



HAL
open science

Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés

Jacques Mudry

► **To cite this version:**

Jacques Mudry. Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Sciences de l'environnement. Université de Franche-Comté, 1987. Français. NNT: . tel-00654518

HAL Id: tel-00654518

<https://theses.hal.science/tel-00654518>

Submitted on 22 Dec 2011

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.

THÈSE

présentée à

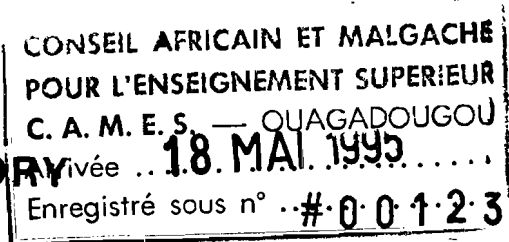
L'UFR des SCIENCES et TECHNIQUES
de FRANCHE COMTE-BESANCON

pour obtenir le

GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES NATURELLES

par

Jacques MUDRY



Apport du traçage physico-chimique naturel

à la connaissance hydrocinématique des

aquifères carbonatés



Soutenue le 5 Mai 1987, devant la Commission d'Examen:

- | | |
|--|--------------|
| P. CHA UVE, Professeur à l'Université de Franche Comté (Besançon) | } Président |
| B. BLA VOUX, Professeur à l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse | |
| P. BROQUET, Professeur à l'Université de Franche-Comté (Besançon) | } Examineurs |
| C. DROGUE, Professeur à l'U.S.T.L. (Montpellier II) | |
| L. KIRALY, Directeur de Recherche au FNRS (Neuchâtel - Suisse) | |
| R. LETOLLE, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) | |
| J. MANIA, Professeur à l'Université de Franche-Comté (Besançon) | |
| G. de MARSILY, Professeur à l'Ecole des Mines de Paris (Fontainebleau) | |

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ BESANÇON
Président : Monsieur le Professeur Jean-François ROBERT
Présidents honoraires : MM. THIEBAUT, LÉVÉQUE

U.F.R. DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DIRECTEUR

M. le Professeur Jean PARIZET
 Mathématiques

DIRECTEURS ADJOINTS :

M. le Professeur Alain CHAMBAUDET,
 Chimie

M. Jean-Paul KARCHE,
 Pétrographie-Minéralogie

DOYENS HONORAIRES

MM. GLANGEAUD, JACQUEMAIN, CHATELET, THIÉBAUT,
 BERNARD, GALATRY, BULABOIS.

PROFESSEURS ÉMÉRITES :

MM. CHALEAT, GREMILLARD.

PROFESSEURS HONORAIRES

MM. BENNETON, CHATELET, MESNAGE, PERROT,
 PLUVINAGE, QUANTIN, REAL, THIRY, TRILLAT,
 TRONCHET, UERBERSFELD

PROFESSEURS

MM. ALBIGNAC Roland	: Biologie anim. et Ecologie	LALLEMENT Gérard	: Mécanique appliquée
BANTEGNIE Robert	: Mathématiques	LAUDE Bernard	: Chimie organique
BENILAN Philippe	: Mathématiques	LESAINTE Pierre	: Mathématiques I
BERNARD Jean	: Chimie Physique	LHOTE François	: Automatique
BIDAULT Michel	: Taxonomie expérimentale	MANIA Jacky	: Géologie Structurale et appliquée
Mme BONAMY Jeanine	: Physique Moléculaire	MERIGOUX Henri	: Cristallographie et Synthèses minérales
Mme BRIDE Michèle	: Zoologie Embryologie	MIELLOU Jean-Claude	: Analyse numérique
MM. BROQUET Paul	: Géologie	MILLET Bernard	: Botanique
BRUCKERT Sylvain	: Ecologie végétale	MONTAGNER Hubert	: Psychophysiologie
BULABOIS Jean	: Physique Gle Optique	MOREELS Guy	: Astronomie
CAPODANNO Pierre	: Mécanique théorique	OLIVIER Marcel	: Electronique quantique
CERUTTI Ernest	: Chimie appliquée	OYTANA Claude	: Mécanique appliquée
CHAMBAUDET Alain	: Chimie	PAGETTI Claude	: Corrosion et traitements de surface
CHARDON Jean-Claude	: Spectroscopie	PARIZET Jean	: Mathématiques
CHAUVE Pierre	: Géologie minéralogie	POTIER Robert	: Physique des solides
COUGNARD Jean	: Mathématiques	RANGHEARD Yves	: Géologie
DEVIN Claude	: Chimie 1er cycle	REMY François	: Chimie des Eaux
DOBREMEZ Jean-François	: Biologie	ROBERT Daniel	: Physique
DUBOUCHET Jacques	: Physiologie végétale	ROBERT Guy	: Electrochimie
GALATRY Louis	: Physique moléculaire	ROBERT Jacques	: Mathématiques I
GAUDEMER Yves	: Biochimie	STRICKER Christophe	: Mathématiques II
GIRARDET Claude	: Physique moléculaire	THEOBALD Jean-Gérard	: Spectroscopie hertzienne
GOMOT Lucien	: Zoologie-Embryologie	THIEBAUT Jean	: Pétrogr. minéralogie
GOUARNE René	: Mathématiques	TREHEL Michel	: Informatique
GRAS Georges	: Mathématiques	VERNEAUX Jean	: Zoologie-Embryologie
HARDOUIN-DUPARC Jean	: Analyse Numérique et informatique	VIENOT Jean-Charles	: Physique Gle Optique
GUYARD André	: Physique moléculaire	VIGOUREUX Jean-Marie	: Physique
JOLICARD Georges	: Physique moléculaire	WEIL Michel	: Mathématiques
KARCHE Jean-Paul	: Pétrographie Minéralogie		
Mme LACROIX M.Th.	: Mathématiques		

Responsable des services administratifs : Mlle MOUREY Dominique

Professeurs des Instituts Universitaires de Technologie dont les activités de Recherche sont rattachées à l'UFR des Sciences et Techniques de Besançon

I.U.T. de Besançon

MM. GENTYL Claude	: Spécialité Chimie
VEBREL Joël	: Spécialité Chimie
SONZOGNO Robert	: Spécialité Génie Mécanique

I.U.T. de Belfort

ARQUES Didier	: Mathématiques
CLAD Raymond	: Spécialité électronique
KAUFFMANN Jean-Marie	: Spécialité Electrotechnique
HOSTACHE Gabriel	: Spécialité Thermodynamique
MANDRET Gérard	: Spécialité Electronique Physique
MIGNOT Jean	: Spécialité Résistance des Matériaux et Métallurgie
PRENEL Jean-Pierre	: Spécialité Physique-Electricité
STAMON Georges	: Spécialité Informatique
Mlle RIGO M-Odile	: Génie Thermique
RONDOT Daniel	: Spécialité Métallurgie Thermodynamique

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE MICROMÉCANIQUE ET MICROTECHNIQUE

DIRECTEUR INTERIMAIRE

M. le Professeur Vaterkowski

DIRECTEURS HONORAIRES

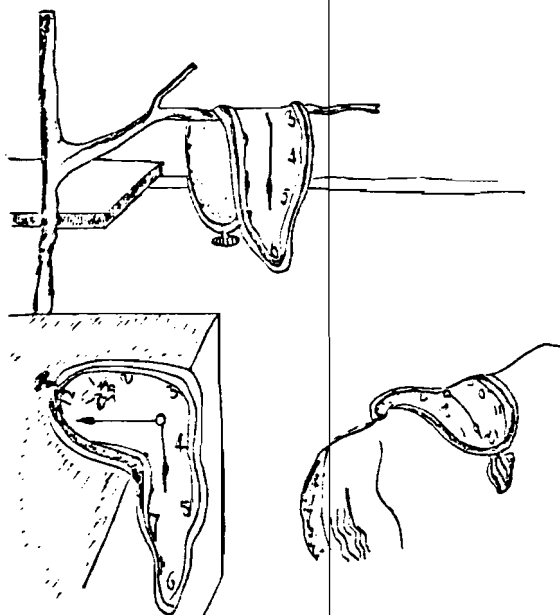
MM. MESNAGE, CHALÉAT

MM. ANDRE Pierre	: Informatique Industrielle	HAUDEN Daniel	: Microélectronique
AVRAMESCO André	: Mathématiques	Mme LOSCO Lucette	: Mécanique
BESSION Raymond	: Electronique	ROQUES-CARMES Claude	: Physico-Chimie des Matériaux
HAURAT Alain	: Automatique	VATERKOWSKI Jean-Louis	: Electronique

Responsable des services administratifs : Madame Jocelyne HAUTON

A mes parents

A Martine, Delphine et Vincent



d'après S. DALI

"Persistence de la mémoire"

1931



AVANT - PROPOS

Au terme de ce travail, il m'est agréable de citer et de remercier les très nombreuses personnes qui ont contribué à son bon déroulement.

Ma profonde gratitude s'adresse tout d'abord aux très occupés membres du jury qui ont accepté de consacrer un peu de leur temps à la lecture et au jugement de cette thèse. En particulier mes deux co-directeurs de thèse, P. CHAUVE et B. BLAVOUX, qui ont mis à ma disposition d'importants moyens techniques, m'ont toujours témoigné leur confiance et ont eu la tâche ingrate de corriger le manuscrit.

Contrairement au plan du texte, l'étude a démarré en 1977 au sein de la RCP Hydrogéologie du CNRS, par une collaboration inter-laboratoires sur la prospection hydrogéologique de la chaîne jurassienne, et je suis heureux de remercier à ce titre MM. P. CHAUVE (Laboratoire de Besançon), A. BURGER et L. KIRALY (Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel), B. BLAVOUX et R. LETOLLE (CRG Thonon et Laboratoire de Géologie dynamique de Paris VI).

Le lancement d'un laboratoire d'Hydrogéologie à Avignon en 1980 a requis la mobilité d'une partie des chercheurs, et a initié un volet "suivi" axé sur le premier système carbonaté français, la Fontaine de Vaucluse. Les études, soutenues par le GRECO Hydrogéologie du CNRS (directeurs P. CHAUVE puis G. de MARSILY) ont été facilitées par la collaboration efficace des laboratoires de Besançon (P. CHAUVE et J. MANIA), Thonon (P. OLIVE) et Moulis (A. MANGIN, M. BAKALOWICZ et D. d'HULST). Je remercie donc toutes les instances des universités et de la recherche scientifique qui ont contribué, par leur appui financier et technique, au bon déroulement de cette étude.

L'Hydrochimie requiert tout d'abord des prélèvements, et si l'échantillonnage des émergences du Sud-Est de la France a été effectué depuis Avignon, l'étude de sources dispersées n'a été rendue possible que grâce au concours de nos collègues de Moulis pour le Baget, de Thonon (MM. CHESSEL et OLIVIER) pour le Pont de Gys, de Besançon (MM. C. TRUCHE et M. ROUILLER) pour le Verneau; la simultanéité des prélèvements instantanés du Jura, effectués sur un grand secteur géographique, a été garantie par la collaboration de nombreux thésards bisontins (G. CHARLES, G. CLAUDON, M. DURAFFOURG, A. LEONETTI, P. PALACIO, G. TISSOT, P. TRESSE).

Les nombreuses analyses chimiques et isotopiques ont été en partie effectuées dans les laboratoires de Thonon (B. BLAVOUX, S. CHESSEL, O. NOIR et le regretté B. CHASSAING) et de Besançon (C. MIGNOT, C. TRUCHE et les thésards bisontins) pour les instantanés du Jura. Le laboratoire de Besançon a en outre assuré les analyses du Verneau (suivi hebdomadaire).

Une partie des analyses du suivi hebdomadaire de la Fontaine de Vaucluse a été faite à Avignon par J. BROUSSARD, M. DANIEL et C. MICHELOT.

La qualité des dosages chimiques et isotopiques a été un préambule à leur analyse statistique ultérieure, que tous ceux qui y ont contribué soient chaleureusement remerciés.

Le recueil des données hydrométéorologiques a été facilité par les personnes dépendant de la Météorologie Nationale : M. CRETIEN (Besançon), MM. CHASSIGNEUX et PORTES (Carpentras-Serres), du CNRS (Moulis), du CRG (Thonon), de l'INRA Station de Bioclimatologie, R. ANTONIOLETTI, B. SEGUIN, Madame SARROUY (Avignon-Montfavet), du BRGM : MM. M. CAILLOL, B. DELLERY, M. GRAVOST (Marseille-Luminy), H. PALOC (Montpellier), du SRAE de Franche Comté : MM. BADIN, DEMANGELLE, METTETAL et l'équipe d'Hydrométrie.

L'analyse des données n'a été possible que grâce à une chaîne de collaborations qu'il m'est agréable de remercier : le personnel du Centre Universitaire de Calcul, J. MANIA (Besançon), L. KIRALY et I. MUELLER (Neuchâtel), A. MANGIN et M. BAKALOWICZ (qui m'ont réservé à temps plein l'usage du calculateur de Moulis pendant 2 semaines), J.L. LARICE grâce à qui j'ai eu accès aux logiciels écrits par l'Ecole Supérieure de Chimie de Marseille. Sa grande compétence en informatique est la base de l'efficacité du Centre de Calcul d'Avignon. Certains programmes statistiques ont été écrits pour APPLE II en collaboration avec M. GHAMIZI.

Une partie de l'illustration du mémoire (la plus belle) est due à M. DANIEL qui a participé en outre à une foule de travaux indispensables à la bonne marche du laboratoire d'Avignon.

Le résumé en anglais a été relu et amélioré par A. ONUGBA.

La première frappe du texte est due à G. DANIEL, N. DOPIERALSKI, E. ADGE, N. BRENIAUX et C. COUVREUR qui, malgré la précarité de leur emploi (vacataire ou T.U.C.) ont travaillé très efficacement. La beauté du texte définitif, dont la correction a été très aisée, est due au savoir-faire d'O. BOQUESTAL et G. SALOMON qui n'ont pas perdu la main depuis mon départ de Besançon. J. PEGUENET a composé la couverture et assuré la reliure.

Je ne saurais manquer d'associer à ces remerciements l'ensemble des chercheurs bisontins et avignonnais qui ont contribué à une bonne ambiance dans les deux laboratoires. En particulier à Besançon P. BROQUET, qui est le maître d'oeuvre des enseignements de Géophysique et de Géologie appliquée, à Avignon, J.Y. BARBAUD, G. MALLESSARD et R. ABIVEN qui ont collaboré à la fiabilité du laboratoire d'analyses, y compris dans l'encadrement de mémoires de DEA au temps de la co-habitation Avignon-Montpellier, dont B. BLAVOUX et C. DROGUE sont ici les représentants. Je ne saurais omettre les fructueuses discussions tenues avec J.M. PUIG sur "Vaucluse" et l'ambiance créée au laboratoire et au sein de la filière de licence de "Gestion de l'Eau".

T A B L E D E S M A T I E R E S

C H A P I T R E I

	<u>Page</u>
<u>I. INTRODUCTION</u>	
I.1. KARST ET KARSTIFICATION	3
I.1.1. Structure du milieu	3
I.1.2. Fonctionnement hydraulique	6
I.1.3. La zone non saturée du karst	7
I.1.4. Comportement hydrodynamique et physico-chimique	9
I.2. PRESENTATION DE L'ETUDE	10

P R E M I E R E P A R T I E

SUIVI DIACHRONIQUE DE LA PHYSICO-CHIMIE DE L'EAU DES EMERGENCES KARSTIQUES :
UN PUISSANT MOYEN DE RECONSTITUTION DES TRANSITS AU TRAVERS DES SYSTEMES. 11

C H A P I T R E II

METHODES D'ETUDE ET SYSTEMES ETUDIES

II.1. LES PRELEVEMENTS	17
II.2. METHODOLOGIE ANALYTIQUE	19
II.3. LE SYSTEME DU VERNEAU (DOUBS)	19
II.3.1. Géologie	19
II.3.2. Climat de la région	21
II.3.3. Hydrogéologie	21
II.4. LES SYSTEMES DU MASSIF DU NIFFLON (HAUTE-SAVOIE)	23
II.4.1. Géologie	23
II.4.2. Climat de la région	24
II.4.3. Hydrogéologie	24
II.5. LE SYSTEME DU BAGET (ARIEGE)	25
II.6. LES SYSTEMES DE POUSSAROU ET DE MALIBERT (HERAULT)	26
II.7. LE SYSTEME DE VAUCLUSE	26
II.7.1. Présentation géographique	27
II.7.2. Géologie	27

II.7.3. Hydrogéologie	31
II.7.4. Eléments du bilan	34

C H A P I T R E III

ANALYSES AU PAS DE TEMPS HEBDOMADAIRE

III.1. COURBES DE VARIATION	39
III.1.1. Source du Verneau	39
III.1.2. Source du Pont de Gys	43
III.1.3. Emergence pérenne de Las Hountas (Baget)	49
III.1.4. Fontaine de Vaucluse	54
III.2. UTILISATION DE LA METHODE DE LA DISTRIBUTION DES FREQUEN- CES DES CONDUCTIVITES POUR LA COMPARAISON DES EMERGENCES ETUDIEES	60
III.2.1. Comparaison des émergences	61
III.2.2. Limites de la méthode dans le cas d'un mélange entre deux systèmes dont l'un est très marqué	61
III.2.3. Importance de la période d'étude	61
III.2.4. Conclusion	62
III.3. ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES AU PAS DE TEMPS HEBDOMADAIRE	62
III.3.1. Source du Verneau	63
III.3.2. Source du Pont de Gys	68
III.3.3. Emergence pérenne de las Hountas (Baget)	74
III.3.4. Sources de Poussarou et Malibert (Montagne Noire - Hérault)	77
III.3.5. Fontaine de Vaucluse	81
III.4. INTERET DES SUIVIS AU PAS DE TEMPS HEBDOMADAIRE	85

C H A P I T R E IV

ANALYSES AU PAS DE TEMPS QUOTIDIEN

IV.1. COURBES DE VARIATION QUOTIDIENNE DE TROIS SOURCES DU BASSIN DE LA FONTAINE DE VAUCLUSE	89
IV.1.1. Etude des variations en décrue et tarissement	89
IV.1.2. Etude des variations en crue d'été et en basses eaux d'automne	91
IV.1.3. Etude des variations en crue d'hiver	92
IV.2. ADAPTATION DE LA METHODE DE LA DISTRIBUTION DES FREQUENCES DES CONDUCTIVITES AU PAS QUOTIDIEN	97
IV.3. ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES AU PAS DE TEMPS QUOTI- DIEN	99

	<u>Page</u>
IV.3.1. Trois systèmes du Vaucluse (1981)	99
IV.3.2. Fontaine de Vaucluse (1981)	101
IV.3.3. Détail des différents épisodes	103
IV.4. ANALYSE DISCRIMINANTE	106
IV.4.1. But	106
IV.4.2. Résultats	107
IV.5. INTERET DES SUIVIS AU PAS DE TEMPS QUOTIDIEN	115

C H A P I T R E V

APPORT DES SUIVIS A LA CONNAISSANCE HYDROCINEMATIQUE
DES SYSTEMES

V.1. APPORT METHODOLOGIQUE	119
V.2. APPORT A L'HYDROCINEMATIQUE	120

D E U X I E M E P A R T I E

SEPARATION DES COMPOSANTES DE L'ECOULEMENT D'UN EXUTOIRE KARSTIQUE A L'AIDE DES METHODES PHYSICO-CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES	123
--	-----

C H A P I T R E VI

PRINCIPE DE LA DECOMPOSITION CHIMIQUE DE L'HYDROGRAMME DE
C R U E

VI.1. METHODES UTILISEES EN HYDROLOGIE DE SURFACE	127
VI.1.1. Principes	127
VI.1.2. Résultats	130
VI.2. TRANSPOSITION AU SYSTEME KARSTIQUE	133
VI.2.1. Modèle de fonctionnement hydrodynamique du karst par analogie avec un bassin versant	133
VI.2.2. Décomposition chimique de l'hydrogramme de crue d'un exutoire karstique	134
VI.3. ESTIMATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA MATRICE	135
VI.3.1. Reproductibilité inter-annuelle des compositions chimiques en étiage des sources du Jura	135
VI.3.2. Comportement chimiques de la Fontaine de Vaucluse au cours de l'étiage 1981	136

VI.4. ESTIMATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU RUISSELEMENT SOUTERRAIN	136
VI.4.1. Variabilité chimique de l'exutoire au cours du cycle hydrologique	136
VI.4.2. Les diagrammes flux chimique - débit	139
VI.4.3. Estimation de la teneur en chlorures des eaux d'infiltration	140

C H A P I T R E VII

APPLICATION A L'ESTIMATION DES COMPOSANTES DE
L'HYDROGRAMME DE CRUE D'UNE SOURCE KARSTIQUE

VII.1. MARQUEURS PHYSICO-CHIMIQUES	145
VII.1.1. Verneau	145
VII.1.2. Areuse	145
VII.1.3. Pont de Gys	147
VII.1.4. Plagnes et Pont de Gys	149
VII.1.5. Grotte de Sainte-Catherine	151
VII.2. ESSAI AVEC LES ISOTOPES DE L'ENVIRONNEMENT	153
VII.2.1. Lison	153
VII.2.2. Baget	155
VII.2.3. Areuse	157
VII.2.4. Intérêt et limites de l'emploi des isotopes	157

C H A P I T R E VIII

DECOMPOSITION DES HYDROGRAMMES AU COURS D'UN (OU DE PLUSIEURS)
CYCLES HYDROLOGIQUES

VIII.1. FONTAINE DE VAUCLUSE	161
VIII.2. PONT DE GYS	163
VIII.3. AREUSE	164

C H A P I T R E IX

COMPARAISON DES RESULTATS DES DECOMPOSITIONS HYDRODYNAMIQUES
ET PHYSICO - CHIMIQUES

IX.1. DECOMPOSITIONS HYDRODYNAMIQUES	167
IX.2. COMPARAISON DES METHODES	173

C H A P I T R E X

LIMITES, PERSPECTIVES ET INTERET DE LA
METHODE PHYSICO - CHIMIQUE

X.1.	LIMITES DE LA METHODE	177
	X.1.1. Cas d'une réserve ou d'une infiltration hétérogène	177
	X.1.2. Choix des marqueurs	178
	X.1.3. Choix du pas de temps	179
	X.1.4. Méthode approximative ne prenant en compte que deux composantes	179
	X.1.5. Méthode pas totalement indépendante des hypothèses hydro- dynamiques	179
X.2.	INTERET ET PERSPECTIVES DE LA METHODE PHYSICO-CHIMIQUE ...	179

