bar, the water is still of good quality: chloride concentrations are lower than 40 mg/l. Locally, some interconnections exist between the Quaternary and Pliocene aquifers, mainly due to two reasons: (i) leakage from existing wells and (ii) incision of the Pliocene aquifers by Quaternary channels. These interconnections tend to deteriorate the water quality of the Pliocene aquifers.

Fluvial sands channels of deposited in a deltaic environment constitute the **Continental Pliocene aquifer**. This water in this aquifer is only excessively mineralised in the northern part of the basin, along the lagoon and even more so along the coast at Barcarès. The continental Pliocene aquifer is very productive, especially in the Salanque Plain. Because of its geological formation (stream channel and flood plain alternations), this aquifer is considered to be a heterogeneous aquifer: the permeability tensor and salt water interface position could vary widely in three dimensions.

Usually, layers of lignite with plant remains alternating with plastic marsh clays are found beneath the Continental Pliocene aquifer. This non-continuous impervious layer separates the continental Pliocene aquifer from the sandy marine Pliocene aquifer.

Sandy marine Pliocene sediments correspond to the prograding deltaic shore face. Theoretically, this homogeneous aquifer is not connected to the sea and it is preserved from seawater intrusion. However, some areas contain excessive mineralization. The origin of this contamination is vertical leakage from the partially contaminated Quaternary aquifer to the Pliocene aquifers, due to defective boreholes (Marchal and Chery, 1995). New boreholes drilled next to the old ones show a strong decrease in water salt content. Without any extraction, the hydraulic head of the sandy marine Pliocene aquifer is higher than that of the continental Pliocene aquifer.

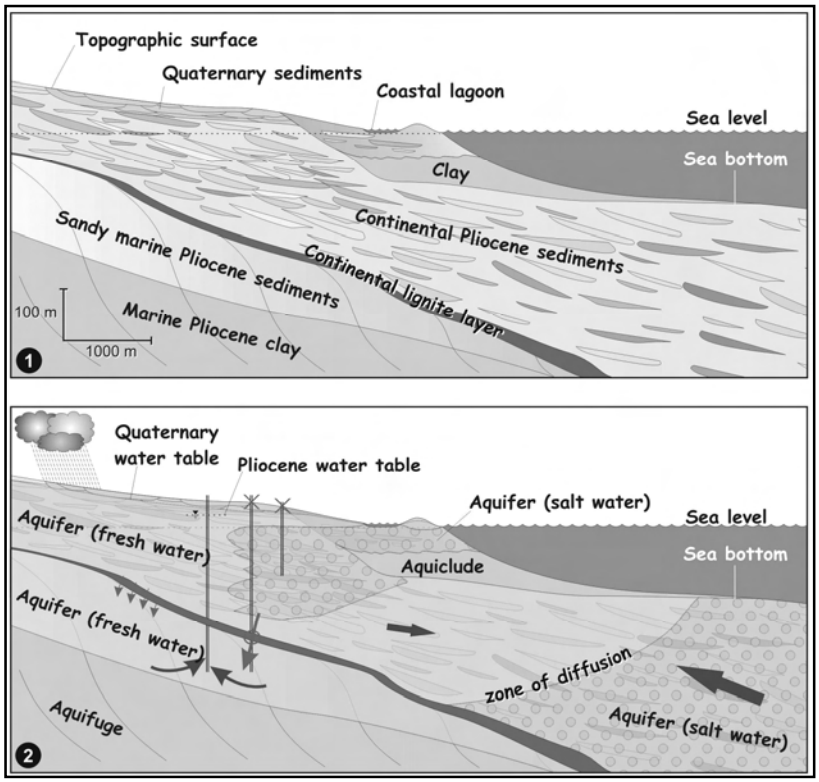


Figure 3 *Geological (1) - hydrogeological (2) cross sections of the Roussillon Basin. Vertical leakage linked to hydraulic head inversion is illustrated in the hydrogeological cross section. Vertical leakage takes place through a more sandy continental lignite layer or through defective boreholes. Scale and location are not presented because these theoretical cross sections only illustrate the hydrogeological problem.*

Improved understanding of the hydrogeological model elaborated from reservoir geology methods clears up the uncertainties of the traditional model concerning aquifer interconnections and extensions. Our investigations suggest that a strong link exists between the upper and lower layers, although the piezometric levels are apparently different because of a pronounced inertia of the Roussillon Pliocene aquifers (Aunay, forthcoming). They also indicate that, whereas the Quaternary aquifer is vulnerable to seawater intrusion, the Pliocene aquifers are most probably protected by a five kilometre long impervious layer (clay on Fig. 3).

3.3 Increasing salt water intrusion risk

Based on electrical conductivity measurements and chemical analyses (Fig. 4), seawater intrusion is well recognized in the Salanque Plain a few kilometres from the coast relating to the unconfined superficial Quaternary aquifer. In the South Roussillon Basin, seawater intrusion is restricted to within one kilometre from the coastline.

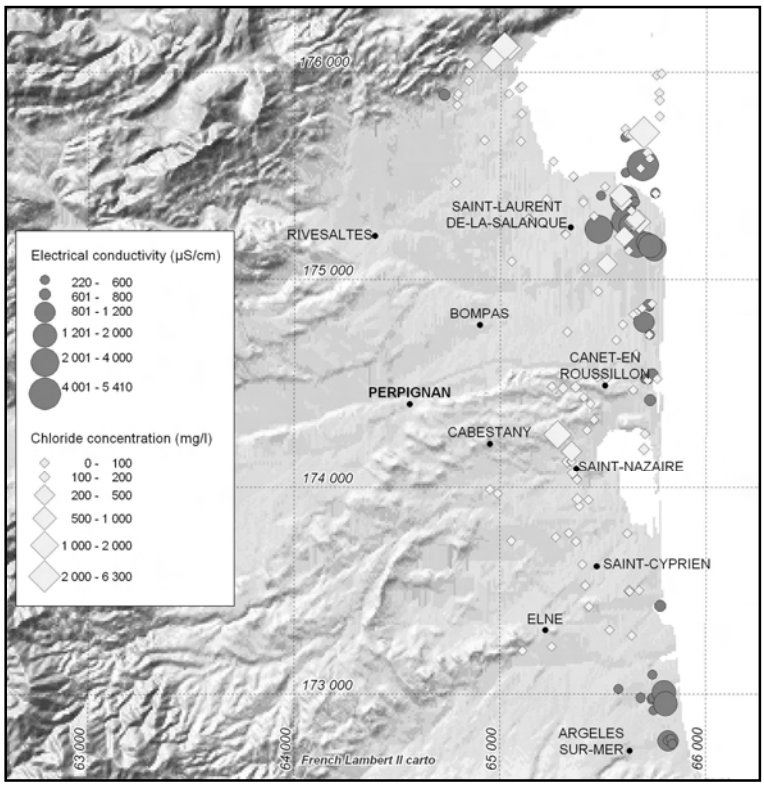


Figure 4 *Coastal water quality in September 2004. Values of electrical conductivity from unconfined superficial aquifer and chloride concentration from confined aquifers. In the north of Roussillon, the Salanque Plain coastal area is more vulnerable to a decrease in water quality because of the presence of the Salses-Leucate lagoon, high hydraulic conductivity and a large number of wells including defective boreholes. In the southern Roussillon, water quality decreases only in the unconfined superficial aquifer in a few places close to the sea (campsites with superficial boreholes).*

Near the coast and since exploitation began, the water level in the Pliocene aquifers has dropped to 0 m regularly during the year (Fig. 5). Moreover, the range in annual variation increases year after year. Although abstractions are almost constant in the Quaternary aquifer, there has been a threefold increase for the Pliocene aquifers since 1975 (Accord-cadre, 2003). A drop in groundwater levels means that leakage direction and vertical flow are reversed: leakage was upward before exploitation, whereas leakage is now downward. Even if no direct connections exist between the sea and the Pliocene aquifers, the risk of seawater intrusion is real because of vertical flow through the contaminated superficial Quaternary aquifer. In the same way, chloride concentration increases locally in a few observation points located in the Pliocene aquifers. At present, these increases are geographically limited, but they are also continuous for each observed point.

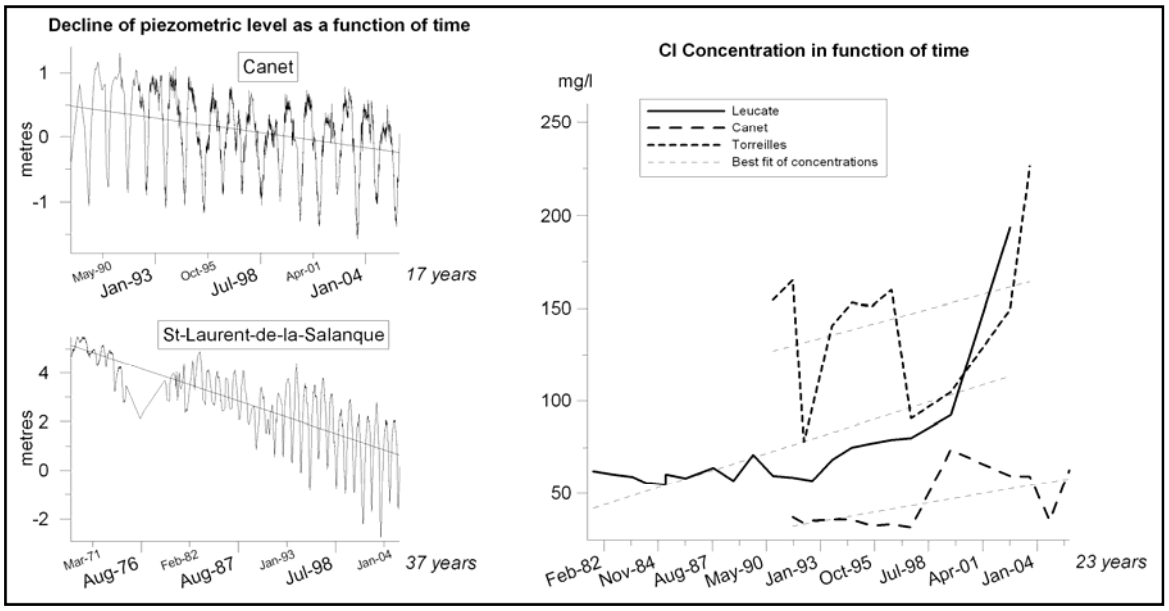


Figure 5 *Piezometric level and chloride concentration as a function of time. All these observations points are located in the Pliocene aquifers near the sea.*

Today, the situation is serious but not totally irreversible. Nevertheless, after field observations, field measurements and geological studies, some quantitative hydrogeological studies are necessary in order to determine the most suitable method for exploiting the Roussillon aquifers. These quantitative hydrogeological studies began with variable-density flow and solute transport simulations (Aunay, forthcoming). In these simulations, because good geological information is available, interconnection and aquifer geometry constitute key parameters. In the same way as geological information, knowledge of the hydraulic conductivity distribution comes from conventional well tests and from geostatistical stress analyses of the geological model of the Roussillon Plain. The aim of the modelling is to determine, amongst other things, the time of occurrence and the velocity of vertical leakage.

Such studies enable the risk of seawater intrusion into the aquifers to be determined in different coastal areas. The saltwater intrusion risk may be assessed for the present time and for various water management scenarios. For example, in the Salanque Plain, because of a specific geology, the origin of which is attributed to differential subsidence, the seawater intrusion risk is more pronounced than in the south of the Roussillon Basin. Regarding hydrogeological results, the water management recommendations will be different for each aquifer. These recommendations, resulting from geological and hydrogeological models, need to be discussed with the stakeholders to determine the best ways of ensuring sustainable water management.

4. Identifying water management scenarios through consultations with stakeholders

Because stakeholders have different technical backgrounds, information levels, interests at stake and strategic objectives, they have diverging opinions on the strategy that should be selected for ensuring a sustainable management of the Pliocene coastal aquifer. Taking all these viewpoints into consideration and debating them publicly is a prerequisite for the acceptability of the final decision and successful implementation of the selected policy option. One option for eliciting the diversity of stakeholders' viewpoints consists of conducting a stakeholder analysis (Wellard, 1997) using semi-directive individual interviews. These interviews are preceded by a questionnaire addressing the following issues with (i) current water management practices (opinions, concerns, etc.); (ii) perception of decrease in water quality linked to saltwater intrusion (origin, location, interaction between groundwater and surface water, etc.); (iii) perception of groundwater use by different economic sectors (households, municipalities, agriculture and tourism); (iv) existing and potential water use conflicts; perception of the need for reinforcing regulations and economic tools (tax system, quotas, restrictive

measures for drilling new boreholes, fines, etc.). This section presents the result of such a consultation conducted in the Roussillon case study area, where 35 representatives from public territorial bodies (2), municipalities (9), drinking water utilities (7), farmers' organisations (4), private companies (2), regional research departments and local experts in hydrogeology (7) and government agencies (4) were interviewed. A qualitative summary of the findings is presented below.

4.1 Stakeholders perception of the risk of seawater intrusion

The results of this consultation highlight the fact that stakeholders do not share the same view of the risk of seawater intrusion, its significance in the current situation, its origin and its possible consequences in the future. Overall, stakeholders' views of the aquifer correspond to the traditional conceptual model presented in the previous sections (Fig. 2). Although all of the stakeholders concerned acknowledge that the water table has been declining for several decades, some of them do not perceive this as a serious threat. Some of them argue that the drop in the water table is not likely to generate seawater intrusion, since there could be an impervious layer between the sea and the Pliocene aquifers preventing seawater inflow. Similarly, most of the stakeholders are aware that high chloride concentrations have been found in several boreholes along the coast, but their opinions on the origin of the contamination differ. For some stakeholders, the presence of chloride confirms that intrusion actually takes place, whereas others assert that the chlorides found stem from the brackish water contained in the superficial Quaternary deposits through abandoned boreholes. Given the lack of scientific evidence available, the construction of a common perception of the aquifer does not seem possible. As a result, stakeholders are likely to remain entrenched in their beliefs and viewpoints and no real debate can take place as long as these key technical questions remain unsolved by scientific and technical experts and passed on to the public.

4.2 Alternative water management strategies advocated

Since they do not agree on the nature and the intensity of the problem, the groundwater management strategies they advocate significantly differ. A first group of players has called for an immediate and drastic reduction in groundwater abstraction. Others are opposed to this decision and simply recommend that the monitoring of chloride concentrations is upgraded and the control of existing boreholes reinforced, both in terms of monitoring water abstraction and the compliance of boreholes with construction quality standards (to reduce the risk of contamination of deep layers with superficial contaminants). Similarly, although all stakeholders agree that the quantitative pressure exerted on the aquifer will continue to increase over the coming years, mainly due to sustained population growth, they disagree on the policy that should be developed at a regional level to meet the mounting water demand. The following three main strategies are advocated, reflecting the diversity of interests at stake.

The first strategy is based on the assumption that the satisfaction of increasing drinking water supply should be considered as a priority objective, overruling all other objectives – agriculture development in particular. The Pliocene aquifer should only be used for drinking water purposes and its use for irrigation in agriculture restricted. This would require developing additional surface water supply for agriculture use: three reservoirs (Caramany, Vinça and Villeneuve de la Raho) could be used as a substitute for groundwater. Inter-basin transfer has also been suggested as a possible solution that could be implemented, with the construction of an aqueduct supplying raw water taken from the Rhône River. The success of this strategy would, however, require that public authorities are able to identify all existing boreholes (most of them are not officially registered), that appropriate regulations are developed to allow the closure of existing wells (and possibly financial compensation allocated) and that local politicians are willing to support this decision.

A second strategy would consist of preserving all existing agricultural and drinking water supply boreholes and allocating them water use quotas corresponding to their current exploitation level (or slightly below if hydrogeological studies confirm that the total abstraction has to be reduced). New drinking water demand would be satisfied through the development of non-conventional resources (desalination) or inter-basin transfers (importation of water from the nearby Corbières karstic aquifer, an aqueduct bringing water from the Rhône River, etc.). The successful implementation of this

strategy would require carrying out a census of existing boreholes, registering them, installing meters and monitoring the implementation of the quota system.

An alternative to the two previous strategies would consist in implementing water demand management actions targeting both the agricultural and drinking water sectors. Irrigation efficiency could significantly be increased for a large number of farms who still use basin or furrow irrigation techniques (Salanque region). Significant water savings could also be achieved in the drinking water sector through various actions, such as reducing leakages in mains distribution systems, households and public services, installing water saving devices such as double button toilet flushes etc., providing economic incentives for reducing per capita water use in households through increased water pricing, reducing irrigation of public gardens, developing waste water recycling systems for irrigating greens on golf courses, public gardens, etc.

4.3 Socio- political implications

The implementation of any of the strategies described above would, however, be difficult due to political and economic constraints. For instance, a reduction in groundwater use by the farming sector is a very sensitive political issue; farmers are strongly opposed to any restrictions in their access to the aquifer. They have only accepted, after long negotiations, that a census of agricultural wells is carried out. Water meters remain very rare, even though this has been required by law since 1997 and they are generally opposed to the idea of substituting groundwater with surface water resources, since this alternative would probably be more costly, its supply less flexible and provide water of lower quality. Many stakeholders are also opposed to the idea that the drinking water supply should be considered as a priority as long as no water saving efforts have been made in this sector. Between 25 and 50% of losses occur in drinking water networks and huge volumes of water pumped from the Pliocene aquifers are used for watering lawns or golf courses and filling swimming pools. Some stakeholders also point out that many households have drilled private wells to access the Pliocene aquifers (Perpignan region) and that these should be regulated as a priority. Building a political consensus will require a significant negotiation effort and the water management policy that may be adopted by all the parties will probably be a compromise of the three options described above.

5. Conclusion

Based on a French case study, this paper shows that assessing the risk of sea water intrusion in complex multi-layer systems is technically and sociologically complex. It also shows that this complexity favours the emergence of different and sometimes opposing viewpoints among stakeholders, who, because they do not share the same diagnosis of the problem, are not likely to agree on the groundwater management solutions to implement. Major sources of uncertainties concerning the intensity of the risk of sea water intrusion are highlighted and a method is proposed for eliminating them. This method consists of conducting a high-resolution geological characterisation of sedimentary prisms resulting in a precise geometry of the aquifers and aquicludes. This knowledge establishes the relationships existing between the different aquifers and their possible connection to the sea. It contributes to establishing the origin of salinity of contaminated boreholes or aquifers in such a complex multi-layered system. Indeed, it is possible to determine whether direct or indirect (defective boreholes) connections with the sea exist. Understanding of the geological framework, hydrogeological field observation measurements and modelling allow the degree of vulnerability to seawater intrusion to be determined.

The results of the stakeholder consultation presented in this study also highlight that, whilst constructing a common understanding of the functioning of the aquifer is a prerequisite to collective action, it is far from being the end of the process. Differences in stakeholders' viewpoints also reflect diverging economic interests. In the Roussillon as in many other places in the world, proponents of demand based management options are opposed to stakeholders calling for the mobilisation of additional resources, either through dam or desalination plant construction (Giordana and Montginoul, 2006).

Acknowledgements

This study forms part of Bertrand Aunay's and Cédric Duvail's PhD work at the University of Montpellier II (France), funded by the regional government of Languedoc-Roussillon (CPER - Syscolag Program) and by the BRGM in the framework of the COMPLEX'AQUI project (EAU15). This work also benefited from financial support from the French Ministry for Ecology and Sustainable Development.

References

Accord Cadre pour la définition d'un programme global de protection et de gestion concertée des ressources en eau de l'ensemble aquifère multicouche plio-quaternaire de la plaine du Roussillon – Connaissance des eaux souterraines de de la plaine du Roussillon (2003) - Water management institutions of Roussillon Basin report. Regional council of Pyrénées-Orientales (CG66), Perpignan, France, 47 p.

Aguilera-Klink F, Perez-Moriana E and Sanchez-Garcia J (2000) - The social construction of scarcity. The case of water in Tenerife (Canary Islands). Ecological Economics, 34, 2, 233-245.

Aunay B (forthcoming) - Importance of sequence stratigraphy knowledge for hydrogeological modeling accuracy applied to coastal water resources management. PhD dissertation, University of Montpellier II.

Auroux F, Noyer ML, Marchal JP and Martin JC (1992) - Management mathematical model of the Roussillon. -in French- BRGM, Montpellier, France, R34 981 LRO 4S 92. 31 p.

Clauzon G, Aguilar J-P, Michaux J (1987) - Pliocene Roussillon basin (Pyrénées–Orientales, France): geodynamical evolution of a Mediterranean ria linked to the Messinian salinity crisis. -in French- C. R. Acad. Sc. Paris 304 II,11, 585-590

Cross TA, Baker MR, Chapin MA, Clark MS, Garner MH, Hason MS, Lessenger MA, Little LD, Mc Donough KJ, Sonnenfeld MD, Valasek DW, Williams MR, Witter DN (1993) - Application of High-Resolution Sequence Stratigraphy to Reservoir Analysis. In Eschard R & Doligez B eds, Subsurface Reservoir Characterization from Outcrop Observations. Technip, Paris: 11-33.

Duvail C, Gorini C, Lofi J, Le Strat P, Clauzon G, Dos Reis AT (2005) - Correlation between onshore and offshore Pliocene-Quaternary systems tracts below the Roussillon Basin (eastern Pyrenees, France). Marine and Petroleum Geology 22, 6-7, 747-756

Giordana G, and Montginoul M (in press, corrected proof) - Policy instruments to fight against seawater intrusion in coastal aquifers: an overview. Life and Environment.

Hardin G (1968) - The Tragedy of the Commons. Science 162, 1243-1248.

Homewood P, Mauraud P and Lafont F (2002) - Best practice in Sequence Stratigraphy for Explorationists and Reservoir Engineers. Vol. Mem. 25. Total ed. Pau. 81p.

Marchal J-P, Plegat R, Benech C, Biscaldi R, Bourgeois M, Juncy G, Ramil F and Sauvel C (1976) - Roussillon Plain. -in French- Hydrogeological map of France, BRGM, Orléans.

Marchal J-P and Chery L (1995) - Marine contamination of the Roussillon Plio-quaternary aquifer (Pyrénées-Orientales) -in french- BRGM report, BRGM R38604, Orléans, France 85 p

Nixon S, Trent Z, Marcuello C and Lallana C (2003) - Europe's water: an indicator-based assessment European Environment Agency report, 1/2003

Plan-Bleu (2005) - A sustainable future for the Mediterranean. The Blue Plan's environment and development outlook Benoit G and Comeau A (eds), Earthscan, London - Streling VA. 432 p

Rinaudo J-D and Garin P (2005) - The benefits of combining lay and expert knowledge for water management planning at the watershed level. Water Policy, 7, 279-293

Wellard K (1997) Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, contexts, experiences and opportunities Agricultural Systems 55, 2, 173-193

Les défis pour une gestion durable de l'eau des aquifères côtiers. Application au bassin du Roussillon.

Aunay B.[1,2], Duvail C.[1,3], Giordana G.[4,5], Dörfliger N.[1], Le Strat P.[1], Montginoul M.[4], Rinaudo J.-D.[1]

1- BRGM *EAU/RMD - 1039, rue de Pinville 34 000 Montpellier - Tel: 33-4 67 15 79 97 - Fax: 33-4 67 15 79 75 - Email: b.aunay@brgm.fr*

2- Hydrosciences Montpellier - Université Montpellier II

3-Laboratoire "Dynamique de la Lithosphère" *UMR 5573 CNRS-Université de Montpellier 2*

4- UMR G-EAU - Cemagref

5- UM1 - LAMETA

Mots clés : aquifère côtier, géologie, hydrogéologie, économie de l'eau, gestion durable

1. INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses zones littorales de l'Europe méditerranéenne ont subi des transformations socio-économiques et démographiques aussi importantes que rapides, qui se sont traduites par des pressions très importantes sur l'environnement, et en particulier sur les ressources en eau. Dans la région méditerranéenne, les pressions sont principalement imputables à l'agriculture et au tourisme, l'industrie étant relativement peu développée à l'exception de quelques grands centres urbains. L'agriculture a été profondément transformée par la première vague d'élargissement de l'Europe des années 1980 : des pays comme l'Espagne et la Grèce ont ainsi vu se développer une agriculture intensive, orientée vers le maraîchage et l'arboriculture et rendue très compétitive du fait du faible coût de la main d'œuvre. Le financement européen de nouvelles infrastructures de transport, permettant l'écoulement rapide des produits maraîchers vers l'Europe du Nord, a accentué ce développement agricole qui s'est poursuivi jusque dans les années 1990. En parallèle, l'augmentation du pouvoir d'achat de la population européenne a conduit à un fulgurant développement des activités touristiques dans ces mêmes zones littorales, notamment dans les années 1970 et 80, avant de connaître un ralentissement au cours des années 1990. Depuis, les zones littorales méditerranéennes sont caractérisées par des taux de croissance démographique très importants, dus à l'arrivée massive de population provenant de régions ou pays du Nord de l'Europe et s'y installant de manière permanente. Ces flux migratoires bouleversent la structure du tissu social, générant occasionnellement des conflits de valeurs entre populations locales et nouveaux arrivants ; ils modifient également le tissu économique, en particulier avec le développement d'une économie reposant fortement sur la production de services de proximité ; enfin, ils génèrent de nouveaux problèmes environnementaux, liés à la forte consommation d'espace des nouveaux arrivants, à l'augmentation des sources de pollution des sols et de l'eau, et surtout, à l'accroissement des prélèvements d'eau.

Dans la plupart des régions côtières méditerranéennes, l'approvisionnement en eau de la population et des activités économiques dépend fortement des ressources en eau souterraine. En l'absence de mécanismes de régulation des prélèvements, ces ressources ont souvent été utilisées au-delà de leur capacité de renouvellement. Les prélèvements étant largement supérieurs à la recharge naturelle, les niveaux piézométriques ont chuté, quelquefois de plusieurs dizaines de mètres, entraînant parfois des intrusions d'eau de mer dans les aquifères côtiers. Si l'intrusion saline peut localement être un phénomène d'origine naturelle, elle est largement amplifiée par l'anthropisme : implantation inadéquate de forages, surexploitation locale des nappes ou forages défectueux mettant en contact de manière inopportune différents niveaux aquifères, dont les plus superficiels peuvent être contaminés par l'intrusion d'eau de mer.

En l'absence de stratégie globale de gestion de ces aquifères côtiers, souvent par manque d'information et de moyens de contrôle sur les prélèvements, on a régulièrement assisté à une "fuite en avant" : les captages contaminés par l'intrusion d'eau de mer sont abandonnés et

remplacés par de nouveaux ouvrages prélevant dans la même ressource mais situés plus à l'intérieur des terres. La surexploitation persiste, le biseau salé continue de progresser, générant une dégradation irréversible des aquifères. Dans les situations les plus critiques, le recours au dessalement d'eau saumâtre devient une nécessité, au moins pour faire face aux pics de demande en période estivale (zones côtières d'Espagne ou des îles telles que Malte, Chypre, les Canaries, etc.).

Depuis la promulgation de la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE), une telle fuite en avant n'est plus possible. En effet, les Etats Membres doivent impérativement mettre en œuvre les mesures nécessaires pour préserver le bon état quantitatif et chimique des eaux souterraines (obligation de résultat) et, dans le cas des aquifères côtiers en particulier, éviter tout risque d'intrusion d'eau de mer. Cet objectif, qui doit être atteint à l'horizon 2015, représente un véritable défi pour trois raisons principales : tout d'abord, parce que la pression quantitative exercée sur les aquifères côtiers se maintient, notamment du fait de la croissance démographique et de la poursuite de l'activité agricole ; ensuite, parce que le cadre réglementaire en vigueur dans la plupart des pays est insuffisant pour permettre une régulation efficace des prélèvements en eau ; enfin, parce que la connaissance des processus hydrogéologiques en jeu reste très insuffisante.

Cet article se propose d'explorer les trois dimensions du problème de la gestion durable des aquifères côtiers.

Dans une première partie, il passe en revue des cas européens de surexploitation d'aquifères en essayant de mettre en évidence les instruments mis en œuvre pour contrôler les prélèvements en eau.

La deuxième partie présente une méthodologie pluridisciplinaire visant à évaluer le risque de dégradation de la ressource, à travers (i) une caractérisation de la géologie des réservoirs, y compris ceux du domaine marin, (ii) les flux d'eau entre compartiments hydrogéologiques et (iii) les différents usages de la ressource en eau souterraine. La finalité ultime de cette recherche pluridisciplinaire est de développer un modèle permettant de simuler l'évolution à moyen et long terme de différents scénarios d'évolution tendanciels – ou de rupture- de l'activité économique.

La troisième et dernière partie présente une application de cette méthodologie au cas de l'aquifère multicouche du Roussillon en France, réalisée dans le cadre du programme de recherche SYStèmes CÔtiers et LAGunaires (Syscolag) de la région Languedoc-Roussillon, Septimanie. Ce cas d'étude est représentatif de la complexité géologique, hydrogéologique et économique des zones côtières méditerranéennes où collectivités locales, agriculteurs et particuliers partagent une ressource en eau commune, fragile et contaminée localement par l'intrusion saline.

2. SUREXPLOITATION DES AQUIFERES COTIERS : ETAT DES LIEUX

Aujourd'hui, environ 70% de la population mondiale vit dans des zones côtières (à une distance inférieure à 60 km de la mer) et les ressources souterraines sont très fortement sollicitées. L'exploitation optimale des aquifères côtiers et le suivi de l'évolution de la position de l'interface eau douce / eau salée constituent les principaux défis des gestionnaires de l'eau (Bear & Cheng, 1999). Nous allons ici présenter sommairement quelques cas de surexploitation des eaux souterraines littorales et les mesures qui ont été prises pour lutter contre l'intrusion d'eau de mer.

2.1. Revue de quelques cas européens d'intrusion d'eau de mer

Une étude conduite par l'Agence européenne pour l'environnement (EEA) a mis l'accent sur le fait que de nombreux pays côtiers (neuf pays sur les onze cités) font état d'une surexploitation côtière, liée à l'approvisionnement public en eau, au tourisme ou à l'irrigation. Il en a résulté une intrusion de l'eau de mer (Nixon *et al.*, 2003) (figure 1).

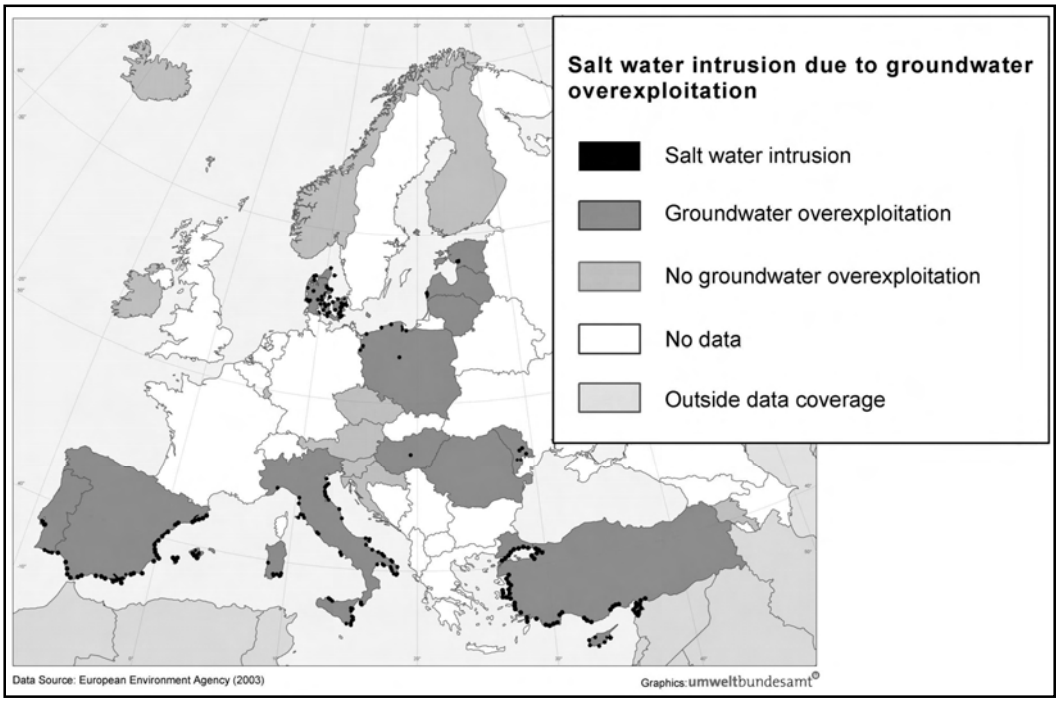


Figure 1 – Intrusion d'eau salée liée à la surexploitation d'aquifère en Europe (Nixon *et al.*, 2003).

En France métropolitaine, sur 5500 km de côtes (et 95 aquifères superficiels plus 17 aquifères profonds), les problèmes d'intrusion saline se localisent essentiellement (Tableau 1) :

- Dans les aquifères en bordure d'estuaires, par exemple en Haute-Normandie où des industries fortement consommatrices d'eau se sont installées (Petit, 1996). Bien qu'il s'agisse de zones particulièrement vulnérables, peu de problèmes ont été recensés.
- Dans les nappes alluviales du littoral méditerranéen où ont été observées des eaux qui présentent une salinité supérieure à 350 mg/l sur une frange côtière qui couvre une surface comprise entre 400 et 500 km^2. Bien que localement, certaines teneurs soient fortes, la frange a toujours existé et n'est pas d'origine anthropique. Les zones éloignées du littoral caractérisées par une forte teneur en sel constituent les points sensibles à surveiller afin d'éviter tout propagation du phénomène. L'absence de prise en considération de ces indices ont conduit certains pays à abandonner les ressources en eau souterraines des zones littorales.

- Dans les nappes profondes, lorsque deux conditions sont réunies : (i) salinité élevée dans la nappe superficielle libre en contact avec la mer et (ii) inversion du gradient hydraulique entre nappe superficielle et nappe profonde. Ce phénomène se produit localement ou régionalement, suite à de forts prélèvements, le niveau piézométrique des nappes profondes devenant inférieur à celui de la nappe superficielle qui est envahie par l'eau de mer. Les flux verticaux entre les aquifères superficiels et profonds (drainance) s'établissent essentiellement le long de forages défectueux ou lorsque la couche imperméable séparant les deux aquifères rétrécit ou est inexistante.

Différents degrés de gravité ont pu être distingués dans les aquifères atteints par l'intrusion d'eau de mer dont l'origine est anthropique (Petit, 1996 ; Dörfliger, 2003).

Degré de l'invasion d'eau de mer	Aquifère	Usage
Généralisé	Estuaires de la Seine, et de l'Arques (Haute-Normandie).	Prélèvements industriels
Limité et stable	Plaines alluviales du littoral méditerranéen : Plaine du Gapeau, plaine de l'Argens et plaine du Golo en Corse Aquifères superficiels de la côte aquitaine	
Saisonnier et réversible	Département du Calvados ; Région de Créances-Lessay (Manche) Nappes du Lias et du Dogger à proximité du marais poitevin	Calvados : AEP[1] Créances-Lessay : irrigation
Localisé	Littoral méditerranéen du Roussillon au Languedoc (aquifères alluviaux superficiels) : plaines de l'Aude, de l'Orb, du Roussillon, du Lez, Vistrenque et plaine de la Crau Bretagne Aquifères karstiques de Thau et de la région PACA	AEP (tourisme), irrigation
Dans aquifères profonds	Nappe captive des sables et conglomérat du Pliocène Continental et marin sableux (Hérault) Nappe captive des sables et conglomérat du Pliocène Continental et marin sableux (Pyrénées-Orientales)	AEP, irrigation

Tableau 1 - Aquifères littoraux influencés par l'anthropisme, dont les teneurs en chlorures sont supérieures à la norme (d'après Petit, 1996 ; Dörfliger, 2003)

Cet état des lieux étant établi, il est important enfin de noter que les impacts économiques liés à la dégradation des eaux souterraines littorales peuvent être forts. Globalement, ils sont proportionnels au degré de l'invasion marine. L'abandon des captages et le coût de recherche de ressources de substitution, ou encore la salinisation des terres agricoles sont des conséquences directes de l'augmentation de salinité dans un aquifère.

2.2. Instruments mis en œuvre pour lutter contre l'intrusion d'eau salée

Trois types d'actions sont menés par le régulateur (qui peut être multiple) pour lutter contre l'intrusion d'eau de mer[2] :

1. *Acquisition d'informations*. Quasi-systématiquement dans tous les cas étudiés, des études sur l'état et le fonctionnement de l'aquifère sont conduites. Ainsi, la majorité des pays dont les ressources en eau sont contaminées par une intrusion saline ont déjà mis en place un programme de surveillance de l'état chimique et quantitatif des eaux souterraines. En règle générale, ce programme consiste à suivre l'évolution de la salinité par analyses chimiques et à observer les variations du niveau des nappes via un réseau de piézomètres. Plus

[1] AEP : Alimentation en Eau Potable

[2] Les éléments présentés ici sont issus d'une revue de littérature conduite par le Cemagref (Giordana & Montginoul, 2004) avec le soutien du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

exceptionnellement, des actions de recensement des forages sont projetées mais non encore réalisées, comme c'est le cas en Algérie.

2. *Augmentation de l'offre*. C'est souvent la première action de gestion mise en place et qui est réalisée avant de réfléchir à une gestion intégrée de la ressource en eau. Elle se traduit de deux manières :

   - en agissant sur l'offre en eau de surface : construction de barrages (plaine du Roussillon, Chypre, Espagne, Grèce) ou d'aqueducs (Angleterre, Californie, Italie), dessalement d'eau de mer (Algérie, Espagne, Grèce, Italie), recyclage des eaux usées (Algérie, Angleterre, Chypre, Espagne, Grèce, Italie). L'objectif est souvent alors de réserver l'eau souterraine pour les usages nobles et de satisfaire les autres usages par des eaux de moindre qualité.

   - en réalisant des aménagements pour réalimenter artificiellement la nappe (Californie, Chypre, Croatie, Italie, Liban, Turquie) ou en construisant des barrages souterrains pour empêcher l'intrusion d'eau salée (Californie, Turquie) ou des galeries souterraines pour augmenter la capacité de stockage (Angleterre, Croatie).

3. *Gestion de la demande*. Cette action est marginale dans les décisions de gestion conduites jusqu'à présent. Ce n'est souvent qu'une fois les solutions d'augmentation de la ressource épuisées ou devenant trop coûteuses, que des actions sur la demande sont envisagées. De plus, elles ne fonctionnent toujours pas parfaitement du fait de la méconnaissance des préleveurs réels. Les différentes actions de gestion de la demande recensées s'établissent comme suit :

   - Définition de "droits de propriété" : autorisation (Californie, Espagne, France, Liban), licence (Angleterre, Italie, Turquie), concession (Espagne).

   - Instauration de rationnement en cas de crise se traduisant souvent par une interdiction d'arrosage ou de remplissage des piscines (Chypre, Espagne, France, Pays-Bas)

   - Obligation de comptage (Angleterre, Orange en Californie, France)

   - Programme d'information relatif à l'économie d'eau (Californie, Chypre, Grèce, Iles Baléares, Turquie) et à la réduction des pertes (Iles Baléares).

   - Tarification de la ressource en eau souterraine. Appliquée parfois lors d'un service rendu tel que la recharge de la nappe (exemple d'Orange en Californie) ou indépendamment de tout service (Angleterre, Californie, France avec les redevances des Agences de l'Eau, Pays-Bas).

   - Pénalités pour surexploitation. Aucune politique de ce type ne semble avoir été instaurée. Elle est toutefois prévue en Albanie.

3. CONNAITRE LA RESSOURCE POUR MIEUX LA GERER : UNE METHODOLOGIE D'ETUDE INTEGREE ENTRE GEOLOGIE, HYDROGEOLOGIE ET ECONOMIE

Afin d'optimiser la gestion des ressources en eau, ayant pour objectif leur préservation sur le long terme, l'enjeu indispensable est d'intégrer la compréhension du fonctionnement des aquifères côtiers au modèle de gestion des ressources en eau du littoral. Au vue de la complexité de l'environnement naturel et anthropique des hydrosystèmes littoraux, il est nécessaire d'effectuer une démarche intégrée.

Dans le cadre du programme Syscolag (SYStèmes CÔtiers et LAGunaires – Région Languedoc-Roussillon, Septimanie), une méthodologie d'étude a été élaborée dans le but de fournir des outils pour la gestion optimisée de la ressource d'eau souterraine littorale. Cette méthodologie, axée sur la recherche opérationnelle, se décompose selon un triptyque de thématiques de recherches pluridisciplinaires : géologie, hydrogéologie et économie (figure 2).

- la géologie permet d'appréhender l'architecture et la géométrie des différentes formations susceptibles d'abriter des ressources en eau ;

- l'hydrogéologie s'emploie à déterminer les formations aquifères et leurs propriétés hydrodynamiques, à étudier et à caractériser les circulations d'eau souterraine tout en employant les données de la géologie. Ses résultats se présentent sous la forme de divers scénarios de modélisation considérant à la fois la croissance des besoins en eau des différents usagers et l'impact des variations climatiques ;

- l'économie s'attache à déterminer les instruments de gestion à mettre en place afin d'arriver à une gestion durable de cette ressource, en tenant compte des évolutions prévisibles et des résultats issus des simulations hydrogéologiques.

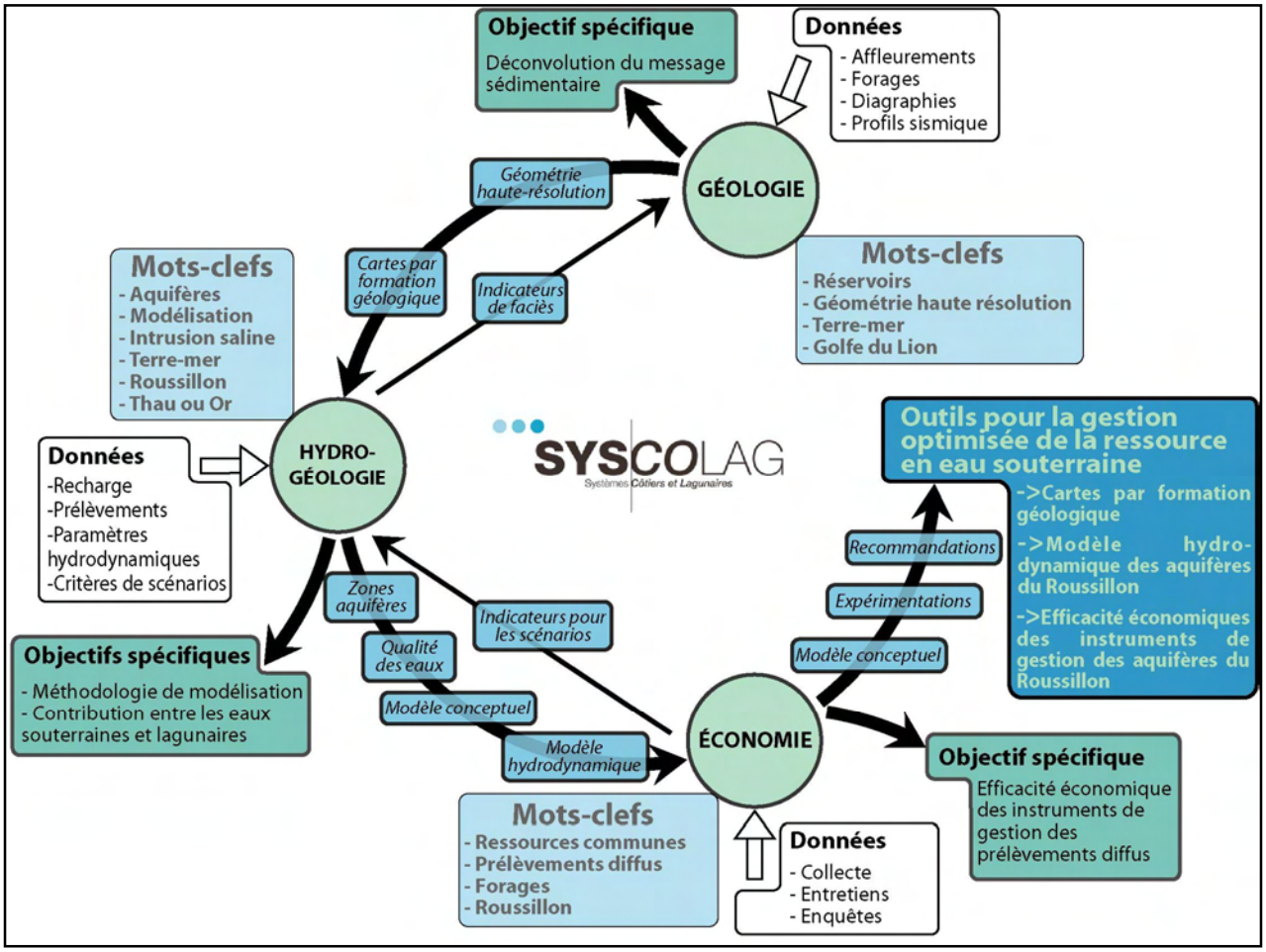


Figure 2 – Organigramme du triptyque de recherche opérationnelle géologie / hydrogéologie / économie[1]

3.1. Géologie

La zone côtière possède plusieurs particularités nécessitant une démarche géologique spécifique.

La première est d'ordre géographique et correspond à la présence de la frontière entre le domaine marin et le domaine continental. Le littoral est très fréquemment une limite aux études du sous-sol puisqu'elle sépare deux zones sur lesquelles les informations géologiques sont de nature différente. Il s'agit pour le domaine continental des données de forages (débris, roches et imagerie géophysique) et d'affleurements (partie visible des formations géologiques), interprétées à l'aide

[1] Organigramme présenté le 29 juin 2004 lors du 4ème séminaire Syscolag – Montpellier

des concepts de la stratigraphie génétique ou stratigraphie séquentielle de faciès[1] (Cross, 1988 ; Galloway, 1989 ; Guillocheau, 1991 ; Homewood *et al.*, 1992). Le domaine marin offre principalement des données d'imagerie par sismique réflexion issues de la recherche universitaire, de l'Ifremer et de l'industrie pétrolière. Elles sont interprétées en s'appuyant sur les concepts de la stratigraphie séquentielle[2] (Vail *et al*., 1977 ; Posamentier & Vail, 1988 ; Posamentier *et al*., 1988 ; Van Wagoner *et al*., 1988). La démarche utilisée ici est novatrice, elle correspond à l'étude des deux domaines, avec leurs données et méthodes respectives, puis à leur corrélation permettant d'obtenir la répartition des corps sédimentaires selon un continuum terre-mer. Les corrélations terre-mer reposent sur l'analyse des modalités d'empilement des formations sédimentaires. Il s'agit de l'empilement des séquences génétiques à terre et de celui des prismes sismiques en mer. Ces variations d'empilement sont le reflet d'évènements géologiques, qu'ils soient climatiques, tectoniques ou eustatiques. Les corrélations terre-mer ne se basent donc ni sur des arguments géométriques, ni sur des arguments lithologiques mais reposent sur la mise en cohérence des évènements géologiques enregistrés dans chaque domaine, qu'ils soient locaux, régionaux ou globaux.

La seconde particularité de la zone côtière est d'ordre géologique. Depuis peu de temps (2,6 millions d'années), la terre est soumise à des fluctuations climatiques de grande ampleur et de haute fréquence contrastant avec les climats antérieurs beaucoup plus stables. Ce phénomène naturel, induit par la géodynamique (le continent antarctique occupe le pôle sud), s'exprime sous forme d'alternances de périodes glaciaires et interglaciaires (période actuelle) et implique des variations du niveau de la mer fréquentes et de grande ampleur. Plus de 50 cycles ont été ainsi mis en évidence (Shackleton *et al.*, 1984) avec des variations du niveau marin global atteignant une amplitude paroxysmale de 120 mètres entre 18 000 ans BP (Before Present) et nos jours. Ces modifications des facteurs géologiques rapides et de grande ampleur induisent des dépôts sédimentaires de faible épaisseur et de nature lithologique hétérogène très variable . La démarche utilisée face à cette particularité est de travailler en "haute-résolution", c'est à dire d'individualiser les corps sédimentaires à l'échelle la plus fine possible.

Les corps sédimentaires sont individualisés par des surfaces renseignées géographiquement et altitudinalement (X, Y, Z) afin de fournir à l'étude hydrogéologique un modèle géologique en trois dimensions.

3.2. Hydrogéologie

L'hydrogéologie est la science qui traite de la circulation des eaux dans le sous-sol. Dans le cadre de l'élaboration d'outils pour la gestion optimisée de la ressource d'eau souterraine en zone côtière, l'évaluation de la ressource constitue l'enjeu essentiel de l'hydrogéologie. L'évaluation de la ressource permet de bâtir les fondations sur lesquelles reposeront les scénarios d'exploitation futurs.

La compréhension et la maîtrise du fonctionnement d'un aquifère est indispensable avant d'aborder tout problème d'intrusion d'eau de mer (Custodio, 1997). Dans la méthodologie développée, les objectifs de la recherche hydrogéologique sont au nombre de quatre (figure 2) :

1. **Détermination des zones aquifères**. Les recherches menées en géologie permettent de déterminer les limites verticales et horizontales de chaque aquifère. A l'échelle d'un hydrosystème composé de différents aquifères, il est indispensable de connaître le volume d'eau prélevé pour chacun d'eux.

[1] Étude de stratigraphie séquentielle partant des briques élémentaires identifiables sur carottes et diagraphies

[2] Mise en évidence de séquences stratigraphiques à valeur chronologique, essentiellement à l'échelle de la sismique

En Méditerranée, les aquifères littoraux poreux s'organisent généralement selon un même schéma conceptuel qui est fonction des variations du niveau marin passé (Aunay *et al.*, 2004). De haut en bas :

- Un premier système aquifère libre superficiel localisé dans des formations alluviales et vulnérable aux pollutions. Sur le littoral, le problème de salinité est omniprésent et la présence de nitrates n'est pas à exclure, si l'activité agricole est fortement présente.

- Un second système plus ou moins captif composé de un ou plusieurs aquifères, dont la qualité des eaux est assez bonne. Ces aquifères "profonds", même localisés sur le littoral, sont rarement exposés *naturellement* au risque d'intrusion saline. Le nombre des aquifères profonds est variable : il peut atteindre le nombre de 6 dans le bassin aquitain, par exemple.

2. **Connaissance de la qualité des eaux**. Dans le cadre d'une cohérence des schémas de gestion de l'eau, la qualité des diverses nappes doit être connue. Ainsi, une eau présentant des teneurs élevées en nitrates pourra être destinée à un usage agricole ou industriel. De même, les eaux de bonne qualité issues des aquifères profonds devraient être uniquement destinées à l'alimentation en eau potable. La qualité des eaux souterraines est déterminée à la suite d'analyses chimiques[1]. Ces dernières permettent aussi de déterminer l'origine de l'anomalie en chlorures. Habituellement, l'augmentation de chlorures est liée à une invasion d'un aquifère par de l'eau de mer, néanmoins la dissolution de roches évaporitiques, la pollution liée à l'anthropisme (décharges, égouts, salage des routes, effluents industriels) ou encore l'irrigation à partir d'eau salée peuvent être à l'origine d'une augmentation de chlorures.

3. **Élaboration d'un modèle conceptuel**. Les volumes d'eau prélevés, la recharge efficace via les précipitations et l'irrigation ainsi que les interactions intrinsèques à l'hydrosystème sont connus pour chaque aquifère de l'hydrosystème. La géométrie des aquifères et leur relation entre eux selon leur agencement dans l'espace 3D est définie. De même, les propriétés hydrodynamiques[2] doivent être connues pour chaque aquifère. Enfin, les problèmes locaux ont régionaux de pollution doivent être aussi mentionnés dans le modèle conceptuel. Dans le but de comprendre l'évolution temporelle future de l'aquifère, des données plus anciennes doivent être intégrées à l'élaboration du modèle.

4. **Élaboration d'un modèle numérique hydrogéologique**. Le modèle numérique (modélisation discrète, couplée hydrodynamique et transport) permet de simuler la position de l'interface eau douce / eau salée sur l'ensemble des aquifères en fonction des sollicitations anthropiques ou naturelles de l'hydrosystème. Lorsque le modèle est fiable, c'est à dire qu'il reproduit correctement les observations passées, il devient utilisable pour simuler les variations futures. Différents paramètres d'influence variable sur la position de l'interface eau douce / eau salée peuvent ainsi être testés : (i) augmentation locale ou régionale des prélèvements, (ii) augmentation saisonnière ou annuelle des prélèvements (expansion du tourisme, croissance démographique), (iii) impact de l'implantation de nouveaux captages dans les différents aquifères en fonction des besoins (eau potable, irrigation, industrie), (iv) diminution de la recharge des aquifères dans le cadre de variations climatiques.

Les résultats des simulations se présentent sous la forme de divers scénarios de modélisation qui seront pris en compte par l'aspect économique dans le cadre d'une gestion durable des aquifères littoraux. Les besoins qualitatifs et quantitatifs sont différents pour chaque demande en eau et les divers scénarios de simulation pourront aiguiller les choix et politiques de gestion.

[1] Décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles

[2] Paramètres décrivant la circulation et le stockage d'eau dans les aquifères telles que transmissivité, porosité et emmagasinement

3.3. Économie

L'apport du volet "économie" consiste à l'identification des instruments économiques, réglementaires et contractuels, permettant d'assurer une gestion durable des aquifères lorsque ceux-ci sont exploités par un grand nombre d'usagers aux caractéristiques hétérogènes et sur lesquels le gestionnaire ne dispose que de très peu d'informations quantitative et géographique (prélèvements "diffus").

Le travail est sub-divisé en quatre phases : (i) travaux de terrain, (ii) modélisation, (iii) expérimentation, (iv) recommandations de politique publique.

L'objectif final des **travaux de terrain** est de recueillir des informations pour bien alimenter le modèle d'exploitation de l'eau souterraine en fournissant des hypothèses à tester sur le comportement individuel des usagers. Dans l'étape de **modélisation**, il sera procéder à la formulation des hypothèses de comportement des préleveurs vis-à-vis de la ressource, en travaillant à partir de la bibliographie existante sur la modélisation de l'exploitation de l'eau souterraine et des résultats des travaux de terrain.

L'**étape d'expérimentation** est destinée à évaluer l'efficacité des différents instruments de gestion des prélèvements dans un contexte où le régulateur ne dispose pas d'une information parfaite sur les prélèvements individuels, en se servant des outils méthodologiques de l'économie expérimentale. L'économie expérimentale est une méthode consistant à reconstituer une situation économique stylisée en laboratoire. L'économiste sélectionne les éléments qui caractérisent au mieux le phénomène étudié. Dans ce contexte contrôlé ("l'environnement institutionnel"), sur la base d'un protocole, l'expérimentateur organise la prise de décisions et les interactions entre les participants à l'expérience. Selon des règles précises, des informations sont échangées. Les décisions des participants et leurs réactions face à une variation des paramètres de l'environnement de décision constituent un ensemble de données qui font ensuite l'objet d'analyses et tests statistiques (Ostrom *et al.*, 1994). L'approche expérimentale permet également d'évaluer de nouvelles politiques et des nouveaux "designs" institutionnels ou organisationnels sans avoir à subir les coûts sociaux, privés et politiques associés à leur mise en place et en évitant une véritable expérimentation préalable ("murmurant dans les oreilles des princes"[1]). Ainsi, avec la mise en place des protocoles expérimentaux appropriés, un avis complémentaire pourra être donné sur l'efficacité des instruments envisagés pour la gestion des prélèvements dans les aquifères côtiers.

4. LE ROUSSILLON : UNE PLAINE COTIERE SIGNIFICATIVE DES ENJEUX DE LA GESTION DE L'EAU

Tant au point de vue géologique, hydrogéologique qu'économique, la plaine côtière du Roussillon (Pyrénées-Orientales) est représentative de la complexité des zones littorales méditerranéennes. L'application de la méthodologie d'étude développée au cours des paragraphes précédents sera présenter ci-dessous. De plus, le choix du Roussillon en tant que terrain d'étude sera justifié.

4.1. Le Bassin du Roussillon : un domaine géologique à forte empreinte méditerranéenne

Le bassin du Roussillon forme une large plaine qui échancre la partie orientale des Pyrénées. L'histoire géologique de ce bassin sédimentaire a été fortement marquée par un événement d'ampleur méditerranéen nommé "Crise de Salinité Messinienne" (Hsü *et al.*, 1973). Cet événement, sans équivalent connu, est initié par l'interruption des circulations marines entre la Mer Méditerranée et l'Océan Atlantique (Benson *et al.*, 1991) du fait de la fermeture du détroit de

[1] En utilisant les mots de (Roth, 1995)

Gibraltar (il y a 6 millions d'années). Le bassin méditerranéen devient alors endoréique ce qui provoque, par évaporation, une chute du niveau de la mer d'au moins 1500 mètres (Hsü *et al.*, 1973 ; Ryan, 1976 ; Clauzon, 1982). Une des conséquences fut de créer un déséquilibre des profils des fleuves qui se mirent à entailler le pourtour méditerranéen en formant de véritables canyons : les canyons messiniens. Environ 700 000 ans plus tard (Gautier *et al.*, 1994), à la faveur du retour des connexions entre Océan et Mer, le niveau méditerranéen remonte rapidement (Clauzon *et al.*, 1996) à une altitude supérieure celui connu actuellement.

Les aquifères des plaines littorales actuelles se localisent dans les sédiments déposés après cet événement commun à l'ensemble de la Méditerranée. Il s'agit des deltas de l'époque pliocène (5,3 à 4,2 millions d'années). Ils fossilisent les canyons messiniens avec la particularité d'avoir une accommodation (espace disponible à la sédimentation) très importante ce qui leur confère une géométrie et une architecture particulières (Gilbert, 1885 et 1890). Cette sédimentation perdure jusqu'à l'arrivée des premiers cycles glaciaires / interglaciaires qui engendrent des variations du niveau de la mer de haute fréquence et de grande amplitude. Cette période a pour conséquence d'une part d'éroder les formations pliocènes antérieures et d'autre part de déposer des nappes alluviales attribuées, en partie, à la période quaternaire.

Le Bassin du Roussillon est un site privilégié pour l'étude des corps sédimentaires pliocènes et quaternaires (figure 3), car il offre un grand nombre de données que ce soit à terre (forages et affleurement) ou en mer (forages et profils sismique). En outre, ce domaine a été marqué par une subsidence non négligeable ayant pour effet de dilater les corps sédimentaires et de limiter leur érosion.

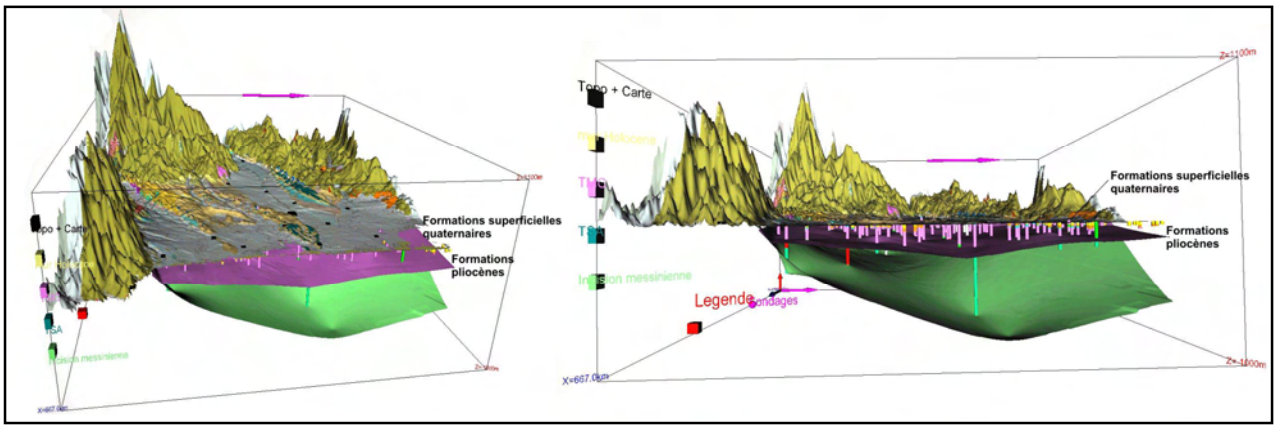


Figure 3 –Modèle géologique 3D de la plaine du Roussillon.

4.2. Le fonctionnement hydrogéologique complexe de la plaine du Roussillon

4.2.1. Choix de la zone d'étude

Comme cela a été mentionné précédemment, la géologie de la plaine du Roussillon est représentative de la géologie littorale méditerranéenne. De fait, les concepts et problématiques hydrogéologiques présentent des similitudes marquées sur l'ensemble du littoral méditerranéen. Ainsi, le problème récurrent des intrusions salines dans les aquifères littoraux existe sur le long de la côte Roussillonnaise. Le phénomène est marqué mais pas encore dramatique. Le Conseil Général des Pyrénées-Orientales a été d'accord pour reconnaître que ce secteur est propice au développement d'une gestion optimisée des ressources en eau du littoral.

De plus, l'hydrogéologie de la plaine du Roussillon a été étudiée et suivie depuis de nombreuses années (Got, 1965). Les variations piézométriques et les analyses chimiques des différents aquifères ont été archivées au sein de divers organismes.

4.2.2. Application

Les résultats de recherche en géologie permettent d'obtenir la localisation et les limites de chaque aquifère. En recherchant la profondeur de chaque forage, il est possible d'en déduire les volumes d'eau prélevés. A ce jour, les données de l'Accord Cadre[1] présentent une synthèse dichotomique de ce système (tableau 2).

	AEP	Irrigation	Industriel	Particuliers	**Total**
Aquifères alluviaux superficiels	14,9	23	0,6	5 ?	**43,5**
Réservoir plio-quaternaire	27,9	5	3 ?	1 ?	**36,9**
Total	**42,8**	**28**	**3,6**	**6**	**80,4**

Tableau 2 - Estimation des prélèvements effectués dans l'ensemble aquifère multicouche plio-quaternaire de la plaine du Roussillon, en millions de m^3. (extrait de l'Accord Cadre – Connaissance des eaux souterraines de la plaine du Roussillon, 2003)

La figure 4 présente le modèle conceptuel de l'hydrosystème de la plaine du Roussillon. Les problèmes d'augmentation de salinité dans les forages du Roussillon y sont évoqués. Dans le cas du Roussillon, l'augmentation de chlorures dans l'aquifère libre superficiel est liée à une différence de densité et amplifiée par l'anthropisme (pompage). Dans les aquifères plus profonds, l'augmentation de chlorures semble être liée à des flux verticaux entre aquifère superficiel contaminé et aquifères inférieurs sains et ceci via des forages défectueux (Marchal & Chery, 1995). Ces derniers mettent en connexion différents aquifères hydrogéologiquement indépendants.

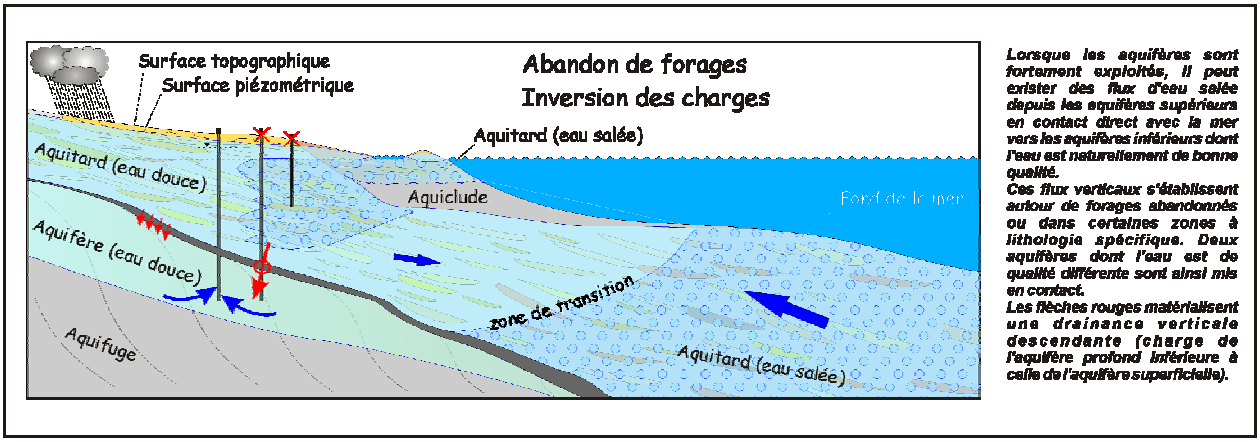


Figure 4 - Modèle conceptuel hydrogéologique simplifié et problématique de l'augmentation des chlorures dans les forages du Roussillon.