T R O I S I E M E P A R T I E

PROSPECTION	HYDROGEOLOGIQUE DES PROVINCES KARSTIQUES PAR LES INS- TANTANES PHYSICO-CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES	183
-------------	--	-----

C H A P I T R E XI

I N T R O D U C T I O N 185

C H A P I T R E XII

PROSPECTION DES KARSTS DE LA CHAINE JURASSIENNE

XII.1.	PRESENTATION GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU JURA	189
	XII.1.1. Géologie	189
	XII.1.2. Connaissances hydrogéologiques sur les aquifères kars- tiques	189
XII.2.	CRITERES D'UN CHOIX METHODOLOGIQUE	191
	XII.2.1. Choix des émergences	191
	XII.2.2. Choix des périodes de prélèvements	193
	XII.2.3. Choix des éléments à analyser	193
XII.3.	GRADIENTS ALTIMETRIQUES ET LOCALISATION DES AIRES DE RECHARGE	195
	XII.3.1. Température de l'air	195

	<u>Page</u>
XII.3.2. Température de l'eau des émergences	197
XII.3.3. Teneur en oxygène 18 de l'eau des émergences	207
XII.4. TENEURS EN TRITIUM	221
XII.4.1. Introduction	221
XII.4.2. Signification hydrogéologique des teneurs	224
XII.4.3. Interprétation des résultats de la campagne d'étiage	224
XII.4.4. Variation de la teneur en tritium entre crue et étiages ..	227
XII.4.5. Représentativité des campagnes et des émergences	229
XII.4.6. Evolution des teneurs d'étiage en tritium	230
XII.4.7. Classification des aquifères karstiques	234
XII.4.8. Conclusion	237
XII.5. EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES	237
XII.5.1. Les diagrammes de Tillmans	237
XII.5.2. Le Δ pH	241
XII.5.3. La pression partielle de CO ₂	241
XII.6. AGRESSIVITE DES EAUX VIS-A-VIS DE LA PHASE SILICATEE	243
XII.7. TRACEURS DE L'ACTIVITE ANTHROPIQUE	245
XII.7.1. Reproductibilité intercampagnes des phénomènes	245
XII.7.2. Interprétation des résultats de la campagne d'étiage 1978.	247
XII.7.3. Définition d'un indice de contamination	251
XII.7.4. Interprétation des résultats des différentes campagnes ...	253
XII.7.5. Conclusion	255
XII.8. ANALYSES MULTIDIMENSIONNELLES	256
XII.8.1. Introduction	256
XII.8.2. Analyse en composantes principales	257
XII.8.3. Classification ascendante hiérarchique de la campagne d'étiage	258
XII.8.4. Evolution des émergences d'une campagne à l'autre	263
XII.8.5. Conclusion	268
XII.9. RESTRICTION GEOGRAPHIQUE DES CAMPAGNES	269
XII.9.1. Le Haut Doubs	269
XII.9.2. Le plateau de Vesoul	273
XII.9.3. Conclusions	278

C H A P I T R E XIII

PROSPECTION DES KARSTS DU SUD-EST DE LA FRANCE

XIII.1. INTRODUCTION	281
XIII.2. GEOLOGIE DE LA REGION	281

	<u>Page</u>
XIII.3. GRADIENTS CLIMATIQUES	281
XIII.3.1. Température de l'eau	283
XIII.3.2. Teneur en chlorures	283
XIII.3.3. Conclusions	285
XIII.4. TRACEURS LITHOLOGIQUES	287
XIII.4.1. Teneur en sulfates et affleurements triasiques	287
XIII.4.2. Teneur en magnésium et affleurements dolomitiques	289
XIII.4.3. Conclusions	289
XIII.5. pCO ₂ ET SATURATION	289
XIII.5.1. pCO ₂	289
XIII.5.2. Saturation ..	291
XIII.6. TENEURS EN TRITIUM	291
XIII.7. SYNTHÈSE DES DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES AU MOYEN DE L'ACP	293
XIII.7.1. ACP globale	293
XIII.7.2. ACP sans les sources très marquées	293
XIII.7.3. ACP globale avec tritium	293
XIII.7.4. ACP avec tritium sans les sources très marquées	295
XIII.7.5. Conclusion	296
XIII.8. INSTANTANES DE JUIN ET SEPTEMBRE 1981	297

C H A P I T R E X I V

C O N C L U S I O N : I N T E R E T D E S C A M P A G N E S
D ' I N S T A N T A N E S

XIV.1. SECTEUR PROSPECTE	301
XIV.2. PERIODE D'ETUDE ...	301
XIV.3. OBJECTIF DES INSTANTANES	301
XIV.4. RESULTATS OBTENUS DANS LE JURA ET LE SUD-EST DE LA FRANCE	302

C H A P I T R E X V

C O N C L U S I O N S G E N E R A L E S

XV.1. METHODOLOGIE	307
XV.2. RESULTATS	308

	<u>Page</u>
. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	313
. ANNEXE 1 : ANALYSES CHIMIQUES	325
. ANNEXE 2 : FICHIERS DE DONNEES (SUIVIS)	331
. ANNEXE 3 : COEFFICIENT DE CORRELATION DE RANG DE SPEARMAN ...	343
. ANNEXE 4 : ANALYSE DISCRIMINANTE	345
. ANNEXE 5 : CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE	351
. ANNEXE 6 : FICHIERS DE DONNEES (INSTANTANES)	353
. LISTE DES FIGURES	367
. LISTE DES TABLEAUX	375
. R E S U M E	379
. A B S T R A C T	Couverture .

I N T R O D U C T I O N

I N T R O D U C T I O N

I.1. KARST ET KARSTIFICATION

Le karst est l'ensemble des formes superficielles et souterraines engendrées par la dissolution de certaines roches, et en particulier des roches carbonatées. Cette définition morphologique du karst requiert à la fois des conditions thermodynamiques et hydrodynamiques. La dissolution de séries carbonatées par les eaux agressives nécessite des pourvoyeurs de gaz carbonique, - l'atmosphère et le sol principalement -, et des conditions de pression et de température permettant la mise en oeuvre des réactions.

Les conditions hydrodynamiques d'un drainage karstique sont d'une part l'existence d'une énergie potentielle, donc d'un gradient entre une zone "amont" ou impluvium et une zone "aval" ou exutoire, d'autre part, si ce drainage est souterrain, la préexistence de discontinuités assurant le départ du drainage. Le gradient est fourni par la dénivelée morphologique, liée à la tectogénèse et à l'orogénèse régionale, qui portent l'impluvium à une altitude supérieure au niveau de base. Les discontinuités sont aussi bien des interfaces sédimentaires (la tectonique pouvant leur donner un pendage favorisant l'enfoncement de l'eau dans le massif) que le résultat de la tectonisation : la fracturation (observable de l'échelle centimétrique à l'échelle pluri-kilométrique), les jeux banc sur banc (améliorant les discontinuités stratigraphiques originelles).

De plus, il faut que le massif soit capable d'éliminer ses insolubles et ses précipitations secondaires, afin d'éviter un colmatage.

La karstification est un processus thermodynamique et hydrocinématique qui transforme les milieux carbonatés hétérogènes et anisotropes en milieux hiérarchisés, c'est-à-dire qui organise la coalescence des écoulements souterrains à la manière d'un réseau hydrographique tridimensionnel.

I.1.1. Structure du milieu

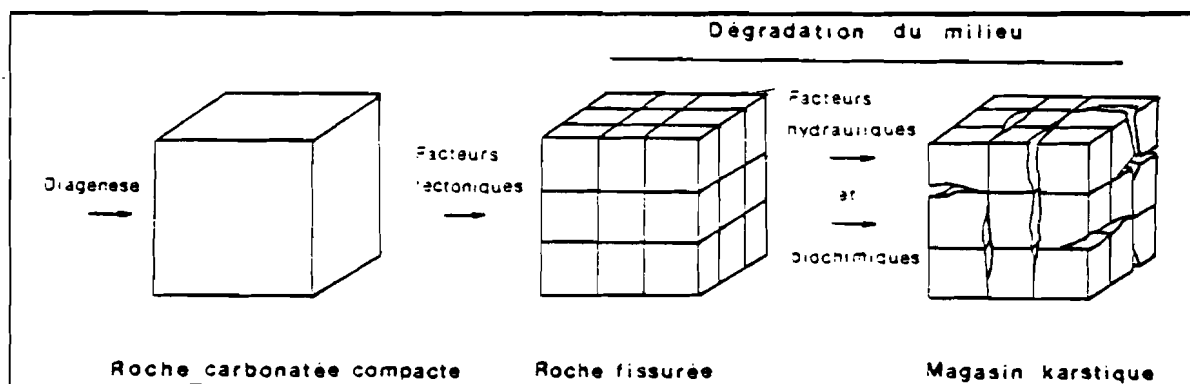
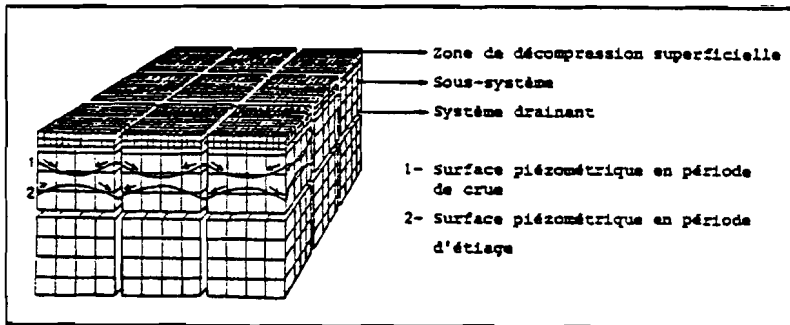


Fig. 1 : GENESE D'UN MAGASIN CARBONATE, FISSURE ET KARSTIFIE (DROGUE 1980)

La karstification est donc un processus destructif (fig. 1, DROGUE, 1980), qui accroît la perméabilité globale du massif. Comme la karstification n'affecte

que certaines discontinuités pré-existantes, le processus épargne certaines zones, ce qui entraîne au sein du massif la coexistence de zones très perméables (les drains) et de zones à perméabilité réduite (les blocs).

L'eau souterraine circule dans des joints d'écartement varié ; leurs caractères géométriques et par conséquent leur perméabilité, sont distribués de façon continue. On peut admettre que la répartition de l'ouverture des fissures obéit à une loi log-normale, les joints les plus ouverts étant les moins fréquents (SNOW, 1970 ; TRIPET, 1972). Les zones perméables des karsts peuvent être schématisées par une "arborescence" (KIRALY, 1969) dont la "racine" est l'exutoire, dont les "feuilles" sont les petits chenaux situés à l'amont du massif, ce schéma ressemblant aux représentations de l'hydrologie de surface (SCHEIDEGGER, 1968). Plus ce réseau de drainage est ramifié, meilleur est son pouvoir drainant (TRIPET, 1972).



◀ Fig. 2 : STRUCTURE D'UN MAGASIN KARSTIQUE (DROGUE 1971)

Vu sous l'angle d'un aquifère, on peut représenter le karst par 3 zones de perméabilités différentes (DROGUE, 1971 ; voir fig. 2) : la zone de décompression superficielle, perméable sur toute sa surface horizontale, les systèmes drainants de dimensions réduites à faible capacité et à bonne perméabilité, qui délimitent des ensembles capacitifs, peu perméables, de dimensions hectométriques (blocs).

La perméabilité régionale d'un tel aquifère est donc soumise à un effet d'échelle. Dans le Jura neuchâtelois, la distribution des perméabilités montre un accroissement du paramètre lorsque la taille du volume étudié augmente (fig. 3 d'après KIRALY, 1975) : échantillons et forages ont peu de chances de recouper

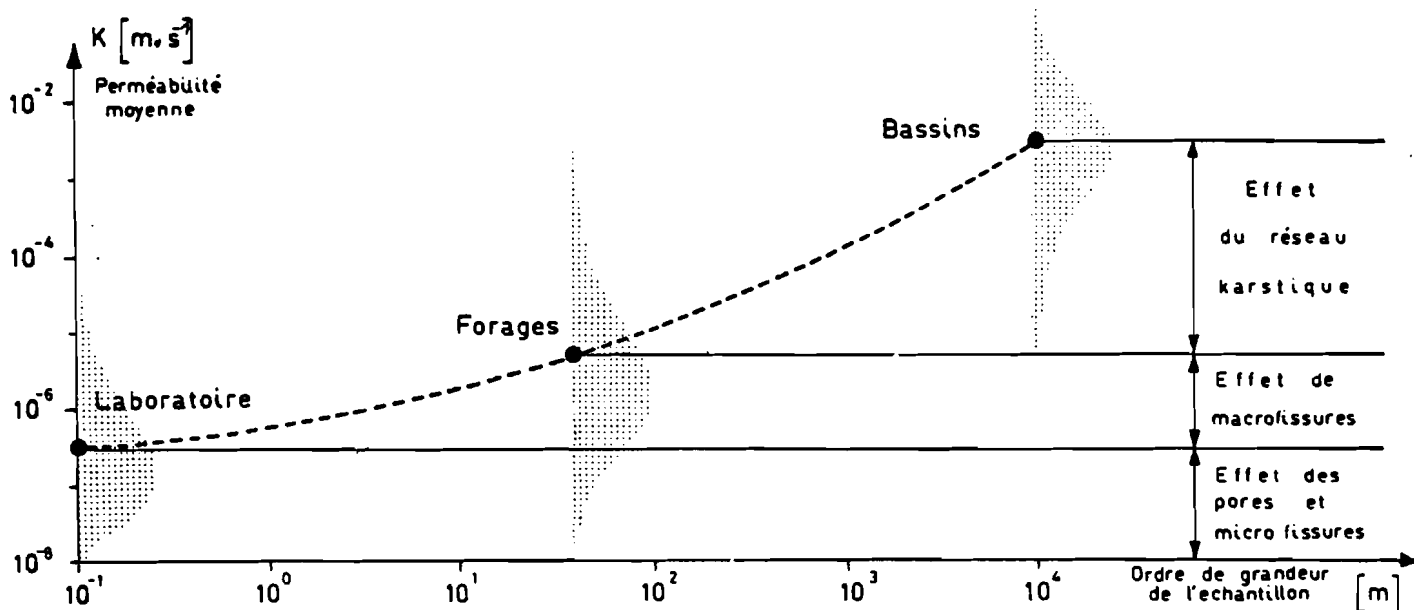


Fig. 3.: EFFET D'ECHELLE SUR LA PERMEABILITE DANS LE KARST (KIRALY 1975)

des drains très perméables, mais à fréquence faible. Les figures 4 et 5 donnent la gamme de perméabilités théoriques obtenues pour divers diamètres de chenaux (d) à différents espacements (x), et pour diverses ouvertures de fissures (D) à différents espacements (X), (d'après KIRALY, 1973,1978). La zone en grisé montre la gamme de perméabilités réellement rencontrée. Ces abaques permettent de présenter le degré de connexité des fractures.

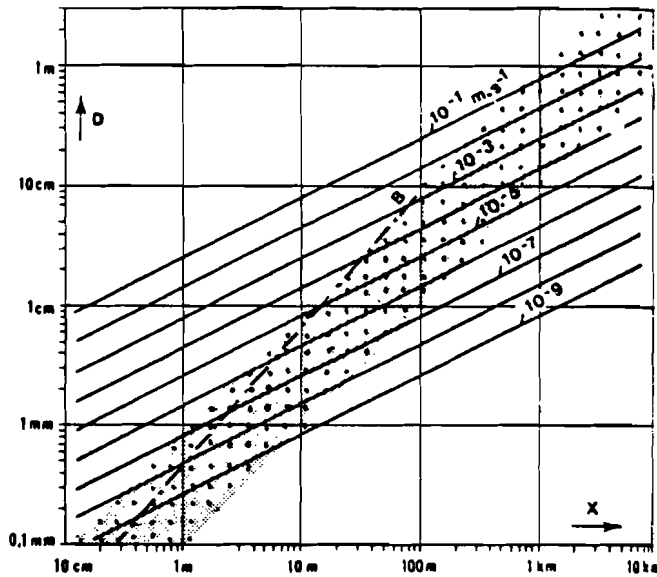


Fig. 4 : EFFET D'ECHELLE SUR LA PERMEABILITE POUR LES RESEAUX DE CHENAUX (KIRALY 1973)

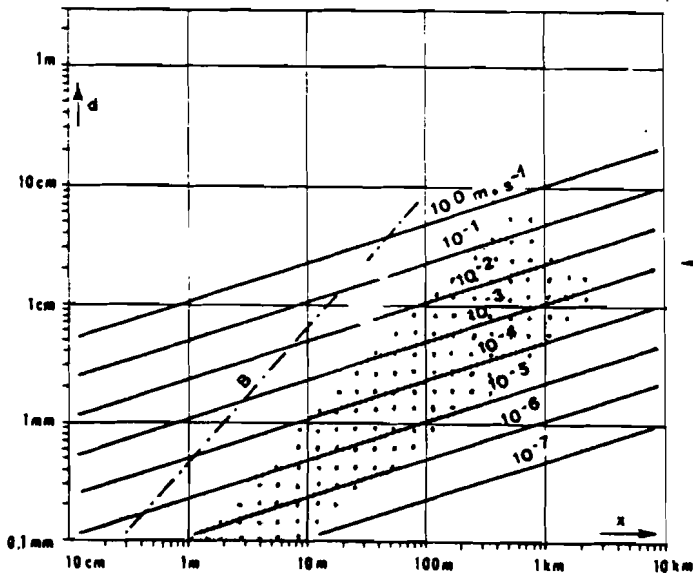


Fig.5 : EFFET D'ECHELLE SUR LA PERMEABILITE POUR LES RESEAUX DE FISSURES (KIRALY 1973)

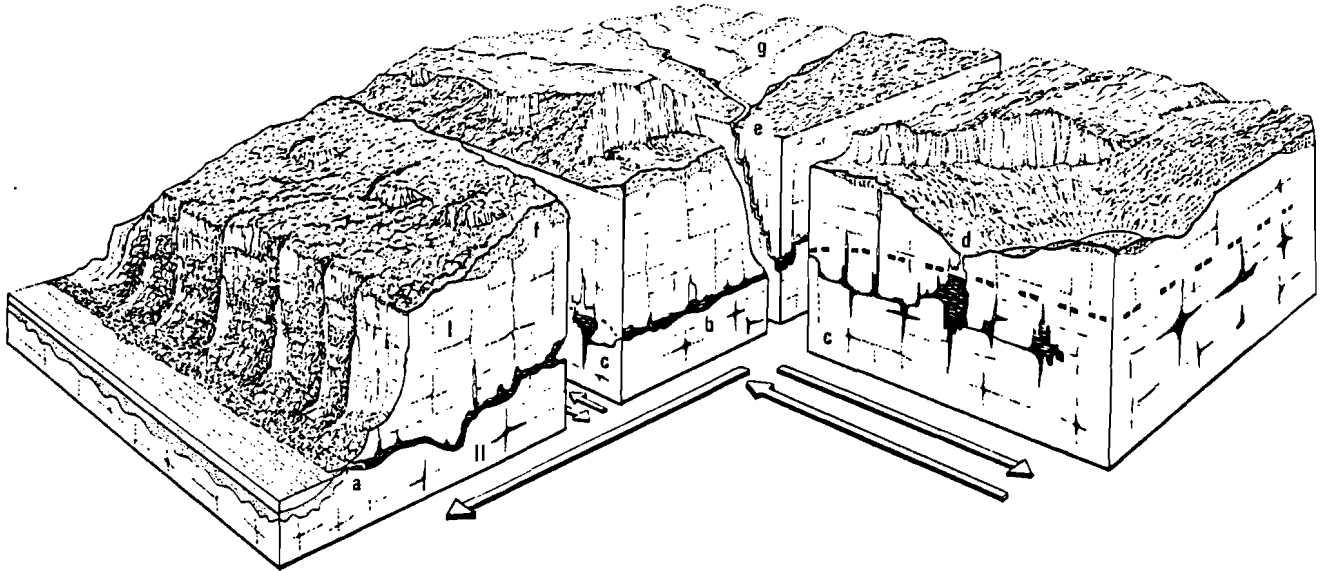
I.1.2. Fonctionnement hydraulique

Le karst peut également être considéré comme un système, c'est-à-dire une structure capable de transférer une information de son entrée à sa sortie, de passer du hétérogramme à l'hydrogramme par l'intermédiaire de la fonction de transfert.

Le système karstique est représenté par l'ensemble au niveau duquel les écoulements souterrains de type karstique s'organisent pour constituer une unité de drainage (MANGIN, 1975).

Le système karstique répond également à la définition de l'Unité Hydrogéologique (KIRALY, 1978), "classe d'équivalence spatialement connexe dans le champ des variables caractérisant la qualité, la quantité ou le mouvement de l'eau souterraine".

Il comprend dans les cas classiques (fig. 6) une zone d'infiltration incomplètement ou temporairement saturée, où prédominent les écoulements diphasiques, surmontant le karst noyé.