[1] Comité de rédaction composé des ingénieurs et techniciens de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMEC), du BRGM, de la Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales (CDA66), du Conseil Général des Pyrénées-Orientales (CG66), de la Direction Départementale de l'Agriculture et la de la Forêt (DDAF), de la Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS), de la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN)

4.3. Économie

4.3.1. Choix de la zone d'étude

Les zones littorales sont souvent confrontées à de nombreuses pressions dues à des usages multiples : agriculture, alimentation en eau potable (tourisme) et industrie. Chaque usage peut se caractériser en terme de quantité d'eau, de niveau minimum de qualité de l'eau requise ainsi que de moment d'accès. En effet, la demande en eau peut présenter un caractère saisonnier, ce qui est particulièrement le cas en zones côtières où la saison d'irrigation coïncide avec la période touristique. La pression sur l'eau souterraine est alors forte à un moment où la recharge naturelle est au point le plus bas. Ainsi, le problème qui se pose ici combine deux aspects : un aspect spatial et un aspect temporel. L'aspect spatial résulte de la localisation de la ressource et des activités humaines, et l'aspect temporel de la dynamique généralement inversée entre l'offre et la demande en eau.

L'intérêt d'étudier la plaine côtière du Roussillon réside dans le fait qu'elle constitue un cas représentatif de cette situation. Plus précisément, les usages principaux sont l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Le premier représente environ 73% (estimé) des demandes au système aquifère plio-quaternaire, qui sont en augmentation constante (il est prévu une augmentation de 40 000 habitants d'ici 15 ans). De façon similaire à l'agriculture, la demande pour l'eau potable présente une saisonnalité importante due à la forte activité touristique des stations balnéaires littorales qui concentrent chaque été une population saisonnière évaluée à 700 000 personnes. Sachant que les conséquences les plus néfastes de la dégradation des eaux souterraines ne se sont pas encore produites, il est fort possible que la mise en place d'une "gestion optimisée" de la ressource en eau permette un développement soutenable (dans le sens le plus large du terme) des activités économiques locales.

4.3.2. Application

A partir d'un modèle économique simplifié représentant le comportement des usagers et de l'aquifère multicouches, des instruments de gestion des prélèvements sont testés via des expériences. Le tableau 3 présente ainsi des instruments applicables pour la gestion de l'eau souterraine en France et qui pourraient être testés. Ces expériences permettront d'évaluer l'efficacité de ces instruments sur l'aquifère et d'analyser les impacts sur les usagers. Des scénarios sur l'évolution géographique des prélèvements pourront être fournis pour alimenter des simulations du modèle hydrogéologique[1].

	Réglementaires	**Économiques**	**Contractuels**
État	Déclaration/Autorisation des forages. Information sur les prélèvements. Interdictions par arrêtés préfectoraux.	Pénalités si fraude ou non respect	Contrats Territoriaux d'Exploitation
Département	Outils d'aménagement foncier		
Communes	Plan d'Occupation du Sol (POS) ou Plan Local d'Urbanisme (PLU)	Tarification AEP	
Associations, syndicats ou sociétés	Accords qui peuvent impliquer des mesures réglementaires, économiques et contractuelles.	Tarification eau irrigation	Outils d'aménagement foncier : SAFER

Tableau 3 - Instruments applicables pour la gestion de l'eau souterraine en France

[1] Il faut souligner que la proposition des scénarios pour la prospective mobilise les connaissances d'autres sciences et métiers autres que la géologie, hydrogéologie et l'économie) tels que la sociologie, les sciences politiques, etc qui ne seront pas incorporées dans le cadre de notre travail (bien sûr des hypothèses les plus vraisemblables seront formulées).

5. CONCLUSION

Les zones littorales du sud de l'Europe sont des territoires caractérisés par des évolutions significatives et très rapides de leur environnement économique et démographique. L'agriculture, le tourisme et l'afflux de nouveaux habitants en provenance des régions du Nord de l'Europe contribuent à exercer une pression toujours croissante sur l'espace et les ressources naturelles. Ces pressions affectent en particulier les aquifères côtiers qui représentent souvent la principale ressource en eau, notamment en région méditerranéenne. La surexploitation de ces aquifères, conduisant à leur dégradation irréversible par intrusion d'eau salée, est déjà observée dans un certain nombre de régions ; dans de nombreuses régions littorales méditerranéennes, elle pourrait s'accentuer dans les années à venir si aucune politique de gestion durable de ces ressources n'est mise en place.

L'aménagement de telles politiques de gestion se heurte à deux difficultés majeures. Tout d'abord, il reste relativement difficile d'évaluer le risque d'intrusion d'eau de mer et de construire des scénarios à moyen et long terme d'évolution du biseau salé. En effet, toute prévision d'évolution due à la qualité de l'aquifère présuppose une bonne connaissance (i) de la géologie, et en particulier du continuum entre la partie terrestre et maritime des couches géologique et (ii) des flux hydrauliques existant entre les différents compartiments d'hydrosystèmes souvent complexes (aquifères multicouches, en liaison avec les eaux superficielles, des réservoirs karstiques, etc.). De plus, la mise en place d'une gestion durable des eaux souterraines suppose que la puissance publique dispose d'instruments réglementaires ou économiques efficaces pour réguler l'intensité des prélèvements. Un examen de situations réelles montre que les décideurs publics cherchent généralement à régler le problème de la surexploitation des aquifères côtiers en recherchant des ressources alternatives (importation d'eau d'autres régions, recyclage d'eaux usées, dessalement d'eau saumâtre ou de mer, etc.). Mais cette politique de gestion de l'offre montrant ses limites, il apparaît de plus en plus nécessaire de mettre en place des instruments permettant de gérer la demande. Compte tenu de la difficulté technique à recenser les forages et connaître les volumes prélevés, de nouveaux instruments sont à mettre au point, en s'inspirant des expériences appliquées pour la gestion d'autres ressources naturelles.

La problématique abordée dans cet article est par nature transversale ; elle appelle la mise en œuvre d'une approche pluridisciplinaire mobilisant théorie et concepts de la géologie, de l'hydrogéologie et de l'économie. L'objectif ultime est l'élaboration de scénarios d'évolution de l'environnement socio-économique sur l'état de la ressource en eau souterraine. Les scénarios reposeront sur le développement d'un modèle mathématique, conçu comme un support de réflexion prospective plus que comme un outil prédictif.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUNAY B., DUVAIL C., LE STRAT P., DOERFLIGER N., LACHASSAGNE P. & PISTRE S. (2004) - Importance of a high resolution lithological and geometrical knowledge for mediterranean coastal sedimentary aquifers management, 18th Salt Water Intrusion Meeting - IAH, IHP-UNESCO, IGME - Cartagena - Espagne - 31/05-03/06/2004.

BEAR J. & CHENG A. H.-D. (1999). Seawater intrusion in coastal aquifers - Concepts, methods and practices. Dordrecht, Boston, London, Kluwer. 624 p.

BENSON R. H; RAKIC-EL BIED K. & BONADUCE G. (1991) - An important current reversal (influx) in the Rifian Corridor (Morocco) at the Tortonian-Messinian boundary; the end of Tethys Ocean. *Paleoceanography*, **6**, 1, pp.165-192.

CLAUZON G. (1982) - Le canyon messinien du Rhône; une preuve décisive du "Desiccated deep-basin model" (Hsü, Cita and Ryan, 1973). *Bull. Soc. Geol. France*, **24**, 3, pp.597-610.

CLAUZON G., SUC J.-P., GAUTIER F., BERGER A. & LOUTRE M.-F. (1996) - Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis; controversy resolved? *Geology*, **24**, 4, pp.363-366.

CROSS T.A. (1988) – Controls on Coal Distribution in Transgressive-regressive cycles, Upper Cretaceous, Western Interior, U.S.A. – *Soc. Econ. Paleont. Miner.*, Sp. Publ., 42, pp. 371-380.

CUSTODIO E. (1997) - Specific methodologies to identify and monitor seawater intrusion, especially in its early stage. Seawater intrusion in coastal aquifers - Guidelines for study, monitoring and control. *Water reports*, **11**, FAO, pp. 7-23.

DÖRFLIGER N. (2003) – The state of the french mediterranean coastal aquifers. *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos, Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas n°8*, IGME, Madrid, **II**, pp 187-206.

GALLOWAY W.E. (1989) – Genetic Stratigraphic Sequences in Basin Analysis: Architecture and Genesis of Flooding-surface Bounded Depositional Units – *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **73**, pp. 125-142.

GAUTIER F., CLAUZON G., SUC J.-P., CRAVATTE J. & VIOLANTI D. (1994) – Age et durée de la crise de salinité messinienne. *C. R. Acad. Sc. Paris*, **318**, II, pp. 1103-1109.

GILBERT G.K. (1885) – The topographic features of lake shores. U. S. *Geol. Surv. Rep.*, **5**, pp. 75-123.

GILBERT G.K. (1890) – Lake Bonneville. *Monogr. U. S. Geol. Surv.*, **1**. 438 p.

GIORDANA G. & MONTGINOUL M. (2004) - Synthèse bibliographique des instruments de gestion de l'eau instaurés pour faire face aux intrusions d'eau saline. *Rapport Cemagref*. 46 p.

GOT H. (1965) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Feuilla-Fitou (Corbières) et de la Salanque (Roussillon). *Thèse 3ème cycle*, Université de Montpellier. 158 p.

GUILLOCHEAU F. (1991) – Modalités d'empilement des séquences génétiques dans un bassin de plate-forme (Dévonien Armoricain) : nature et distorsion des différents ordres de séquences de dépôts emboîtées. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, **15**, 2, pp. 383-410.

HOMEWOOD P., GUILLOCHEAU F., ESCHARD R. & CROSS T.A. (1992) - Corrélations haute résolution et stratigraphie génétique : une démarche intégrée. *Bull. Centre Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, **16**, pp. 357-381.

HSÜ K.J., CITA M.B. & RYAN W.B.F. (1973) - The origin of the Mediterranean evaporites. *Initial Repts DSDP*, Washington, **XIII**, 2, pp. 1203-1231.

MARCHAL J. P. & CHERY L. (1995) - Contamination marine de l'aquifère plio-quaternaire du Roussillon (Pyrénées-Orientales). *Rapport BRGM*, R38604BRGM. 85 p.

NIXON S., TRENT Z., MARCUELLO C. & LALLANA C. (2003) - Europe's water: An indicator-based assessment. Rapport de l'EEA (European Environment Agency), 1/2003.

OSTROM E., GARDNER R. & WALKER J.M. (1994) – Rules, Games, and Common-Pool Resources. Ann Arbor, The University of Michigan Press, Michigan.

PETIT V. (1996) *avec la coll. Pour les synthèses régionales* Caous J.-Y., Czernichowski I., de La Querière P., Mazenc B., Talbo H., Duermael G., Sourisseau B., Bérard P. & Bel F. – Les aquifères littoraux de France métropolitaine. *Rapport BRGM* /R-39298-FR. 120 p.

POSAMENTIER H.W. & VAIL P.R. (1988) - Eustatic controls on clastic deposition II – Sequence and systems tract models. *In*: Sea level changes – An integrated approach, Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G. St. C., Posamentier H., Ross C.A., Van Wagoner J. (eds.), *Soc. Econ. Paleontol. Mineral.*, Spec. Publ., **42**, pp. 125-154.

POSAMENTIER H.W. JERVEY M.T. & VAIL P.R. (1988) - Eustatic control on clastic depositions I - Conceptual framework. *In*: Sea level changes – An integrated approach, Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G. St. C., Posamentier H., Ross C.A., Van Wagoner J. (eds.), *Soc. Econ. Paleontol. Mineral.*, Spec. Publ., **42**, pp. 109-124.

ROTH A. E. (1995) - Introduction to Experimental Economics. *In* : Kagel J. H. & Roth A. E. - The Handbook of Experimental Economics. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, pp. 3-109.

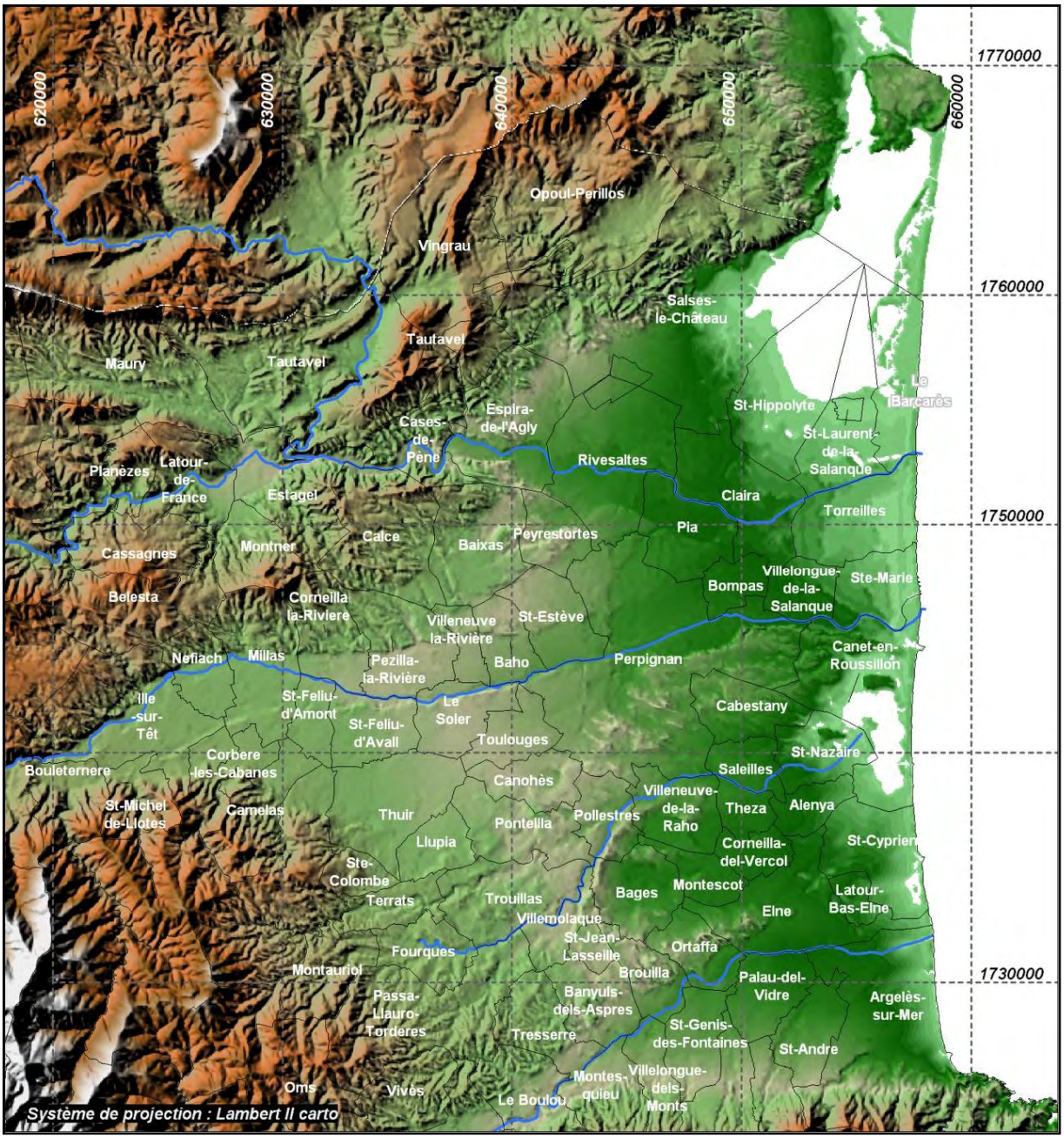
RYAN W. B. F. (1976) - Quantitative evaluation of the depth of the western Mediterranean before, during and after the late Miocene salinity crisis. *Sedimentology*, **23**, 6, pp.791-813.

SHACKLETON N. J., BACKMAN J., ZIMMERMAN H., KENT D. V., HALL M. A., ROBERTS D. G., SCHNITKER D., BALDAUF J. G., DESPRAIRIES A., HOMRIGHAUSEN R., HUDDLESTUN P., KEENE J. B., KALTENBACK A. J., KRUMSIEK K. A. O., MORTON A. C., MURRAY J. W. & WESTBERG-SMITH J. - (1984) - Oxygen isotope calibration of the onset of ice-rafting and history of glaciation in the North Atlantic region. *Nature*, **307**, pp. 620 - 623

VAIL P.R., MITCHUM R.M. JR, TODD R.G., WIDMIER J.W., THOMSON S., SANGREE J.B., BUBB J.N. & HATLELID W.G. (1977) - Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Payton CE (eds.). Seimic Stratigraphy : Application to hydrocarbon Exploration, *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, **26**, pp. 49-212.

VAN WAGONER J.C., POSAMENTIER M.W., MITCHUM R.M. JR., VAIL P.R., SARG J.F., LOUTIT T.S. & HARDENBOL J. (1988) – An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. *In* : Sea level changes – An integrated approach, Wilgus C.K., Hastings B.S., Kendall C.G. St. C., Posamentier H., Ross C.A., Van Wagoner J. (eds.), *Soc. Econ. Paleontol. Mineral.*, Spec. Publ., **42**, pp. 39-46.

Annexe 2 - Localisation des communes du Roussillon



Annexe 3 - Historique de la BSS

Document réalisé par les agents et retraités du BRGM : Dominique Pajon grâce à l'historique détaillé de Jean-Pierre Leprêtre réalisé en février 1993, aux Rapports de Service Public de 1999 à 2002 et aux relecteurs : Denis Bonnefoy, Pierre Laville, Esther Miguel, Michel Richard.

Légitimité de la Banque du Sous-Sol

L'existence de la Banque du Sous-Sol (BSS) découle :

- de l'application du code minier (article 131 à 134)
- du décret (n° 67-1202 du 22 octobre 1967) qui précise que le BRGM doit notamment rassembler, classer et conserver les informations recueillies en application des articles 131 à 134 du Code Minier (loi 77620 du 16 juin 1977 - art. 32).
- de l'application du décret du 22 septembre 2004, relatif aux missions du BRGM, qui précise que le BRGM est l'établissement public national désigné pour être le Service Géologique National. Il est chargé de :
  - développer la connaissance géologique du territoire national, carte et documentation hydrogéologique systématique,
  - recueillir, valider, archiver et mettre à disposition les informations couvrant le territoire national ainsi que le plateau continental.
- Du code de l'environnement : arrêté interministériel " forages " publié le 11 septembre 2003, qui prévoit qu'un rapport de fin de travaux doit être transmis au préfet et doit comporter un numéro national BSS

Les Grandes Etapes Techniques de la Constitution de la BSS

Un rappel historique paraît toujours superflu, mais prend ici toute sa valeur puisque la plupart des données que nous avons engrangées dans la BSS l'ont été il y a plus de 30 ans.

L'ensemble des données sur le sous-sol recueillies, à l'occasion de travaux, de forages... dans le cadre de l'application du Code minier (*Art. 131 à 136 du titre VIII*), constitue ce que l'on nomme la Banque du Sous-Sol (BSS). Les informations relatives à chaque ouvrage déclaré sont rassemblées dans des dossiers archivés par chaque service régional sur le territoire de sa compétence. Le classement de ces dossiers est basé sur le découpage des cartes géologiques à 1/50 000 de l'IGN avec une numérotation spécifique à la BSS.

Devant le nombre croissant d'informations collectées et afin de faciliter l'accès aux données, leur numérisation a été entreprise dès **1970** à partir des travaux d'un groupe de travail (1967-1970) sous l'égide du Ministère de l'Industrie.

Ainsi, de **1967** à **1972**, ces travaux se concrétisaient par la création des banques de données informatisées des régions Rhône-Alpes et Alsace.

Début **1972**, les bordereaux de saisie des données étaient réalisés, avec notamment

la création des lexiques ou glossaires indispensables à une description homogène. Ces bordereaux permettaient à l'époque de prendre en compte :

- les informations générales,
- la géologie,
- la piézométrie,
- la géotechnique des sols,
- les gîtes minéraux.

Dans un premier temps, cette structure allait fonctionner sur les deux principes suivants : instruction des dossiers dans les régions et saisie informatique à Orléans.

En **1980**, pour des raisons budgétaires, il était décidé de diminuer l'informatisation au profit de la collecte en ne mémorisant que les informations essentielles des dossiers (informations générales) et en supprimant l'informatisation des données géotechniques. Parallèlement, une opération de microfichage des dossiers était mise en place pour assurer une consultation nationale à Paris et constituer une sauvegarde des archives "papier". Un microfichage complémentaire a été effectué de 1991 à 1995.

A partir de **1986**, l'adoption du système ORACLE a permis que les informations soient directement saisies et gérée en région. A la même époque, elles ont été rendues accessibles au public grâce au service "Géobanque" sur le serveur "QUESTEL".

En **1990**, devant le succès de Géobanque, mais aussi ses difficultés d'accès (prise d'abonnement, langage d'interrogation), le produit était amélioré pour permettre un accès plus libre en mode "vidéotex". Cependant, le produit ne donnait accès qu'aux seules informations générales (choix fait en fonction des coûts).

En **1992**, une étude était réalisée pour étendre ce service à l'ensemble des informations contenues dans la banque avec un serveur utilisant directement les données de la BSS (sans duplication des données). Cette étude a permis de calculer les coûts d'une telle opération et d'identifier les maîtres d'œuvre potentiels. Parallèlement, un audit mené par la société SODERMA sur la Banque du sous-sol a montré que le manque de connaissances des usagers sur le contenu de la BSS et leurs besoins en restitutions graphiques nécessitaient un couplage de données graphiques (cartes, logs) aux données descriptives habituellement fournies dans des tableaux ou des formulaires.

En début **1993**, la création au BRGM du département C3G, rassemble les collecteurs des informations, les gestionnaires de la banque et les développeurs de produits d'information géographique. Par la conception de nouveaux outils, cette équipe permet de répondre aux besoins des usagers identifiés dans l'audit et aussi de révéler la richesse et les imperfections de l'information contenue dans la BSS.

La mise en œuvre des techniques cartographiques révèle l'hétérogénéité des données numérisées et impose des procédures de validation des données dans la BSS. Plus de 10 000 points d'observation incomplets ou partiellement erronés ont été identifiés dans la BSS puis progressivement corrigés. Ces erreurs représentaient 3 % des données.

A partir de **1993**, la BSS s'étoffe et permet de gérer et d'utiliser les informations suivantes :

- informations générales,
- informations géologiques,
- informations sur les gites minéraux,
- informations piézométriques,
- informations hydrochimiques.

Des contrôles sur la qualité de l'information sont réalisés à toutes les étapes de l'instruction et de la saisie des données (mots clés contrôlés automatiquement, contrôles de vraisemblance sur la localisation (X, Y) du point...).

La banque en **1993** n'est que le reflet des politiques qui ont été menées au cours des 20 années précédentes : tantôt une demande d'informatisation à caractère exhaustif, tantôt une informatisation réduite au strict minimum, tantôt des opérations de rattrapage en sites urbanisés, tantôt des opérations d'inventaires carrières, points d'eau, sources... Depuis 2001, on privilégie les dossiers fournissant des informations géologiques précises et ceux permettant de renseigner les zones les plus dépourvues.

La fluctuation des objectifs explique l'apparition d'une hétérogénéité du contenu des dossiers et c'est principalement cette hétérogénéité qui suscite les critiques des utilisateurs de la BSS.

Aussi, il a été décidé en **1993** que l'acquisition des informations sera basée sur la constitution de dossiers de qualité, avec :

Pour les données anciennes, la poursuite de l'opération 1992 "nettoyage" des points aux coordonnées erronées. Les listes des points ont été remises aux sites régionaux au cours du 2ème semestre 1992.

Pour les données nouvelles, la collecte auprès des fournisseurs d'information pour vérifier, dès le départ, la qualité de la donnée (localisation, coupe géologique, valeurs mesurées). A cet effet, chaque dossier constitué devra comprendre les documents suivants :

- la déclaration
- les bordereaux d'analyse des informations servant à l'informatisation, remplacés ensuite par les dossiers imprimés après saisie informatique
- le plan de situation de l'ouvrage avec les coordonnées
- la coupe géologique
- la coupe technique de l'ouvrage
- les résultats concernant les aquifères traversés (niveau piézométrique, productivité...)
- le rapport de fin de travaux.

Dans chaque région, la collecte sera prioritairement orientée de manière à répondre aux besoins spécifiques exprimés localement, et à défaut, elle visera à une répartition des points en rapport avec la complexité des structures géologiques et des systèmes aquifères.

Dans tous les cas, la cartographie des données déjà mémorisées sera utilisée pour guider les travaux de collecte, ou pour

déterminer les orientations de la politique régionale d'acquisition.

Suite au rapport "Martin" du 29/01/1996, le conseil général des mines a émis un avis le 5/02/1996, sur la gestion durable des eaux souterraines. En conséquence, une partie de la BSS a été spécialisée en eau souterraine (BSS_ES). Cette BSS_ES a servi de modèle conceptuel de données (MCD) pour la piézométrie du SANDRE (Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau).

Début **2001**, le SANDRE a imposé dans sa norme que l'identifiant de la BSS soit l'identifiant national des points d'eau de l'Accès des Eaux Souterraines (ADES).

Entre **1993** et **1999**, autour d'un serveur géré avec le logiciel ORACLE, le BRGM développe son réseau informatique qui permet à ses unités décentralisées d'accéder entre autre à la BSS. Les Services géologiques régionaux (SGR) peuvent directement alimenter et interroger la base de données centrale. Fin 1995, le micro fichage a été abandonné, il sera remplacé en 1999 par un programme de numérisation (scannage) des dossiers papier dont les pages sont gérées dans les tables Oracle.

En **1998** réalisation avec MapBasic de l'application Consult utilisable avec MapInfo. Cet outil d'analyse cartographique permet :

- de connaître la localisation des données situées, par exemple, dans une commune, un département, ... ou dans un rectangle géographique,
- d'éditer sur imprimante ou à l'écran les informations relatives à ces données,
- ainsi que des graphiques spécifiques aux données de la Banque du Sous-Sol, soit :
- d'obtenir une coupe géologique graphique sur écran / imprimante,
- d'obtenir un graphe d'évolution des mesures piézométrique sur écran / imprimante.
- d'éditer les documents numériques associés aux dossiers.

1999 marque une évolution nette et profonde dans les moyens mis à la disposition du public pour consulter les informations de la BSS. Trois types de média sont offerts :

- des bornes de consultations dans les centres de consultation nationaux (Paris, Brest) et dans les Services régionaux du BRGM,
- le service Minitel 3617 BRGM,
- internet avec le site Infoterre.

Ce dernier mode d'accès répond à une demande très forte comme en témoigne le nombre de connexions. Il va encore se poursuivre et induire dans les années à venir un changement des méthodes de travail et de mise à disposition des informations géologiques et d'organisation des services.

La commodité de l'accès internet aux données de la BSS, confirme la nécessité de diffuser une information de qualité et a déclenché le renforcement des contrôles de la qualité des données, l'identification au sein de la BSS et de nos cartes d'un lot de données de très bonne qualité constituant le Référentiel géologique et la numérisation a minima de tous les dossiers BSS ayant un indice.

En **2000**, le service Minitel (3617 BRGM) est interrompu car les informations de type « fiche signalétique d'ouvrage » proposées en accès gratuit, via Internet, répondent à une part significative des attentes des usagers. En retour du succès d'Infoterre, les changements induits dans les méthodes de travail des utilisateurs de la BSS provoquent des attentes et des exigences plus fortes concernant l'exhaustivité, la qualité et la "fraîcheur" des données mises à disposition. Ainsi, l'opération "Rattrapage des dossiers BSS" a été programmée de 2000 à 2002 simultanément au développement du "Référentiel géologique de la France"

En **2001**, si la BSS centrale connaît encore quelques bases de données autonomes qui nécessitent l'entretien de procédures de mise à jour locales comme l'Alsace et l'Aquitaine, les DOM, tels que La Réunion et la Guyane peuvent accéder en direct au serveur national en saisie comme en consultation.

De **2001** à **2002**, dans le cadre général de l'Assurance Qualité de l'établissement, le manuel Qualité de la BSS (ISO 9001:2000) est conçu puis appliqué. Il tend à la pérennisation du patrimoine d'information sur le sous-sol. Cette démarche du BRGM accompagne celles des entreprises qui ont de plus en plus l'obligation réglementaire de prendre en compte les données géologiques en préalable aux études environnementales de leurs sites industriels.

Ainsi, progressivement, le décalage a disparu entre les dossiers "papier" disponibles dans les SGR et les données numériques consultables par internet sur InfoTerre (http://infoterre.brgm.fr/).

De **2001** à **2003** la BSS_ES a servi de modèle pour élaborer le MCD "point d'eau et qualité".

En **2001**, dans le but de faciliter et de normaliser la collecte des informations techniques générées par tous les foreurs, le BRGM s'est rapproché du Syndicat National des Entrepreneurs de Puits et de Forages d'Eau qui avait développé pour ses adhérents un outil simple de description des forages. Après l'acquisition de sa licence de diffusion par le BRGM et une mise à la norme de la BSS, ce logiciel permet de standardiser l'informatisation des données techniques de forage et facilite leur chargement dans la BSS. Réalisé en 2002, ce nouveau logiciel GesFor est diffusé gratuitement aux foreurs par les Services Géologiques Régionaux du BRGM depuis 2003. Il leurs permet notamment la collecte des données de forage, la préparation des documents de chantier et la rédaction du rapport de forage.

En **2003**, en raison d'un nouvel arrêté du code de l'environnement qui prévoit qu'un rapport de fin de travaux doit être transmis au préfet et doit comporter un numéro national BSS, le nombre de dossier augmente, il est demandé au SGR d'informatiser uniquement les données de la fiche signalétique et de numériser les autres informations. Il est reprécisé que les données de la BSS sont des données factuelles. Les données géologiques interprétées sont stockées dans le référentiel géologique. Les données EAU sont stockées en partie dans ADES et dans la BSS_ES. Une étude est en cours pour créer une base EAU brgm en dehors de la BSS à la norme SANDRE.

A partir de **2002** et jusqu'en **2005**, réalisation d'une opération de dégroupage afin d'identifier les dossiers uniquement par l'INDICE. Désormais, un dossier ne contient qu'un ouvrage. La clé BSS reste INDICE/DESIGNATION, mais le dégroupage est terminé et donc, il serait possible de n'avoir que l'INDICE comme clé unique BSS.

En **2003**, création de BSS-Mayotte au sein du réseau de collecte BSS et répartition des dossiers BSS-Antilles vers les BSS-Martinique et BSS-Guadeloupe ;

Depuis **2003** et jusqu'en 2005, mise en place d'outils informatiques sur les tables de la BSS de manière à contrôler les entrées de données en dehors des grilles de saisie : Contrôle et correction éventuelle de l'existant. Création et mise à jour des lexiques pour garantir l'intégrité. Mise en place d'une table historique sur les changements d'INDICE.

A partir du 15 décembre **2004**, pour la France métropolitaine, le découpage en huitièmes est retenu pour toutes les feuilles à l'exception de la feuille 0183 de Paris.

Fin **2004**, l'application Consult est modifiée pour prendre en compte les DOM et les changements de structure de la BSS relatifs essentiellement aux coordonnées. Elle s'appelle désormais ConsultBSS. Pour la métropole comme pour les DOM, toutes les tables : carroyages des coupures, huitièmes de coupures et communes existent depuis cette date.

En fin, le décret n° 2006-649 du 02 juin **2006** relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains détermine, quant à lui, le champ des travaux soumis à déclaration ou à autorisation, fixe le contenu des dossiers de demande et définit la procédure d'instruction. Dans son article 1, on peut lire "Sous réserve des procédures spécifiques qu'il comporte et qui se substituent à celles du décret n°93-742 du 29 mars 1993, les autorisations et les déclarations prévues par le présent décret valent respectivement autorisations et déclarations au titre de l'article L. 214-3 du code de l'environnement. Les demandes d'autorisation et les déclarations prévues par l'article L. 214-3 du code de l'environnement valent déclaration au titre de l'article 131 du code minier."

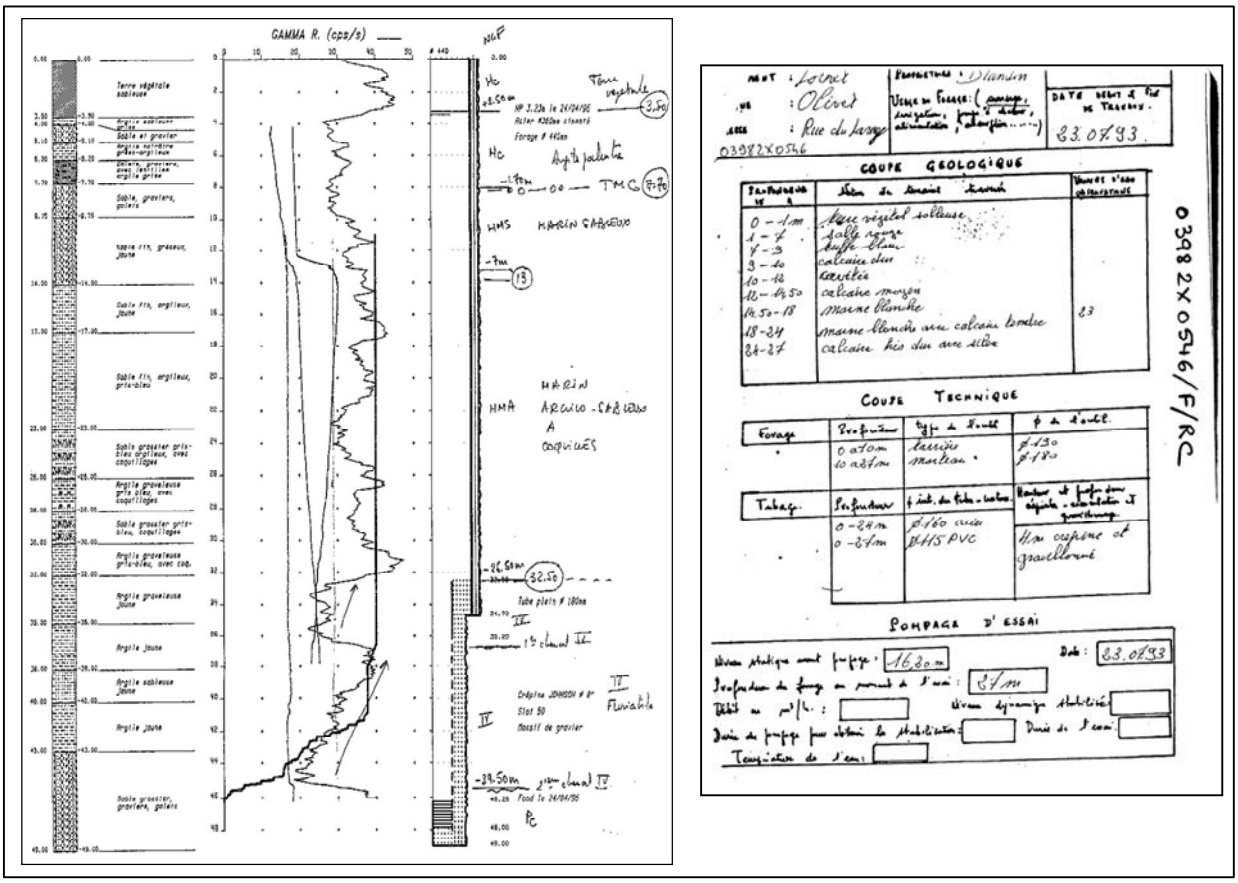


Figure 1 : Archive papier BSS

brgm

Coupe géologique, Niveaux reconnus ou exploités

Indice 1091 2X 0048

BRGM / LRO

Z_SOL 5.1
Z_COUPE 5.1

Désignation M2

TYPE DE NIVEAU	PROFONDEUR (m) DE	A	HAUTEUR UTILE (m)	CODE AQUIFERE OU GEOLOGIQUE	STRATIGRAPHIE	LITHOLOGIE
COUPE	0.00	2.00			QUATERNAIRE	REMBLAI
	2.00	3.00			QUATERNAIRE	ALLUV: LIMON, SABLEUX
	3.00	4.50			QUATERNAIRE	ALLUV: SABLE, ARGILEUX GROSSIER
	4.50	6.70			QUATERNAIRE	ALLUV: SABLE, ARGILEUX FIN
	6.70	10.00			QUATERNAIRE	ALLUV: LIMON, GRIS ARGILEUX SABLEUX
	10.00	12.10			QUATERNAIRE	ALLUV: ARGILE, NOIR VASEUX
	12.10	14.80			QUATERNAIRE	ALLUV: GRAVIER-SABLE, ARGILEUX GRIS
	14.80	17.20			QUATERNAIRE	ALLUV: GRAVIER, SABLEUX ROUGE
	17.20	22.00			PLIOCENE	ARGILE, SABLEUX
	22.00	24.60			PLIOCENE	SABLE, GROSSIER ARGILEUX BRUN; GALET
	24.60	28.00			PLIOCENE	ARGILE, SABLEUX COMPACT

Figure 2 : Coupes géologiques numériques extraites de la BSS

Annexe 4 - Cartes de profondeur et d'épaisseur des unités sédimentologiques du bassin du Roussillon

Les cartes sont classées par profondeur croissante. Pour chaque unité sédimentologique, deux cartes ont été éditées :

- sur la partie gauche de la page : une carte de profondeur du toit de l'unité sédimentologique par rapport au sol (ou mur pour l'Holocène continental, toujours affleurant) ;
- sur la partie droite de la page : une carte d'épaisseur de l'unité sédimentologique. L'information "mur non atteint" peut-être également présentée sur le document.

Les labels ne sont pas tous représentés afin d'éviter la surcharge graphique.

Pour quelques cas particuliers, le toit a aussi été représenté par rapport à une côte NGF. La légende des cartes signale cette particularité.

La répartition des classes est déterminée à l'aide d'un algorithme proposé par le logiciel de MapInfo. Cet algorithme définit une répartition de classes de façon à limiter, par classe, la différence entre les valeurs et la moyenne des valeurs. Cette méthode offre une représentation plus précise des données. Les effectifs sont comptés et représentés dans la légende pour chaque classe.

Annexe 5 - Cartes de faciès des formations argileuses et palustres du bassin du Roussillon

Quatre cartes synthétiques ont été élaborées :

- carte de la lithologie des formations palustres quaternaires ;
- carte de la lithologie des formations argileuse quaternaires ;
- carte de la lithologie des formations palustres pliocènes ;
- carte de la lithologie des formations argileuse pliocènes.

La répartition des classes est déterminée en fonction de deux paramètres :

- la lithologie (argile, silt…) suit un code couleur appliqué aux figurés des points ;
- la stratigraphie (prisme 1, prisme 2…) suit un code basé sur le type de figurés des points.

Les effectifs sont comptés et représentés dans la légende pour chaque information faciès et chaque unité sédimentologique.

Afin de faciliter les manipulations au sein de la BD géologique, des codes ont été employés :

- arg correspond à un faciès à dominante argileuse ;
- sab correspond à un faciès à dominante sableuse ;
- silt correspond à un faciès à dominante silteuse ;
- sable / argile correspond à un faciès hétérogène sans dominante particulière.

Annexe 6 - Cartes de faciès de l'unité sédimentologique du pliocène continental (PC)

Les faciès du pliocène continental (PC) ont été organisés selon quatre classes :

- les sédiments à granulométrie très fine (code "tresfin" dans la BD géologique) tels qu'argile, marne et argile sableuse ;
- les sédiments à granulométrie fine (code "fin" dans la BD géologique) tels que sable argileux et sable fin ;
- les sédiments à granulométrie moyenne (code "moy" dans la BD géologique) tels que sable, sable moyen et sable grossier ;
- les sédiments à granulométrie grossière (code "gros" dans la BD géologique) tels que gravier, cailloutis et conglomérat.

Différentes documents ont été élaborés :

- Quatre documents présentent des données filtrées[1] :
  - sur la partie gauche de la page : l'épaisseur cumulée (en mètres) de sédiments dont la granulométrie appartient à la même classe[2]. La répartition des classes est déterminée à l'aide d'un algorithme proposé par le logiciel de MapInfo. Cet algorithme définit une répartition de classes de façon à limiter, par classe, la différence entre les valeurs et la moyenne des valeurs.
  - sur la partie droite de la page : le pourcentage de sédiments[3] dont la granulométrie appartient à la même classe. La répartition des classes est fixée à une amplitude constante (la différence entre les valeurs minimum et maximum de chaque classe est la même) afin de comparer les cartes entre elles.
- Deux documents (quatre cartes) présentent des données filtrées. Pour chacun des quatre faciès (très fin à grossier), le pourcentage de sédiments dont la granulométrie appartient à la même classe est représenté. La différence avec les documents précédents réside avec le choix des classes. Celle-ci est déterminée à l'aide de l'algorithme proposé par le logiciel de MapInfo afin d'offrir une représentation plus précise des données.
- Deux documents (quatre cartes) présentent des données non filtrées. Pour chacun des quatre faciès (très fin à grossier), l'épaisseur cumulée (en mètres) de sédiments dont la granulométrie appartient à la même classe est représenté. La répartition des classes est déterminée à l'aide de l'algorithme proposé par le logiciel de MapInfo.
- Enfin, une carte présentant les ratios entre sédiments grossiers et sédiments fins est présentée. Ce ratio est rapporté à l'échelle -1 (grossier) et +1 (fin). La valeur 0 exprime une proportion égale entre sédiments grossiers et sédiments fins. La part de sédiments grossiers correspond à la somme des sédiments à granulométrie moyenne et grossière ; et inversement, la part de sédiments fins correspond à la somme des sédiments à granulométrie fin et très fine.

[1] Afin d'éviter tout biais, l'ensemble des forages n'atteignant pas le mur du pliocène continental ont été filtrés. Au total, 195 points possédant une information lithologique sur la totalité du pliocène continental ont été utilisés lors de l'élaboration des cartes "filtrées".

[2] Les effectifs sont comptés et représentés dans la légende pour chaque classe

[3] La valeur 100 apparaît dans la légende lorsque des données sont présentées sous forme de pourcentage.

Annexe 7 - Données brutes de la BD hydrogéologique

Le tableau suivant présente le comptage des crépines par unités sédimentologiques. Les associations d'unités sédimentologiques reconnues en forage ont été conservées.

La première ligne du tableau liste l'ensemble des unités sédimentologiques. La première colonne liste les différentes unités sédimentologiques (seules ou multiples) recoupées par les crépines.

Voici un exemple de lecture du tableau sur l'unité sédimentologique HC :

- *Première ligne, sous le terme modalité* - Douze forages sont crépinés uniquement dans HC, soit 3.08% des 389 forages observés et utilisés ;
- *Seconde ligne, sous le terme modalité* - Trois forages sont crépinés dans les unités sédimentologiques "HC" et "PC", soit 0.77% des 389 forages observés et utilisés ;
- *Avant dernière ligne, sous le terme modalité* - Il y a quinze forages crépinés dans le HC. L'unité sédimentologique HC est exploitée dans 2.38% des observations.
- *Quatrième colonne* - Il y a deux cas où les crépines sont localisés dans HC : "HC" et "HC ; PC"

Ce tableau permet aussi de déterminer les associations d'unités sédimentologiques lors de l'exploitation des aquifères par forages. Par exemple, l'unité sédimentologique TQ1PI est toujours exploitée avec l'unité TQ1.

			HC	PQ2pal	PQ2sab	PQ2arg	PTQ2pal	PTQ2sab	PTQ2arg	TQ	TQ2PI	TQ2	PQ1pal	PQ1sab	PQ1arg	PTQ1sab	TQ1PI	TQ1	PC	P5	P4pal	P4sab	P4arg	P3pal	P3sab	P3arg	P2cont	P2pal	P2sab	P2arg	P1pal	P1sab	P1arg	PT1pal	PT1sab	Mio
		Nombre de cas =>	2	2	2	0	1	0	0	17	0	5	3	1	2	4	4	8	33	1	13	15	3	17	30	11	1	3	19	3	1	10	3	0	1	5
Modalité	**Effectif par modalité**	**Fréquence par modalité (%)**																																		
HC	12	3.08	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HC ; PC	3	0.77	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1pal ; P1sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-
P1sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
P1sab ; P1arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
P1sab ; P1arg ; Mio	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1
P2cont	2	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2pal ; P2sab ; P1sab ; PT1sab ; Mio	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	1	1
P2sab	11	2.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-
P2sab ; Mio	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
P2sab ; P1sab	3	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	3	-	-	-	-
P2sab ; P1sab ; P1arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-
P3pal	7	1.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3pal ; P3sab	2	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3pal ; P3sab ; Mio	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
P3pal ; P3sab ; P2sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P3pal ; P3sab ; P2sab ; P1sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-
P3pal ; P3sab ; P3arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3pal ; P3sab ; P3arg ; P2sab ; P2arg	2	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	2	-	-	2	-	-	-	-	-	-
P3sab	27	6.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3sab ; P2sab	4	1.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-
P3sab ; P2sab ; P2arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-
P3sab ; P3arg ; P2sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
P4pal ; P3sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4pal ; P4sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4pal ; P4sab ; P3sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4pal ; P4sab ; P3sab ; P3arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4sab ; P3arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4sab ; P3sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4sab ; P3sab ; P3arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4sab ; P4arg ; P3sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4sab ; P4arg ; P3sab ; P3arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4sab ; P4pal	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC	142	36.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	142	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P2pal ; P2sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
PC ; P2pal ; P2sab ; P1sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	-
PC ; P2sab	2	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
PC ; P2sab ; Mio	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1
PC ; P2sab ; P1sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-
PC ; P3pal	6	1.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P3pal ; P3sab	8	2.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P3pal ; P3sab ; P2arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
PC ; P3pal ; P3sab ; P2sab	2	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	2	2	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
PC ; P3pal ; P3sab ; P3arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P3pal ; P3sab ; P3arg ; P2sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-
PC ; P3sab	11	2.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P3sab ; P2sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
PC ; P3sab ; P3arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4pal	10	2.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4pal ; P3pal	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4pal ; P3pal ; P3pal	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4pal ; P3pal ; P3sab	3	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	3	-	-	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4pal ; P3pal ; P3sab ; P3arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4pal ; P4sab	3	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4pal ; P4sab ; P3sab	4	1.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	4	4	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4pal ; P3sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4sab	4	1.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4sab ; P3sab	7	1.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	7	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P4sab ; P4arg	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC ; P5pal	5	1.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PQ1arg ; PTQ1sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PQ1arg ; PTQ1sab ; PC	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PQ1pal	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PQ2pal	3	0.77	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PQ2pal ; PQ2sab ; TQ2 ; PC	1	0.26	-	1	1	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PQ2sab	4	1.03	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PTQ1sab ; TQ1 ; PC	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PTQ1sab ; TQ1PI ; TQ1	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PTQ2pal	2	0.51	-	-	-	-	2	-	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ	39	10.03	-	-	-	-	-	-	-	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ ; PC	5	1.29	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ ; PQ1pal	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ ; plio	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ1	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ1 ; TQ1PI	2	0.51	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ1 ; TQ1Pi	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ1Pi ; TQ1	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ2	3	0.77	-	-	-	-	-	-	-	3	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ2 ; PC	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TQ2 ; PQ1pal ; PQ1sab	1	0.26	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	**389**	**100.00**	15	4	5	0	2	0	0	63	0	8	3	1	2	4	5	9	233	5	29	29	3	40	90	12	2	3	37	4	1	12	3	0	1	5
		Fréquence d'observation (%) =>	**2.38**	0.63	0.79	0.00	0.32	0.00	0.00	**10.00**	0.00	1.27	0.48	0.16	0.32	0.63	0.79	1.43	**36.98**	0.79	**4.60**	**4.60**	0.48	**6.35**	**14.29**	1.90	0.32	0.48	**5.87**	0.63	0.16	1.90	0.48	0.00	0.16	0.79

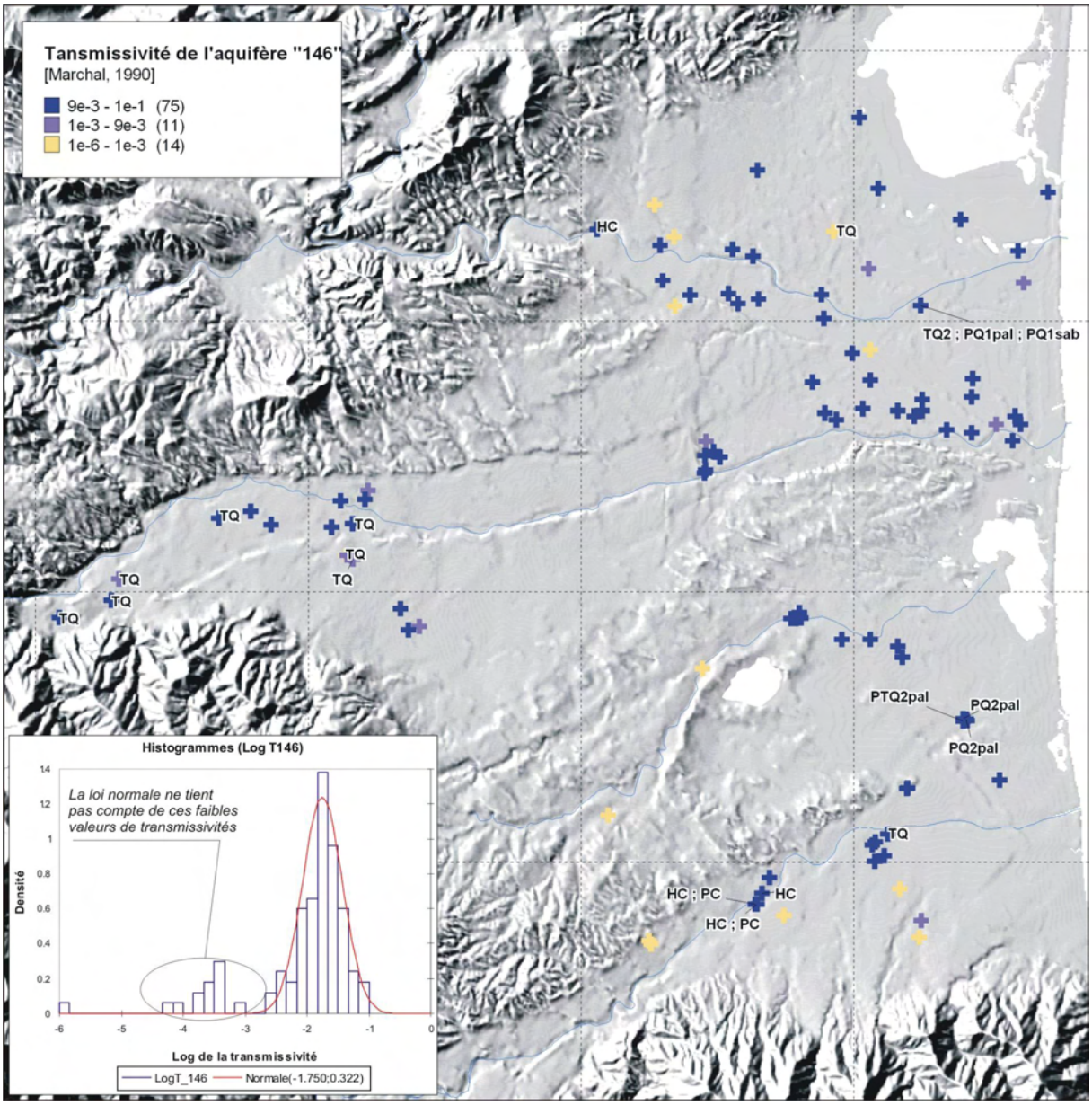
Annexe 8 - Exploitation concomitante des unités sédimentologiques

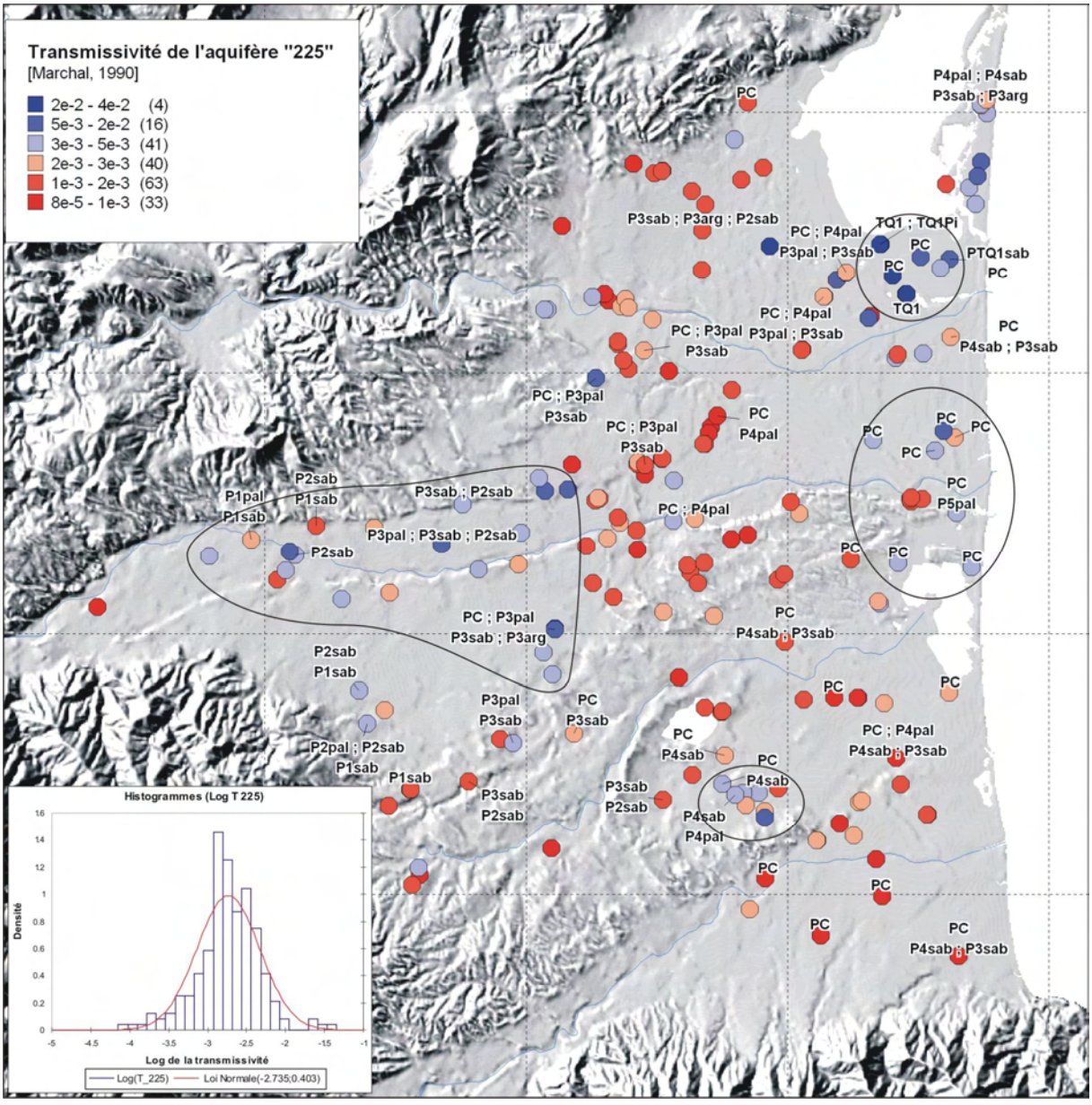
	Nombre de formations recoupées =>			1	2	3	4	5
	Effectif	Fréquence	↓					
HC	12	3.08	1	12	-	-	-	-
HC ; PC	3	0.77	2	-	3	-	-	-
P1pal ; P1sab	1	0.26	2	-	1	-	-	-
P1sab	1	0.26	1	1	-	-	-	-
P1sab ; P1arg	1	0.26	2	-	1	-	-	-
P1sab ; P1arg ; Mio	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P2cont	2	0.51	1	2	-	-	-	-
P2pal ; P2sab ; P1sab ; PT1sab ; Mio	1	0.26	5	-	-	-	-	1
P2sab	11	2.83	1	11	-	-	-	-
P2sab ; Mio	1	0.26	2	-	1	-	-	-
P2sab ; P1sab	3	0.77	2	-	3	-	-	-
P2sab ; P1sab ; P1arg	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P3pal	7	1.80	1	7	-	-	-	-
P3pal ; P3sab	2	0.51	2	-	2	-	-	-
P3pal ; P3sab ; Mio	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P3pal ; P3sab ; P2sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P3pal ; P3sab ; P2sab ; P1sab	1	0.26	4	-	-	-	1	-
P3pal ; P3sab ; P3arg	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P3pal ; P3sab ; P3arg ; P2sab ; P2arg	2	0.51	5	-	-	-	-	2
P3sab	27	6.94	1	27	-	-	-	-
P3sab ; P2sab	4	1.03	2	-	4	-	-	-
P3sab ; P2sab ; P2arg	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P3sab ; P3arg ; P2sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P4pal ; P3sab	1	0.26	2	-	1	-	-	-
P4pal ; P4sab	1	0.26	2	-	1	-	-	-
P4pal ; P4sab ; P3sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P4pal ; P4sab ; P3sab ; P3arg	1	0.26	4	-	-	-	1	-
P4sab	1	0.26	1	1	-	-	-	-
P4sab ; P3arg	1	0.26	2	-	1	-	-	-
P4sab ; P3sab	1	0.26	2	-	1	-	-	-
P4sab ; P3sab ; P3arg	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P4sab ; P4arg ; P3sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
P4sab ; P4arg ; P3sab ; P3arg	1	0.26	4	-	-	-	1	-
P4sab ; P4pal	1	0.26	2	-	1	-	-	-
PC	142	36.50	1	142	-	-	-	-
PC ; P2pal ; P2sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PC ; P2pal ; P2sab ; P1sab	1	0.26	4	-	-	-	1	-
PC ; P2sab	2	0.51	2	-	2	-	-	-
PC ; P2sab ; Mio	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PC ; P2sab ; P1sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PC ; P3pal	6	1.54	2	-	6	-	-	-
PC ; P3pal ; P3sab	8	2.06	3	-	-	8	-	-
PC ; P3pal ; P3sab ; P2arg	1	0.26	4	-	-	-	1	-
PC ; P3pal ; P3sab ; P2sab	2	0.51	4	-	-	-	2	-
PC ; P3pal ; P3sab ; P3arg	1	0.26	4	-	-	-	1	-
PC ; P3pal ; P3sab ; P3arg ; P2sab	1	0.26	5	-	-	-	-	1
PC ; P3sab	11	2.83	2	-	11	-	-	-
PC ; P3sab ; P2sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PC ; P3sab ; P3arg	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PC ; P4pal	10	2.57	2	-	10	-	-	-
PC ; P4pal ; P3pal	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PC ; P4pal ; P3pal ; P3pal	1	0.26	4	-	-	-	1	-
PC ; P4pal ; P3pal ; P3sab	3	0.77	4	-	-	-	3	-
PC ; P4pal ; P3pal ; P3sab ; P3arg	1	0.26	5	-	-	-	-	1
PC ; P4pal ; P4sab	3	0.77	3	-	-	3	-	-
PC ; P4pal ; P4sab ; P3sab	4	1.03	4	-	-	-	4	-
PC ; P4pal ; P3sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PC ; P4sab	4	1.03	2	-	4	-	-	-
PC ; P4sab ; P3sab	7	1.80	3	-	-	7	-	-
PC ; P4sab ; P4arg	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PC ; P5pal	5	1.29	2	-	5	-	-	-
PQ1arg ; PTQ1sab	1	0.26	2	-	1	-	-	-
PQ1arg ; PTQ1sab ; PC	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PQ1pal	1	0.26	1	1	-	-	-	-
PQ2pal	3	0.77	1	3	-	-	-	-
PQ2pal ; PQ2sab ; TQ2 ; PC	1	0.26	4	-	-	-	1	-
PQ2sab	4	1.03	1	4	-	-	-	-
PTQ1sab ; TQ1 ; PC	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PTQ1sab ; TQ1PI ; TQ1	1	0.26	3	-	-	1	-	-
PTQ2pal	2	0.51	1	2	-	-	-	-
TQ	39	10.03	1	39	-	-	-	-
TQ ; PC	5	1.29	2	-	5	-	-	-
TQ ; PQ1pal	1	0.26	2	-	1	-	-	-
TQ ; plio	1	0.26	2	-	1	-	-	-
TQ1	1	0.26	1	1	-	-	-	-
TQ1 ; TQ1PI	2	0.51	2	-	2	-	-	-
TQ1 ; TQ1Pi	1	0.26	2	-	1	-	-	-
TQ1Pi ; TQ1	1	0.26	2	-	1	-	-	-
TQ2	3	0.77	1	3	-	-	-	-
TQ2 ; PC	1	0.26	2	-	1	-	-	-
TQ2 ; PQ1pal ; PQ1sab	1	0.26	3	-	-	1	-	-
	389	**100**						
Effectif par nombre d'unités exploitées =>				**256**	**71**	**40**	**17**	**5**
Fréquence par nombre d'unités exploitées (%) =>				**65.8**	**18.3**	**10.3**	**4.4**	**1.3**

Annexe 9 - Transmissivités de la plaine du Roussillon [Marchal, 1990]

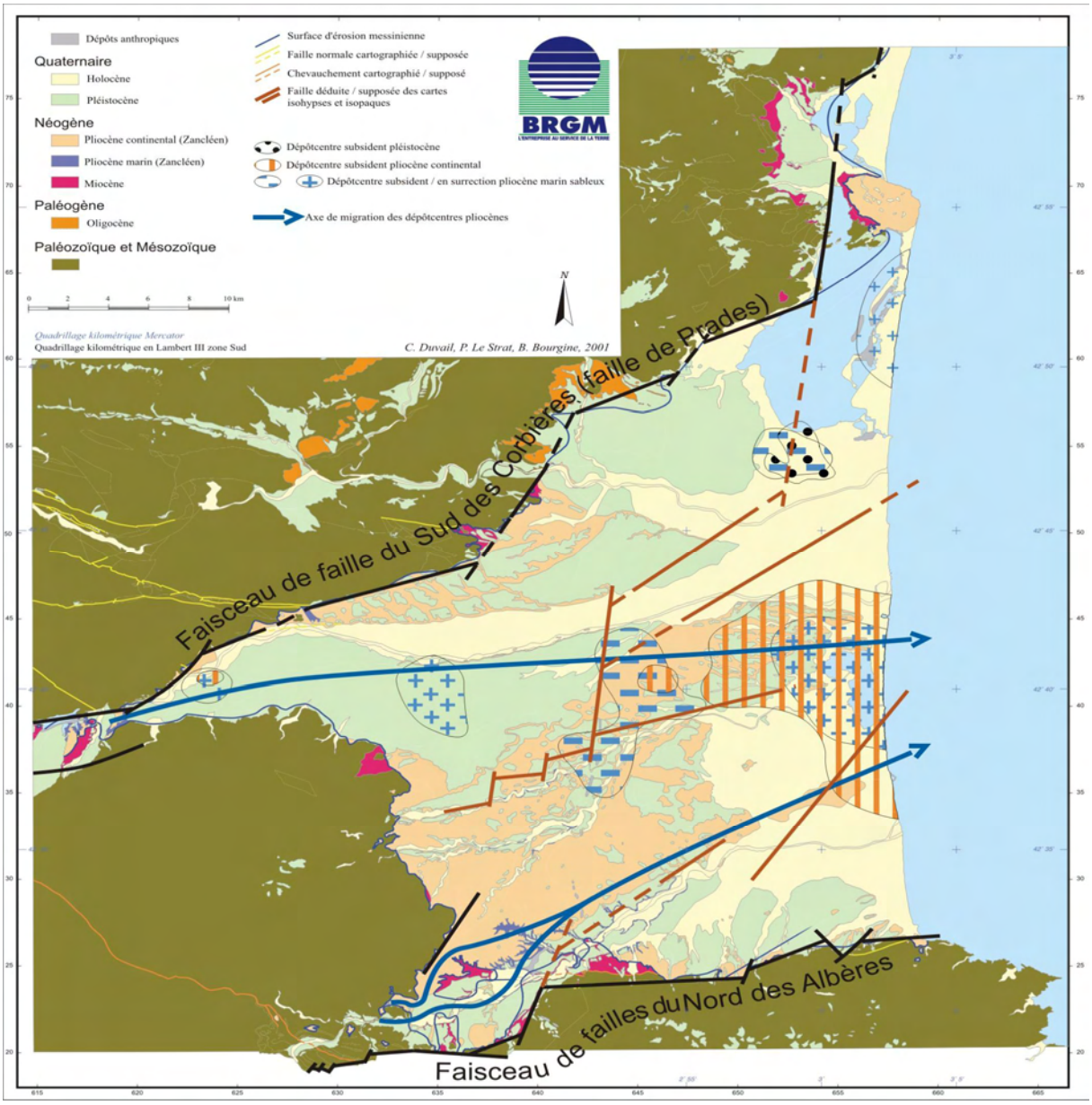
Transmissivité des aquifères codés 146 (ci-dessous) et 225 (page suivante).