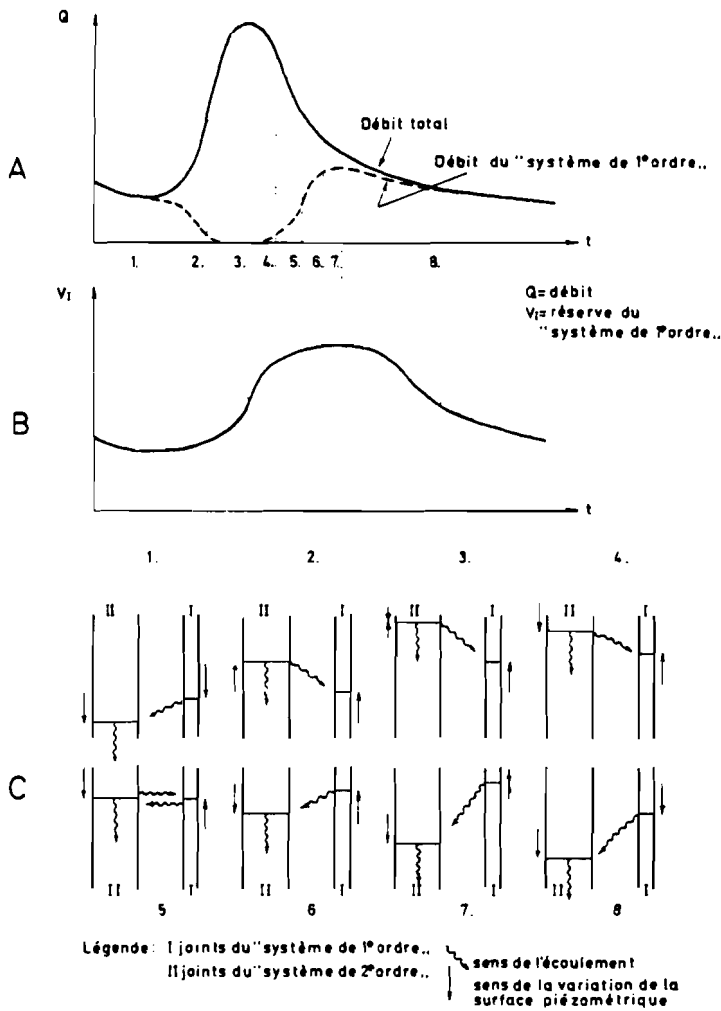


I : zone d'infiltration.
II : karst noyé. a : exutoire principal du système, b : drain ; c : systèmes annexes ; d : exutoire de trop-plein ; e : ponor ; f : aquifère épikarstique ; g : terrains non karstiques appartenant au système. Les flèches indiquent le sens des circulations au niveau du karst noyé

Fig. 6 : SCHEMA D'UN SYSTEME KARSTIQUE - (PARTIE PROCHE DE L'EXUTOIRE) (dessin de R.ROUCH in MANGIN 1975)

Dans le karst noyé, l'hétérogénéité de la perméabilité peut être schématisée par l'existence de 2 types de joints appelés "systèmes de 1er ordre" (joints à faible perméabilité) et "système de 2ème ordre" (drains).

Les relations piézométriques entre les deux familles permettent d'avancer une explication du fonctionnement hydrodynamique de l'émergence au cours des crues (fig. 7, d'après TRIPET, 1972). Cet auteur rapproche le fonctionnement du karst avec le régime d'un écoulement superficiel : le système de 2ème ordre est équivalent au réseau de drainage, celui de 1er ordre étant équivalent à une nappe en terrain à porosité d'interstices.

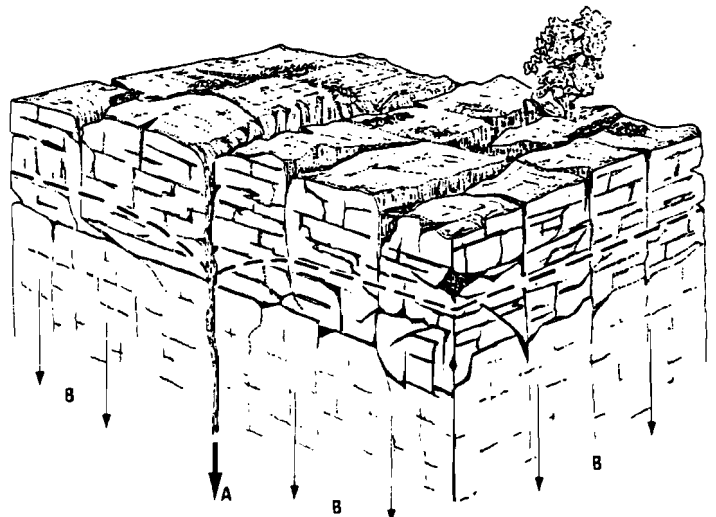


◀ Fig.7 : SCHEMA THEORIQUE DU REGIME DE L'ÉCOULEMENT SOUTERRAIN (TRIPET 1972)

I.1.3. La zone non saturée du karst

Une tranche de calcaire appelée zone non saturée ou zone d'infiltration assure le transfert des informations de la surface vers la zone noyée du système. Comme la zone noyée, ce milieu comprend des drains élargis par la dissolution assurant l'infiltration rapide et des blocs finement fissurés assurant l'infiltration retardée ou effluence (fig. 8, MANGIN, 1975).

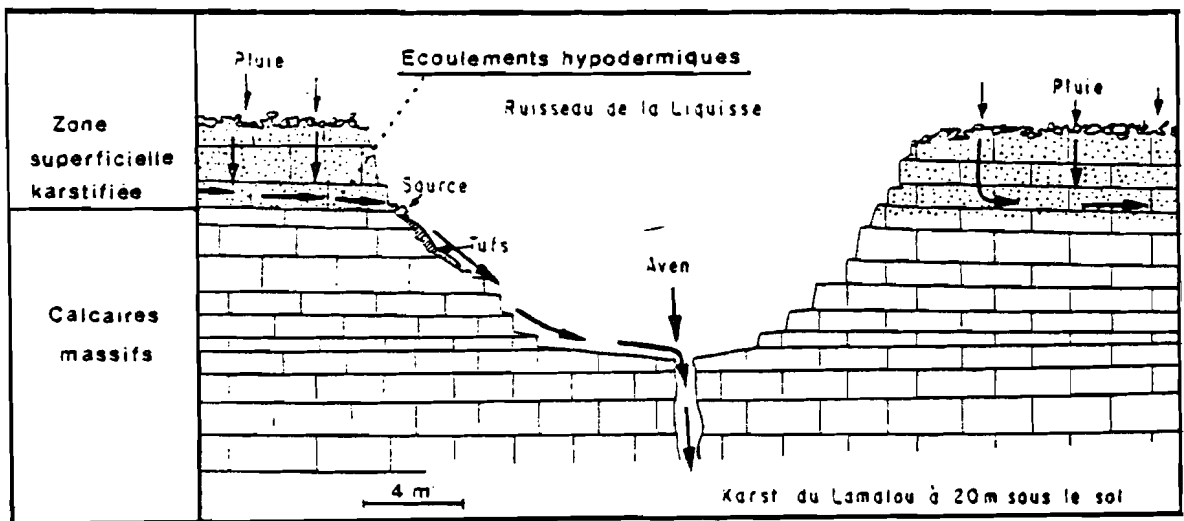
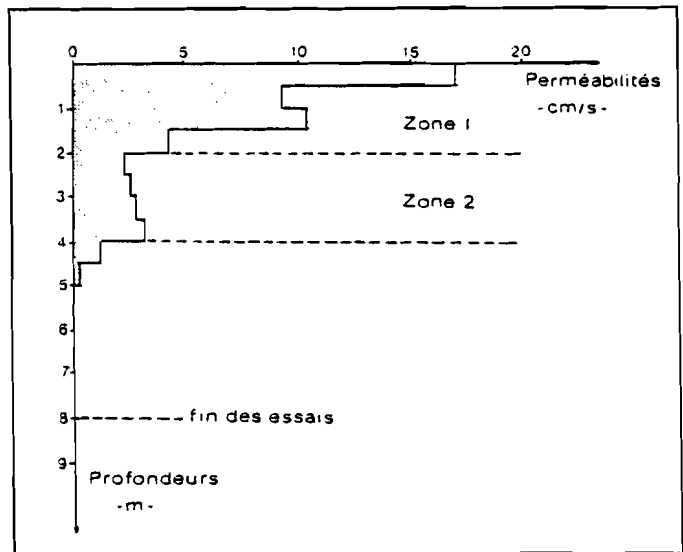
Fig. 8 : SCHEMA D'UN AQUIFERE EPIKARSTIQUE DANS LA ZONE D'ALTERATION ET DE FRACTURATION SUPERFICIELLE D'UN KARST (MANGIN 1975)



En A est représenté le drainage de cet aquifère vers la profondeur par une fissure largement ouverte. En B est figuré le phénomène d'effluence.

A la surface de la zone non saturée un milieu particulier appelé karst superficiel ou épikarst est soumis à la décompression de surface. L'humidité et les fortes teneurs en gaz carbonique dues à sa couverture pédologique en font un milieu très atteint par la dissolution. Les perméabilités mesurées y sont grandes (GOUISSET, 1981), ce qui confère aux régions karstiques de faibles coefficients de ruissellement ; le contraste entre les perméabilités du karst superficiel et celles de la zone non-saturée sous-jacente (fig. 9) implique des cheminements horizontaux (écoulements hypodermiques de DROGUE, 1969 ; fig. 10)

Fig. 9 : PROFIL MOYEN DES PERMEABILITES (EPIKARST DE CORCONNE) (GOUISSET 1981)



10 : ECOULEMENTS HYPODERMIQUES - CAUSSE D'HORTUS (GARD) (DROGUE 1969)

jusqu'aux drains de la zone non saturée : (GUYOT, 1983) permettant l'infiltration verticale. Ce contraste est également responsable de la saturation temporaire de ce milieu lors de fortes pluies (aquifère épikarstique de MANGIN, 1975), et explique l'allure de la descente des niveaux piézométriques, une brisure (fig. 11) sépare la descente rapide dans un joint ouvert, de la vidange par les fines fissures (GOUISSET, 1981 ; GUYOT, 1983).

La proximité de la surface fait de cet épikarst le lieu privilégié (avec le sol qui souvent le recouvre) des phénomènes d'évapotranspiration.

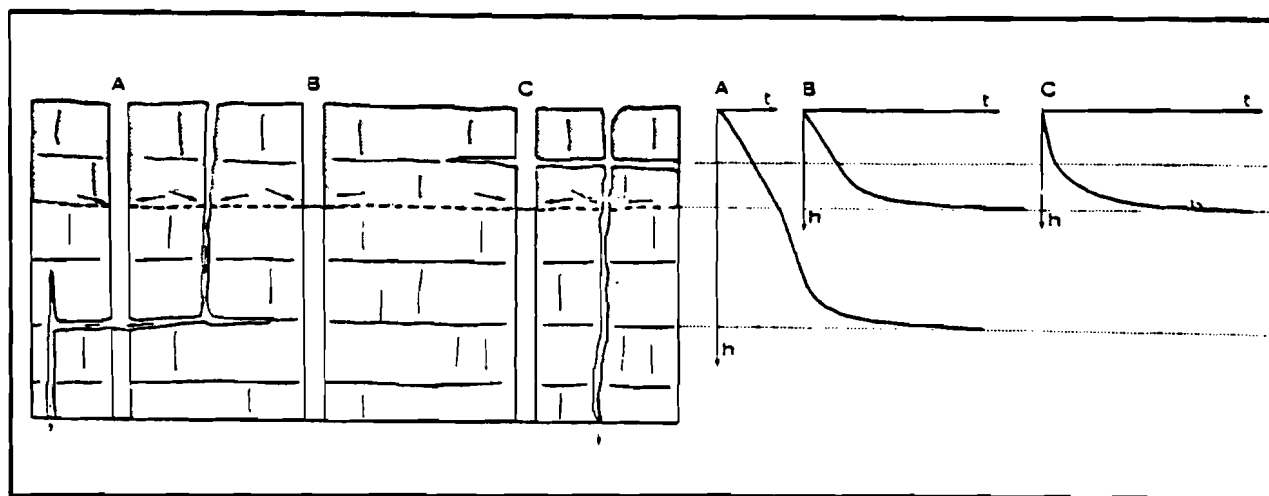


Fig. 11 : COMPORTEMENT PIEZOMETRIQUE DU KARST SUPERFICIEL (GOUISSET 1981)

I.1.4. Comportement hydrodynamique et physico-chimique

L'ensemble des caractères communs au karst et aux autres types d'aquifères ainsi que sa configuration spécifique confèrent à ce milieu un comportement hydrodynamique et physico-chimique original. La réponse du système à une impulsion pluviométrique, ou à l'absence d'impulsion permet d'accéder de manière indirecte à son fonctionnement.

Le message physico-chimique contenu dans l'eau à l'émergence permet de reconstituer les modalités de son transit à travers le système, les divers éléments étant acquis en des lieux différents : nuages, atmosphère, sol, épikarst, milieux non karstiques, blocs capacitifs. Si le système peut être transparent à certains traceurs naturels externes, d'autres, internes peuvent être des indicateurs de transit rapide, leurs équilibres thermodynamiques n'ayant pas eu le temps de se réaliser (à cause de la lenteur de leur cinétique d'acquisition).

Ainsi les équilibres calco-carboniques, qui représentent l'essence du processus de karstification permettent d'identifier les transits d'eaux sous-saturées à l'émergence. Ces équilibres ont été étudiés par divers auteurs (ROQUES, 1961, 1967 ; LANGMUIR, 1965 ; GARRELS et CHRIST, 1967 ; WIGLEY, 1973 ; UDOWSKI, 1980...).

Les karstologues et les hydrogéologues ont utilisé l'information calco-carbonique pour comprendre les mécanismes de transit de l'eau dans les karsts (SCHOELLER, 1969 ; ROQUES, 1963 ; MISEREZ, 1973 ; BAKALOWICZ, 1979, 1980 ; LEPILLER, 1980).

I.2. PRESENTATION DE L'ETUDE

Le présent travail s'inscrit également dans les modes d'approche indirects de l'aquifère karstique, en tentant d'expliquer les phénomènes hydrocinématiques à partir des réponses physico-chimiques et isotopiques des émergences.

Il est divisé en trois parties.

La première partie étudie le comportement des indicateurs physico-chimiques dans l'eau des émergences karstiques au cours du temps, elle se propose de relier leurs variations aux événements affectant le système et son environnement. L'échantillonnage a été effectué à des pas de temps différents (la semaine et la journée) qui apportent des informations complémentaires. Des prélèvements hebdomadaires ont été effectués sur les sources du Verneau à Nans sous Ste Anne (Doubs), de las Hountas sur le Baget (Ariège), du Pont de Gys (Haute Savoie) et de la Fontaine de Vaucluse, retenues pour la bonne connaissance hydrogéologique qu'on en avait et pour la diversité physique de leur système. Le tarissement prolongé de l'été 1981 a permis l'échantillonnage intensif (journalier) des systèmes du Groseau, d'Aurel et de la Fontaine de Vaucluse. Les méthodes d'analyse des données (distributions, corrélations, analyse en composantes principales, analyse discriminante) montrent des phénomènes de lessivage, d'infiltration, de recharge et de recharge lente des réserves en précisant leur localisation dans le système. Cette étude permet de mesurer l'adéquation du pas de temps au phénomène étudié et la représentativité de l'échantillon, donc d'accéder à la chimie-type des différentes composantes de l'écoulement et à la mémoire du système aux épisodes antérieurs.

La seconde partie tente, à partir de ces résultats, d'accéder aux volumes d'eau délivrés par les différentes composantes de l'écoulement du système à partir de la composition en certains traceurs physico-chimiques à l'émergence, tant pour des crues isolées que pour des cycles complets.

La troisième partie traite de la prospection d'une province hydrogéologique à partir des instantanés physico-chimiques et isotopiques. Elle précise la méthodologie à mettre en oeuvre pour classer les aquifères karstiques lors d'épisodes hydrocinématiques bien contrôlés au point de vue représentativité (étiages d'hiver, tarissements, fonte de neige généralisée). La chaîne jurassienne, les plateaux calcaires de Haute-Saône et le Sud-Est de la France ont permis de souligner l'intérêt et de préciser les limites de cette méthode. Les instantanés nous ont fait classer les systèmes en fonction du temps de renouvellement et de l'atteinte anthropique de leurs réserves. Ils précisent l'impluvium des émergences. La répétition d'instantanés sur le même secteur géographique teste la représentativité de chaque campagne par rapport aux phénomènes mis en évidence.

P R E M I E R E P A R T I E

LE SUIVI DIACHRONIQUE DE LA PHYSICO - CHIMIE DE L ' EAU

DES EMERGENCES KARSTIQUES : UN PUISSANT MOYEN DE

RECONSTITUTION DES TRANSITS AU TRAVERS DES SYSTEMES

I N T R O D U C T I O N

Les moyens d'investigation hydrocinématiques permettent de quantifier les transits d'eau à travers le système karstique (par exemple le "volume dynamique de la réserve"), ils sont malheureusement aveugles sur la provenance de ces volumes. La physico-chimie et l'isotopie au contraire permettent en première approximation de qualifier ces eaux qui ont acquis, tout au long de leur histoire (atmosphère, milieux non karstiques, sol, zone non saturée, zone noyée, émergence) un marquage évolutif.

Dès la fin des années 60, les variations des teneurs (et des rapports de teneurs) en traceurs naturels ont été pressenties comme indicatrices des mouvements du fluide dans l'aquifère, donc à priori comme significatives de la structuration de l'écoulement et du fonctionnement du système.

Ainsi, en Autriche, en Yougoslavie, aux Etats-Unis (ZOTL, 1960 ; GAMS, 1966 ; BACK et HANSHAW, 1970) a-t-on tenté de relier les fluctuations chimiques (concomitantes avec les variations de débit) à la structure du milieu. En 1971, SHUSTER et WHITE proposent une classification des aquifères carbonatés de Pennsylvanie à l'aide de leur "coefficient de variation". (voir page 109).

Dans les pays francophones l'étude des variations physico-chimiques a été menée avec succès sur le système de l'Areuse (cycles 68-69) au pas de temps hebdomadaire (TRIPET, 1972 ; MISEREZ, 1973), puis de manière très intensive (cycles et crues isolées) sur le système expérimental du Baget à partir de 1973 (AMINOT, 1975 ; BAKALOWICZ et AMINOT, 1974 ; BAKALOWICZ, 1975, 1979).

Les méthodes d'analyse des données mises en oeuvre par ces auteurs sont l'étude directe des courbes de variation en fonction du temps (BAKALOWICZ, 1979 ; MARJOLET et SALADO, 1975), puis les variables régionalisées et la distribution des fréquences (BAKALOWICZ, 1976, 1977, 1979 ; LEPILLER, 1980) et enfin les analyses multidimensionnelles (TISSOT et TRESSE, 1978 ; KIRALY et MULLER, 1979 ; BAKALOWICZ, 1979, 1980).

Ces auteurs ont travaillé à l'échelle du cycle à un pas de temps hebdomadaire ou bimensuel, et à l'échelle de la crue à des pas de temps journaliers voire horaires.

Les crues des systèmes karstiques présentent souvent l'intérêt de variations spectaculaires de teneurs, hors barres d'erreurs analytiques, permettant de mettre à coup sûr en évidence des phénomènes intéressants. Le défaut majeur des crues dans l'étude du karst est la complexité des réponses physico-chimiques où les phénomènes se superposent et sont masqués par la dilution générale des teneurs. En outre les prélèvements de crue sont souvent effectués sur des critères hydrométriques : démarrage avec la première montée du débit, fréquence élevée des prélèvements jusqu'au début de la "décrue hydrodynamique", puis fréquence espacée, ce qui fait généralement oublier les phénomènes immédiats (intervenant entre la pluie et la montée du débit) et les phénomènes différés (intervenant en "décrue" et "tarissement").

Le présent travail repose sur l'étude au pas hebdomadaire de cycles sur quatre systèmes. Dans le Sud-Est de la France, le pas "journalier" a été retenu pour l'étude intensive des étiages. Ce pas (en fait 16h39mn = 999 mn, période maximale des préleveurs automatiques utilisés) était adapté aux phénomènes

étudiés (étiages et crues) sur des systèmes de grande taille et d'inertie importante (Vaucluse, Groseau). La confrontation de deux pas de temps emboîtés est indispensable pour tester la représentativité des échantillons hebdomadaires d'étiage ; elle permet la comparaison d'un échantillon avec ses prédécesseurs ou successeurs journaliers. La comparaison Groseau - Vaucluse permet, grâce à l'invariance des valeurs du Groseau pendant une longue période, de tester les barres d'erreurs analytiques (voir Annexe 1). L'étude des étiages a été entreprise dans le but d'estimer la "mémoire" des systèmes aux événements antérieurs.

C H A P I T R E II

M E T H O D E S D ' E T U D E

E T S Y S T E M E S E T U D I E S

SYSTEME	PERIODE D'ETUDE	FREQUENCE PRELEVEMENTS	NOMBRE D'E-CHANTILLONS	AUTEURS
VERNEAU	4.XI.77	Crue	45	TISSOT-TRESSE 1978
(Doubs)	XI.81-XII.82	Hebdomadaire	55	*
PLAGNES (Haute-Savoie)	IV.79-IV.80	Hebdomadaire + Crues	53	VUYLSTEEK 1983
PONT DE GYS (Haute-Savoie)	XII.76-IV.80	Hebdomadaire + Crues	126	
	XI.80-XII.82	Hebdomadaire	114	*
BAGET	73 →	Hebdomadaire + Crues + Continu	très important	BAKALOWICZ 1979
(Ariège)	VII.81-XII.82	Hebdomadaire	27	*
POUSSAROU MALIBERT (Hérault)	X.81-IX.82	Hebdomadaire + Crues	45 + 35	GUYOT 1983
	XII.66-IV.69	Bimensuel	?	EVIN et al. 1971
VAUCLUSE	I.81-XII.82	Hebdomadaire	62	*
	VII.81-I.82	Quotidien	255	*
GROSEAU (Vaucluse)	VII.81-I.82	Quotidien	258	*
AUREL (Vaucluse)	VII.81-IX.81	Quotidien	108	*

* Ce travail.

Tabl. 1 - LES EMERGENCES ETUDIEES

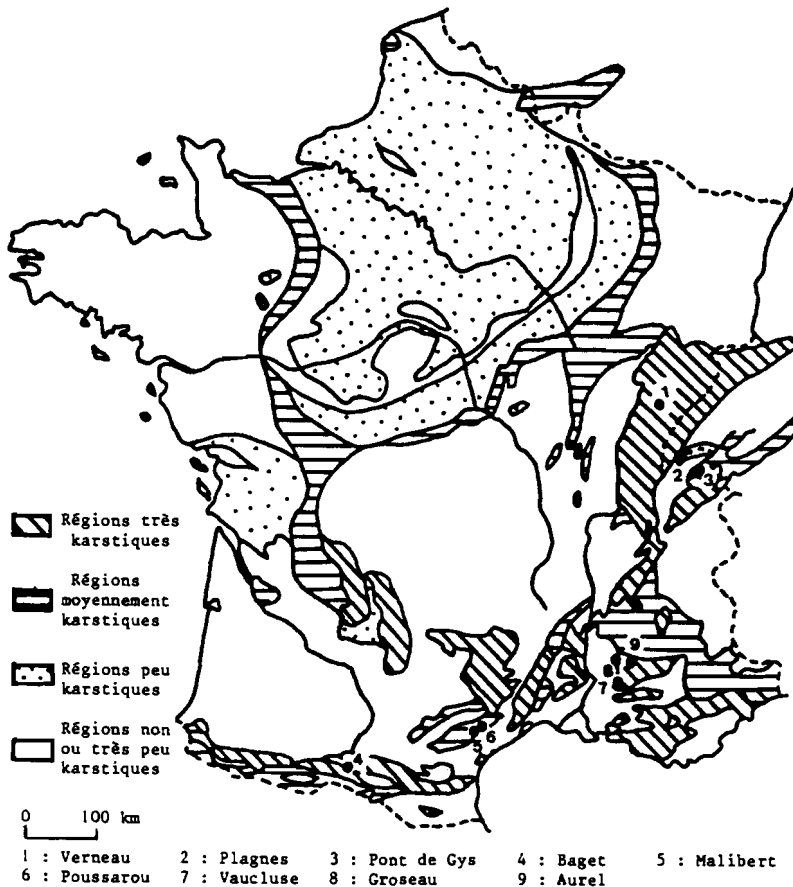
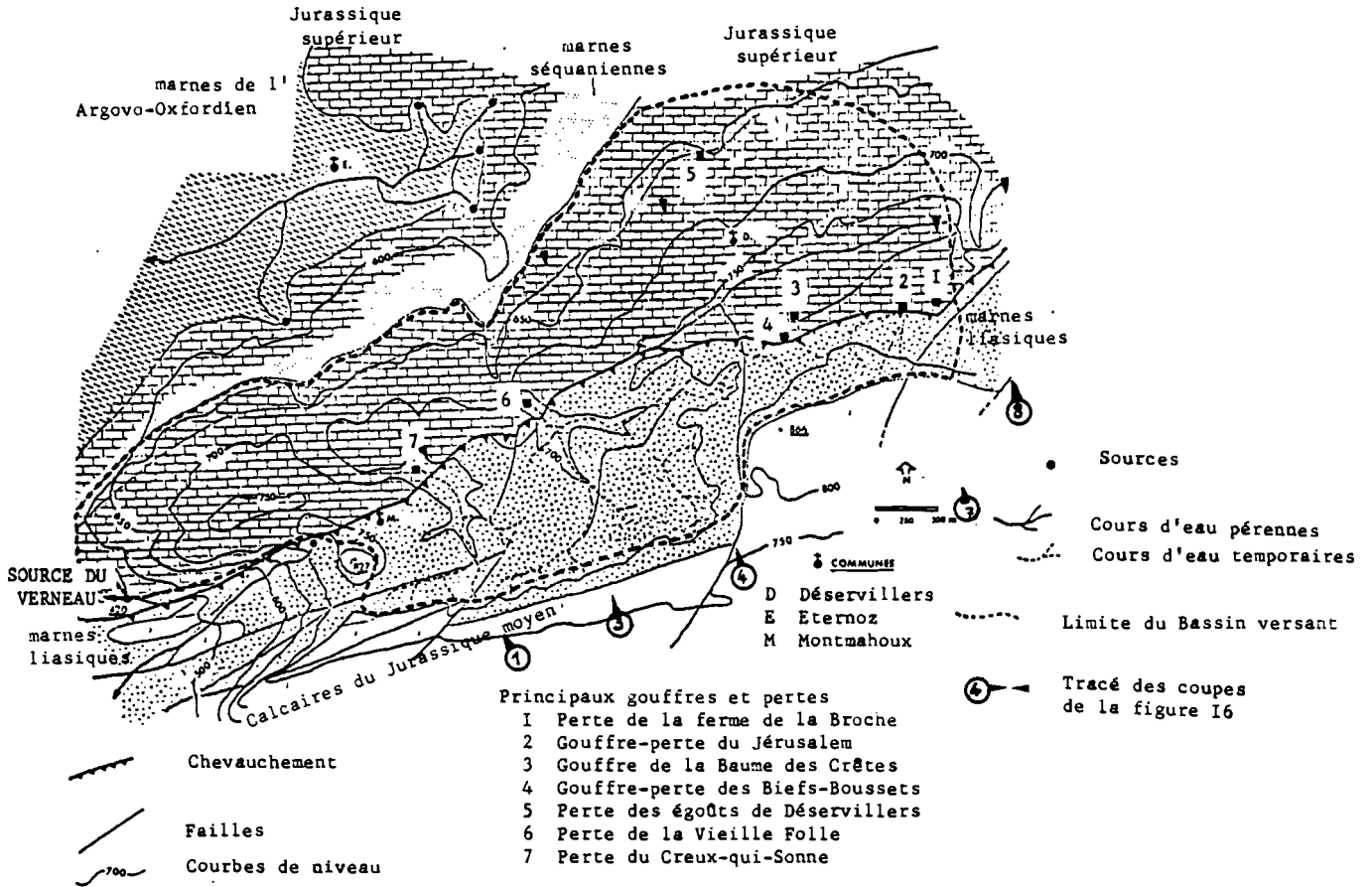
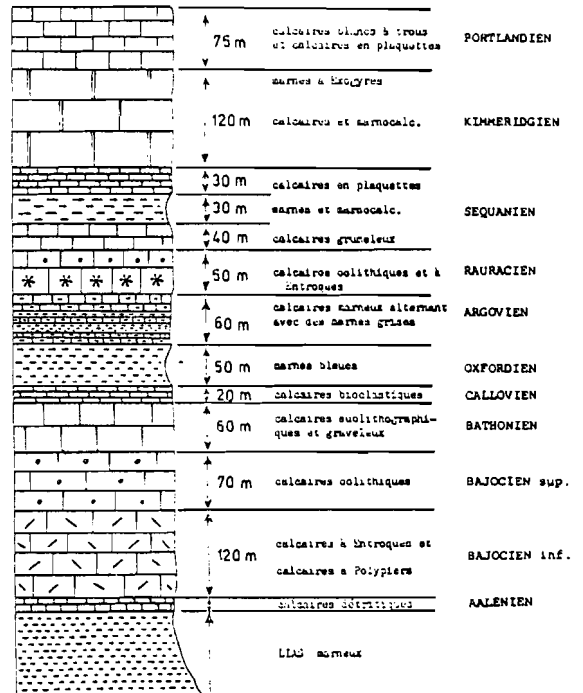


Fig. 12 - SYSTEMES ETUDIES (d'après GEZE in MANGIN 1975, simplifié)



▲ Fig. 14 : SYSTEME DU VERNEAU : CARTE GEOLOGIQUE (TISSOT et TRESSE 1978)

Fig. 15 : VERNEAU :
LITHOSTRATIGRAPHIE
(TISSOT et TRESSE 1978)



température qui ont eu pour conséquence la dégradation des teneurs en ions permettant le calcul des équilibres calco-carboniques (calcium et bicarbonates principalement, voir annexe 1).

Les anions ont été dosés en série, le reste de l'eau a été acidifié à 1% d'acide nitrique, à posteriori, pour conserver les cations en solution afin de les doser par spectrométrie d'absorption atomique.

II.2. METHODOLOGIE ANALYTIQUE

Les méthodes d'analyse utilisées lors des suivis hydrochimiques demandent une fiabilité particulière. AMINOT (1974) a fait un point intéressant sur la question. Si les analyses d'eau à des fins hygiéniques requièrent une certaine justesse, le calcul des équilibres calco-carboniques utilisant les teneurs en plusieurs espèces ioniques, demande une justesse très importante.

L'examen des courbes de variations temporelles est moins contraignant sur la justesse des mesures, en revanche, la reproductibilité doit être la meilleure possible : pour accroître la signification des variations mesurées, il faut sérier les analyses, mais ce n'est possible que sur les éléments dont la teneur n'est pas altérée au cours du temps. L'intercalation d'échantillons à teneurs extrêmes dans les séries suivantes permet le recalage des séries les unes par rapport aux autres.

Les méthodes analytiques employées sont tirées de HEM (1970), RODIER (1976), APHA-AWWA-WPCF (1980) pour la volumétrie et la colorimétrie (ce sont les méthodes utilisées en routine au CRG de Thonon), de PINTA (1979), de EMMEL et al. (1977), SOTERA et al. (1981) pour la spectrométrie d'absorption atomique (voir annexe 1).

Les méthodes colorimétriques étaient bien adaptées aux gammes de teneurs rencontrées (sensibilité et barres d'erreur acceptables sur le dosage des chlorures, nitrates, sulfates et de la silice) ; l'absorption atomique en revanche, du fait de sa très bonne sensibilité, a une plage de mesure restreinte obligeant à des dilutions importantes, qui portent préjudice à la barre d'erreur (par exemple sur calcium et magnésium, voir annexe 1).

II.3. LE SYSTEME DU VERNEAU

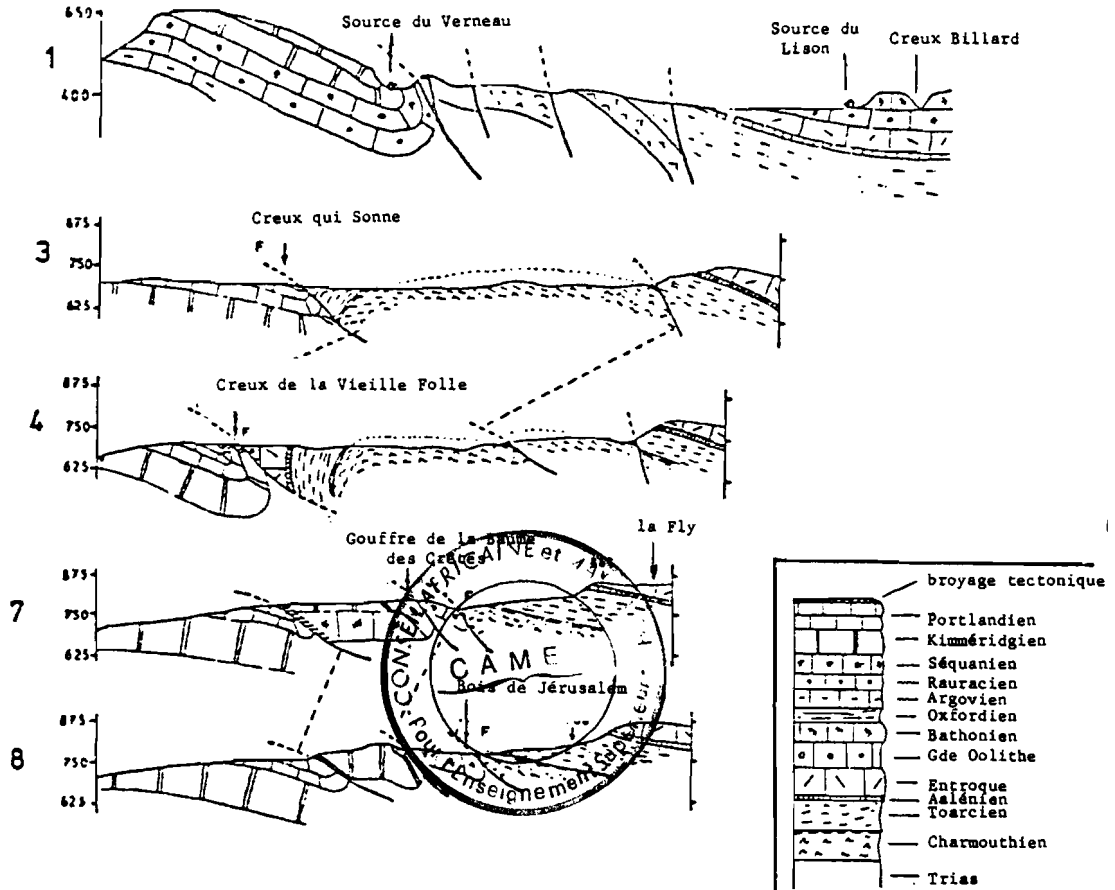
Dans le Jura des plateaux, à une trentaine de kilomètres au Sud de Besançon, le système karstique du Verneau est situé sous le faisceau salinois, structure plissée en bordure du plateau de Levier et chevauchant sur celui d'Ornans-Amancey. Il a fait l'objet d'études hydrogéologiques détaillées (FOLTETE, 1968 ; TISSOT et TRESSE, 1978 ; DIDON et JACQUIN, 1979).

II.3.1. Géologie

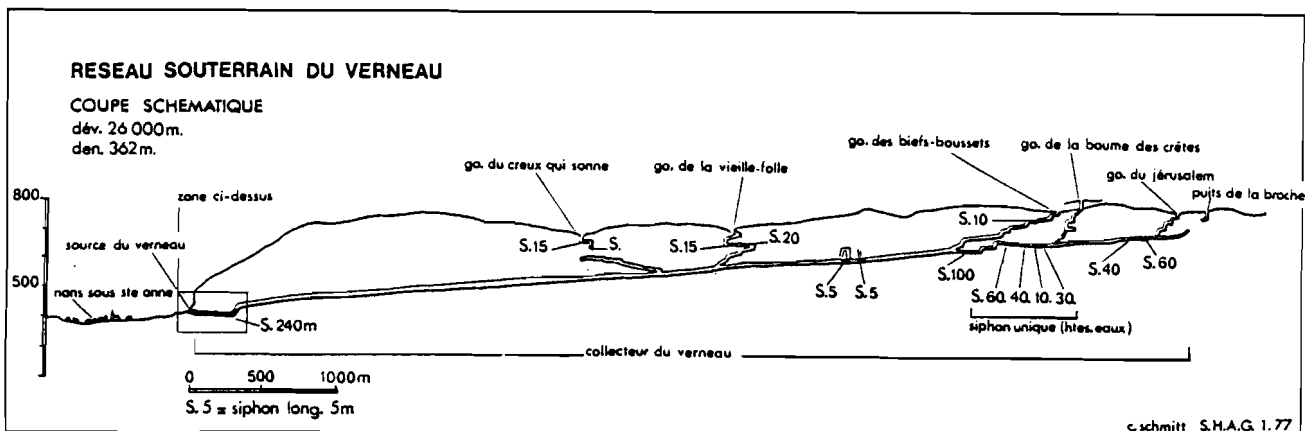
Les séries rencontrées à l'affleurement dans le faisceau salinois appartiennent au Lias marneux et au Dogger (fig. 14 et 15) alors que les séries du plateau d'Amancey appartiennent au Malm. Le système du Verneau s'étend d'une part sur les marnes liasiques, d'autre part dans le Malm calcaire qui repose sur les marnes "séquanienues".

Les marnes liasiques (fig. 16) affleurent au coeur d'un anticlinal qui chevauche le Malm terminal d'un synclinal dont l'axe plonge vers l'Ouest-Sud-Ouest. Au niveau de Déservillers, des écailles de Dogger et de Malm, vestiges du flanc septentrional de l'anticlinal, jalonnent le contact chevauchant.

Cette lithologie et cette structure expliquent le développement d'une karstification dans le Malm calcaire et l'établissement de réseaux hydrographiques sur les marnes liasiques, avec cependant des possibilités de circulation sous-cutanées à la limite des marnes saines et des marnes altérées, et des possibilités de drainage vers les calcaires sous-jacents du Malm (très localement dans les parties chevauchantes).



▲ Fig. 16 : FAISCEAU SALINOIS ; COUPES GEOLOGIQUES (FOLTETE 1968)



▲ Fig. 17 : RESEAU SOUTERRAIN DU VERNEAU - COUPE SCHEMATIQUE

II.3.2. Climat de la région

Les altitudes extrêmes du bassin sont 804 et 420 m. et la médiane de la courbe hypsométrique se situe à 710 m. La température moyenne annuelle (1972-1977) est voisine de 8,6°C, et les précipitations moyennes (1972-1977) représentent 1363 mm, ce qui donne des valeurs d'ETP de 576 et 616 mm (Turc, Thornthwaite) et des valeurs d'ETR de 508 et 659 mm. (Turc, Bilan d'énergie). Sous le climat comtois, où les précipitations sont bien réparties, l'ETR est proche de l'ETP.

II.3.3. Hydrogéologie

Le système du Verneau comprend un grand réseau spéléologique (fig. 17) avec plus de 25 km de galeries explorées et une dénivelée totale voisine de 400 m. Certaines parties, situées derrière des voûtes mouillantes ne sont accessibles que par plongées. Le réseau du Verneau comprend un collecteur principal qui suit l'axe du synclinal et qui est parfois sous le compartiment chevauchant. Vers ce collecteur convergent 5 gouffres ouverts dans le Malm, à faible distance et à l'aval de petits bassins versants situés sur les marnes liasiques du compartiment chevauchant. (4 de ces gouffres sont des pertes de ruisseaux).

Grâce à l'importance de la karstification à l'aval du système, aux petits bassins marneux compacts, à la dénivelée pertes-collecteur, à l'abaissement axial de la gouttière synclinale, le Verneau est un système à faible réserve, à crues très brutales et à décrues très rapides.

L'impluvium du Verneau couvre 13,9 km², l'émergence a un débit moyen de 441 l.s⁻¹ (période 1970-1977) avec des minima de 8 l.s⁻¹ et des maxima instantanés de 10 800 l.s⁻¹. Avec un volume dynamique de la réserve dérisoire par rapport au volume total de transit, et des crues très vite résorbées (fig. 18) le Verneau se place dans le groupe 1 de la classification de MANGIN 1975 (système très karstifié en aval - réseau spéléologique très développé).

Courbes $y = \frac{1-n \cdot t}{1+et}$

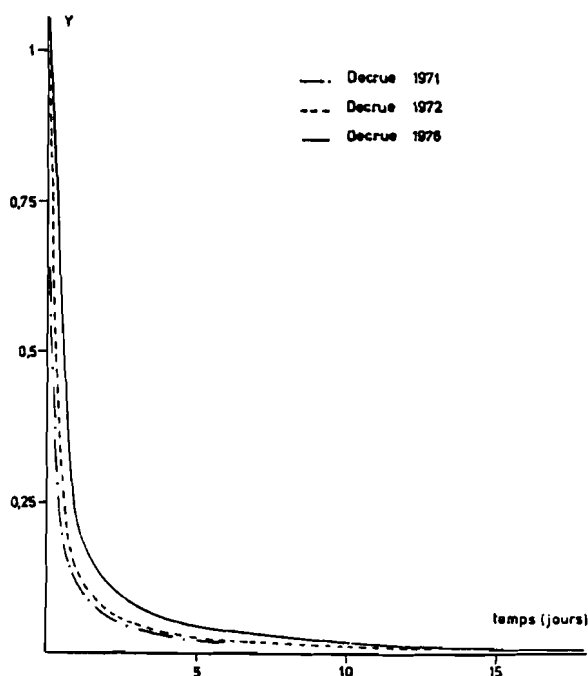
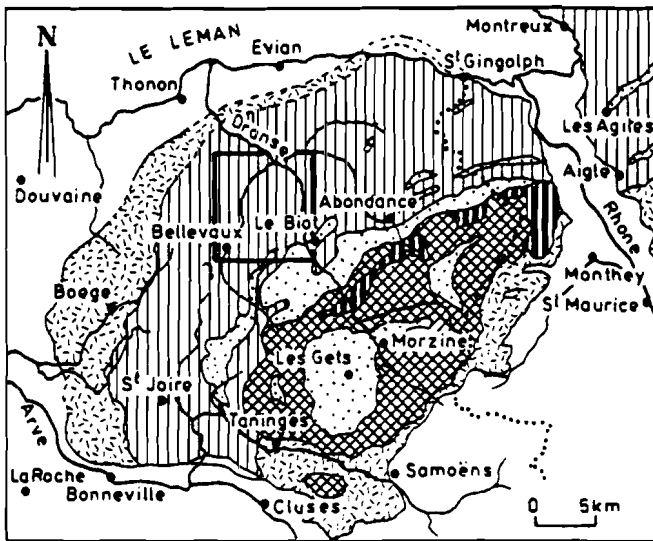


Fig. 18 : VERNEAU : DECRUES
(TISSOT et TRESSE 1978)








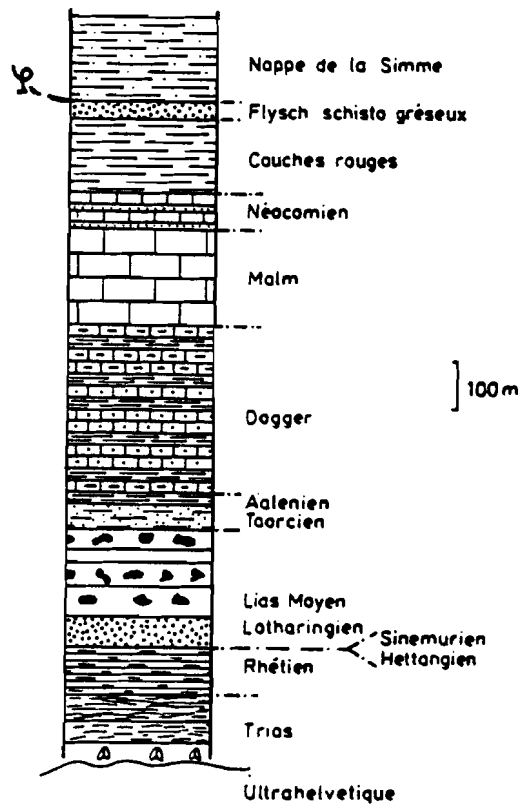
-  Ultrahelvétique ou Préalpes inférieurs
- Nappes des Préalpes médianes
 -  a) Médianes plastiques
 -  d) Médianes rigides
-  Nappe de la Brèche
-  Nappe de la Simme ou Préalpes supérieurs

Fig. 19 : PREALPES DU CHABLAIS
SCHEMA STRUCTURAL
(CARON in DEBELMAS 1970)

Fig. 20 : PREALPES MEDIANES PLASTIQUES :
LITHOSTRATIGRAPHIE
(VOULSTEEK 1983)



II.4. LES SYSTEMES DU MASSIF DU NIFFLON (HAUTE-SAVOIE)

Le massif du Niffлон, situé à une douzaine de kilomètres au Sud de Thonon, fait partie des Médiannes Plastiques (fig. 19), sous-ensemble à faciès sub-briançonnais de la nappe de charriage des Préalpes Médiannes, dans le Chablais. L'hydrogéologie du secteur a été étudiée par VUYLSTEEK (1983), les sols par CAUCHIE (1979).