- 146 : principalement constitué par les unités sédimentologiques quaternaires ;
- 225 : principalement constitué par les unités sédimentologiques pliocènes et quaternaire marin en Salanque.



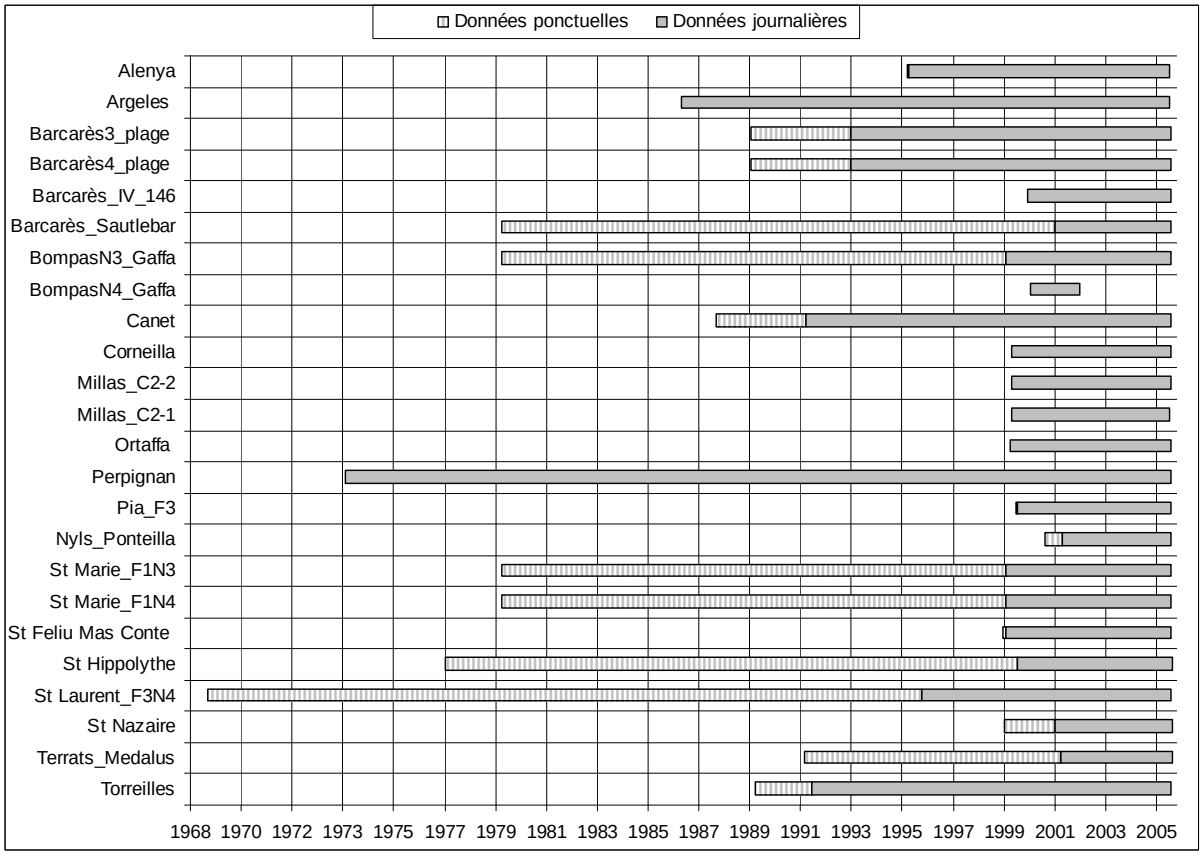

Transmissivité de l'aquifère "225"
[Marchal, 1990]
2e-2 - 4e-2 (4)
5e-3 - 2e-2 (16)
3e-3 - 5e-3 (41)
2e-3 - 3e-3 (40)
1e-3 - 2e-3 (63)
8e-5 - 1e-3 (33)
Histogrammes (Log T 225)
Densité
Log de la transmissivité
Log(T_225)
Loi Normale(-2.735;0.403)

Annexe 10 - Depôtcentres et structuration pliocènes déduits des cartes isohypses et isopaques [Duvail *et al.*, 2001]

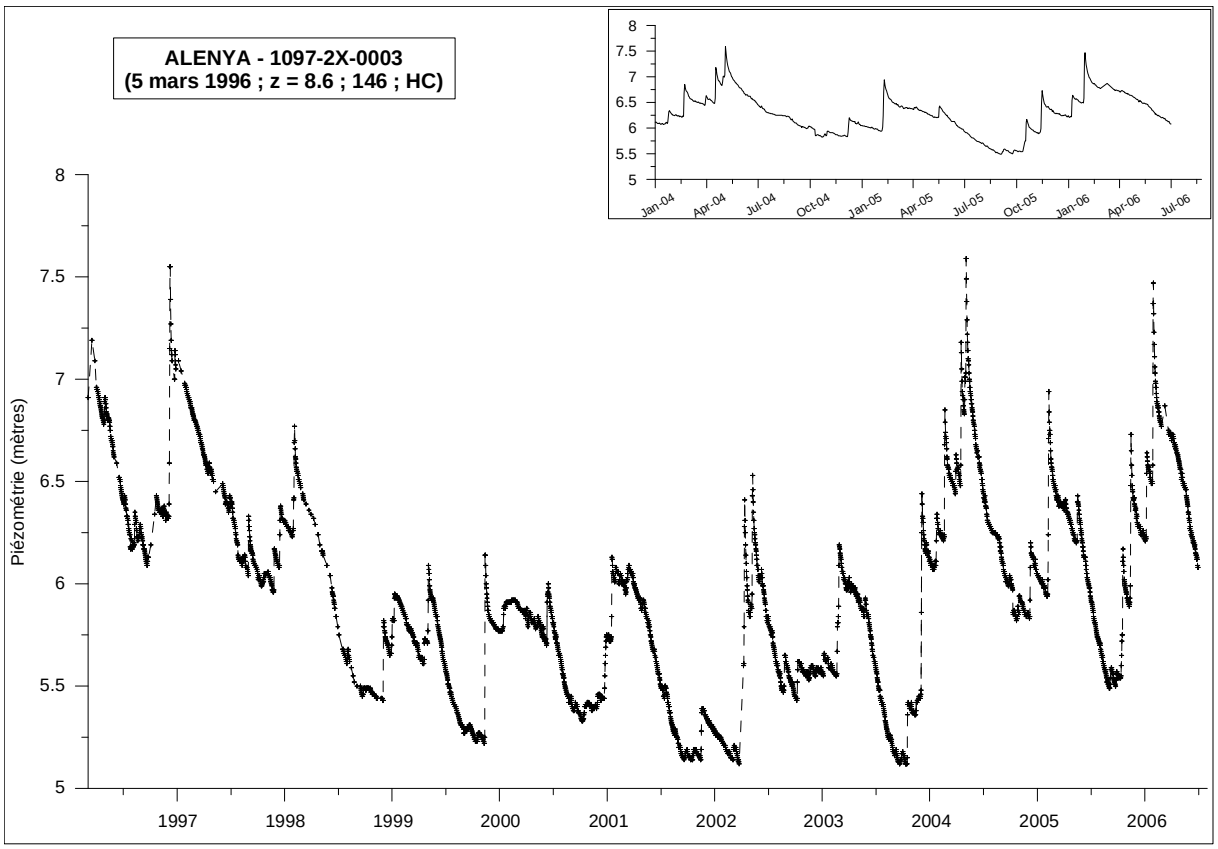


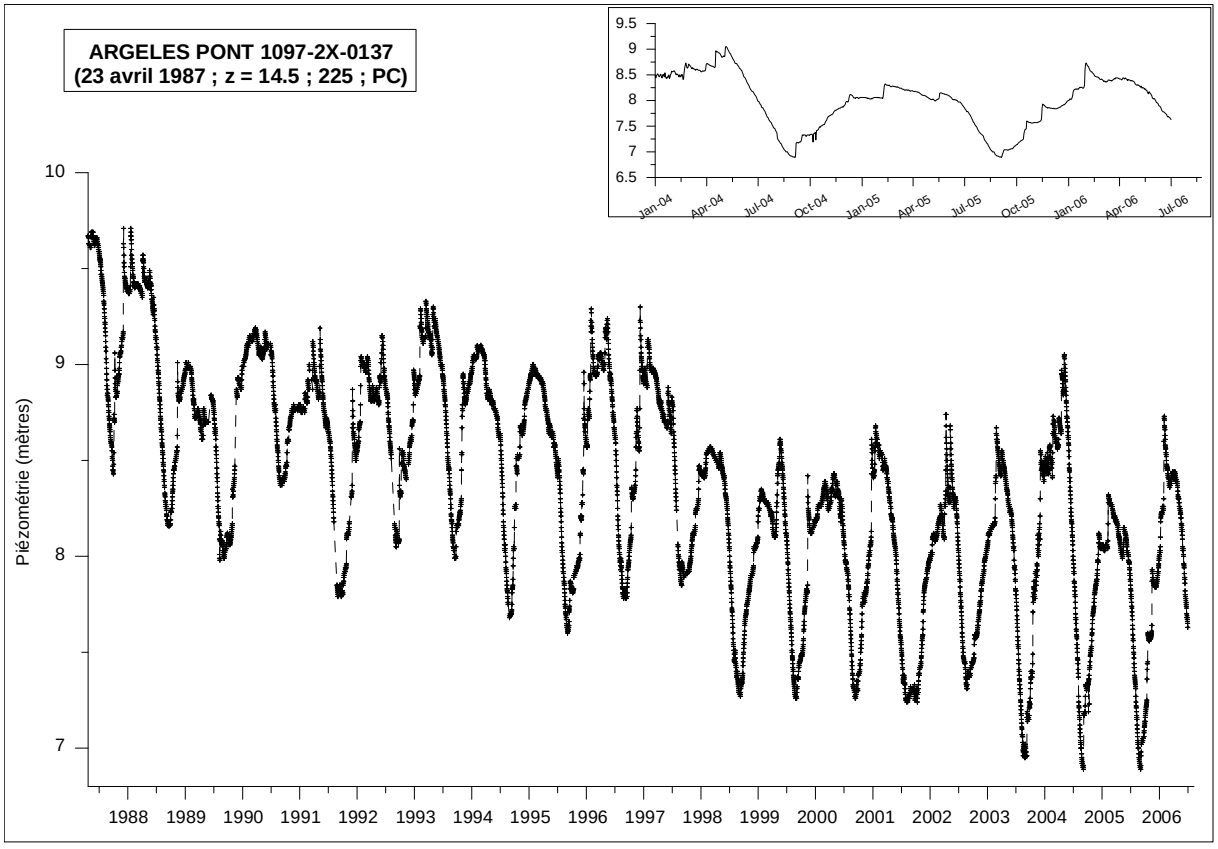
Annexe 11 - Variations piézométriques des aquifères de la plaine du Roussillon

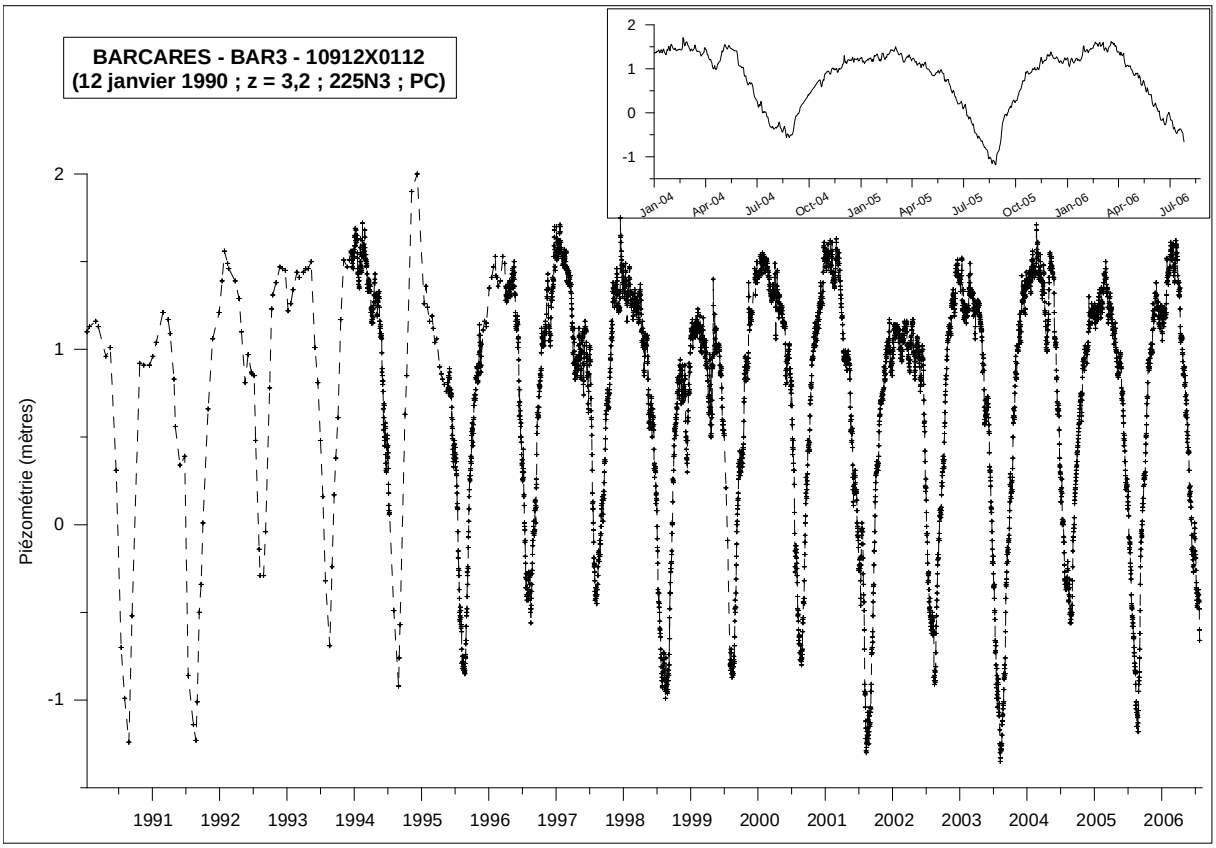
Les variations piézométriques présentées ci-après correspondent à des données brutes validées par des mesures à la sonde piézométrique, mais présentant encore quelques erreurs.

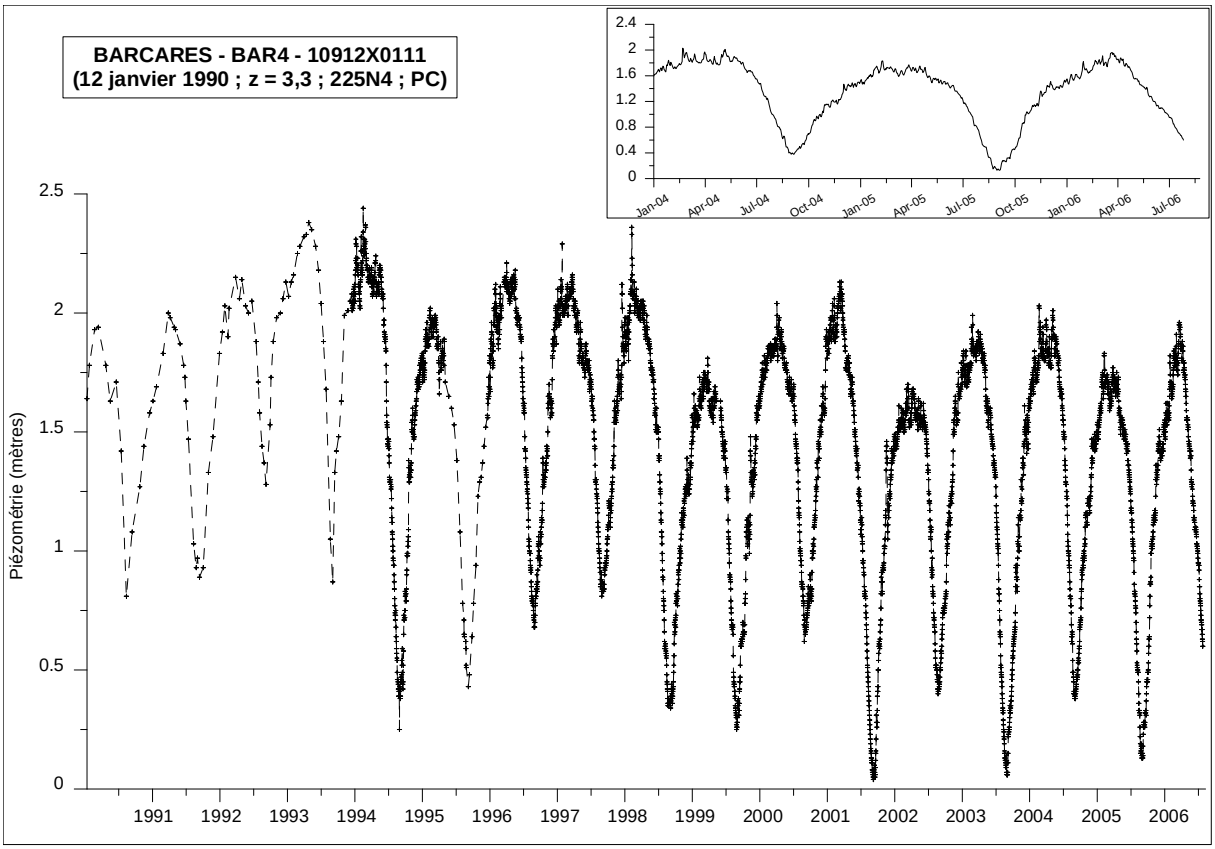


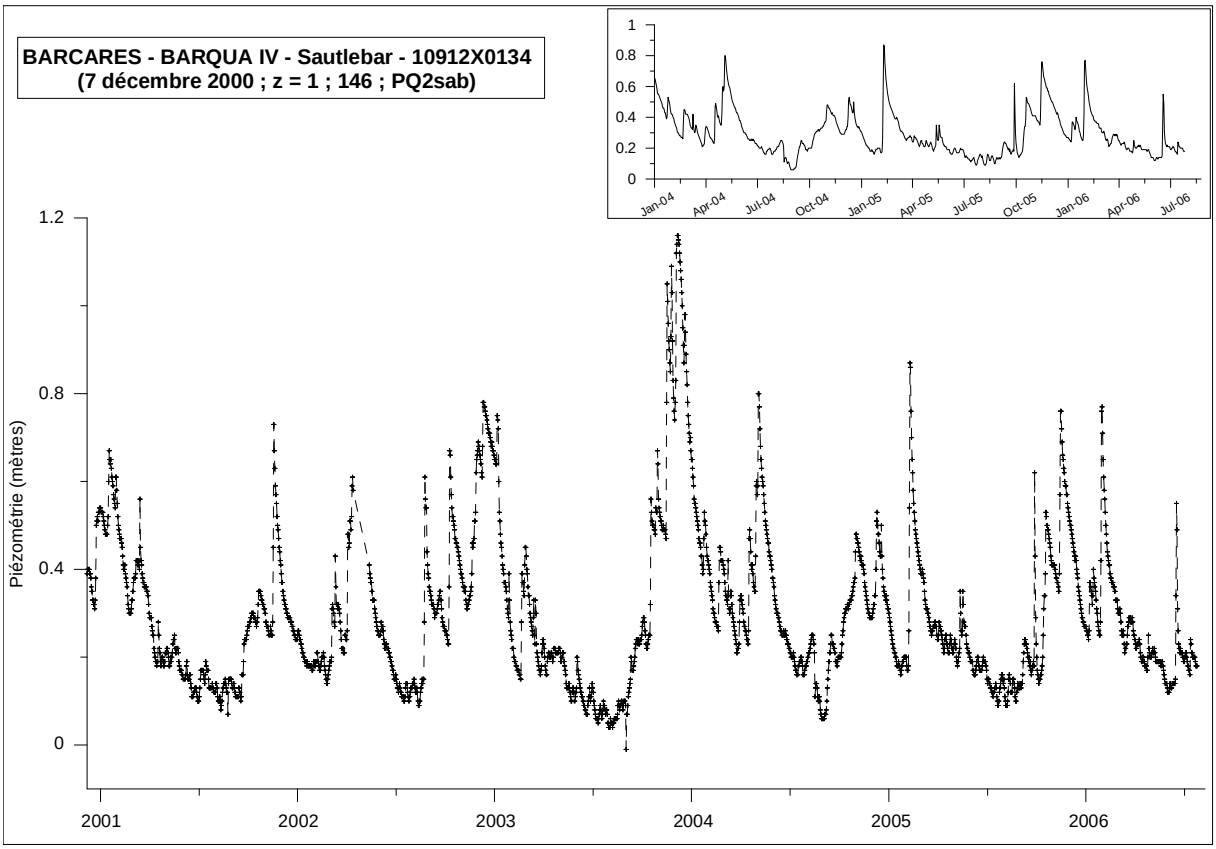
Chronogramme du suivi piézométrique sur la plaine du Roussillon. Les mesures sont prises de manière ponctuelle ou en continu.

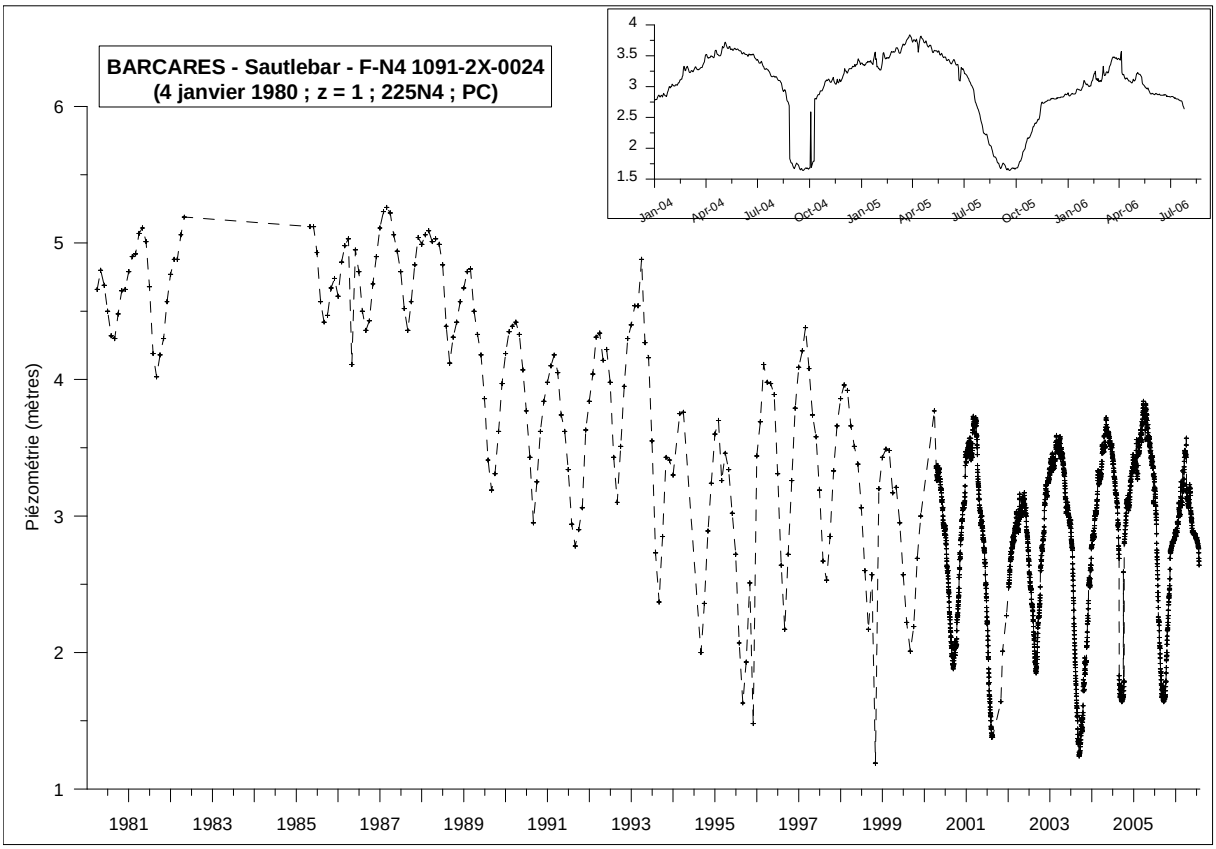

ALENYA - 1097-2X-0003
(5 mars 1996 ; z = 8.6 ; 146 ; HC)
Piézométrie (mètres)
8
7.5
7
6.5
6
5.5
5
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

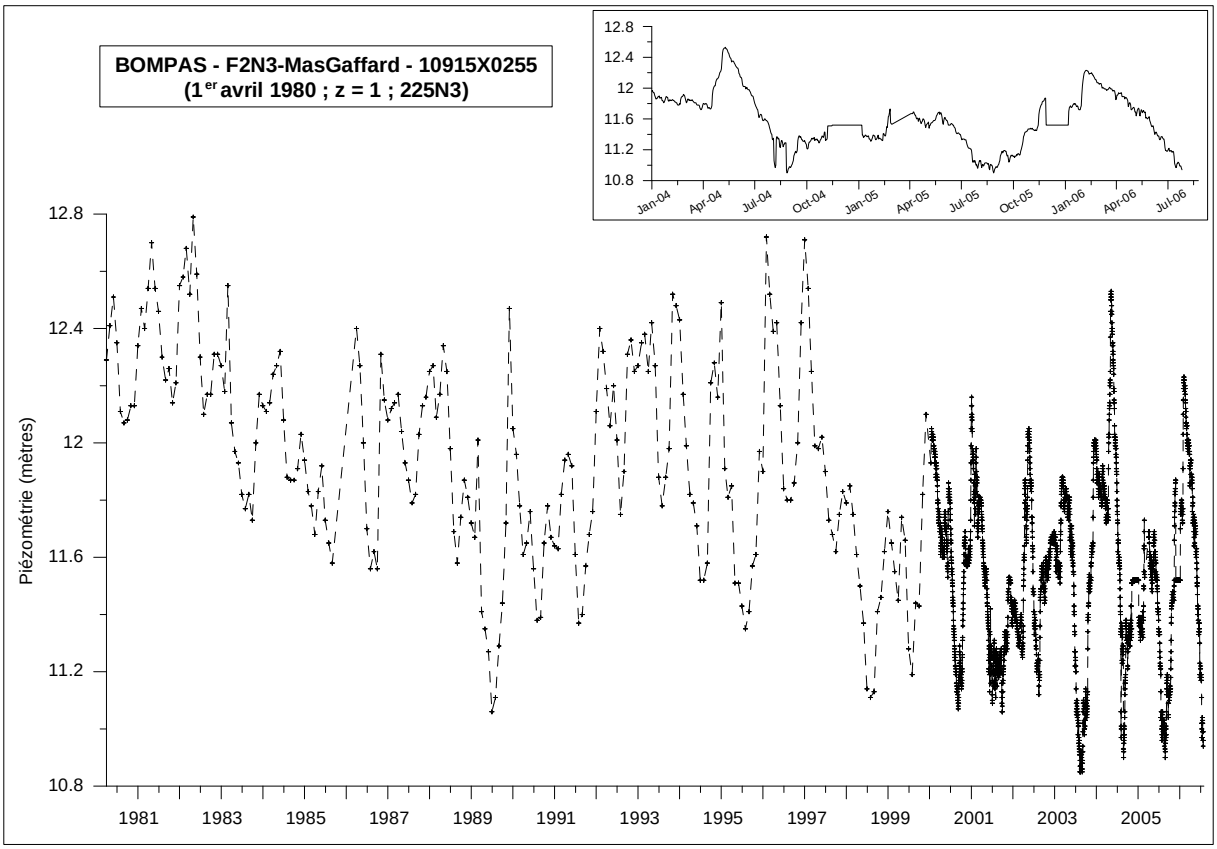

ARGELES PONT 1097-2X-0137
(23 avril 1987 ; z = 14.5 ; 225 ; PC)
Piézométrie (mètres)
10
9
8
7
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

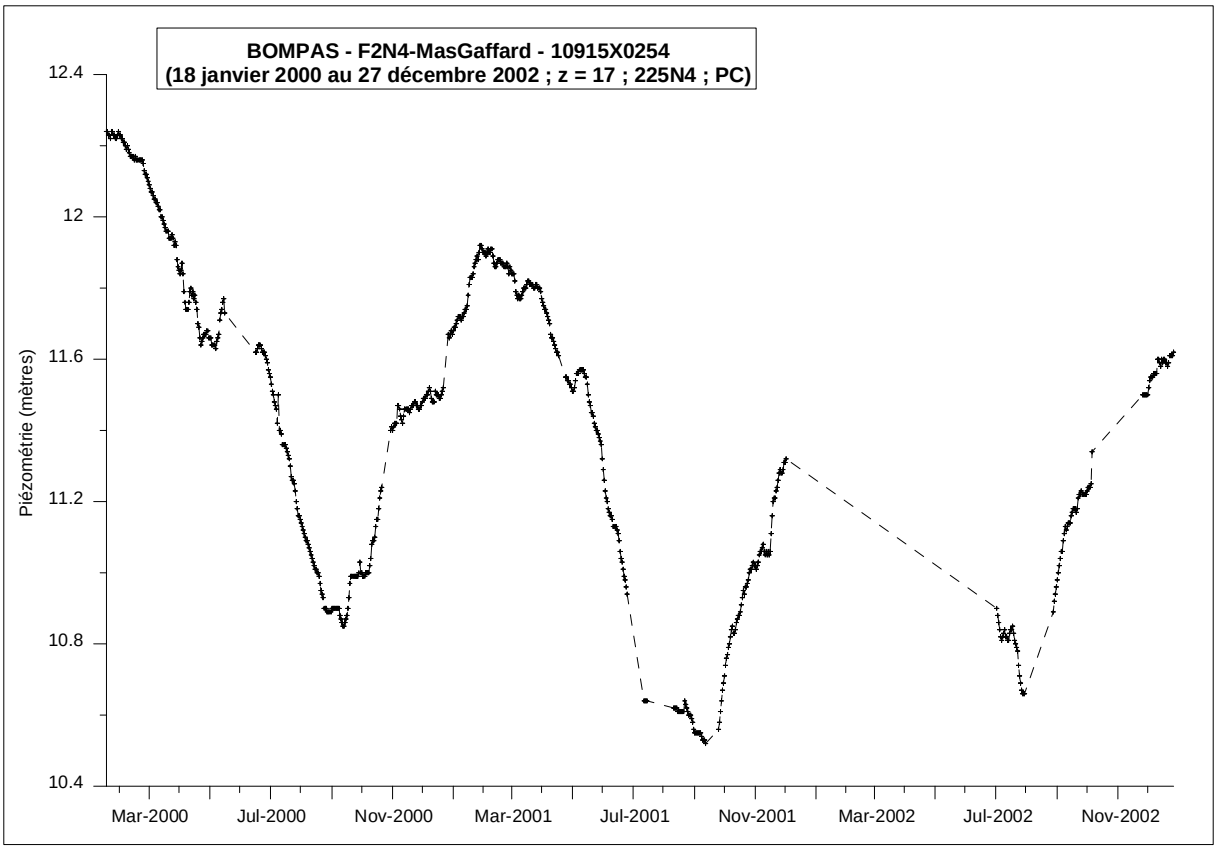

BARCARES - BAR3 - 10912X0112
(12 janvier 1990 ; z = 3,2 ; 225N3 ; PC)
Piézométrie (mètres)
2
1
0
-1
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