II.4.1. Géologie

La série stratigraphique montre (fig. 20) des carbonates francs (Lias spathique, Malm), des calcaires plus marneux (couches rouges) ou des alternances calcaires - marnes (Dogger). Certaines formations, pauvres en carbonates, sont riches en silice (silex), par exemple dans le Lias. Le Trias, qui forme la semelle de la nappe, comprend des gypses, des cargneules et des dolomies.

Cette nappe (fig. 21 et 22) comprend des plis Nord-Est - Sud-Ouest déversés vers le Nord-Ouest et une intense fracturation, issus du déplacement gravitaire de la nappe sur ses niveaux incompetent triasiques à l'Oligo-Miocène. Des mouvements verticaux récents ont dénivélé les axes de plis d'environ 1 200 m dans la vallée de la Dranse.

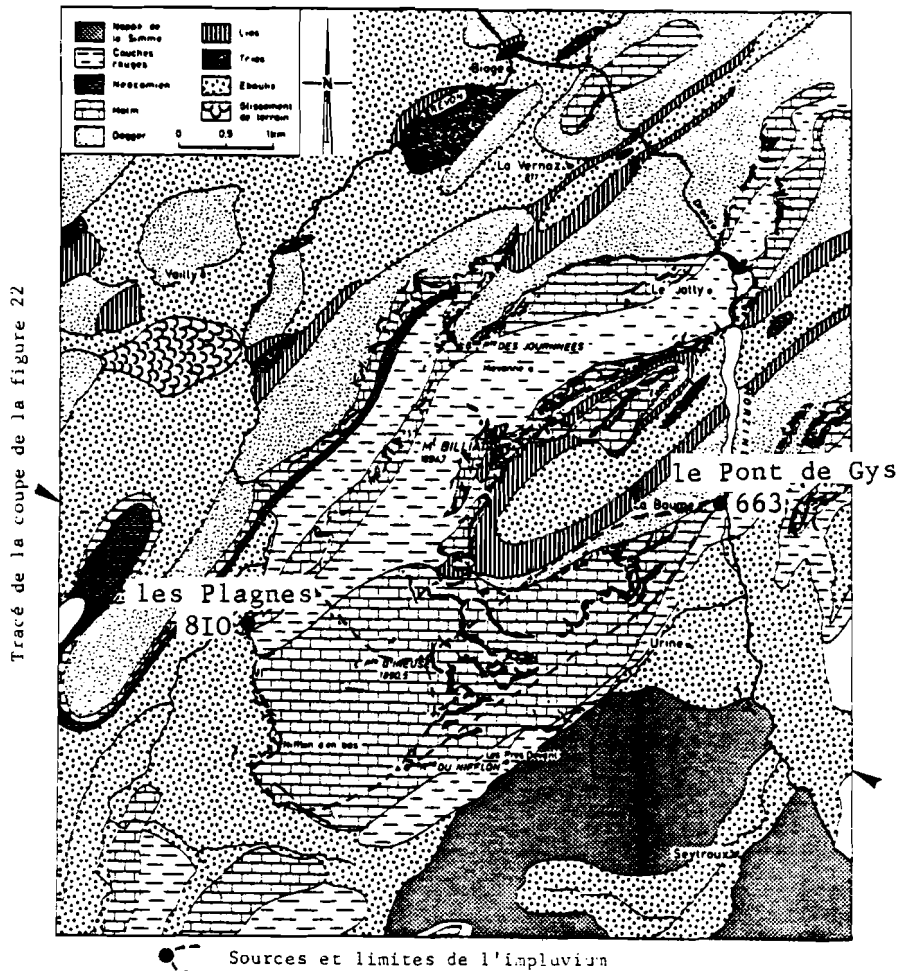


Fig. 21 : MASSIF DU NIFFLON - CARTE LITHOLOGIQUE (VUYLSTEEK 1983)

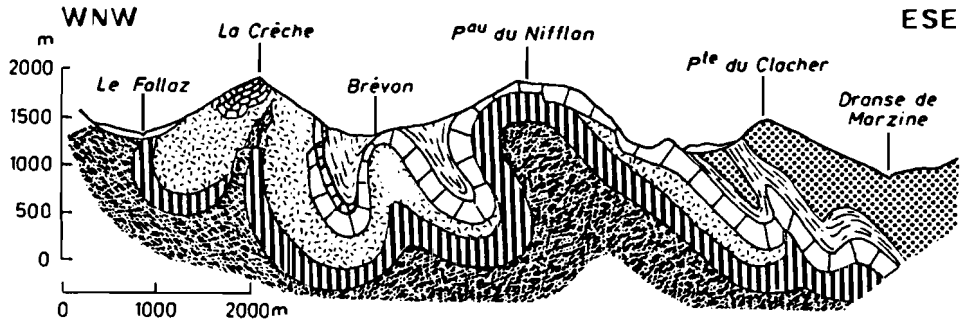


Fig. 22 : MASSIF DU NIFFLON - COUPE GEOLOGIQUE (VUYLSTEEK 1983)

II.4.2. Climat de la région

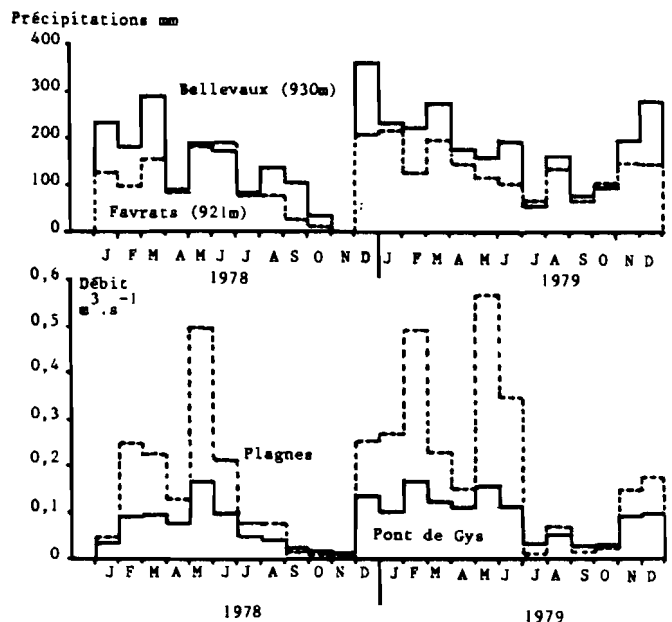
Le massif du Nifflon a deux versants d'orientation nord-ouest et sud-est. Ses altitudes extrêmes sont 528 et 1 895 m, les altitudes médianes sont 1 220 (versant NO) et 1 150 m (versant SE). Compte tenu du gradient pluviométrique de 60 mm par 100 m observé dans la région, les précipitations de 1979 ont été estimées à 2 200 mm sur le massif. Le gradient thermique régional de $- 0,70^{\circ}\text{C}$ par 100 m permet d'estimer à 2°C la température moyenne annuelle sur le Nifflon. L'ETP représente dans ces conditions seulement 346 mm (Turc) ou 415 mm (Thornthwaite) par an.

La neige est présente plus de 5 mois par an sur le bassin, principalement sur le versant exposé au Nord Ouest, où elle fond un mois plus tard que sur le versant Sud-Est.

II.4.3. Hydrogéologie

Le massif du Nifflon alimente deux sources issues des terrains carbonatés (fig. 21), l'une sur son versant Sud-Est, dans la vallée de la Dranse de Morzine, à une altitude de 663 m (le Pont de Gys), l'autre sur son versant Nord-Ouest, sur la rive droite du Brévon, à 810 m d'altitude (les Plagnes). L'impluvium des deux émergences a une surface voisine de $1,6 \text{ km}^2$ pour le Pont de Gys, de $3,6 \text{ km}^2$ pour les Plagnes.

Fig. 23 : MASSIF DU NIFFLON -
 PRECIPITATIONS ET
 DEBITS MOYENS
 MENSUELS



Annuellement (période 1977-1979), le Pont de Gys évacue un débit de 78 l.s^{-1} et les Plagnes de 178 l.s^{-1} en moyenne, bien que le Pont de Gys soit un exutoire pérenne et les Plagnes une émergence temporaire. La répartition mensuelle des débits (fig. 23) fait apparaître des étiages d'été prononcés qui se prolongent parfois jusqu'en novembre, et des crues d'hiver et de printemps. On remarquera le débit très faible des Plagnes en étiage et le débit plus soutenu du Pont de Gys, alors qu'en crue les Plagnes restituent de 2 à 3 fois plus d'eau que le Pont de Gys : le système des Plagnes paraît donc mieux drainé que celui du Pont de Gys. VUYLSTEEK estime le volume dynamique de la réserve au cours de l'étiage 1978 à une valeur dérisoire pour les Plagnes, et à $120\ 000 \text{ m}^3$ pour le Pont de Gys.

II.5. LE SYSTEME DU BAGET (ARIEGE)

Ce système a fait l'objet de nombreuses publications de l'équipe de Moulis : MANGIN (1970,1975) décrit ce système et son fonctionnement hydraulique.

Le Baget est situé dans la zone Nord-Pyrénéenne, dans le massif de l'Estelas-Balaguères. Les terrains carbonatés appartiennent au Jurassique et au Crétacé, ils ont subi le métamorphisme pyrénéen. Entre le Front Nord-Pyrénéen et l'un de ses accidents-satellites, une étroite bande de calcaires (1 km) est bordée au Nord par des terrains imperméables (fig. 24), au Sud elle est couverte par d'autres roches imperméables. Les calcaires cristallins sont homogènes, très fissurés (porosité 1,2 %).

La surface de l'impluvium représente $13,25 \text{ km}^2$, elle comprend un tiers de terrains non karstiques, elle est bien délimitée. L'altitude moyenne est de 923 m, la médiane 930 m, les extrêmes du bassin 1 417 et 498 m.

Le système comprend un exutoire pérenne, las Hountas, dont l'unicité a été prouvée par des essais de traçage, et plusieurs trop-pleins étagés en altitude, entrant successivement en action lorsque croît le débit.

Le ruissellement sur les terrains imperméables se perd sur la partie calcaire de l'impluvium. Le climat (BAKALOWICZ, ANDRIEUX, 1974) est du type océanique, les précipitations représentaient 1 450 mm et la température moyenne $10,6^\circ\text{C}$ en 1973.

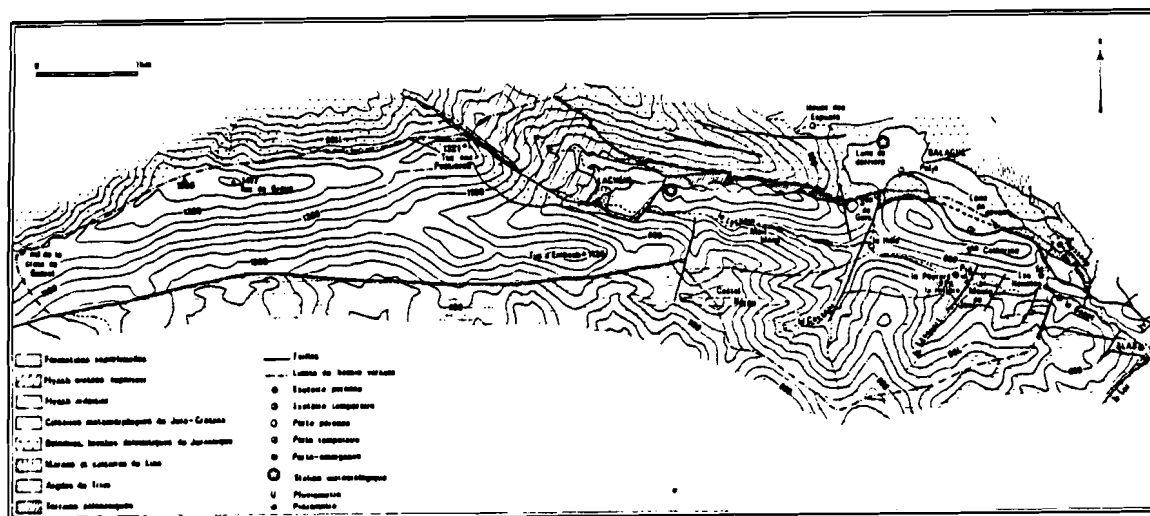


Fig. 24 : SYSTEME KARSTIQUE DU BAGET : CARTE (MANGIN 1975)

II.6. LES SYSTEMES DE POUSSAROU ET DE MALIBERT

Les systèmes karstiques de Poussarou et de Malibert sont situés dans les calcaires et dolomies cambriennes de la Montagne Noire. Ils ont été étudiés par GUYOT (1983). Quelques essais de traçage montrent que Poussarou a un impluvium dolomitique et nu (les dolomies affleurent). Malibert en revanche a un impluvium calcaire, couvert de sols et de végétation (forêt).

Les deux exutoires écoulent l'eau de pertes de ruisseaux pérennes, la surface des deux bassins est comparable : 19,6 km² à Poussarou, 18,7 km² à Malibert. La source de Poussarou a un hydrogramme de crue plus aigu que Malibert, la concavité de la décrue y est plus marquée (fig. 25), le débit de décrue de Malibert est plus soutenu.

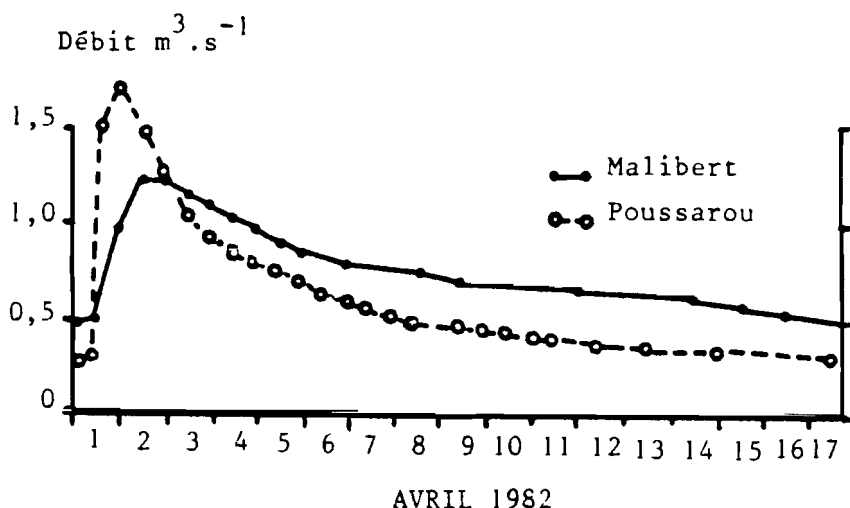


Fig. 25 : SOURCES DE POUSSAROU ET MALIBERT : COMPARAISON DES DEBITS DE CRUE

II.7. LE SYSTEME DE VAUCLUSE

Le plus grand impluvium karstique de France a fait l'objet de nombreuses études synthétisées dans la thèse de PUIG (en cours). Les investigations les plus intensives ont été menées dans le cadre d'une action concertée de la DGRST (EVIN et al., 1968 ; FLANDRIN, 1969 ; FLANDRIN et PALOC, 1969 ; MARGRITA et al., 1970). La présentation qui va suivre est tirée en partie de MUDRY et PUIG, 1987.

A une trentaine de km à l'Est d'Avignon, les plaines du couloir rhodanien sont dominées par des massifs calcaires limités à l'Est et au Sud par la plaine de la Durance. Au Nord, la chaîne Est-Ouest du Mont Ventoux et de la Montagne de Lure représentent la partie septentrionale de ces massifs. Elle surplombe les vallées du Jabron et du Toulourenc qui la séparent de l'ensemble marno-calcaire des Baronnies.

Dans le secteur ainsi délimité, les écoulements de surface pérennes sont presque inexistants : on ne les trouve que dans les secteurs où des terrains imperméables ou semi perméables masquent les calcaires (Fossé de Sault, bassins d'Apt et de Forcalquier).

Aux bordures des calcaires, un certain nombre d'émergences dont le débit moyen n'excède pas 50 l.s⁻¹ évacuent au total moins d'un m³.s⁻¹. La quasi totalité du drainage est assuré par une seule source : la Fontaine de Vaucluse.

Avec un débit moyen interannuel supérieur à $20 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, un débit maximum supérieur à $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et un débit minimum jamais inférieur à $4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, cette source est l'une des principales émergences karstiques d'Europe, et la première de France.

II.7.1. Présentation géographique

Le secteur étudié est à cheval sur trois départements : le Vaucluse, les Alpes de Haute Provence et pour une petite partie la Drôme.

Du point de vue géographique et topographique, on peut le subdiviser en 4 sous-ensembles orientés Est-Ouest (fig. 26) :

- la chaîne septentrionale qui, avec des altitudes de 1 909 m au Mont Ventoux et 1 826 m au sommet de Lure en représente les plus hauts reliefs ;
- se raccordant à cette chaîne, une zone d'altitudes moyennes (600 à 1 000m), les monts de Vaucluse et le plateau de St-Christol ;
- une zone déprimée : le bassin d'Apt - Céreste ;
- la chaîne méridionale : montagnes du Petit Lubéron (719 m) et du Grand Lubéron (1 125 m).

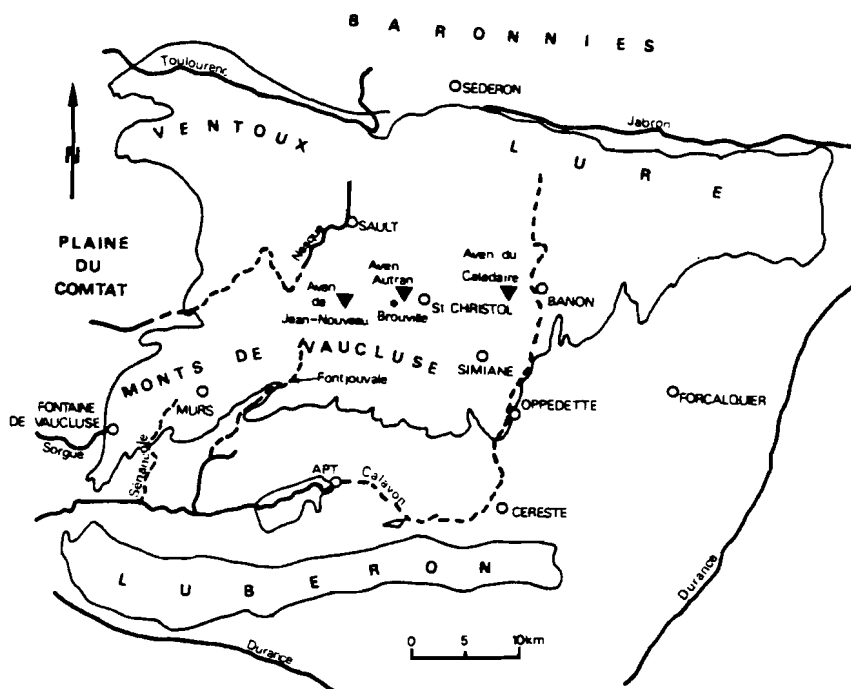


Fig. 26 : SYSTEME DE VAUCLUSE : PRESENTATION GEOGRAPHIQUE (MUDRY et PUIG 1987)

II.7.2. Géologie

A. Stratigraphie

La série carbonatée karstifiable appartient au Crétacé inférieur. Elle est limitée à sa base par les marnes valanginiennes et les calcaires marneux de l'Hauterivien inférieur. Elle est surmontée en concordance par les marnes de l'Aptien supérieur (Gargasien) et en discordance par le Crétacé supérieur sablo-marneux et les terrains tertiaires.

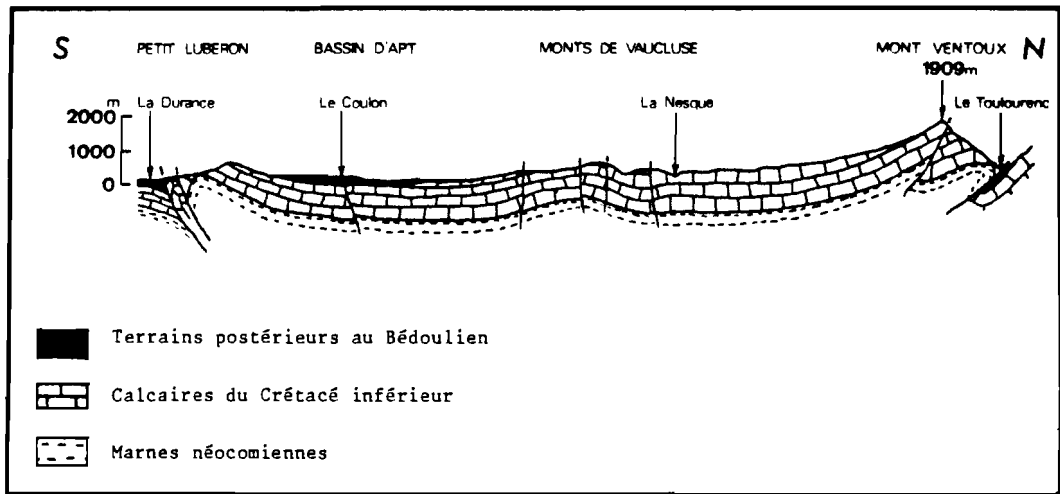


Fig. 27 : SYSTEME DE VAUCLUSE : COUPE GEOLOGIQUE (MUDRY et PUIG 1987)

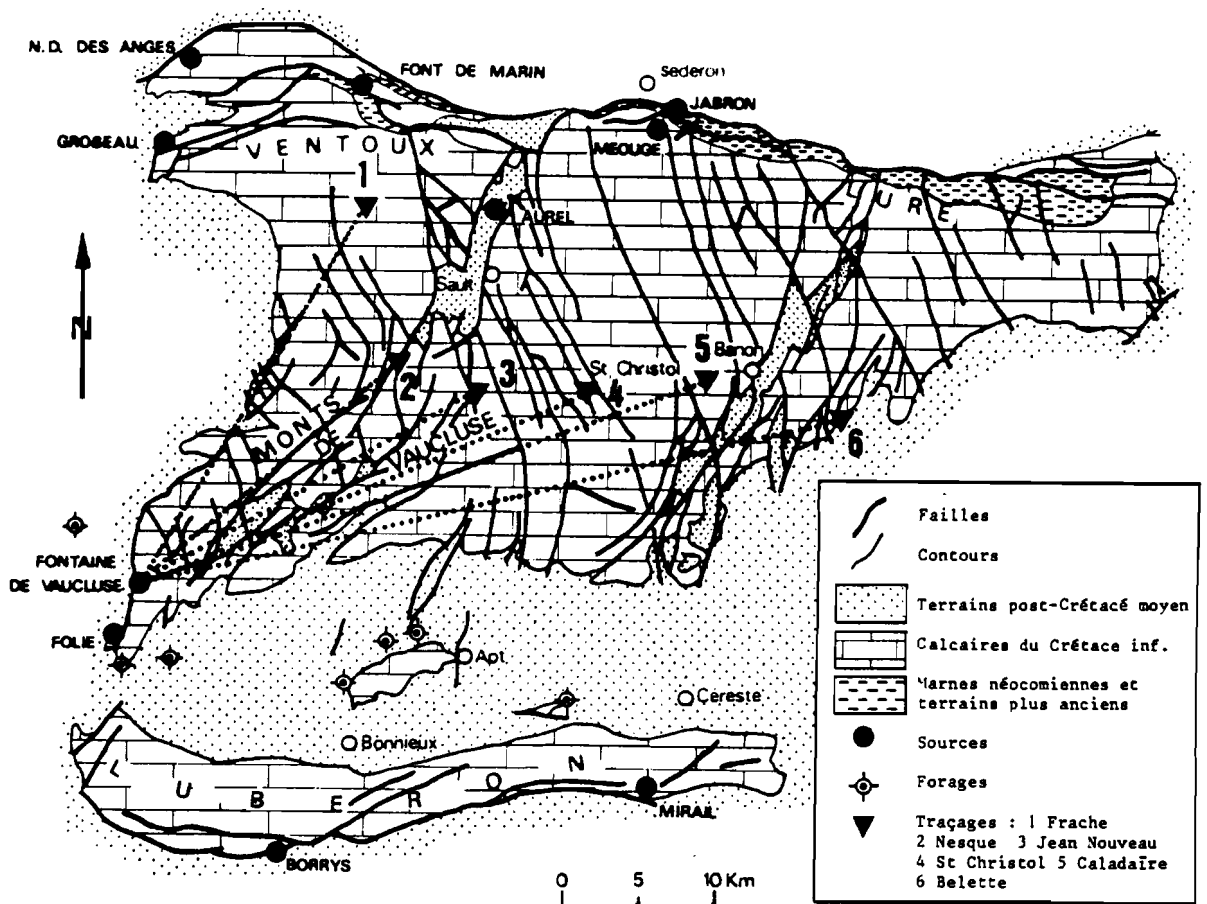


Fig. 28 : SYSTEME DE VAUCLUSE : SCHEMA GEOLOGIQUE (MUDRY et PUIG 1987)

La série calcaire commence donc à l'Hauterivien supérieur et se termine avec l'Aptien inférieur. Dans sa partie Sud-Ouest, elle affleure sous le faciès urgonien : calcaires à rudistes et calcaires bioclastiques périrécifaux ; dans la partie Nord-Est et le Grand Lubéron, "l'Urgonien" fait place à divers faciès moins détritiques.

L'épaisseur totale de la série atteint un millier de mètres dans la Montagne de Lure, et dépasse vraisemblablement cette valeur dans les Monts de Vaucluse.

B. Structure

La puissance et la compétence de ces calcaires expliquent leur comportement tectonique : Ce "bloc Haut-Provençal" (BERGERAT, 1985) a transmis avec un minimum de déformations souples les contraintes subméridiennes responsables des chevauchements vers le Nord de la chaîne Ventoux-Lure, vers le Sud du Lubéron.

Du Sud du Ventoux au flanc Sud du Lubéron, la série calcaire ne forme qu'une dalle, monoclinale pentée vers le Sud sur le flanc méridional du Ventoux et de Lure, tabulaire sur le plateau de St-Christol, synclinale sous le bassin d'Apt (comblé par des sédiments postérieurs), et anticlinale au Lubéron (fig. 27 et 28).

Deux familles de fractures (N30 et N145) découpent le plateau. Elles ont joué plusieurs fois et leur rejet, tant vertical qu'horizontal, est généralement faible.

Réutilisant la famille N30, la distension oligocène a ouvert plusieurs fossés d'effondrement sur le plateau (Sault, Murs, Banon, Simiane). Elle est également responsable (VILLEGER, 1984) du jeu normal des failles limitant les Monts du Vaucluse à l'Ouest.

Dans les fossés, les calcaires sont couverts par les formations peu perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire.

C. Karstification

Dès le Crétacé moyen ces calcaires ont été en partie exondés. Epais, fracturés, dénivelés, ils ont été soumis à la karstification après décapage de leur couverture (là où elle existait).

En surface, les manifestations les plus apparentes de la dissolution des calcaires sont les vallées sèches qui découpent le plateau surtout sur ses bordures pour le raccorder à la plaine (Gorges de la Nesque, de la Sénancole, de Fontjouvale, d'Oppédette, par exemple, où les écoulements de surface sont peu fréquents) ; dans les interfluves, l'infiltration est importante, les lapiés sont développés, les sols sont pauvres et peu épais.

Dans les zones à faible pente, comme le plateau de St-Christol, le réseau de surface est peu développé et endoréique. Les lapiés et les nombreuses dolines sont empâtés de terra rossa.

La végétation naturelle est une forêt méditerranéenne influencée par l'altitude, avec ses formes de dégradation (garrigues).

Au sommet du Mont Ventoux, les calcaires crétacés sont masqués par un champ de pierres provenant de la décompression et de la gélifraction des bancs calcaires. Ce milieu particulier, en raison de l'altitude à laquelle il est situé (1 450 m à 1 900 m) et de l'absence de sol, est difficilement conquis par la végétation. Autour de l'observatoire du Mont Ventoux, sur une surface d'une dizaine de km², la végétation est totalement absente de ces pierriers dont l'épaisseur paraît être de quelques décimètres à quelques mètres.

Outre ces formes de surface, plus de 300 cavités pénétrables ont été répertoriées sur l'impluvium calcaire. Ces cavités montrent un faible développement horizontal mais d'importants développements verticaux. Quatre de ces gouffres dépassent 500 m de profondeur (fig. 26).

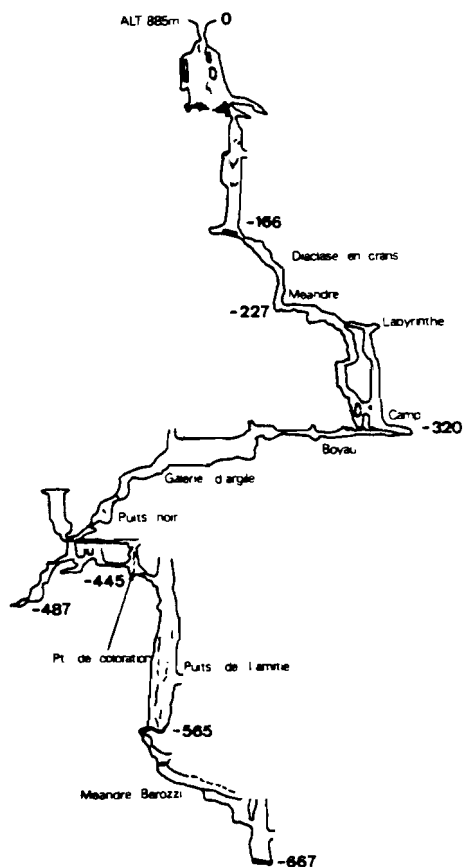


Fig. 29 : GOUFFRE DE CALADAIRE : COUPE TOPOGRAPHIQUE (SOCIETE SPELEOLOGIQUE D'AVIGNON)

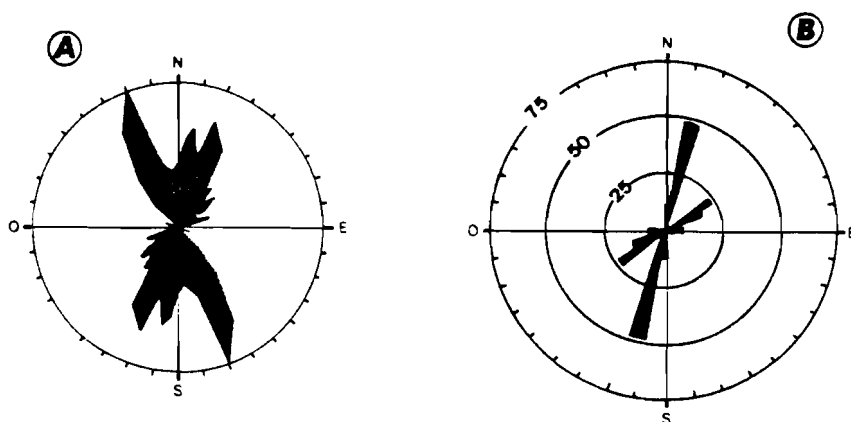


Fig. 30 : FRACTURATION ET ORIENTATION DES CAVITES KARSTIQUES

A : accidents visibles sur photos aériennes (d'après BERGERAT 1985)

B : longueur cumulée de galeries : gouffre de Caladaire (d'après MALZIEU 1984)

- . Aven Jean-Nouveau : 573 m
- . Trou Souffleur ou rivière souterraine de St Christol : 610 m
- . Aven Autran : 613 m
- . Aven du Caladaire : 667 m (voir fig. 29).

L'absence de réseaux perchés et la rareté des grottes amènent à penser que les positions relatives de l'impluvium et du niveau de base n'ont pas connu de phase de stabilité depuis l'épisode orogénique ponto-pliocène.

Il existe une relation indéniable entre les formes karstiques superficielles ou souterraines et la fracturation (WEYDERT, 1963,1965).

Les dolines sont souvent situées à des intersections de fractures. A l'Ouest de St-Christol, des failles délimitent le polje de Brouville. L'orientation des galeries du gouffre de Caladaire montre une bonne corrélation avec la direction des fractures ayant joué en distension à l'Oligocène (fig. 30).

II.7.3. Hydrogéologie

A. *Emergences (fig. 28)*

De nombreuses petites sources drainent les bordures du massif calcaire. Quelques unes seulement ont un débit moyen égal ou supérieur à $10 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Ainsi dans la vallée du Toulourenc, les sources de la Méouge, de la Font de Marin et de Notre-Dame des Anges drainent le versant Nord de la chaîne Ventoux-Lure.

Le flanc nord de l'arête occidentale du Ventoux est drainé par la source du Groseau. Cette émergence karstique pérenne, située à 400 m d'altitude, est dominée par un relief subvertical de faille de direction N15.

L'eau, issue de fissures impénétrables, est captée par la ville de Malaucène et par une papeterie. Son débit (difficile à mesurer) semble assez régulier (50 à $200 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$).

Le Lubéron évacue vers la Durance un débit recensé de $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, principalement par les sources du Mirail et des Borrys (SILVESTRE, 1977).

Constituant à elle seule 95 % des sorties du bassin, la Fontaine de Vaucluse est presque considérée comme son exutoire unique.

Située sur un accident secondaire de l'Urgonien à 500 m de l'Est de la faille bordière NS, l'émergence apparaît au point topographiquement le plus bas du contact de la série calcaire avec les terrains plus récents.

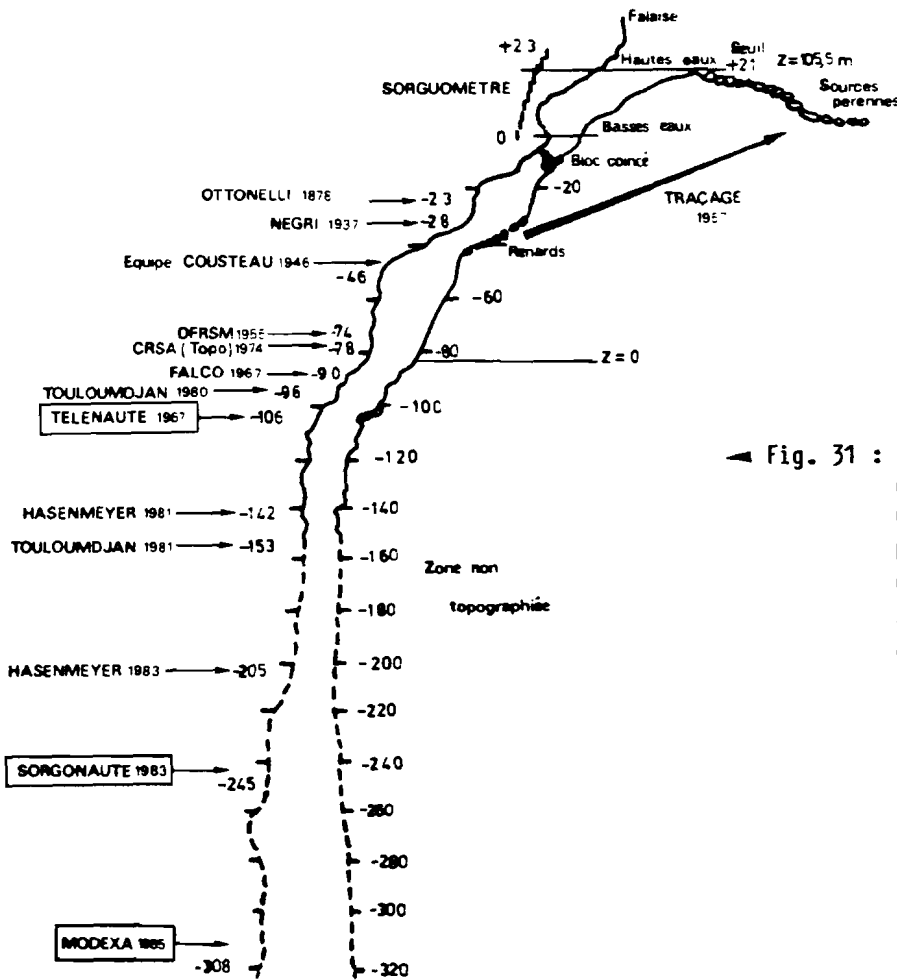
Au pied d'une falaise de calcaire urgonien haute de 200 m, une large vasque s'ouvre à l'amont d'un thalweg chaotique, dans lequel des griffons s'échelonnent sur plusieurs centaines de mètres, en rive droite. Au-dessous de la cote 83 m, les émergences sont pérennes. Pour des débits supérieurs au débit minimum, des sorties étagées entre la cote 83 et le seuil de débordement de la vasque (105,55 m) entrent successivement en action. Le débordement se produit pour des débits supérieurs à environ $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

En basses eaux, le plan d'eau de la vasque atteint parfois la cote 84 m NGF. Les débits de la Fontaine sont connus grâce à la mesure d'une hauteur d'eau dans la vasque supérieure, actuellement à l'aide d'un capteur de pression relié à un enregistreur car le niveau oscille de plus de 20 m, entre étiages et crues et depuis 1867 à l'aide d'une échelle limnimétrique appelée sorguomètre. Deux

stations de jaugeage équipées de limnigraphes ont fonctionné successivement plus en aval sur la rivière Sorgue au bassin des Espélugues à l'Isle-Sur-Sorgue et à Mousquety. Elles ont permis au service exploitant des stations (BRGM) d'établir les correspondances entre hauteur d'eau dans la vasque et débit.

Un certain nombre de reconnaissances par plongées humaines ou appareils ont permis d'explorer le conduit noyé jusqu'à une profondeur de 308 m soit plus de 200 m sous le niveau de la mer (fig. 31).

Quatre kilomètres au Sud dans le même contexte géologique, les petites sources temporaires de la Folie à la cote 92 m, servent de trop-plein à la Fontaine de Vaucluse.



◀ Fig. 31 : FONTAINE DE VAUCLUSE : COUPE DE L'EMERGENCE ET PRINCIPALES ETAPES DE SON EXPLORATION (d'après VIARD in STAIGRE 1983, et complété).

B. Traçages

Les essais de traçage du bassin versant ont permis de confirmer les relations entre l'impluvium calcaire que nous avons défini et la Fontaine de Vaucluse. Ils sont peu nombreux : en effet les distances à parcourir (plusieurs dizaines de kilomètres) et le débit de l'émergence imposent l'emploi de grandes quantités de traceur . En outre, les points d'injection possibles sont rares : le seul cours d'eau qui se perde dans le calcaire est la Nesque. Ce ruisseau pérenne sur les formations peu perméables du fossé de Sault s'infiltré totalement (sauf par très fortes précipitations) en arrivant sur les calcaires urgoniens à l'aval de Monieux où une coloration a été effectuée.

Les autres sites utilisés sont des avens dans lesquels des circulations permettent l'entraînement du colorant : Caladaire (à -445 m, voir fig. 29), à Montsalier (Alpes de Haute-Provence) ; Jean-Nouveau (à -324 m) à St-Jean de Sault (Vaucluse) ; Château de St Christol (à -60 m) ; la Belette (à -15m), à Ongles (Alpes de Haute Provence).

Le sixième et dernier traçage a été opéré sur la perte du trop plein d'une petite source captée au Ravin de la Frache à la limite des communes de Flassans et de Monieux (Vaucluse).

Ces expériences prouvent le drainage par la Fontaine de secteurs qui en sont éloignés de 22 à 46 km. Les vitesses de transit sont très variables, 12 m.h⁻¹ à l'étiage (Jean Nouveau - été 1967), 222 m.h⁻¹ en grande crue (St Christol - printemps 1974).

Malheureusement, tous les points d'injection sont dans le même contexte structural : retombée méridionale de la chaîne Ventoux-Lure ; aucun essai n'a été effectué depuis le bassin d'Apt (pertes éventuelles du Calavon), ni depuis le Lubéron, dont l'appartenance au bassin est discutable.

Ces essais de traçage ne fournissent qu'une certitude de relation par des voies préférentielles.

C. Limites

Les résultats des colorations permettent d'inclure dans le bassin versant le flanc sud de la chaîne Ventoux-Lure, à l'exception peut être de ses extrémités occidentale et orientale.

Le bassin d'Apt, comblé par des sédiments peu perméables et drainé par un cours d'eau pérenne, le Calavon, est à exclure du bassin versant.

Dès 1958, a été formulée (CORROY et al.) l'hypothèse d'une contribution du Lubéron à l'alimentation de la Fontaine. Il y a en effet continuité des calcaires sous le bassin d'Apt (fig. 27). Cette hypothèse a conduit à penser que d'importantes réserves pourraient s'y trouver en charge (FLANDRIN, 1969). En effet, les forages de cette zone ont un niveau statique à une cote souvent supérieure à celle de la vasque de la Fontaine. Le faible débit évacué par les sources du Lubéron et le déséquilibre de son bilan (SILVESTRE, 1977) pourraient être une preuve indirecte de cette hypothèse.

On doit cependant objecter qu'aucun des forages effectués dans le bassin d'Apt n'a traversé de zones notablement karstifiées : les débits des ouvrages sont dérisoires, ils correspondent à de très faibles valeurs de transmissivité. Les datations effectuées donnent un âge de plusieurs milliers d'années. Bien que traversant sur 7 km un affleurement calcaire (à morphologie karstique) à l'Ouest d'Apt, le Calavon n'y présente pas de pertes mesurables alors que le niveau statique du forage de Bonnieux est à plusieurs dizaines de mètres plus bas. L'affleurement calcaire montre un colmatage très évident.

L'activité de ce karst est donc actuellement nulle.

La continuité des calcaires noyés existe bien mais les mauvaises caractéristiques hydrogéologiques de ce secteur (absence de karstification) limitent fortement les échanges d'eau entre Lubéron et aquifère de Vaucluse (EVIN et al., 1968 ; MARGRITA et al., 1970).

II.7.4. Eléments du bilan

Les arguments exposés ci-dessus nous conduisent à retenir une surface d'environ 1 100 km² pour le bassin versant. Si l'on incluait les affleurements calcaires du Nord du Lubéron, la surface totale n'excéderait pas 1 200 km². La géologie et la topographie interdisent d'étendre le bassin au-delà de cette surface. Les mesures isotopiques permettent de rendre définitivement caduque l'hypothèse ancienne d'un soutien des débits d'étiage par les pertes de la Durance.

Les principaux paramètres climatiques intéressant l'hydrogéologie sont résumés sur le tableau 2. (Période 1971-1980, stations de Carpentras-Serres et St Christol météorologie nationale).

Données moyennes annuelles	Carpentras-Serres altitude : 99 m	St-Christol météo altitude : 830 m
Précipitations mm.....	667	1 132
// nombre de jours...	102	114,1
Températures °C.....	13,3	8,9
// nombre de jours \leq 0°C....	49,1	119,5
// nombre de jours \leq - 5°C....	7,0	32,4
Nombre de jours de brouillard	11,0	10,1
// d'orage.....	23,3	21,1
// de neige.....	2	22,4
// de sol couvert de neige..	0,7	20,7
// de vent \geq 16 m.s ⁻¹	57,5	50,1 *
// de vent \geq 23 m.s ⁻¹	7,5	-
Insolation heures.....	26 61	-
rayonnement global 10 ⁶ J.m ⁻²	541,74	-

* 1974-1980

Tabl. 2 - PARAMETRES CLIMATIQUES DU SYSTEME DE VAUCLUSE (MUDRY et PUIG 1987)

A la lecture de ce tableau, on remarque les caractéristiques du climat méditerranéen et de ses variantes montagnardes dont les paramètres (hauteur et nature des précipitations, températures) sont pondérés par l'altitude; on remarquera le faible nombre de jours de pluie, la fréquence importante des vents violents (mistral), l'insolation prolongée et la forte valeur de rayonnement global. Il gèle deux fois plus de jours à St Christol qu'à Carpentras, et il neige plus fréquemment.

Le bilan a été effectué sur l'année moyenne 1976-1981 par tranches d'altitude, avec pondération par leur surface, au pas de temps mensuel (tableau 3).