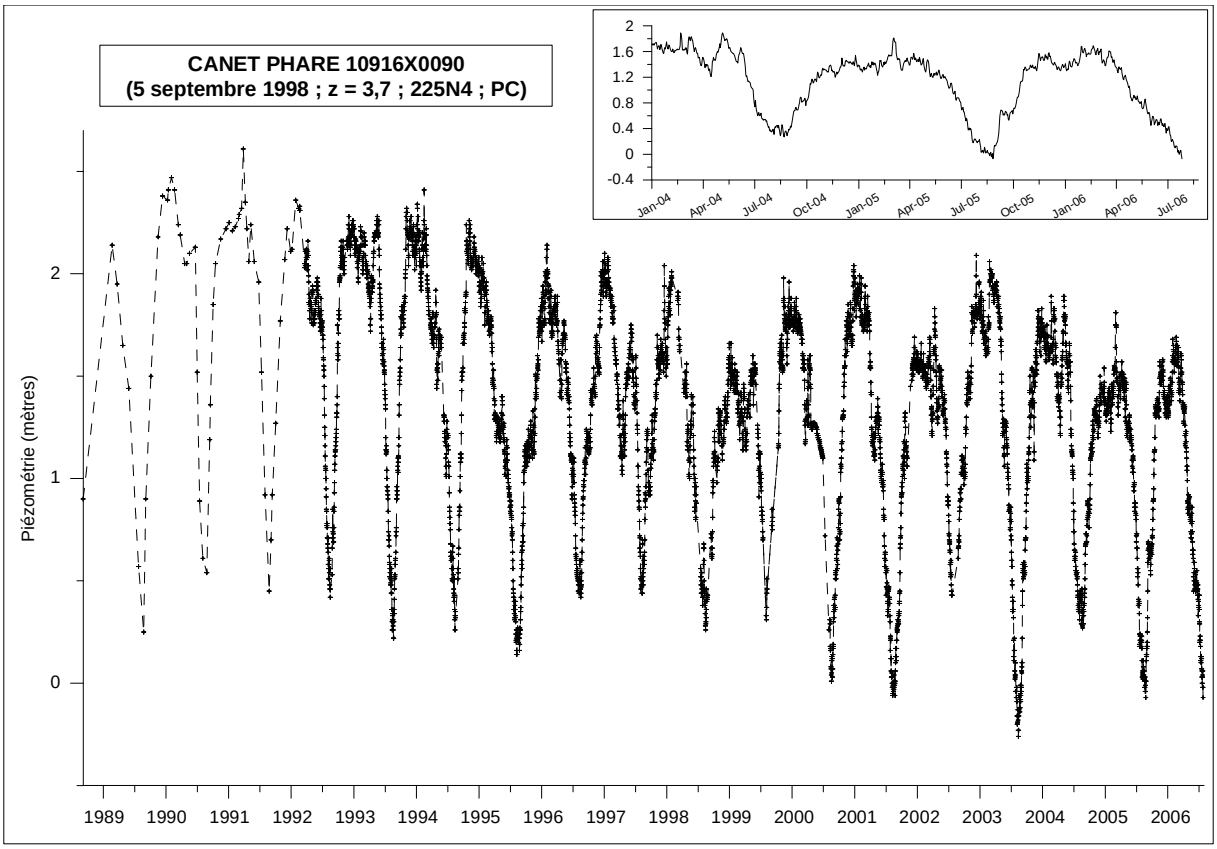

BARCARES - BAR4 - 10912X0111
(12 janvier 1990 ; z = 3,3 ; 225N4 ; PC)
Piézométrie (mètres)
2.5
2
1.5
1
0.5
0
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

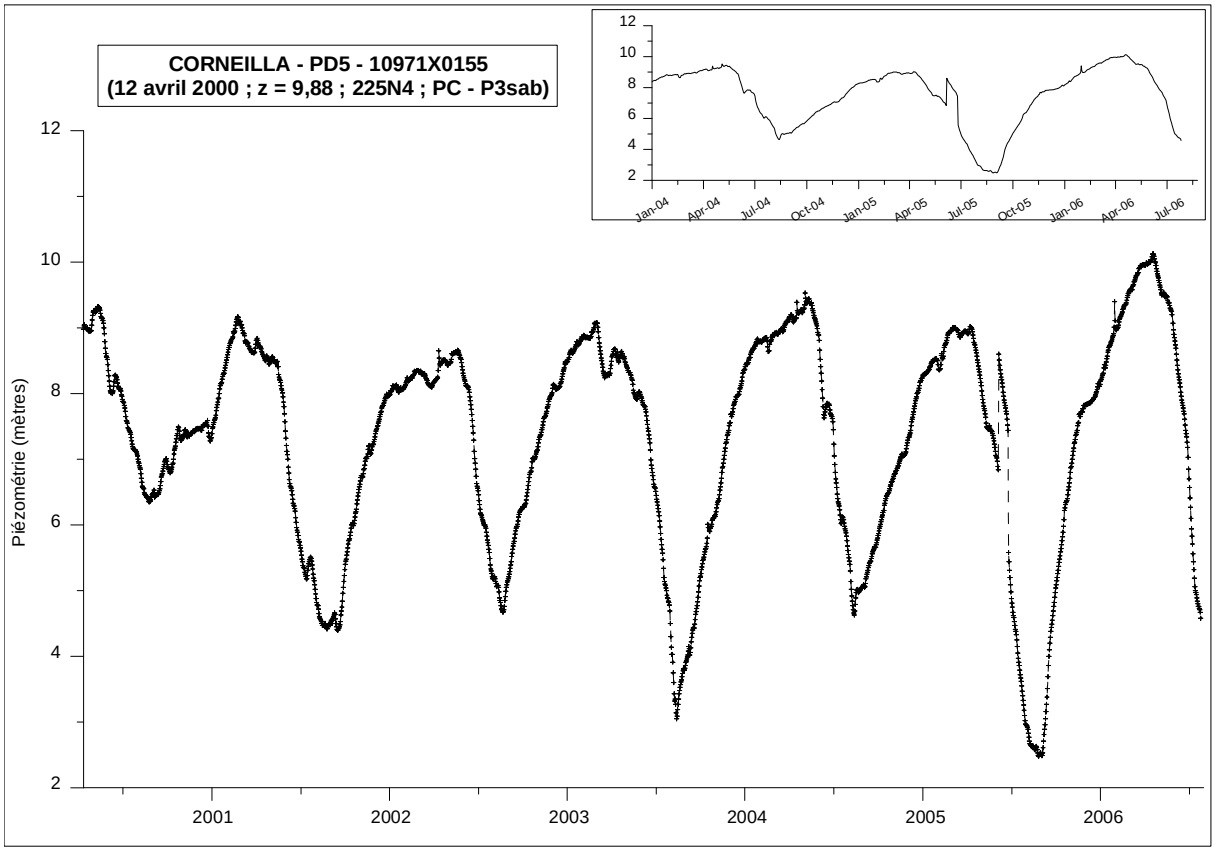

BARCARES - BARQUA IV - Sautlebar - 10912X0134
(7 décembre 2000 ; z = 1 ; 146 ; PQ2sab)
Piézométrie (mètres)
1.2
0.8
0.4
0
2001
2002
2003
2004
2005
2006
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

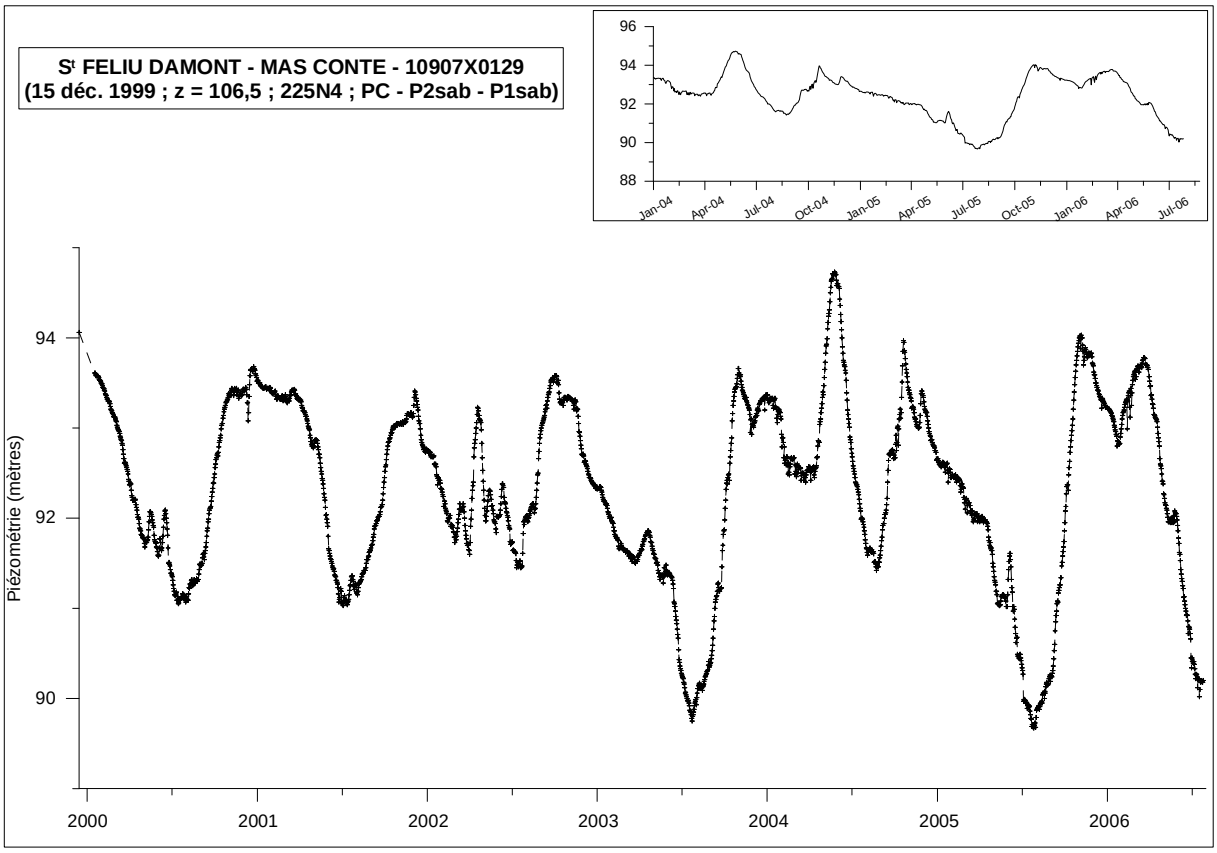

BARCARES - Sautlebar - F-N4 1091-2X-0024
(4 janvier 1980 ; z = 1 ; 225N4 ; PC)
Piézométrie (mètres)
6
5
4
3
2
1
1981
1983
1985
1987
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
4
3.5
3
2.5
2
1.5
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

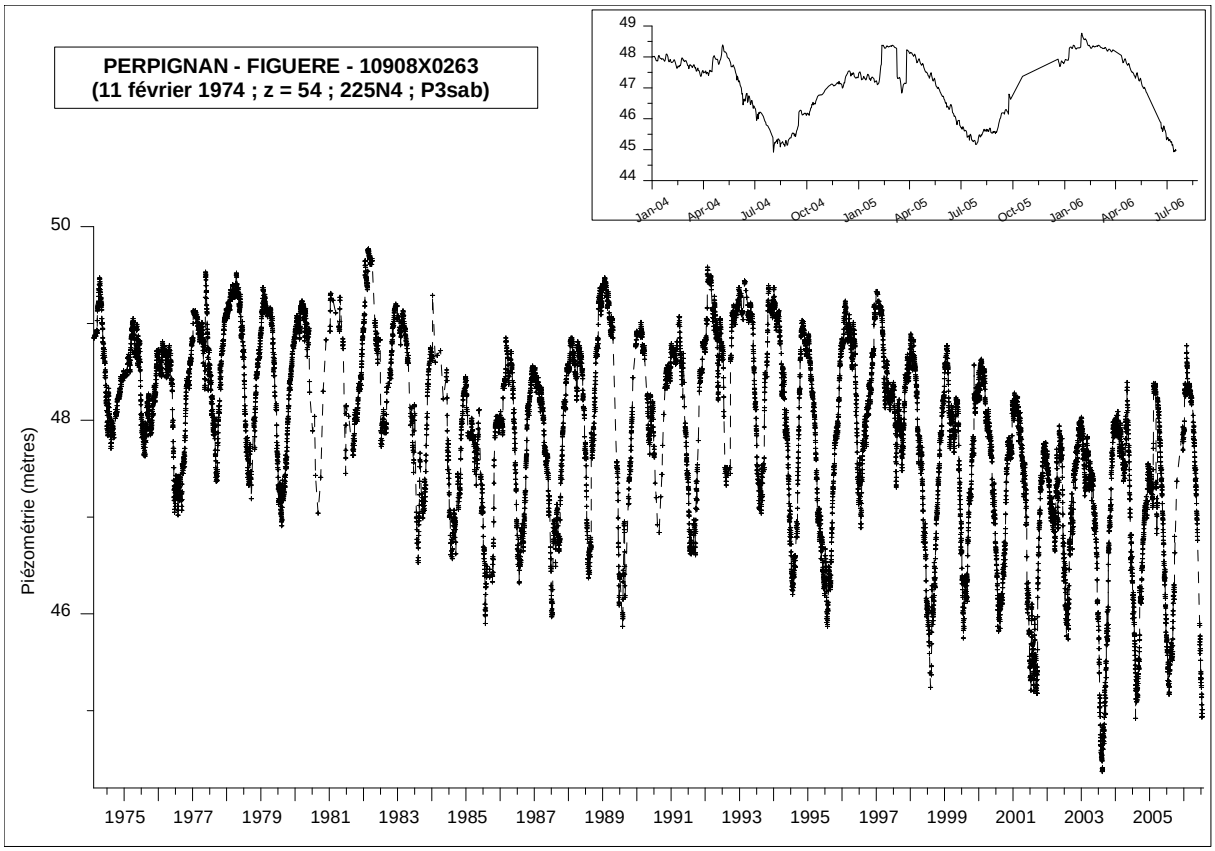

BOMPAS - F2N3-MasGaffard - 10915X0255
(1er avril 1980 ; z = 1 ; 225N3)
Piézométrie (mètres)
12.8
12.4
12
11.6
11.2
10.8
1981
1983
1985
1987
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

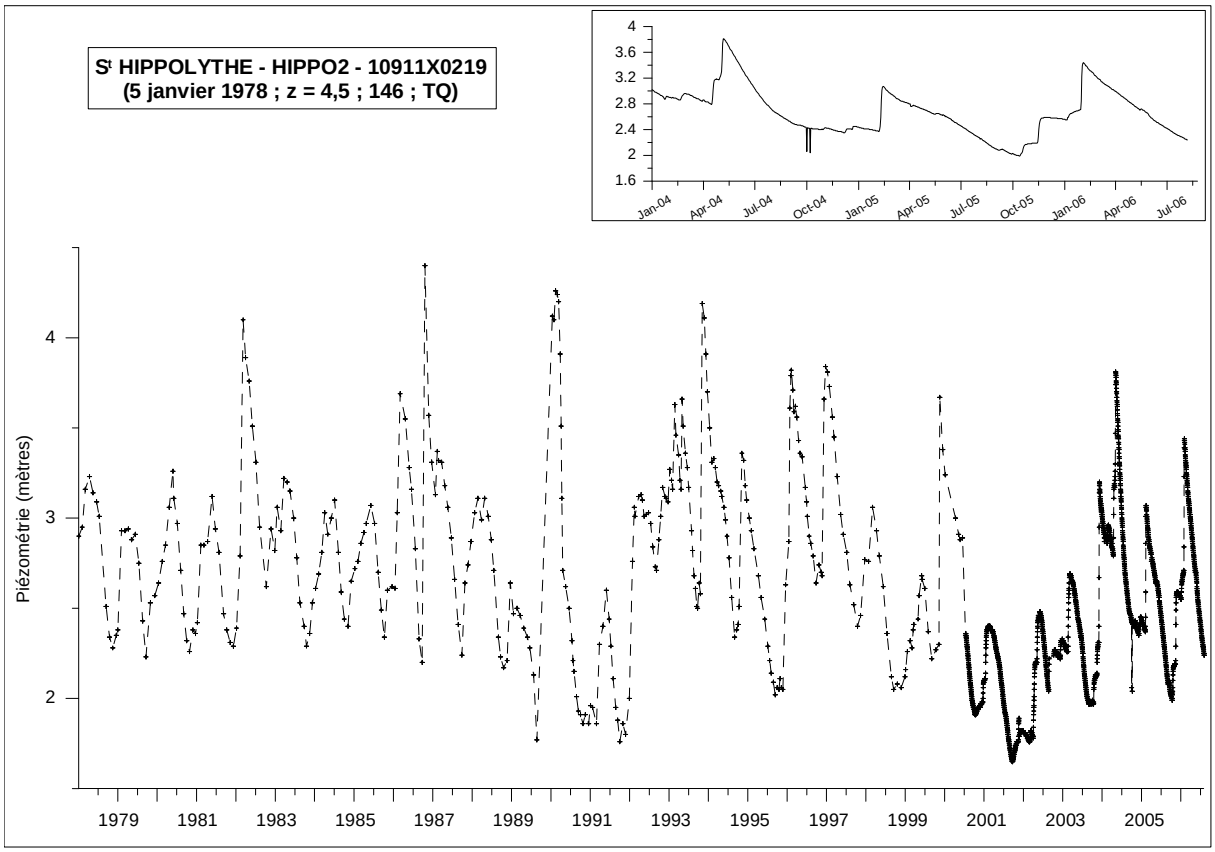

BOMPAS - F2N4-MasGaffard - 10915X0254
(18 janvier 2000 au 27 décembre 2002 ; z = 17 ; 225N4 ; PC)
Piézométrie (mètres)
12.4
12
11.6
11.2
10.8
10.4
Mar-2000
Jul-2000
Nov-2000
Mar-2001
Jul-2001
Nov-2001
Mar-2002
Jul-2002
Nov-2002

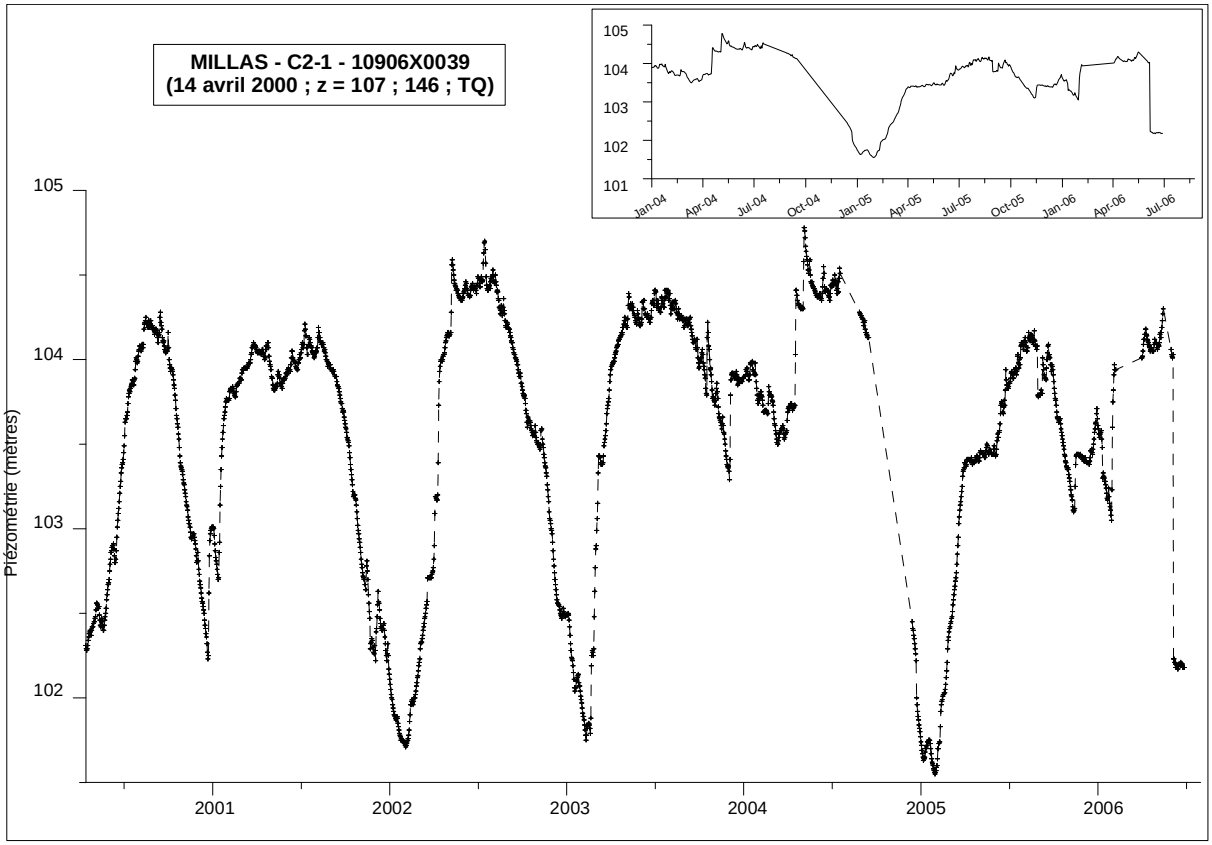

CANET PHARE 10916X0090
(5 septembre 1998 ; z = 3,7 ; 225N4 ; PC)
Piézométrie (mètres)
2
1
0
1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006
2
1.6
1.2
0.8
0.4
0
-0.4
Jan-04 Apr-04 Jul-04 Oct-04 Jan-05 Apr-05 Jul-05 Oct-05 Jan-06 Apr-06 Jul-06

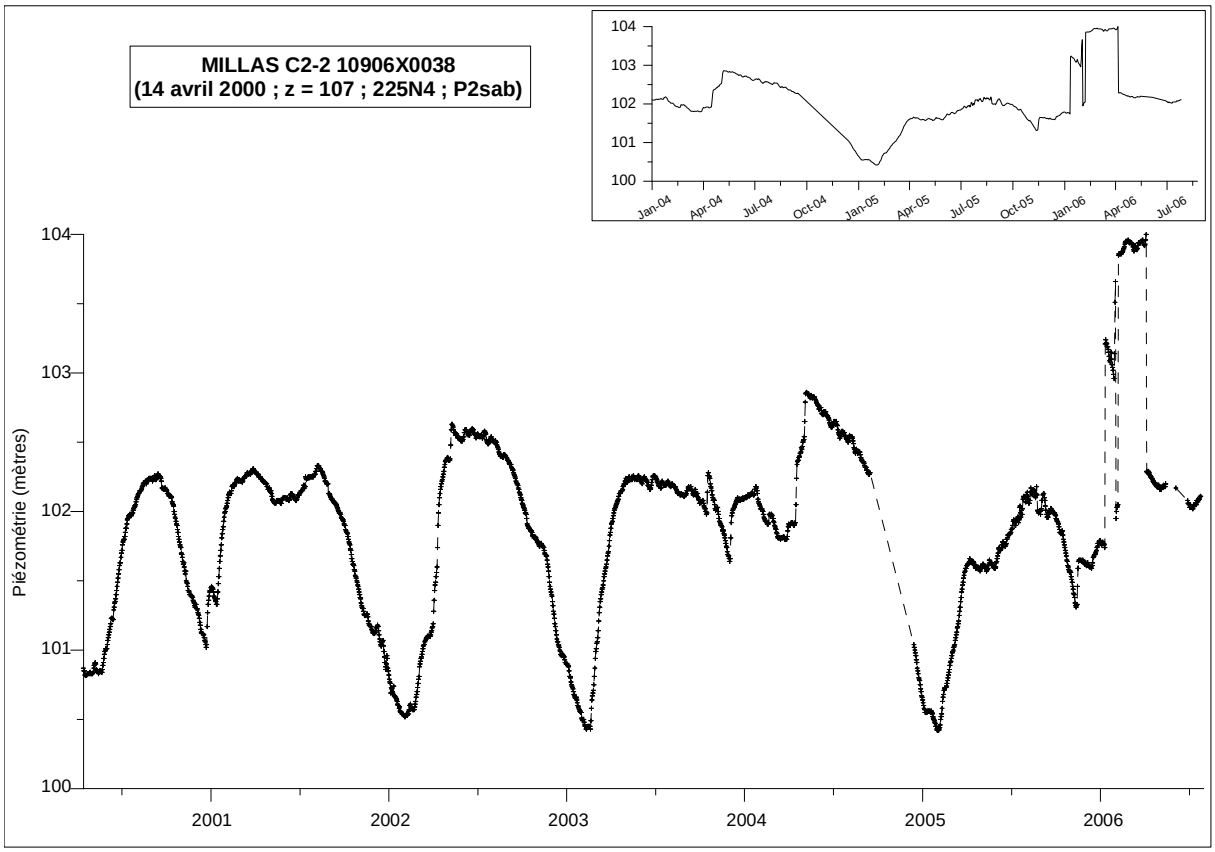

CORNEILLA - PD5 - 10971X0155
(12 avril 2000 ; z = 9,88 ; 225N4 ; PC - P3sab)
Piézométrie (mètres)
12
10
8
6
4
2
2001 2002 2003 2004 2005 2006
12
10
8
6
4
2
Jan-04 Apr-04 Jul-04 Oct-04 Jan-05 Apr-05 Jul-05 Oct-05 Jan-06 Apr-06 Jul-06

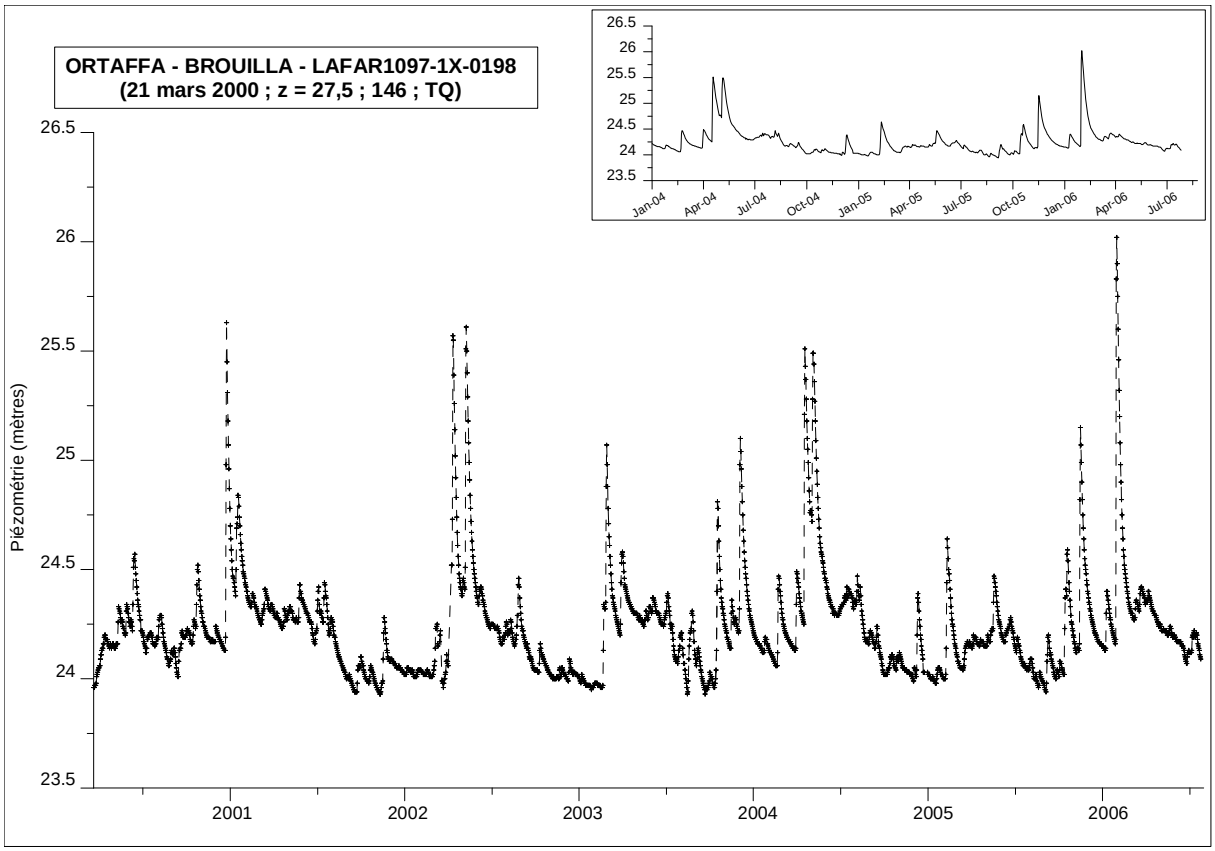

St FELIU DAMONT - MAS CONTE - 10907X0129
(15 déc. 1999 ; z = 106,5 ; 225N4 ; PC - P2sab - P1sab)
Piézométrie (mètres)
94
92
90
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
96
94
92
90
88
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

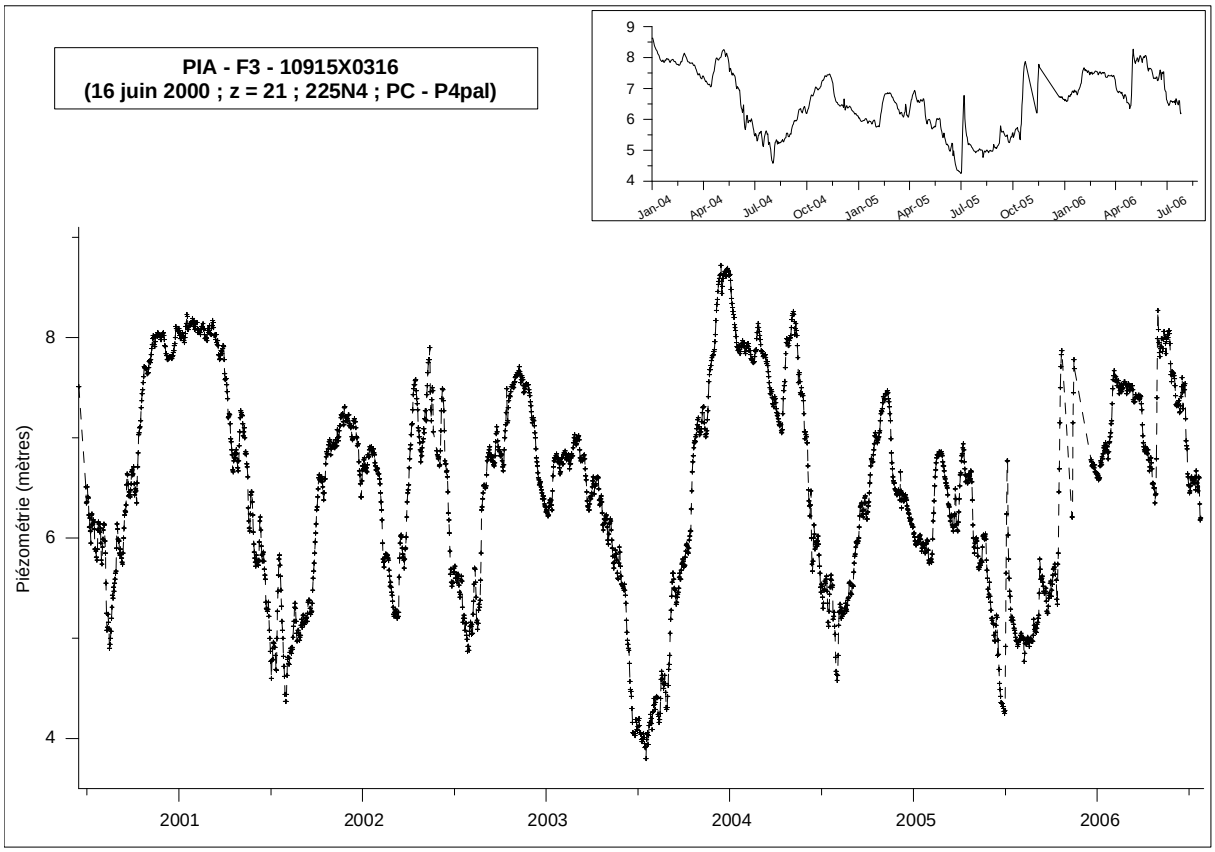

PERPIGNAN - FIGUERE - 10908X0263
(11 février 1974 ; z = 54 ; 225N4 ; P3sab)
Piézométrie (mètres)
50
48
46
1975
1977
1979
1981
1983
1985
1987
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
49
48
47
46
45
44
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

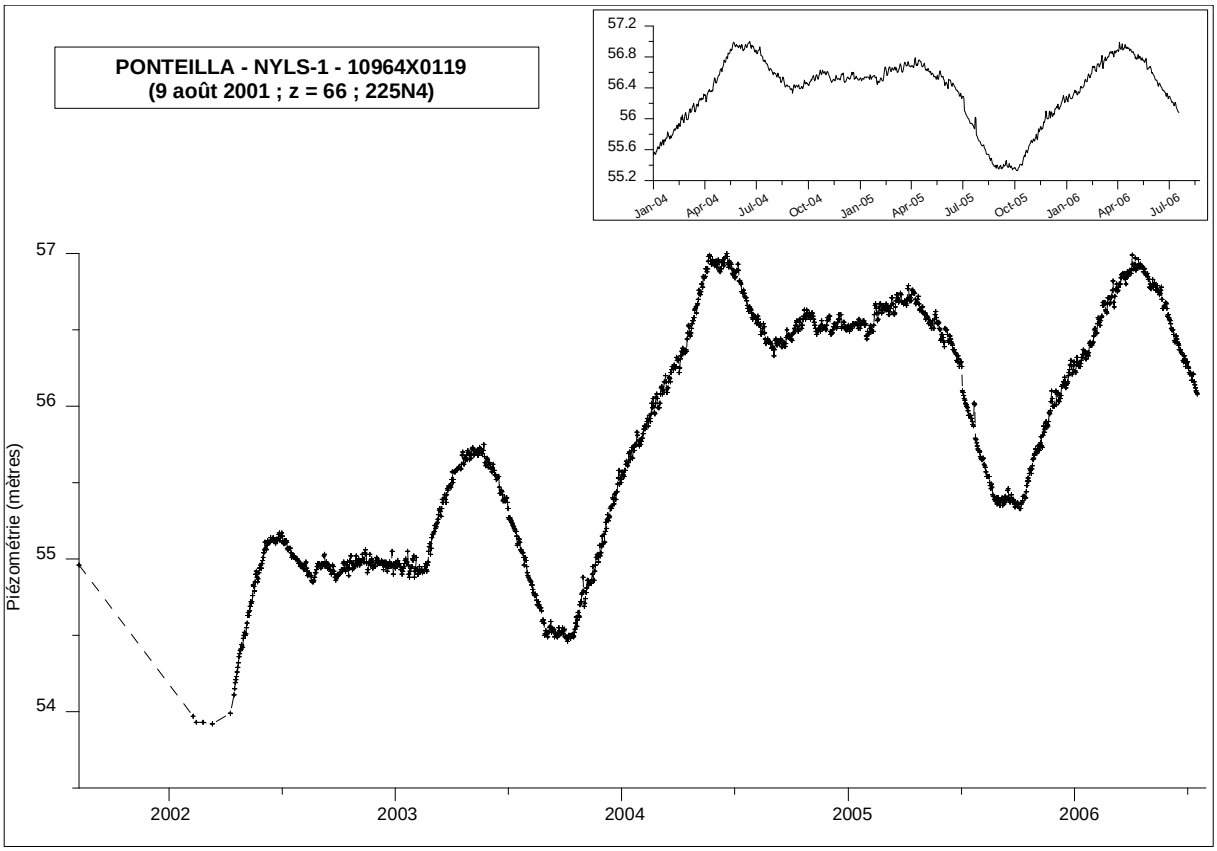

St HIPPOLYTHE - HIPPO2 - 10911X0219
(5 janvier 1978 ; z = 4,5 ; 146 ; TQ)
Piézométrie (mètres)
4
3
2
1979
1981
1983
1985
1987
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
4
3.6
3.2
2.8
2.4
2
1.6
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

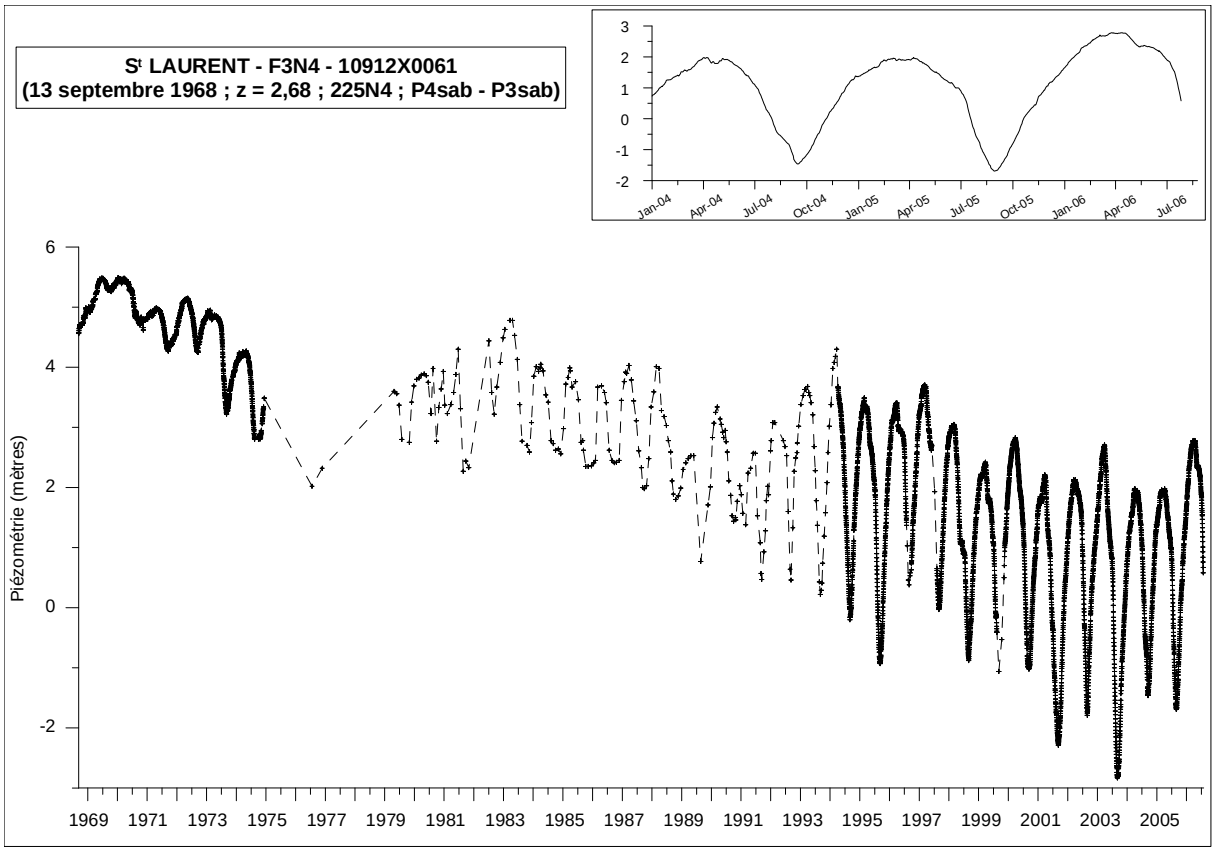

MILLAS - C2-1 - 10906X0039
(14 avril 2000 ; z = 107 ; 146 ; TQ)
Piézométrie (mètres)
105
104
103
102
2001
2002
2003
2004
2005
2006
105
104
103
102
101
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

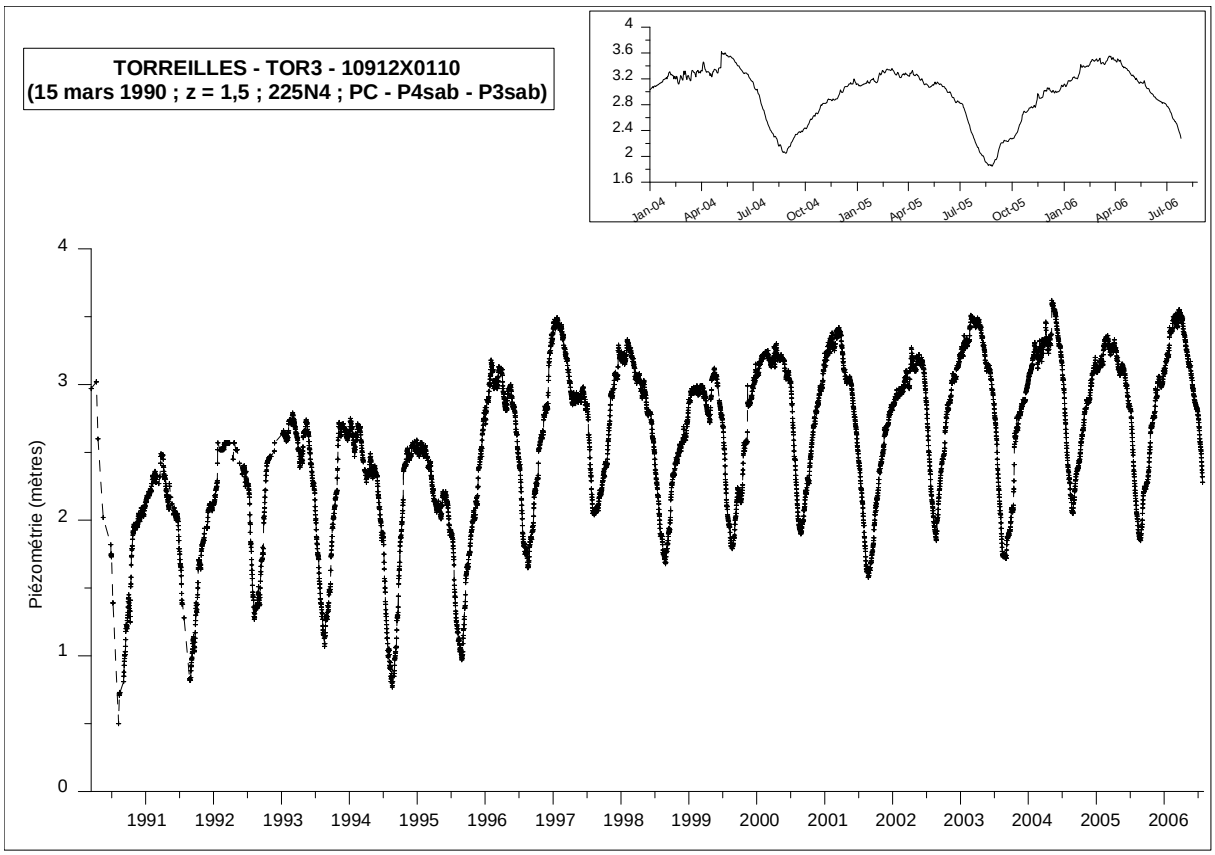

MILLAS C2-2 10906X0038
(14 avril 2000 ; z = 107 ; 225N4 ; P2sab)
Piézométrie (mètres)
104
103
102
101
100
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

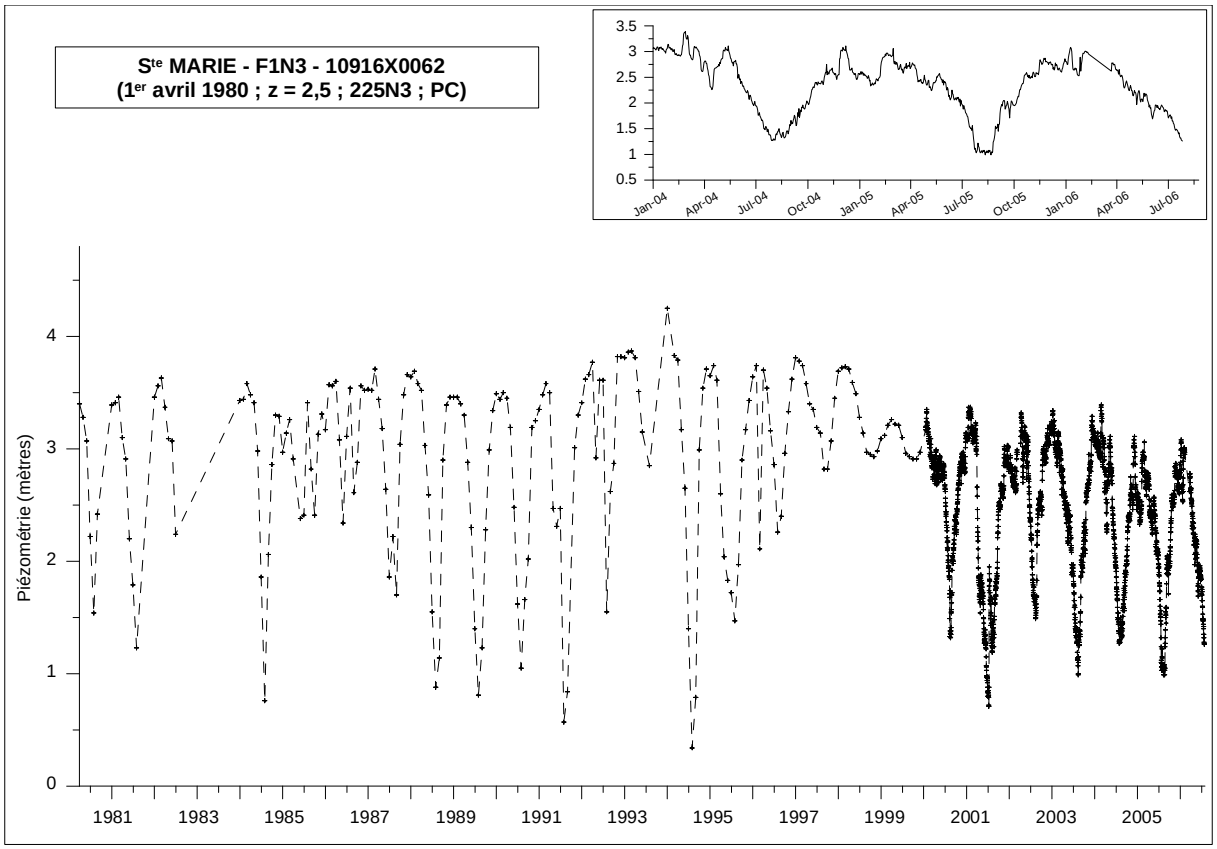

ORTAFFA - BROUILLA - LAFAR1097-1X-0198
(21 mars 2000 ; z = 27,5 ; 146 ; TQ)
Piézométrie (mètres)
26.5
26
25.5
25
24.5
24
23.5
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

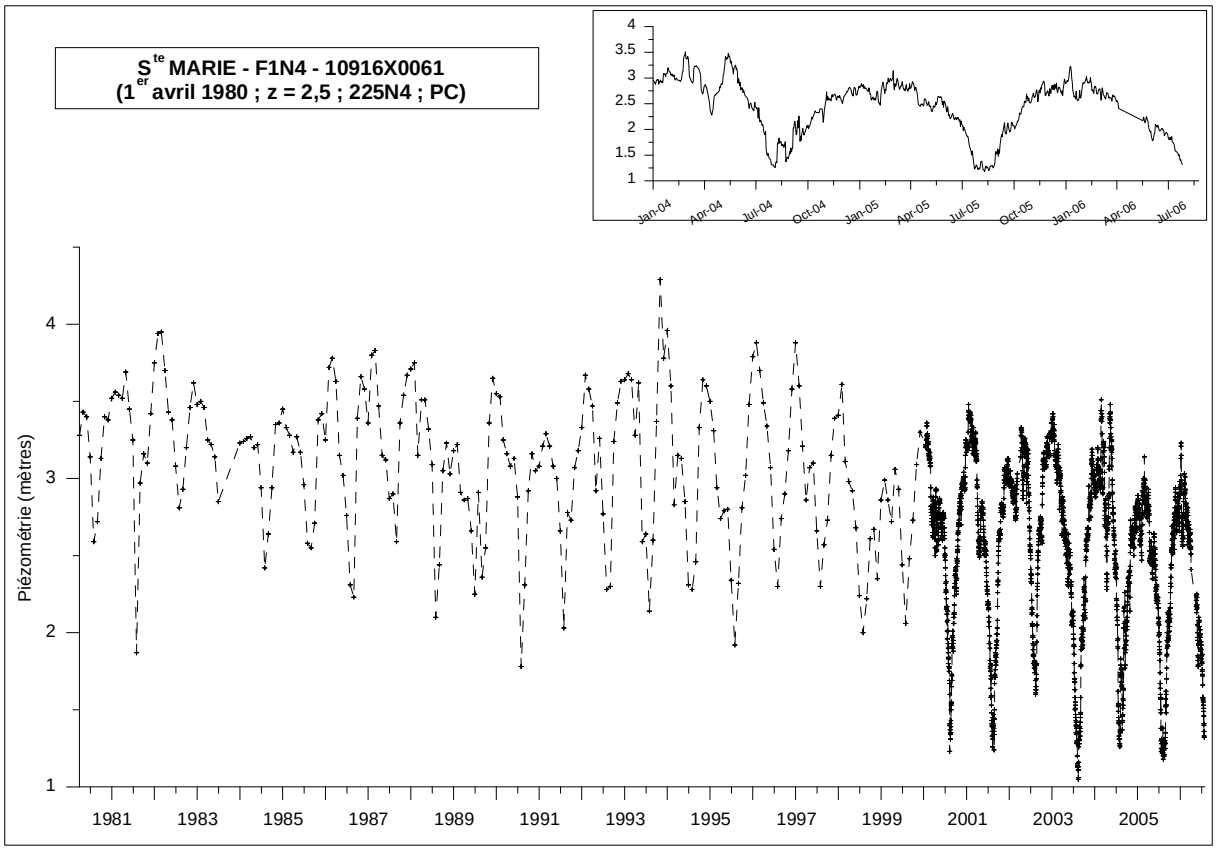

PIA - F3 - 10915X0316
(16 juin 2000 ; z = 21 ; 225N4 ; PC - P4pal)
Piézométrie (mètres)
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

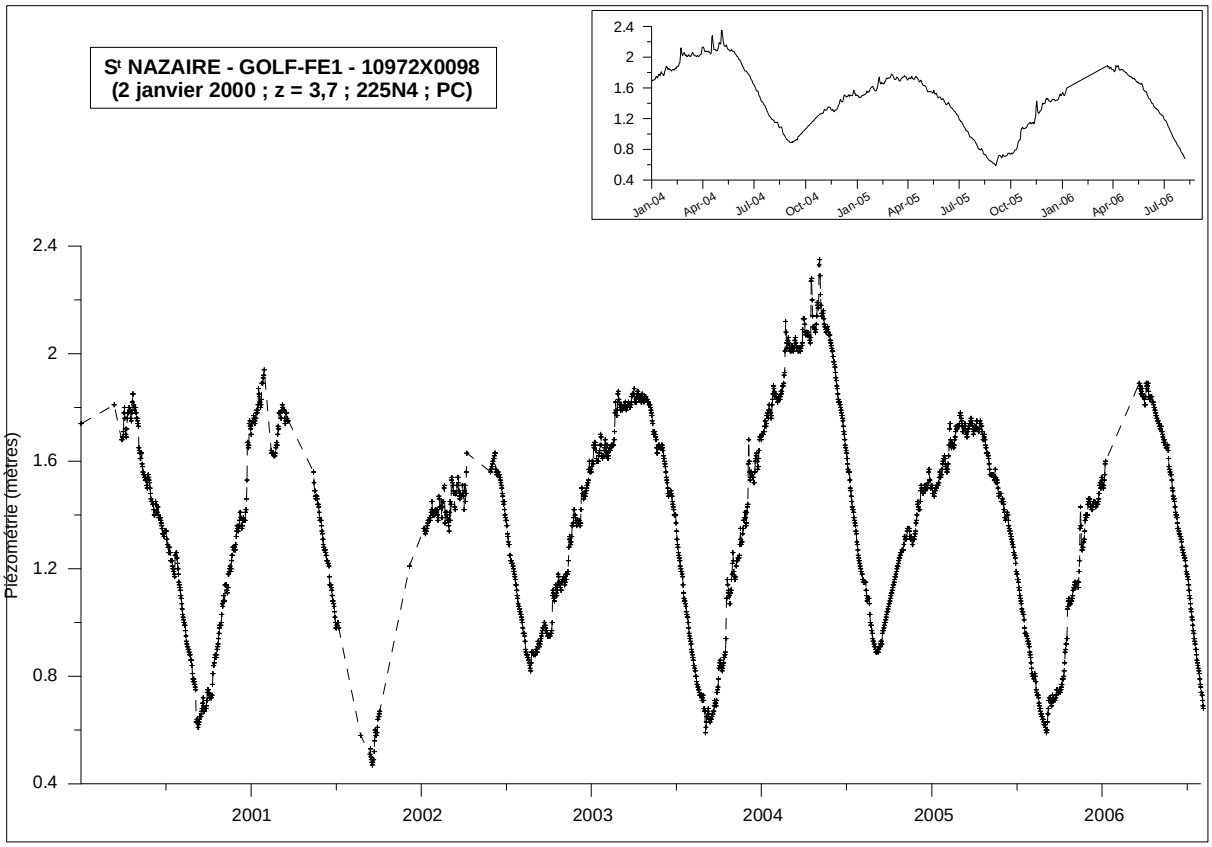

PONTEILLA - NYLS-1 - 10964X0119
(9 août 2001 ; z = 66 ; 225N4)
Piézométrie (mètres)
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

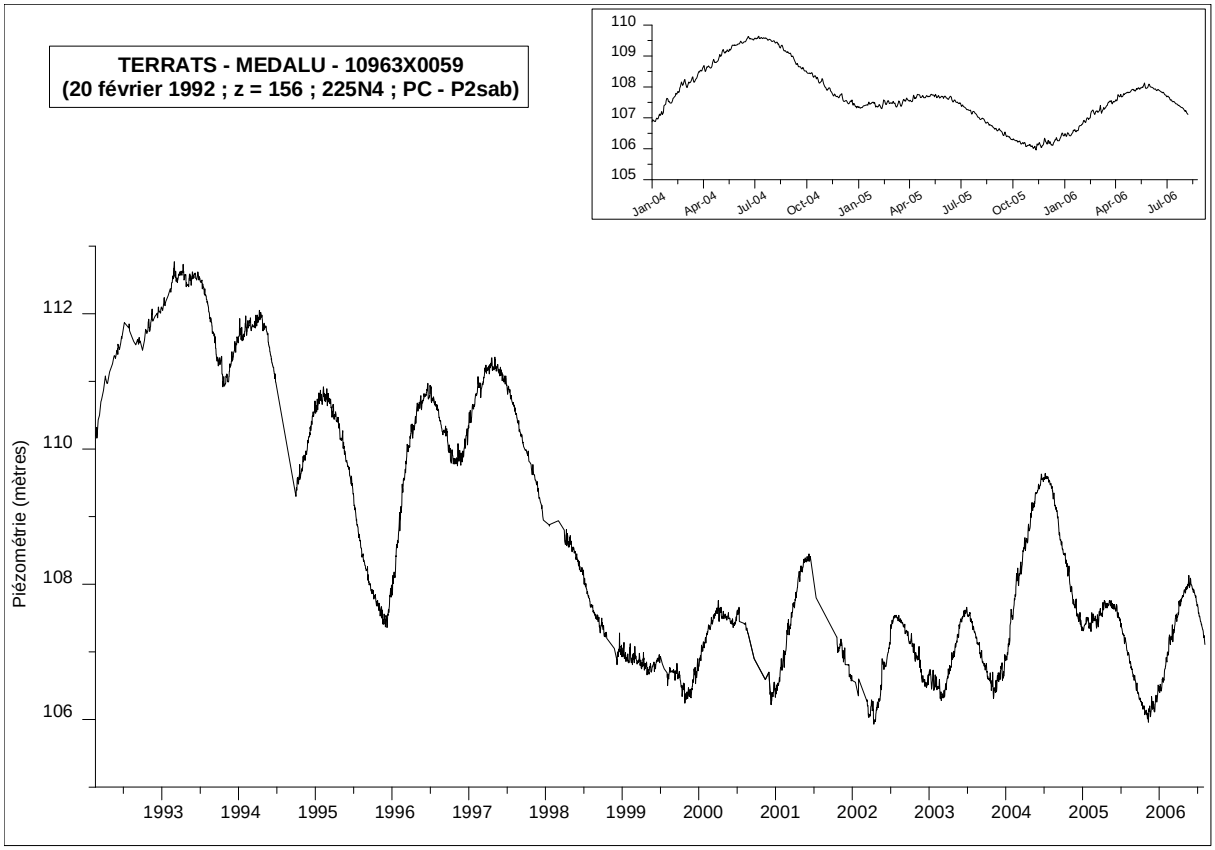

St LAURENT - F3N4 - 10912X0061
(13 septembre 1968 ; z = 2,68 ; 225N4 ; P4sab - P3sab)
Piézométrie (mètres)
6
4
2
0
-2
1969 1971 1973 1975 1977 1979 1981 1983 1985 1987 1989 1991 1993 1995 1997 1999 2001 2003 2005
3
2
1
0
-1
-2
Jan-04 Apr-04 Jul-04 Oct-04 Jan-05 Apr-05 Jul-05 Oct-05 Jan-06 Apr-06 Jul-06


TORREILLES - TOR3 - 10912X0110
(15 mars 1990 ; z = 1,5 ; 225N4 ; PC - P4sab - P3sab)
Piézométrie (mètres)
4
3
2
1
0
1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006
4
3.6
3.2
2.8
2.4
2
1.6
Jan-04 Apr-04 Jul-04 Oct-04 Jan-05 Apr-05 Jul-05 Oct-05 Jan-06 Apr-06 Jul-06


Ste MARIE - F1N3 - 10916X0062
(1er avril 1980 ; z = 2,5 ; 225N3 ; PC)
Piézométrie (mètres)
0
1
2
3
4
1981
1983
1985
1987
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06


Ste MARIE - F1N4 - 10916X0061
(1er avril 1980 ; z = 2,5 ; 225N4 ; PC)
Piézométrie (mètres)
1
2
3
4
1981
1983
1985
1987
1989
1991
1993
1995
1997
1999
2001
2003
2005
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06


St NAZAIRE - GOLF-FE1 - 10972X0098
(2 janvier 2000 ; z = 3,7 ; 225N4 ; PC)
Piézométrie (mètres)
2.4
2
1.6
1.2
0.8
0.4
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06


TERRATS - MEDALU - 10963X0059
(20 février 1992 ; z = 156 ; 225N4 ; PC - P2sab)
Piézométrie (mètres)
112
110
108
106
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
Jan-04
Apr-04
Jul-04
Oct-04
Jan-05
Apr-05
Jul-05
Oct-05
Jan-06
Apr-06
Jul-06

Annexe 12 - Présentation du logiciel TEMPO

Texte extrait de la "Synthèse du Manuel utilisateur de TEMPO"
J.-L. Pinault - 2001 - Rapport BRGM/RP-51459-FR

TEMPO, logiciel destiné au traitement et à la modélisation des séries temporelles en hydrogéologie ainsi qu'en hydrogéochimie, est le fruit d'un savoir-faire dans le domaine du traitement du signal ainsi que des techniques d'inversion et de régularisation utilisées dans différentes disciplines, dont la géophysique.

De par sa conception, le logiciel TEMPO est polyvalent et peut être appliqué à des données aussi diverses que les signaux radon mesurés dans les gaz des sols que la pression atmosphérique, les chroniques pluie/débit d'un bassin versant, les chroniques pluie/niveau piézométrique,…

Les traitements peuvent conduire à la caractérisation du fonctionnement d'un système, à la modélisation inverse des phénomènes ou bien à leur simulation. Le terme modélisation inverse recouvre ici les techniques visant à reproduire un débit, un niveau piézométrique ou un flux (transfert de masse) à partir d'une chronique de pluie et d'ETP (ou de température moyenne journalière), éventuellement de concentration d'un soluté, de paramètres physico-chimiques,…

Contrairement à la modélisation directe qui consiste à reproduire le comportement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de cet hydrosystème et l'application de lois de la physique, la modélisation inverse déduit le fonctionnement du système de l'analyse des données (dualité entre les méthodes inductives et les méthodes déductives).

La relation causale entre entrées et sortie du système est matérialisée par une ou plusieurs fonctions de transfert (ou réponses impulsionnelles) décrivant les différents processus impliqués : ruissellement, infiltration, écoulement souterrain.

Lorsque plusieurs réponses impulsionnelles indépendantes sont nécessaires à la modélisation, le système est dit non linéaire. Ce système peut également avoir plusieurs entrées : c'est ainsi qu'un débit peut être reproduit à partir non seulement d'une séquence de pluie et d'ETP, mais également en niveau piézométrique d'une nappe contribuant à l'alimentation et/ou au drainage d'un cours d'eau. La technique d'inversion permet alors de mettre en évidence la contribution des différentes entrées au cours du temps, les mécanismes de transfert étant, là encore, traduits par les réponses impulsionnelles du modèle.

TEMPO peut également être utilisé pour la simulation de la pluie, de l'ETP, de débits et de niveaux piézométriques. Le simulateur peut fonctionner en cascade, la sortie d'un modèle pouvant être l'entrée d'un autre modèle : par exemple, un niveau piézométrique calculé à partir d'une séquence de pluie et d'ETP elles-mêmes simulées peut être utilisé pour le calcul d'un débit d'un cours d'eau de manière à prendre en compte les interactions nappe/rivière. Les séquences de pluie simulées dans ces différents modèles peuvent éventuellement être corrélées spatialement. Il en va de même des séquences d'ETP.

Généralités sur l'étude fonctionnelle des aquifères par les analyses corrélatoires et spectrales. B. Ladouche - Communication personnelle

Les analyses corrélatoire et spectrale s'inscrivent dans le cadre de l'approche dite fonctionnelle de l'étude des hydrosystèmes et se basent sur les techniques de l'analyse statistiques des séries chronologiques [Jenkins & Watts, 1968 ; Box and Jenkins, 1970 ; Mangin, 1981].