!		!
!	Surface	1 115 km ² !
!	Altitude moyenne pondérée	870 m !
!	Altitude moyenne oxygène 18 ...	850 m !
!	T moyenne annuelle pondérée ...	9,61°C !
!	Précipitation annuelle pondérée	1 117 mm !
!	Somme ETR mensuelles Turc	!
!	(RFU = 20 mm, saturée au départ)	548 mm !
!	Pluie efficace	569 mm !
!	Lame eau écoulée	!
!	Fontaine de Vaucluse	616 mm !
!		!

Tabl. 3 - BILAN DU SYSTEME DE VAUCLUSE (MUDRY et PUIG 1987)

A titre indicatif, l'application de la formule d'ETR de Turc annuelle donne un résultat très voisin, avec une lame d'eau disponible de 593 mm.

La différence entre pluie efficace et lame d'eau écoulée (47 mm) est peu importante, mais la prise en compte d'un certain nombre de facteurs pourrait l'aggraver :

- exclusion éventuelle des extrémités du Ventoux et de la Montagne de Lure du bassin versant ;
- prise en compte de la lame d'eau évacuée par les petites sources ;
- éventualité de sorties occultes vers la plaine du Comtat, impossibles à évaluer (MICHELOT et MUDRY, 1986).

Pour tenter d'équilibrer le bilan, plutôt que de chercher à augmenter la surface de l'impluvium, il serait plus réaliste de remettre en question l'estimation de l'ETR : si les précipitations et températures sont mesurées avec une relative précision, la mesure du rayonnement global demanderait à être faite sur l'impluvium même et non dans la plaine.

C H A P I T R E III

A N A L Y S E S A U P A S D E
T E M P S H E B D O M A D A I R E

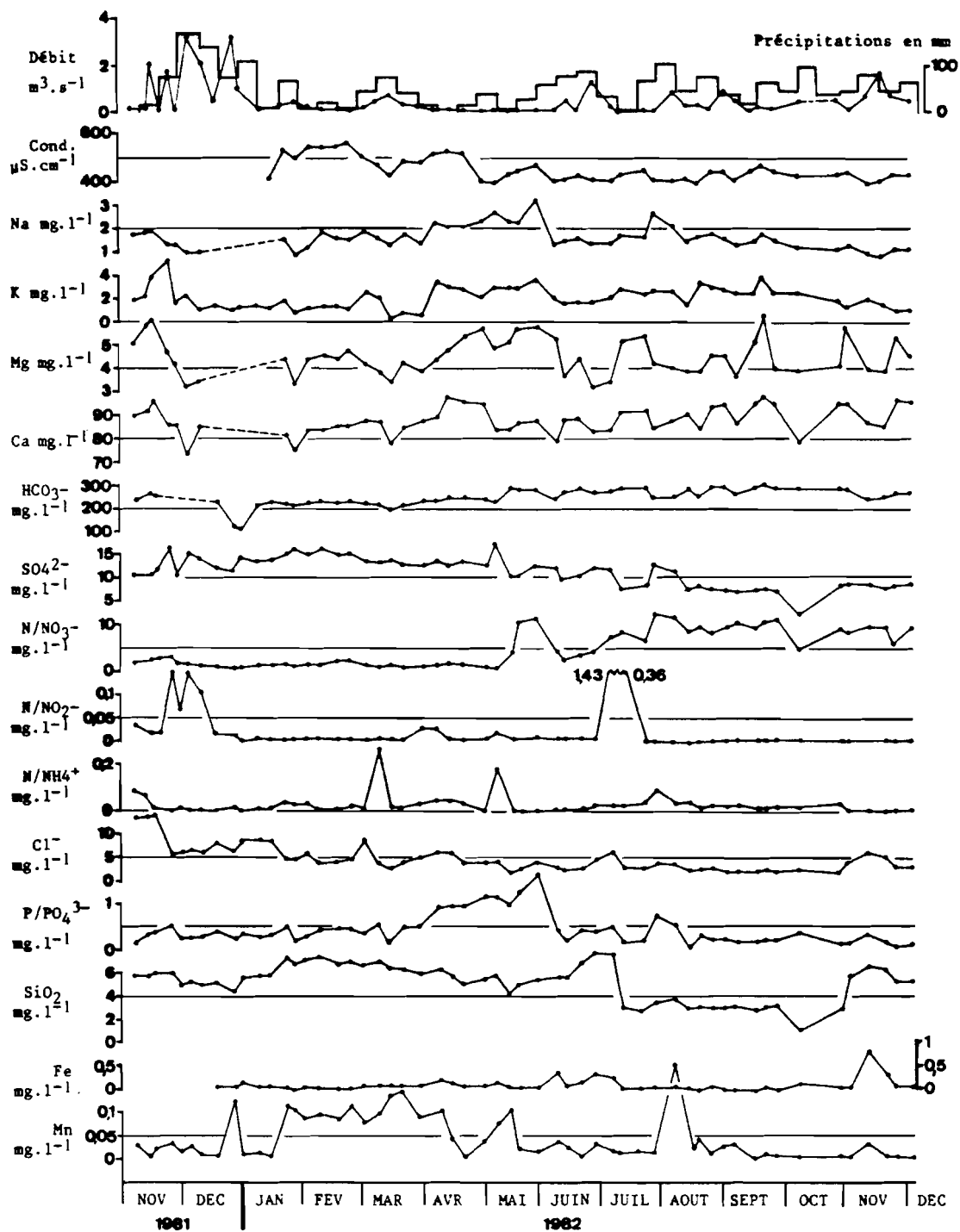


Fig. 32 : VERNEAU : VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

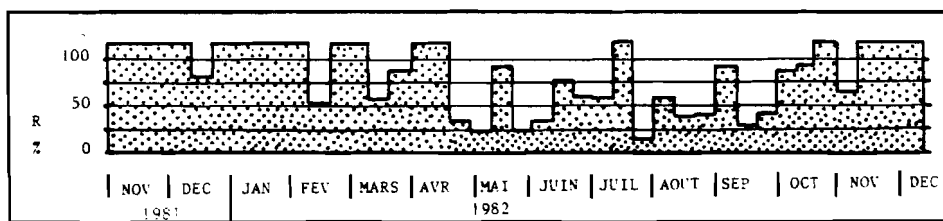


Fig. 33 : VERNEAU : RENDEMENT DES PRECIPITATIONS - $R \% = 100 \times (Q_{xt}) / (P \times S)$

ANALYSES AU PAS DE TEMPS HEBDOMADAIRE

III.1. COURBES DE VARIATION

III.1.1 Courbes de variation de la source du Verneau (fig. 32)

En haut de la figure 32 les phénomènes hydrométéorologiques responsables des variations chimiques de l'émergence, les précipitations à Amancey et les débits du Verneau sont représentés par décades. En effet, l'utilisation d'un pas de temps hebdomadaire pour des prélèvements sur une émergence à réponse très rapide ne s'accomode pas bien de valeurs journalières de précipitations et de débit. On remarquera le "rendement" de la pluie différent selon la saison (fig. 33). Ce "rendement" décadaire représente le quotient du volume d'eau évacué par l'émergence ($V_e = Q_e \times t$) au volume des précipitations de la décade ($V_p = P \times s$).

$$R \% = 100 \times V_e / V_p$$

Les courbes de variations de la conductivité, du magnésium et du calcium montrent un comportement opposé à celui du débit et des précipitations.

On peut remarquer que certaines variations estivales (par exemple celles des éléments déjà cités et des sulfates) sont induites par des précipitations n'ayant pas engendré une réponse hydrodynamique importante.

Les périodes de basses valeurs de bicarbonates coïncident avec les pluies les plus abondantes et les débits les plus forts. Les valeurs décrivent une sinusoïde saisonnière avec basses valeurs au printemps et valeurs élevées en automne, de même pour le potassium.

Les chlorures, la silice et les sulfates en revanche montrent une variation sinusoïdale inversée, avec maximum de printemps et minimum d'automne.

Certains éléments (composés azotés, phosphates, fer, manganèse) ont une valeur stabilisée dont émergent des pics positifs liés aux épisodes hydrométéorologiques.

Nous avons tenté une analyse des périodes de teneur caractéristiques confrontées au débit et aux précipitations. Cette analyse consiste en une simplification des courbes de variation qui ne prend en compte que les variations significatives de teneur. Ainsi, sur la figure 34, seuls les pics de dilution observés en dessous de la tendance saisonnière ont été retenus pour la conductivité, les teneurs en magnésium, calcium et bicarbonate. Les pics et dilutions des figures suivantes ont été déterminés de la même manière.

A- Conductivité, Magnésium, Calcium, Bicarbonates (fig. 34)

La figure compare les périodes bien synchronisées entre elles de diminution de la conductivité, du magnésium, du calcium et des bicarbonates. Ces diminutions

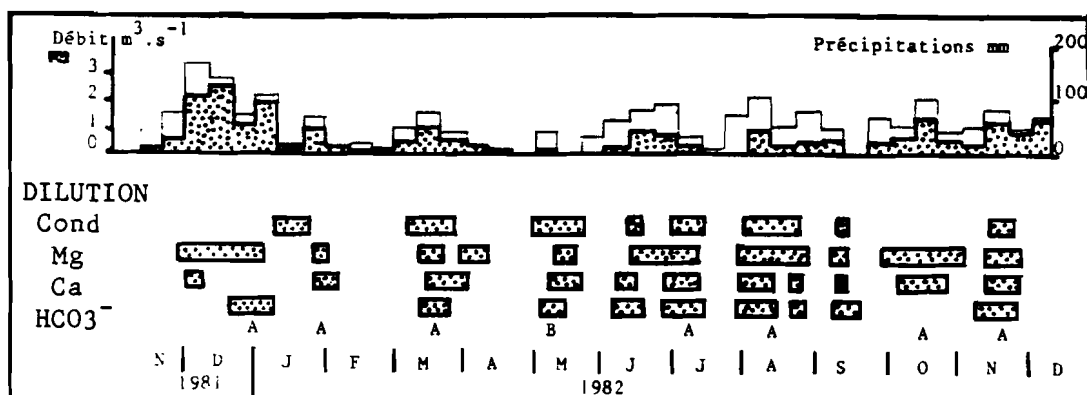


Fig. 34 : VERNEAU : DILUTION DES TRACEURS CALCO-CARBONIQUES

sont provoquées par la dilution des eaux de réserves du Verneau (sol, zone non saturée et zone noyée), par les eaux météoriques "fraîches". Cette dilution s'opère à débit élevé (A), mais aussi après des précipitations à rendement faible (B), ce qui atteste une restitution d'eau peu minéralisée à faible débit (infiltration retardée).

B- Formes de l'azote (fig. 35)

La figure 35 confronte le comportement des composés azotés. Les teneurs élevées en nitrates apparaissent en périodes de basses eaux et en début des épisodes de crue, en revanche, les nitrites s'observent soit au pic de crue, soit en décrue. Les pics de l'ammonium peuvent se rencontrer ou bien seuls, ou bien associés à des pics de nitrates ou de nitrites.

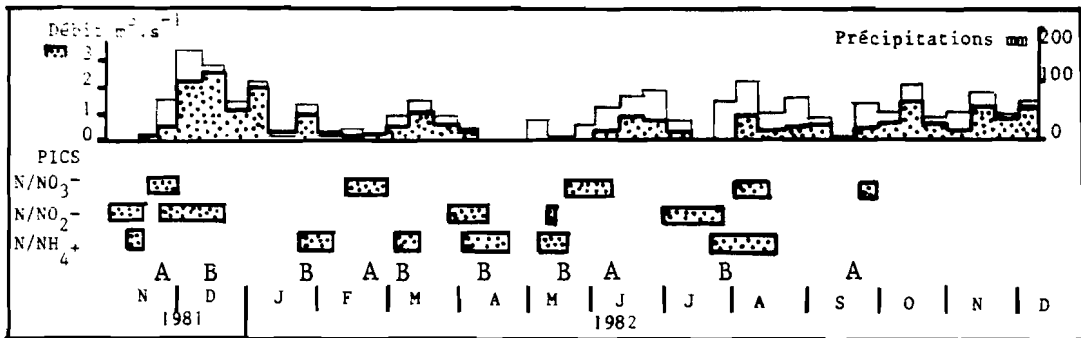


Fig. 35 : VERNEAU : PICS DES COMPOSES AZOTES

La forme stable de l'azote dans les conditions de milieu karstique oxygéné est la forme nitrate. L'ammonium peut provenir soit d'engrais sur le bassin versant (nitrate d'ammonium), soit des eaux-vannes directement rejetées dans le milieu souterrain. Les nitrites, en revanche sont instables et tendent à s'oxyder en nitrates. L'existence de formes réduites instables dans les eaux du Verneau atteste un transit rapide à travers le système permettant de préserver jusqu'à l'exutoire le déséquilibre observable à l'amont du système. Les pics de nitrites correspondent donc au transit des eaux d'infiltration, ils peuvent être utilisés comme le ΔpH ou la pCO_2 pour attester le passage d'eaux non à l'équilibre avec les conditions du milieu. L'azote montre des phases hydrocinématiques intéressantes : la pluie chasse des milieux superficiels des eaux ayant séjourné suffisamment longtemps pour que l'azote soit sous sa forme oxydée, nitrate (A). L'infiltration rapide et retardée, grâce aux vitesses de transit élevées apporte des formes réduites de l'azote jusqu'à l'exutoire (B).

C - Fer et Manganèse (fig. 36)

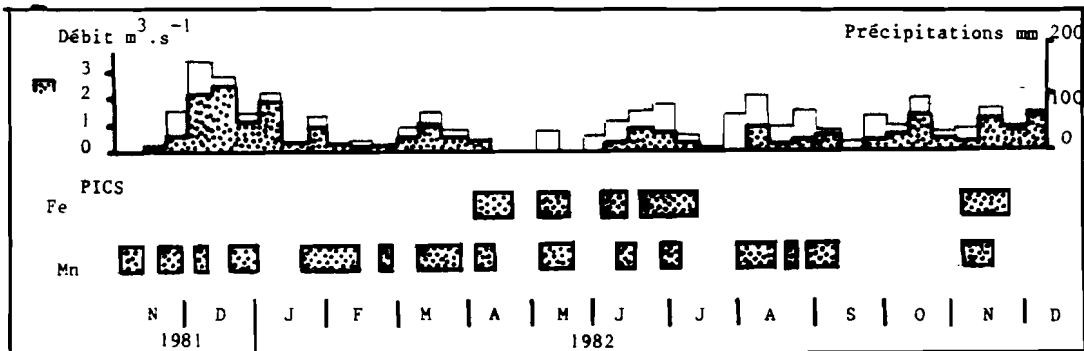


Fig. 36 : VERNEAU : PICS DE FER ET DE MANGANESE

Au cours de la période étudiée, les pics de fer ont été beaucoup plus rares que ceux de manganèse, bien que le fer soit l'élément le plus abondant. Il semble donc exister des facteurs limitants dans la mise en solution du fer.

D - Sodium, Potassium et Phosphates (fig. 37)

Les teneurs élevées en ces 3 éléments s'observent au cours des périodes de basses eaux et en début des crues, les basses teneurs au pic de crue ou en décrue.

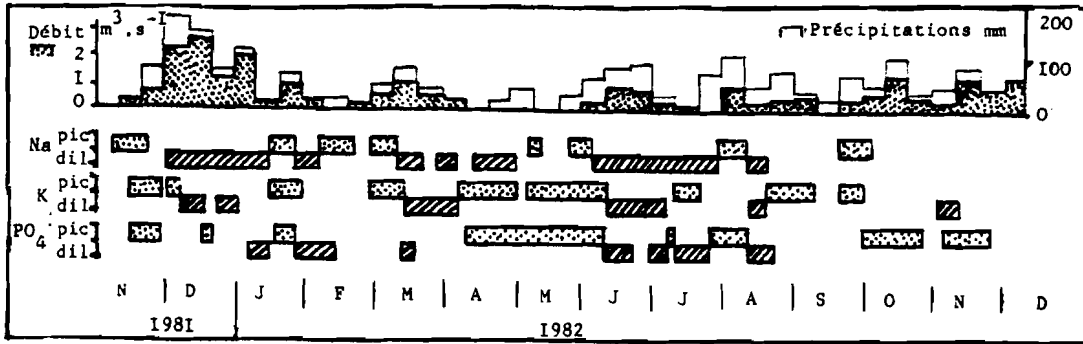


Fig. 37 : VERNEAU : LESSIVAGE ET DILUTION DU SODIUM, DU POTASSIUM ET DES PHOSPHATES

E - Silice, Sulfates, Chlorures (fig. 38)

Ces éléments présentent des teneurs élevées au cours des épisodes de crue et de faibles teneurs en basses eaux ou pendant certaines crues. L'histogramme du bas somme les trois éléments en ajoutant les périodes à forte ou à faible teneur : les épisodes à fortes teneurs sont synchrones des principaux pics de débit ; les décrues et certains pics de crue correspondent à de faibles teneurs.

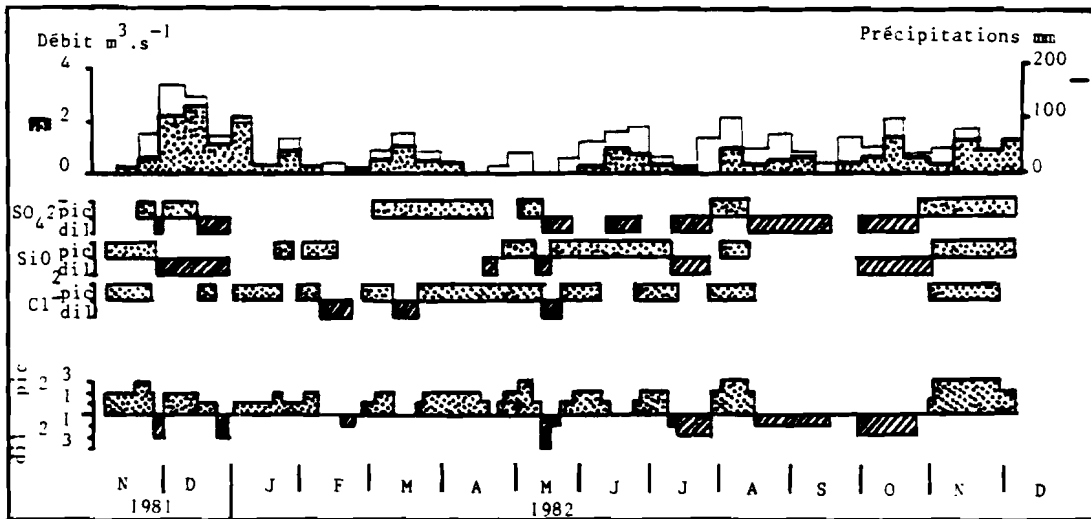


Fig. 38 : VERNEAU : LESSIVAGE ET DILUTION DE LA SILICE, DES SULFATES ET DES CHLORURES

F - Conclusion

Les eaux qui émergent au Verneau au cours d'un cycle hydrologique ont donc acquis une minéralisation variée dans tous les milieux rencontrés : le sol et les bassins marneux de l'amont peuvent fournir les traceurs non spécifiquement karstiques, par exemple SiO₂, SO₄, Cl, Mn, Fe à origine géologique (marnes SCHOELLER 1962) ou météorique (précipitations). La pluie chasse de ces milieux

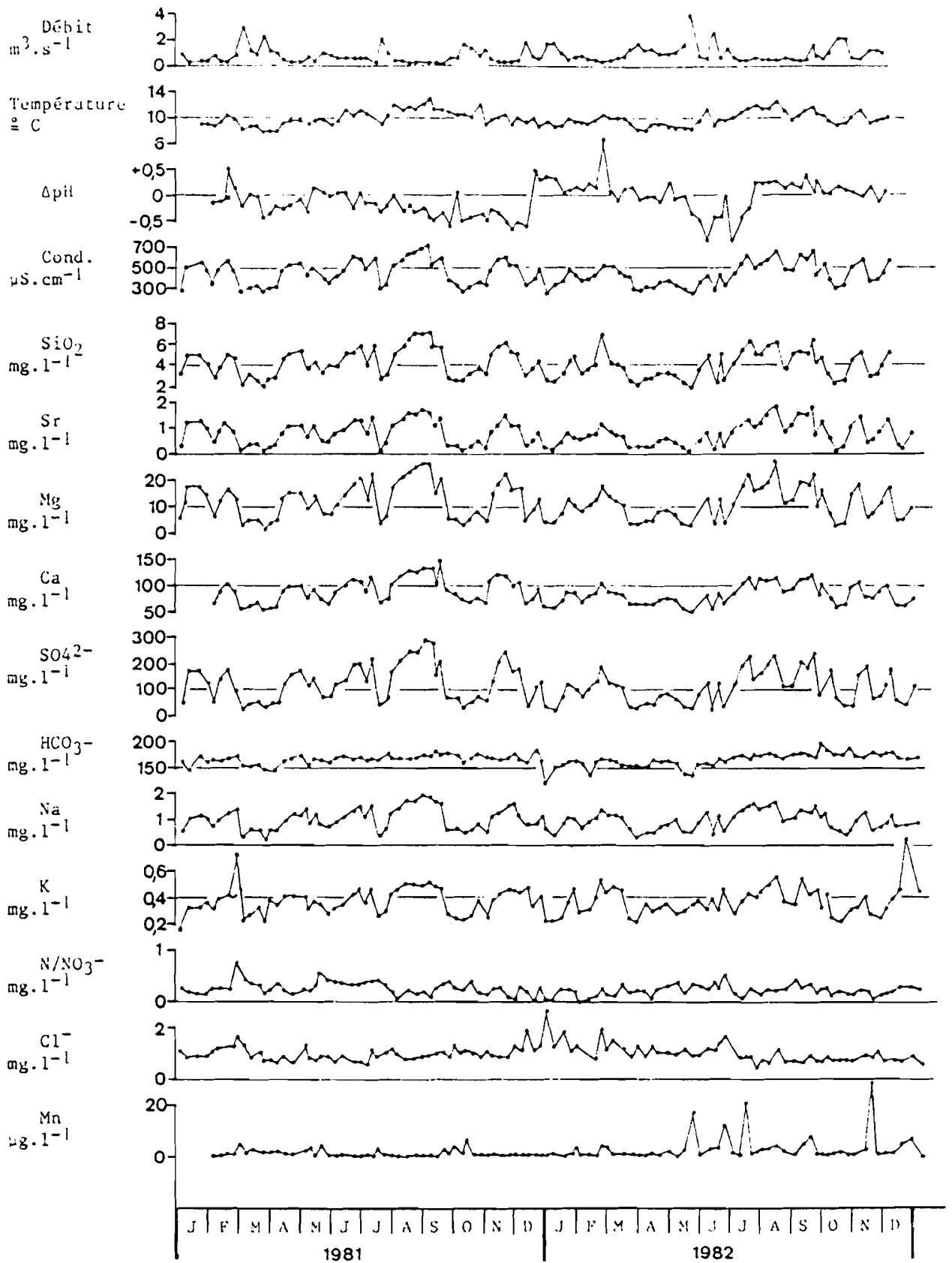


Fig. 39 : PONT DE GYS : VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

superficiels l'eau qui y est présente. Cette eau contient de l'azote à l'état oxydé (nitrates). Les eaux du sol, lorsqu'elles arrivent à l'exutoire par le réseau de drainage, (collecteur du Verneau), sont enrichies en silice, sulfates et chlorures. Cette infiltration chasse devant elle l'eau présente dans le karst, riche en magnésium, calcium et bicarbonates, qui a la même composition stable que celle de l'étiage précédent. La première phase de la crue comprend donc la chasse des eaux spécifiquement karstiques, puis le passage à l'exutoire des eaux des sols et des marnes de l'impluvium, puis le passage de l'eau d'infiltration proprement dite, qui, elle, est appauvrie en traceurs du sol et du karst : ce sont ces eaux sous-saturées et contenant encore un azote sous forme réduite (nitrites) qui montrent des teneurs diluées en magnésium. Malgré la grande rapidité de réponse du Verneau aux événements hydroclimatiques, il y a un décalage entre transferts de pression et transits (ou transfert de masse). Ce décalage est sensible à notre échelle d'observation hebdomadaire.