Le principe de base de ces méthodes est d'assimiler le système aquifère à un filtre qui laisse plus ou moins passer l'information contenue dans un signal d'entrée (l'état du système ne dépend que des entrées les plus récentes). Dans cette approche, l'aquifère est assimilé à une "boite noire" dont la pluie et la piézométrie, par exemple, représente respectivement l'entrée et la sortie. La méthode consiste donc à analyser et comparer des signaux d'entrées (précipitation, marée maritime, pression atmosphérique) et de sortie (piézométrie). Les chroniques des signaux d'entrée et de sortie peuvent être traitées séparément dans le domaine temporel (analyse corrélatoire simple), ou dans le domaine fréquentiel (analyse spectrale simple) ou bien l'un par rapport à l'autre (analyses corrélatoire et spectrale croisée).

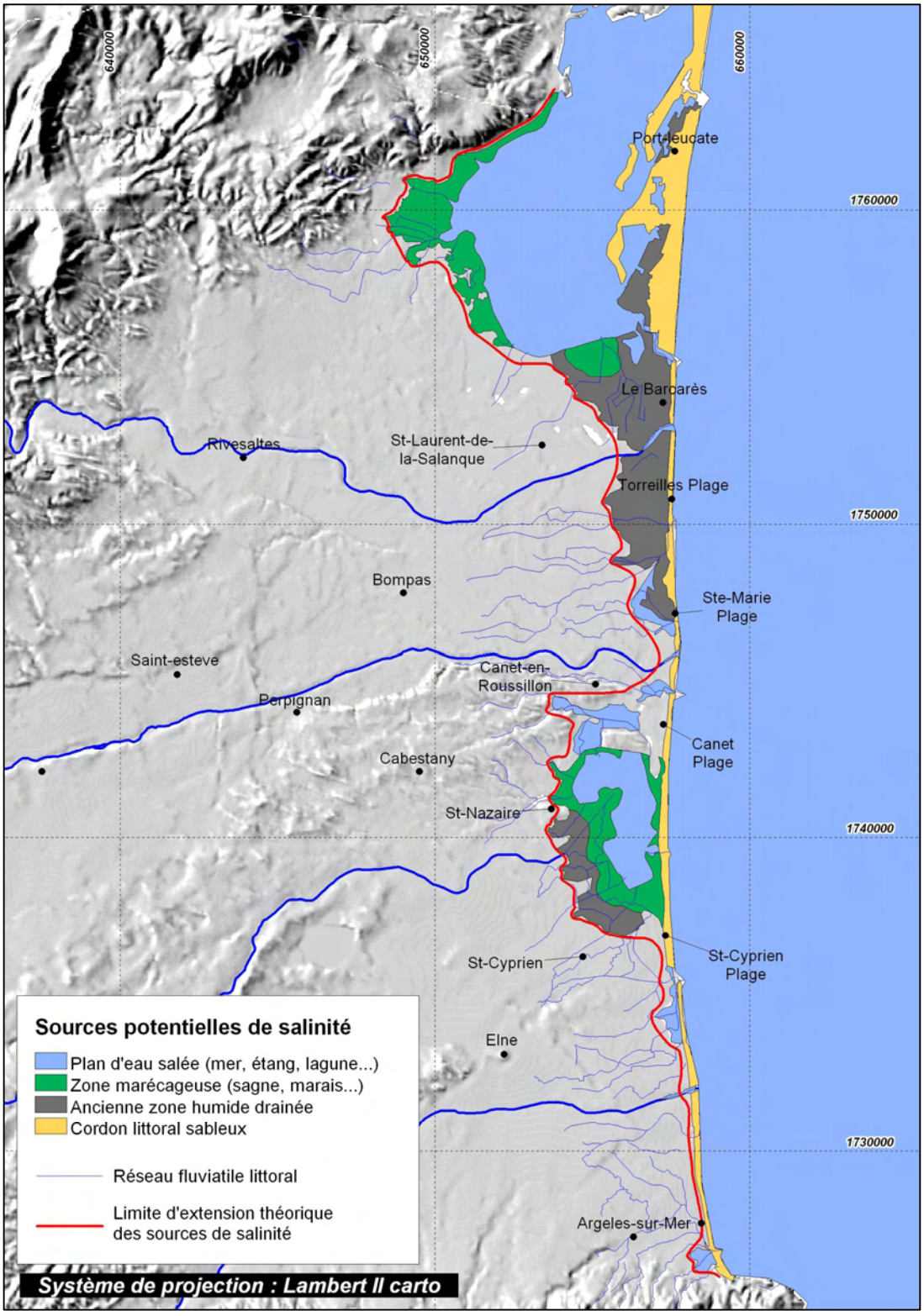
L'analyse corrélatoire simple qui traduit la dépendance dans le temps des évènements affectant la chronique, selon des intervalles de temps de plus en plus grand, permet de tester le caractère répétitif des séries temporelles et leurs éventuelles natures cycliques. Le degré de ressemblance d'une série avec la même série décalée dans le temps est déterminé à l'aide de la fonction d'auto-corrélation définie comme la valeur de la corrélation linéaire entre les valeurs des deux séries. Sur les chroniques de piézométrie par exemple, cette analyse permet de caractériser "l'effet mémoire" de l'aquifère qui traduit la dépendance dans le temps des valeurs piézométriques en présentant une décroissance plus ou moins rapide de la corrélation. En d'autre terme, "l'effet mémoire" est directement lié à l'inertie du système ; "l'effet mémoire" étant d'autant plus grand que le filtrage introduit par le système est important.

L'analyse spectrale simple (densité spectrale de puissance DSP) permet d'identifier les différentes composantes de la variance totale en fonction de la fréquence. En d'autres termes, la densité spectrale de puissance permet de renseigner (i) sur la tendance du système à long terme (plusieurs mois), (ii) sur les phénomènes périodiques et/ou saisonniers et (iii) sur les phénomènes purement aléatoires assimilables au bruit de fond. D'un point de vue mathématique, la densité spectrale de puissance est déterminée par la transformée de Fourrier du corrélogramme simple [Box & Jenkins, 1970].

L'analyse croisée (corrélatoire et spectrale) permet l'étude de la relation entrée-sortie et fournit une image approchée de la réponse impulsionnelle du système par le corrélogramme croisé.

L'intérêt des méthodes corrélatoires et spectrales est de mettre en évidence les phénomènes structurés influençant l'évolution temporelle des chroniques de piézométrie.

Annexe 13 - Cartographie des sources potentielles de salinité



Annexe 14 - Protocole d'échantillonnage en vue d'analyses chimiques

Préparation de la campagne de terrain et protocole d'échantillonnage

Avant la campagne de prélèvements, les flacons destinés à recevoir les échantillons d'eau doivent être parfaitement nettoyés ou neufs. Ils sont remplis d'eau distillée et placés dans des sacs individuels en plastique sur lesquels sont notés les renseignements utiles au repérage de l'échantillon (nom, numéro, date) ainsi que la conductivité électrique normalisée à 25°C. La conductivité est mesurée avec un conductivimètre étalonné. Pour les conductivités moyennes mesurées dans le Roussillon, une solution tampon à 1413 □S/cm a été utilisée.

Pendant la campagne et dans la mesure du possible, les échantillons ne doivent pas être exposés à la chaleur afin que la mesure du titre alcalimétrique complet (TAC) soit exacte lors des analyses chimiques. De plus, cette mesure doit être effectuée dans les trois jours qui suivent le prélèvement.

Avant prélèvement définitif, les flacons sont rincés trois fois avec l'eau qui est échantillonnée. Si le point échantillonné est équipé d'une pompe (AEP ou forage particulier), il est nécessaire de faire fonctionner la pompe plusieurs minutes afin de prélever une eau issue de l'aquifère. L'observation des installations de pompage permet de déterminer si l'eau prélevée est directement issue de l'aquifère ou si elle a séjourné dans des ballons de surpression, comme c'est souvent le cas dans les campings.

Dans le cas d'absence d'installation de pompage (piézomètre), une pompe portable est indispensable. Il est aussi nécessaire de pomper plusieurs dizaines de minutes afin que l'échantillon soit représentatif de l'aquifère.

Deux méthodes complémentaires permettent de déterminer si l'eau pompée est effectivement issue de l'aquifère : (i) attente de la stabilité des mesures en continu de conductivité électrique et température de l'eau extraite par pompage ; (ii) extraction d‘une fois au minimum du volume d'eau contenu dans le piézomètre (la coupe technique du piézomètre et le débit de la pompe doivent être connus).

Matériel de terrain

Les flacons (100 ml) préparés pour l'échantillonnage proviennent du laboratoire de la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier.

Le reste du matériel a été fourni par le BRGM : pompe portable thermique, GPS (repérage de chaque point échantillonné), clés permettant l'accès aux sites, divers outils (clés, pinces, récipients,…).

Annexe 15 - Résultats brutes des analyses chimiques

Les éléments majeurs (cations : Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+} ; Anions : HCO_3^{2-}, NO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}) ont été analysés au laboratoire de la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier par chromatographie ionique. L'alcalinité totale (TAC) a été mesurée par titration acide selon la méthode de "Gran". L'équipement d'analyse est constitué par une sonde "Dionex ICS 1000 Anions" et "Dionex ICS 1000 Cations". L'erreur relative à la mesure sur ces appareils est inférieure à 5% en moyenne.

Echantillons (éléments majeurs)	Cond.	pH	Bal. ion.	Erreur C-Calc	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{--}	Br	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+
	µs/cm		%	%	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
BA01	629	7.8	-0.67	0	157.4	93.61	9.28	33.48	0.35	77.37	7.83	33.40	1.28
BA02	406	7.8	-1.19	3	198.1	18.02	8.43	22.46	0.08	41.43	7.22	36.07	1.04
BA03	828	7.6	0.13	1	253.3	46.62	15.62	154.37	0.22	122.49	16.31	32.33	1.00
BA04	678	7.5	0.11	3	213.9	26.16	46.46	127.71	0.15	103.52	12.74	22.08	0.70
BA05	428	7.9	0.30	3	214.1	17.52	8.02	22.83	n.a.	49.20	8.95	32.16	1.08
BA06	648	7.7	0.16	3	193.6	35.44	47.15	100.9	0.12	93.93	10.10	25.60	0.89
BA07	656	7.5	0.14	1	220.6	21.13	21.65	118.35	0.09	105.50	11.88	16.41	0.80
BA08	52000	8.0	0.45	3	170.7	20801	18.1	2858.5	74.21	379.1	1197	10653	243
BA09	722	7.8	0.09	1	236.9	60.81	23.09	84.06	0.25	96.72	12.56	35.27	0.66
BA10	443	7.9	0.24	2	214.2	18.43	5.74	24.41	0.09	49.92	8.82	34.89	0.95
BA11	470	7.6	0.27	3	158.2	25.15	20.6	66.86	0.08	61.86	10.45	20.61	1.06
BA12	577	7.4	0.24	3	164.3	27.96	34.04	100.31	0.10	81.21	13.96	19.85	1.17
BA13	718	7.7	0.10	0	264.4	74.53	22.03	20.64	0.26	66.27	15.48	62.78	0.67
BA14	791	7.6	0.11	1	300.9	67.45	27.46	25.27	0.28	72.65	17.11	70.24	0.81
BA15	516	7.9	0.28	1	171.4	46.98	9.04	40.04	0.22	70.68	8.01	24.40	1.26
BA16	466	7.8	0.44	3	187.9	29.58	14.78	36.82	0.07	47.45	4.89	45.89	1.67
BA18	57000	8.1	0.49	-3	128	18922	18	2737.7	67.68	365.95	1326	11479	276
BA19	398	7.2	0.21	1	161	17.55	7.3	22.88	0.09	39.91	6.54	34.47	0.72
BA20	457	7.2	0.30	1	162.6	13.77	19.71	62.04	0.06	63.53	11.60	14.37	1.14
BA21	575	7.0	0.25	2	193.9	26.13	18.12	89.68	0.10	80.95	15.87	17.83	1.27
BA22	275	6.8	0.61	2	64.7	35.41	8.85	19.49	0.14	15.31	5.20	30.11	1.26
BA23	382	8.1	0.13	3	173.5	27.17	14.57	8.07	0.12	33.47	8.49	35.33	0.45
BA24	497	7.6	0.38	3	169	24.7	14.01	77.82	0.09	67.55	11.61	19.84	1.58
BA25	532	7.7	0.18	2	154.1	49.93	7.46	66.21	0.21	62.79	10.66	33.12	0.88
BA26	427	7.4	0.29	3	162.9	22.67	3.13	58.27	0.09	54.35	10.62	20.77	1.08
BA27	888	7.4	0.12	-6	296.6	68.08	23.14	39.64	0.27	56.07	20.53	77.39	0.88
BA28	498	7.7	0.22	2	148.5	27.14	20.04	79.89	0.09	62.76	10.62	25.01	0.92
BA29	675	7.6	0.15	-8	177.1	79.57	1.95	47.9	0.34	56.07	11.39	27.59	0.74
BA30	788	7.6	0.14	-7	249.4	79.88	4.68	16.34	0.31	45.45	16.48	74.26	0.88

Cond. *Conductivité électrique normalisée à 25°C.*

Bal. Ion. *Balance ionique*

Erreur C-Calc *Rapport entre la conductivité électrique mesurée sur le terrain et la conductivité calculée à partir des analyses chimiques*

Les éléments traces (Li, B, Br, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, U) ont été analysés au service commun "ICP-MS" du département recherche T3E de l'Université de Montpellier II. Ces analyses ont été effectuées par le spectromètre de masse quadripolaire à source plasma (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer) dénommé "Plasma Quad 2 Turbo+". L'erreur relative à la mesure sur chaque élément est variable suivant les éléments mais reste inférieur à 3%.

Echantillons (éléments traces)	Li	B	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	Pb	U
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
BA01	4.01	28.24	1.68	2.28	0.09	0.29	0.27	0.03	0.87	0.33	440.46	0.72	0.04	46.92	0.02	1.21
BA02	16.64	46.26	0.39	8.89	0.06	0.01	0.19	0.71	1.50	1.01	303.17	1.04	0.01	29.48	0.01	0.41
BA03	7.67	33.00	0.87	0.15	0.14	0.14	2.70	6.15	1.00	0.46	688.56	0.33	0.02	54.44	0.26	6.98
BA04	2.86	22.35	0.87	0.70	0.11	0.02	1.05	3.64	0.34	0.20	591.54	0.25	0.02	39.86	0.06	2.74
BA05	15.97	35.34	0.31	5.62	0.06	0.47	1.11	3.17	1.07	0.73	284.81	0.43	0.01	41.87	0.17	0.09
BA06	2.01	22.44	1.03	0.08	0.10	0.23	0.40	6.22	0.33	0.22	538.85	0.23	0.02	35.44	0.09	1.66
BA07	1.26	21.22	0.90	1.54	0.14	0.16	29.90	31.66	0.36	0.28	530.78	0.22	0.02	32.60	1.15	1.96
BA08	180.4	4235	0.06	7.35	2.24	9.26	17.60	7.48		108	7866	12.20	0.88	19.89	1.09	3.75
BA09	9.76	27.29	0.09	0.13	0.08	0.12	1.50	1.03	1.05	0.15	465.52	0.25	0.00	58.67	0.09	3.55
BA10	16.31	51.75	0.05	3.25	0.06	0.62	0.79	0.95	1.16	0.64	267.05	0.49	0.00	40.78	0.17	0.40
BA11	6.39	12.35	0.21	0.29	0.06	1.10	1.05	2.38	1.73	0.21	177.01	0.45	0.00	45.86	0.54	2.92
BA12	6.26	11.37	0.42	0.74	0.08	1.19	3.14	13.35	1.13	0.24	224.17	0.45	0.01	53.56	0.43	4.25
BA13	16.35	38.10	0.14	0.10	0.06	1.04	0.73	11.61	1.40	0.22	198.36	0.31	0.00	61.29	0.15	5.83
BA14	16.35	38.93	0.64	0.07	0.07	1.06	1.53	3.25	1.31	0.24	204.60	0.25	0.01	63.74	0.19	6.29
BA15	7.45	22.23	0.87	5.25	0.08	3.13	1.00	34.44	1.74	1.23	470.01	0.90	0.01	28.60	0.29	0.96
BA16	17.04	30.81	0.62	0.48	0.05	1.19	5.23	70.44	1.56	2.33	503.52	0.81	0.01	71.38	0.25	2.02
BA18	214.8	5027	0.15	1.70	2.29	9.05	19.41	4.23		132	9647	15.89	1.21	10.97	0.36	4.50
BA19	15.39	29.88	0.29	11.22	0.04	0.65	0.16	0.20	0.77	1.02	336	1.21	0.00	45.49	0.00	0.02
BA20	4.38	30.29	0.38	0.64	0.10	1.46	0.58	3.37	0.64	0.06	238.46	0.08	0.01	32.07	0.05	5.76
BA21	4.65	27.27	0.67	0.08	0.16	1.52	1.14	3.49	0.67	0.04	285.61	0.20	0.01	47.28	0.76	13.53
BA22	2.91	16.99	0.38	10.07	0.05	0.41	0.71	3.25	0.59	0.40	62.12	0.22	0.00	14.73	0.10	0.05
BA23	15.82	21.24	1.59	73.00	0.04	0.72	0.32	0.87	2.06	0.10	182.46	1.06	0.02	43.99	0.10	0.31
BA24	4.75	72.39	0.19	2.14	0.54	0.74	0.92	39.33	0.63	0.06	168.63	0.47	0.01	23.44	0.08	6.09
BA25	8.69	14.32	0.44	0.30	0.06	0.62	2.01	7.81	1.54	0.23	193.44	0.25	0.01	52.07	0.50	3.19
BA26	4.54	19.20	0.90	0.61	0.13	0.98	3.41	14.89	1.16	0.04	123.78	0.43	0.04	11.11	0.04	1.48
BA27	17.03	39.11	1.14	1.19	0.09	2.23	33.06	62.50	0.83	0.25	226.91	0.01	0.04	51.79	1.02	5.08
BA28	5.47	12.49	0.28	25.70	0.10	0.60	0.47	2.18	1.00	0.17	202.06	0.40	0.00	37.12	0.01	3.40
BA29	2.62	24.32	0.47	1.74	0.08	0.38	0.24	2.77	0.59	0.29	479.43	0.59	0.01	35.56	0.06	0.98
BA30	16.58	37.39	0.48	2.86	0.08	0.93	6.85	13.87	1.35	0.20	219.35	0.22	0.01	48.06	0.40	5.75

Annexe 16 - Méthodes des panneaux électriques

La méthode de prospection par panneaux électriques est une méthode géophysique dont le but est de décrire les variations de résistivité en profondeur et le long d'un profil. Les plus simples sont constitués par la juxtaposition de sondages électriques le long d'un profil ; les interprétations 1D sont extrapolées d'un sondage électrique à l'autre pour établir une coupe géoélectrique. Des méthodes spécifiques ont cependant été mises au point pour réduire les difficultés et les coûts de mise en œuvre. L'interprétation des résultats, qui est réellement une extrapolation 2D, fait également appel à des algorithmes spécifiques de calcul tenant compte, notamment, des variations d'altitude le long du profil.

Principes généraux des méthodes de prospection électriques

D'un point de vue pratique, les technologies utilisées par les méthodes électriques sont classiques (injection de courant électrique, mesure de tension et de courant), et leur interprétation relativement aisée ; mais leur mise en œuvre est lourde (longueur des dispositifs électriques à installer) et sensible à l'occupation des sols (couverture forestière en particulier) ; elles sont peu ou pas sensibles aux perturbations d'origine humaine.

Ce sont des méthodes de prospection géophysique où l'on injecte un courant I entre deux électrodes (ou pôles) A et B et où l'on mesure la tension V entre deux électrodes M et N. Un tel dispositif d'émission et de réception est qualifié de quadripôle. La résistivité apparente du sol ρ est définie comme celle d'un sol homogène et isotrope, qui avec le quadripôle utilisé, donnerait entre les électrodes M et N la différence de potentiel V.

$\rho = K . V / I$, où K (appelé coefficient géométrique) est fonction des distances entre les différentes électrodes A, B, M et N.

La théorie du potentiel montre que l'on peut inverser les rôles des électrodes d'émission et de réception.

Le but des méthodes électriques est d'établir un profil, une coupe (bidimensionnelle) ou un log (monodimensionnel) de résistivité apparente ou de polarisation provoquée. Ce résultat de mesure est ensuite interprété pour approcher la répartition des résistivités vraies dans le sol. La profondeur d'investigation augmente avec les dimensions du dispositif d'électrodes, mais diminue avec la résistivité des terrains. La résolution décroît avec la profondeur. Un terrain superficiel conducteur est généralement un inconvénient qui limite la profondeur d'investigation et la résolution ; il oblige à fortement augmenter la longueur de dispositif pour obtenir un résultat comparable à celui obtenu sur un terrain superficiel résistant.

Principes de la méthode "panneau électrique"

Ces méthodes utilisent des ensembles d'électrodes régulièrement espacées le long d'un profil rectiligne. Le dispositif de mesure se décompose en plusieurs sous-ensembles. On distinguera les parties immobiles du dispositif, utilisant les électrodes lointaines, des parties mobiles, utilisant les électrodes du profil. Dans les parties mobiles, on distinguera la partie émettrice de la partie réceptrice. Les grandeurs caractéristiques de ces méthodes sont le "spacing" D (terme anglais couramment traduit par espacement) qui correspond à la distance entre les électrodes du profil, et le rang, grandeur entière qui indique la distance (en nombre de "spacing" n) entre les parties émettrice et réceptrice du dispositif. La position de la mesure est celle du milieu du segment émetteur-récepteur. La profondeur d'investigation augmente avec le rang n.

La coupe géo-électrique de résistivité apparente, appelée pseudocoupe est établie en mesurant la tension pour toutes les combinaisons possibles d'émetteur et de récepteur. Les mesures effectuées avec un écartement entre émetteur-récepteur de 1'espacement ou "spacing" sont dites de rang 1, celles effectuées avec un écartement de 2 espacements sont de rang 2, etc. Les mesures sont présentées sous formes de coupe isovaleur dont l'axe des abscisses correspond à la position le long du profil, et l'axe des ordonnées correspond au rang (pseudo-profondeur).

L'interprétation de la pseudocoupe prend en compte l'ensemble des mesures et aboutit à une coupe, distribution continue des résistivités vraies le long du profil et en fonction de la profondeur. Cette interprétation est plus contraignante que celle des sondages électriques ; les méthodes de panneaux électriques sont donc moins sensibles au phénomène d'équivalence, et l'étalonnage sur sondage est moins essentiel.

Dispositif utilisé : le dipôle-dipôle

Cette méthode n'utilise pas d'électrode lointaine. La partie émettrice est constituée par deux électrodes, A et B, écartées de 1"espacement" ; ces deux électrodes constituent un dipôle, mobile, dont la position est définie par l'abscisse de son milieu. La partie réceptrice est également constituée par deux électrodes, M et N, écartées de 1'"espacement", formant un dipôle.

A "espacement" et rang égaux, la méthode dipôle-dipôle présente la plus faible profondeur d'investigation, mais le meilleur pouvoir de résolution, en comparaison avec d'autres dispositifs de mesure type pôle-pôle.

Traitement interprétatif

Toutes les pseudo-coupes sont interprétées par inversion simultanée de la résistivité apparente et de la polarisation provoquée avec le logiciel RES2DINV[1]. Ce logiciel est utilisé en configuration "éléments finis" et comporte des algorithmes de convergence très perfectionnés.

Le logiciel RES2DINV prend en compte la topographie des profils et permet de corriger les effets de relief (anomalies parasites dues aux variations de relief importantes). Le logiciel s'affranchit également de tous les artefacts "classiques", liés au dispositif dipôle-dipôle ("à-coups de prises" dus aux structures superficielles) et au mode de représentation des pseudo-coupes.

Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme de coupe-profondeur de résistivité.

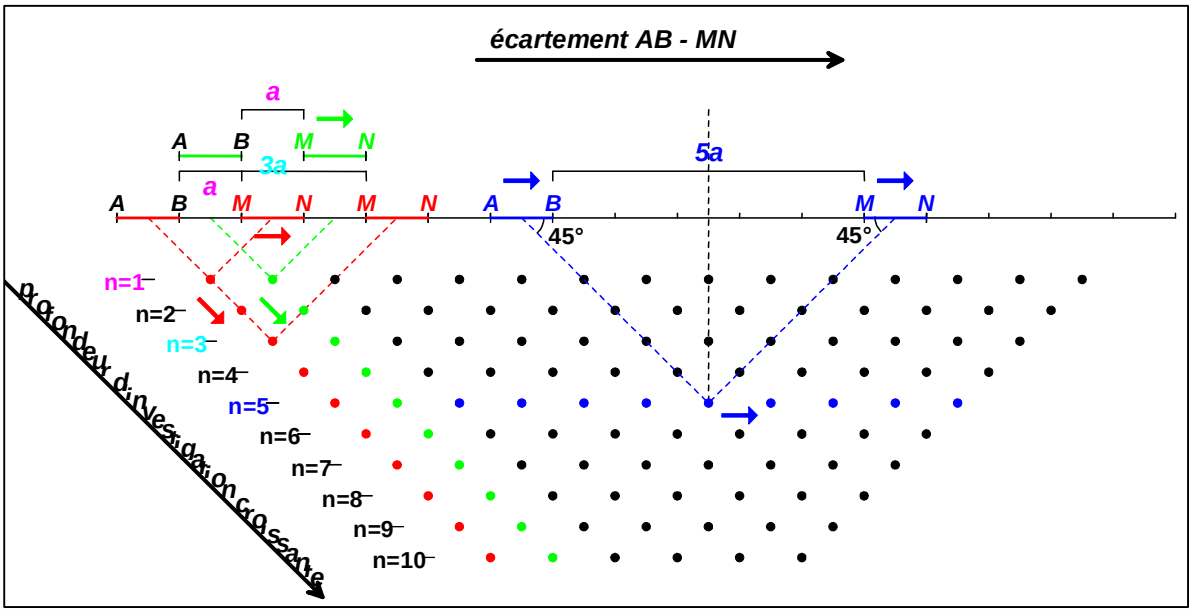
Cette interprétation par inversion fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : caractéristiques électriques (résistivité et chargeabilité vraies), géométrie et profondeur, pendage.

Même si la précision et la stabilité des inversions sont optimisées par des algorithmes de convergence très performants, en l'absence d'étalonnage (résistivité et chargeabilité mesurées sur échantillons, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres géométriques fournis par l'inversion des pseudo-coupes peuvent varier, en théorie, dans un écart compris entre 10 et 20%.

La phase interprétative est précédée d'une élimination des valeurs aberrantes via l'utilisation de plusieurs filtres de contrôle : intensité du signal ($\Delta V < 0{,}2$ mV), qualité des mesures déterminée par l'écart-type de différentes mesures ($q > 1$) et identification des problèmes de couplage interne ($p < 0$). De même, les "à-coups de prise" ont été éliminés avec le logiciel "X2ipi[2]".

[1] Geotomo Software5 (M. H. Loke), Cangkat Minden Lorong 6, Minden Heights,11700 Gelugor, Penang, Malaysia - http://www.geoelectrical.com/

[2] Henri ROBAIN (*IRD – R027 GEOVAST - 32, avenue Henri Varagnat - 93143 BONDY CEDEX France*) et Alexei BOBACHEV (*Moscow State University, Geological faculty, Geophysical department - 119899, MOSCOW, Leninskie Gory, Russie*)



Principe du dispositif dipôle-dipôle

Matériel utilisé et protocole d'acquisition

L'ensemble du matériel a été fourni par le Brgm et Iris Instruments :

- Résistivimètre Syscal Pro (Iris Instruments). Appareil à injection automatique comportant 10 voies de mesures.

- 6 bobines de 60 m de câbles (profils de 360 mètres de long) + 4 boitiers de liaison entre les câbles. Sur chaque câble, 12 électrodes peuvent être connectées.

- 72 électrodes + 72 fils de connexion aux câbles (strap).

- Repérage terrain des profils : GPS, boussole, bombe de peinture, cônes de chantier, …

- Logistique : véhicule 4×4, maillets, bidons (arrosage des électrodes), 2 talkies-walkies, décamètre.

Le protocole d'acquisition se déroule comme suit :

- détermination de "repères terrain" utilisés lors de l'orientation du profil ;

- chaque bobine de câbles est déroulée, les électrodes sont plantées et connectées au câble ;

- test du système, vérification de la prise de terre ; si cette dernière est trop résistante, c'est-à-dire supérieure à 1 KΩ, il est nécessaire d'arroser les électrodes avec de l'eau de mer ;

- démarrage de l'injection de courant et suivi de l'acquisition ;

- à la fin des mesures, le profil est décalé de la valeur du shift déterminée par la qualité souhaitée.

Lieu de développement économique et démographique intense, les zones littorales font l'objet de pressions importantes sur l'environnement et, en particulier, sur les ressources en eau. Bien que la gestion des eaux souterraines côtières bénéficie de nombreux résultats issus de la recherche scientifique, une des problématiques majeures reste la connaissance de la géométrie des aquifères.

Des interprétations géologiques de la genèse du bassin Plio-Quaternaire du Roussillon, issues de la stratigraphie séquentielle, sont confrontées, par l'intermédiaire d'une base données, à l'hydrogéologie de cet hydrosystème complexe localisé sur la partie littorale des Pyrénées-Orientales.

L'étude statistique des points de prélèvement (distribution des crépines, productivité des forages…), l'analyse fonctionnelle (traitement du signal des chroniques piézométriques), l'hydrochimie et la géophysique électrique ont été utilisées afin d'élaborer un modèle conceptuel hydrogéologique des écoulements à l'échelle du bassin et de son prolongement vers le domaine offshore.

La présence de la mer, de zones à salinité résiduelle et de cours d'eaux littoraux contribue à augmenter la salinité d'un aquifère libre supérieur (Quaternaire) sus-jacent aux différents aquifères captifs (Pliocène) exploités pour l'eau potable dans la zone littorale. La vulnérabilité face aux intrusions salines de cette ressource de bonne qualité, tant sur le point de vue quantitatif que qualitatif est appréhendée par modélisation. Dans le domaine offshore, le rôle protecteur des formations géologiques à faible et moyenne perméabilité est mis en évidence vis-à-vis de la préservation de la qualité de l'eau potable.

Importance of sequence stratigraphy knowledge for hydrogeological modeling accuracy applied to coastal water resources management

With the intense economic and demographic development, littoral zones have vital impact on the environment and, in particular, on the water resources. Although coastal groundwater management has many results from scientific research, one of the major problems which remains is the knowledge of the aquifers geometries.
Geological interpretations of the Roussillon Plio-Quaternary basin, stemming from sequential stratigraphy, are compared, through a database, with the hydrogeology of this complex hydrosystem located in the coastal areas of Pyrénées-Orientales (France).
Statistical study of the abstraction points (screen distribution, logs productivity...), functional analysis (piezometric time series analyses), hydrochemistry and electrical geophysics were used with the aim of building a hydrogeological conceptual model of the onshore / offshore basin scale flows.
Sea, residual salinity areas and coastal rivers contribute to the increase in salinity of a superficial Quaternary unconfined aquifer overlying several Pliocene confined aquifers used for drinking water supply of the coastal area. Vulnerability of this good water both in terms of quality and quantity and its intrusion by saline water has been modeled. On the offshore domain, protective function of low and middle permeability layers is highlighted with respect to the safeguarding the quality of drinking water.

DISCIPLINE : Hydrogéologie

MOTS-CLES
Hydrogéologie / Hydrogeology - Roussillon - Aquifère côtier / Coastal aquifer - Intrusion saline / Salt water intrusion – Simulation numérique / Groundwater modeling - Ecoulements densitaires / Density driven flow - Modélisation couplée - Traitement du signal / Time series analysis - Banque du Sous-sol / French underground database - Base de données / database - Gestion des ressources en eau / Groundwater management

INTITULE ET ADRESSE DE L'U.F.R. OU DU LABORATOIRE :

HydroSciences Montpellier - UMR 5569 - Maison des Sciences et de l'Eau - 300, avenue du Professeur Emile Jeanbrau - Université de Montpellier II - France

Brgm, Service Eau, Unité Ressources en eaux et milieux discontinus (RMD) - 1039, rue de Pinville - 34 000 Montpellier