En outre, certaines variations chimiques s'opèrent en même temps que des épisodes pluvieux ayant peu d'impact sur le débit, ce qui atteste l'existence d'un emmagasinement temporaire et d'une restitution lente ou infiltration retardée. La situation géologique originale du Verneau permet de situer ce milieu capacitif dans les formations marneuses et leur couverture pédologique, en effet la dilution des bicarbonates, du magnésium et du calcium s'accompagne de pics de silice, de sulfates, d'ammonium et de sodium.

III.1.2. Courbes de variations de la source du Pont de Gys (1981-1982)

A - Variations temporelles

La figure 39 résume le comportement des paramètres physico-chimiques au cours des deux années 1981-1982.

a) Débit, Température, Saturation

Le débit de la source, au moment des prélèvements est généralement peu élevé. Les pics principaux sont brefs ; les décrues sont rapides : en effet, les crues isolées du Pont de Gys ont une durée généralement inférieure à la semaine. La température montre une évolution cyclique sinusoïdale, elle varie de 8 à 13°C environ. La fréquence des épisodes de crue de la période hivernale perturbe l'équilibre thermique eau-roche au Pont de Gys. On doit remarquer que les températures maximales sont supérieures à la valeur attendue à l'examen du gradient régional dans ce secteur (-0,7°C/100m environ) . On doit donc, compte tenu de la géologie, penser à la contribution d'eaux provenant de milieux plus profonds que le karst du Niffon.

La courbe de saturation (ΔpH) montre la fréquence du passage des eaux agressives à l'émergence, surtout en 1981.

b) Eléments aux variations synchrones et de même sens

La comparaison des courbes de conductivité, silice, strontium, magnésium, calcium, sulfates et sodium montre un parfait synchronisme des variations et un comportement rigoureusement identique de tous ces descripteurs. A première vue ces courbes sont inversées par rapport au débit, leurs variations semblent résulter d'une simple dilution de la composante évaporitique du Trias par les eaux d'infiltration moins chargées. Cette unité triasique très marquée au point de vue chimique occulte le fonctionnement karstique du système, et on ne peut dès lors pas utiliser le magnésium et la silice pour en étudier le comportement.

c) Potassium

Le potassium montre une allure générale semblable à celle des marqueurs triasiques. Cependant, la teneur stabilisée de $0,5 \text{ mg.l}^{-1}$, atteinte lors du ta-

rissement (à la chimie stabilisée) que l'on observe en été 1981, est dépassée plusieurs fois au cours des deux cycles sous forme de pics aigus de durée limitée. Ces pics s'observent en basses eaux ou en début de montée de crue, généralement en même temps que des pics de nitrate, chlorure et manganèse.

d) bicarbonates

La teneur en bicarbonates décrit une sinusoïde de période annuelle. En plus de cette distribution structurée liée au climat, des fluctuations aléatoires en relation avec les épisodes hydrométéorologiques peuvent être notées. Ces fluctuations sont de faible amplitude. Certaines variations sont des accroissements de teneur, d'autres des diminutions. Il est intéressant de constater que les amples variations de la courbe des sulfates par exemple ne sont pas forcément reliées à des variations de la teneur en bicarbonates, ce qui atteste que les phénomènes de dissolution des carbonates et de dilution des eaux à origine évaporitique ne s'opèrent pas dans les mêmes lieux, compte tenu du fait que les dilutions n'engendrent pas de précipitations de calcite.

e) Nitrates. Chlorures. Manganèse

Ces trois ions, à origine superficielle montrent des caractères communs bien que non synchronisés : leur teneur "au repos" (tarissement) est une basse teneur, et les événements hydrométéorologiques produisant des pics, généralement brefs, sont liés aux épisodes de crue. (Ils apparaissent souvent en montée, au pic ou en descente de crue).

B - Synthèse des informations des courbes de variation

L'examen des courbes de variation a permis d'identifier le transit d'eau d'infiltration rapide dans l'écoulement de l'émergence : sur la figure 40 ont été représentées les périodes pendant lesquelles le débit a excédé $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la température était inférieure à la sinusoïde saisonnière, les eaux ont été sous-saturées, la teneur en sulfates a été inférieure à $150 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ et pendant lesquelles le potassium a été supérieur à $0,3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, les chlorures ont dépassé $0,5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ et le manganèse a excédé $2 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Deux remarques viennent à l'esprit :

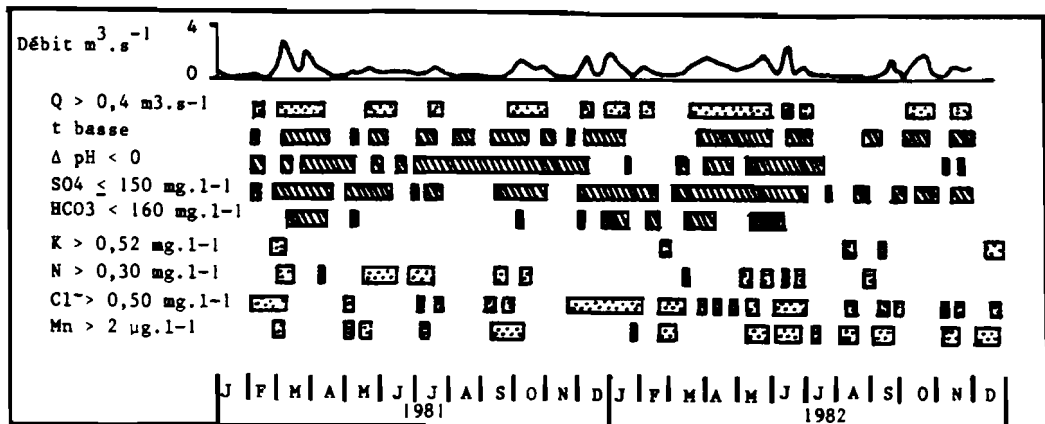


Fig. 40 : PONT DE GYS : INDICATEURS DE TRANSIT D'EAUX D'INFILTRATION

- les périodes d'indicateurs à basses valeurs (dilution) sont plus longues que les périodes à indicateurs à valeurs élevées, ce qui rappelle que le phénomène de dilution dure plus longtemps que celui de lessivage, le stock de traceur disponible ou la quantité solubilisable étant limités.

- Au cours des cycles 1981 et 82, aucune période n'est exempte d'indicateurs de transit de l'infiltration rapide : on a une quasi permanence de cette infiltration, y compris lors des épisodes de basses eaux, il faut donc dissocier l'information hydrodynamique de l'information hydrochimique, et nous allons comparer ces deux informations.

a) Température, débit et saturation

La fig.41A analyse la température de la période et distingue les eaux "chaudes" (à l'équilibre avec le magasin) restituées à fort débit, les eaux froides restituées à fort débit, et les eaux froides restituées à faible débit. Les périodes non représentées sont l'état normal de tarissement : température élevée et débit faible. Il faut remarquer qu'aucune crue ne débute par un débit fort d'eau froide : l'infiltration chasse parfois, à fort débit, une eau à l'équilibre thermique avant que les eaux froides ne parviennent à l'émergence. En revanche, la restitution à fort débit d'eaux froides puis chaudes montre que la crue mobilise des réserves hétérogènes, qu'elle affecte les parties profondes de l'aquifère. La présence d'eaux froides apparaissant en fin de décrue ou en basses-eaux, avec un faible débit peut avoir deux significations : persistance d'une infiltration (malgré le faible débit) ou bien persistance, après une crue, d'un déséquilibre thermique dans l'encaissant, ne permettant pas le "réchauffement" de l'eau en transit.

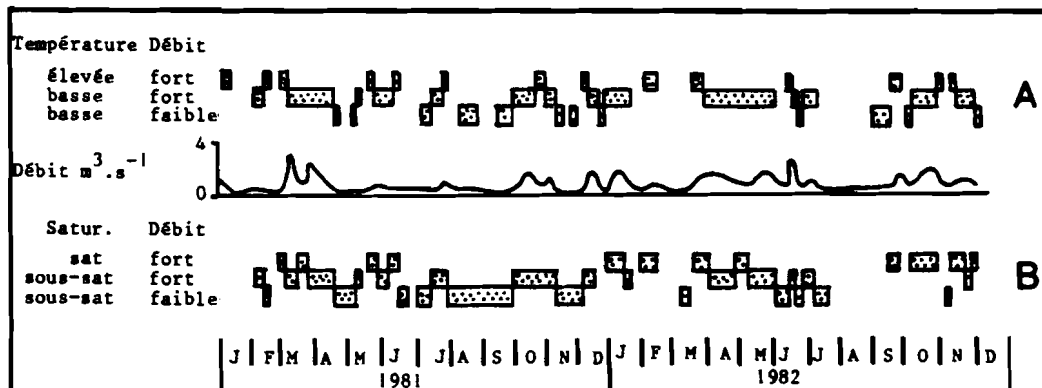


Fig. 41 : PONT DE GYS : DEBIT, TEMPERATURE ET SATURATION

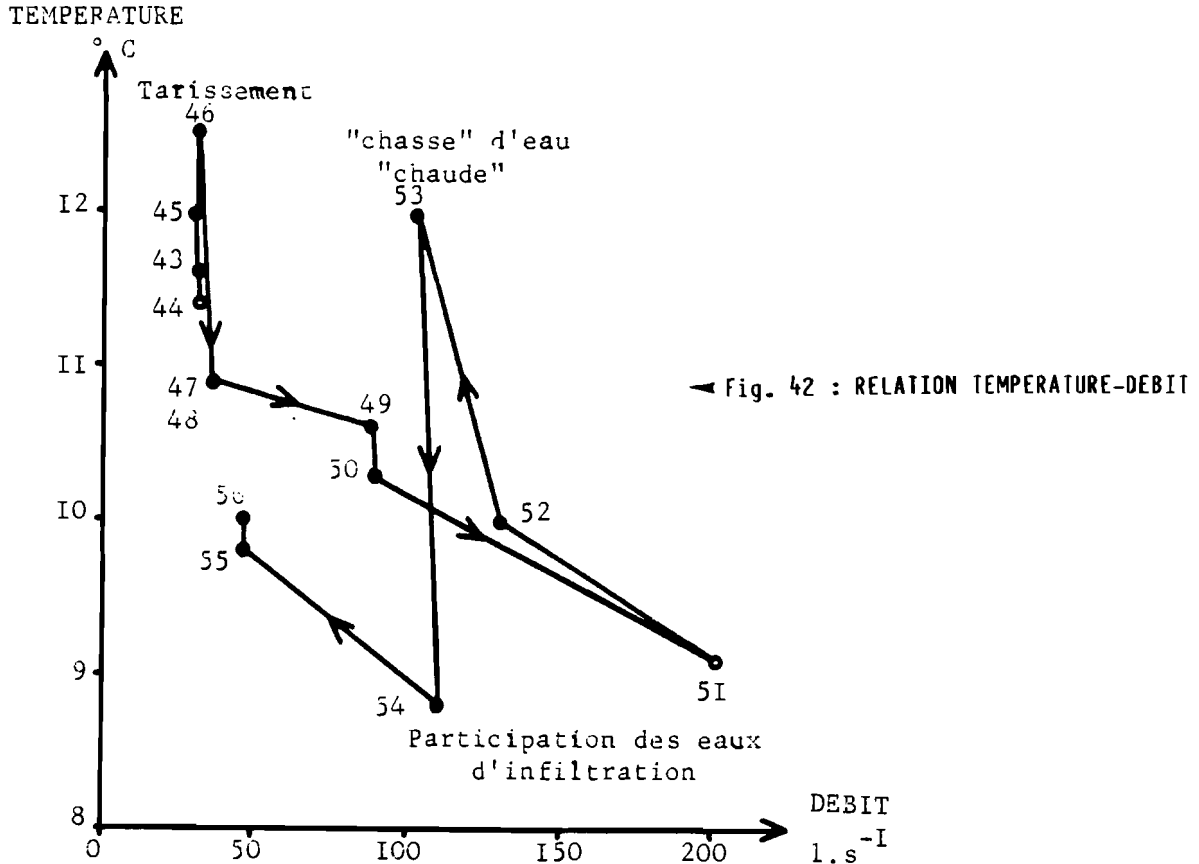
Le diagramme 41B distingue trois familles d'eaux :

- saturées à débit fort,
- sous saturées à débit fort,
- sous saturées à débit faible.

La famille caractéristique du tarissement (saturée à débit faible) n'est pas représentée. Comme pour la température, les crues montrent une chasse à fort débit d'eaux sursaturées, précédant le transit effectif des eaux d'infiltration, sous-saturées, les épisodes de fin de décrue et de tarissement montrant le transit, à faible débit, d'eaux sous-saturées. Il y a donc, pour la température comme pour la saturation, un décalage entre les phénomènes pressentis par l'hydrodynamique et la chimie, les basses eaux n'étant pas synonymes de tarissement au sens qualitatif.

b) Dilution des sulfates et des bicarbonates (fig. 43)

La dilution des sulfates se fait selon un tout autre processus : lors des crues et dès la prime montée des crues, la teneur en sulfate diminue : le schéma le plus fréquent est du type débit faible-sulfates faibles ou forts puis débit



élevé-sulfates faibles puis débit faible-sulfates faibles. Les épisodes avec chasse d'eaux sulfatées à fort débit sont très rares, et la teneur en sulfates réagit très vite à la dilution de début de crue : l'infiltration a peu d'action sur le réservoir profond du Pont de Gys.

Les bicarbonates montrent le phénomène de chasse (au cours de la plupart des crues), suivi d'une dilution. Les faibles teneurs sont en revanche rarement associées à des débits faibles, les transits lents favorisant l'acquisition de teneurs élevées dans la partie superficielle du karst.

La confrontation des paramètres débit-teneurs en bicarbonates et en sulfates permet donc de discerner le fonctionnement "évaporitique" du système de son fonctionnement karstique. La figure 44 compare les basses teneurs en sulfates aux basses teneurs en bicarbonates : on peut remarquer que la situation la plus fréquente est l'écoulement d'une eau faiblement sulfatée et normalement ou assez

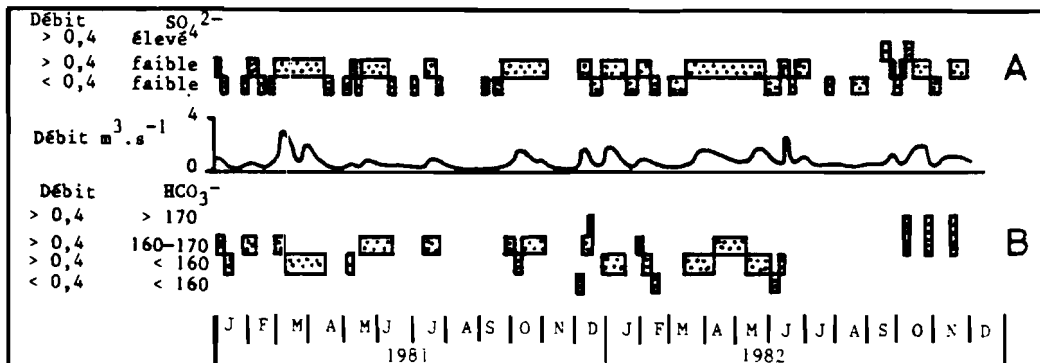


Fig. 43 : PONT DE GYS : DILUTION DES SULFATES ET DES BICARBONATES

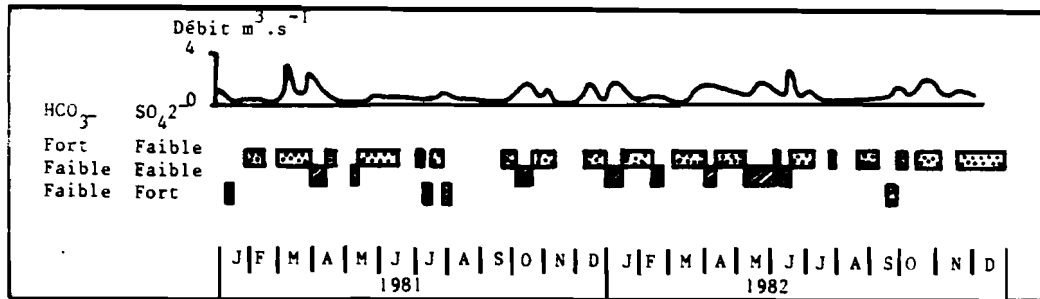


Fig. 44 : PONT DE GYS : EPISODES AVEC SOUS-SATURATION OU AVEC DILUTION

bicarbonatée, que parfois l'émergence restitue des eaux diluées en ces deux anions et qu'il est rare que l'on observe des eaux riches en sulfates et pauvres en bicarbonates : l'acquisition des bicarbonates se fait dans le sol et l'épikarst, elle a donc souvent le temps de se réaliser malgré les équilibres mis en oeuvre (le transit dans la zone d'infiltration semble donc suffisamment lent) alors que celle du gypse, seulement limitée par la solubilité de ce minéral, est plus difficile, le transit à travers les zones profondes étant limité.

c) Indicateurs de lessivage (fig. 45)

Selon les critères de teneurs retenus sur la figure nous avons examiné pour la séquence 1981-82 la présence simultanée des éléments pressentis comme des traceurs du lessivage du sol : potassium, nitrates, chlorures, manganèse. La chronique de la figure 45 représente, en fonction du débit de la source, le nombre de ces ions présents à des concentrations traduisant un lessivage.

On remarquera que ce lessivage intervient avant ou pendant les montées de crue, qu'il marque au Pont de Gys l'infiltration immédiate (avant la montée du débit) et rapide (pendant la crue).

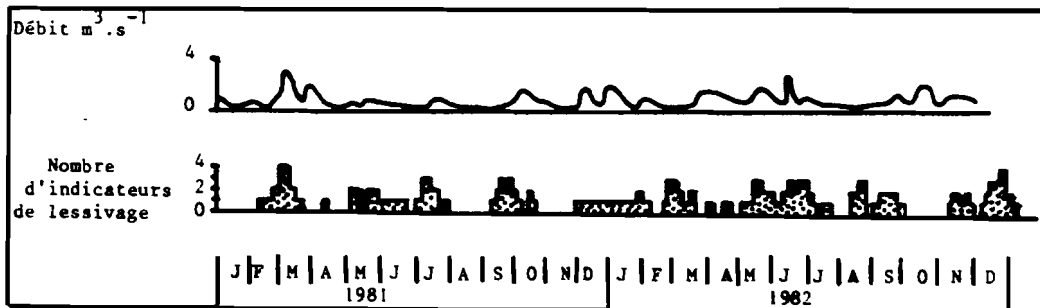


Fig. 45 : PONT DE GYS : INDICATEURS DE LESSIVAGE DU SOL

C - Conclusion

Les indicateurs physico-chimiques nous permettent au Pont de Gys de distinguer un fonctionnement karstique élaboré sur cette source, malgré son oblitération par la participation à l'écoulement d'une unité très marquée chimiquement en de nombreux éléments. Les ions qui autorisent cette étude sont les bicarbonates et les traceurs de l'infiltration acquis dans la zone non saturée et sa couverture pédologique.

Lors des crues se succèdent à l'émergence une infiltration immédiate, à forte concentration et à très faible débit, qui ne marque pas l'hydrogramme, suivie dans la montée de la crue de l'infiltration rapide, chargée en éléments lessivés dans le sol et l'épikarst et appauvrie en éléments de l'unité à la chimie la plus typée (ici le Trias évaporitique). Puis le débit décroît, et en basses eaux

apparaissent encore les eaux d'infiltration différée, riches en bicarbonates acquis au cours de leur transit et diluées en éléments empruntés à l'unité évaporitique.

Cette source montre donc deux caractères originaux : son unité évaporitique, mais aussi son infiltration quasi-permanente. On peut donc considérer le Pont de Gys comme un aquifère à transit permanent d'eaux d'infiltration, alimenté aussi par le Trias.

La source des Plagnes, situées sur l'autre versant du Niffлон, a un comportement identique, aux évaporites triasiques près (elle ne draine qu'un aquifère épikarstique dans les mêmes formations, elle tarit en été) (VUYLSTEEK, 1983).

D - Variations des teneurs hebdomadaires en oxygène 18 et en tritium aux Plagnes et au Pont de Gys (janvier 1979-avril 1980)

a) Tritium

Les teneurs en tritium comparée sur les deux sources (fig. 46) montrent des épisodes d'enchevêtrement des deux courbes, traduisant une similitude

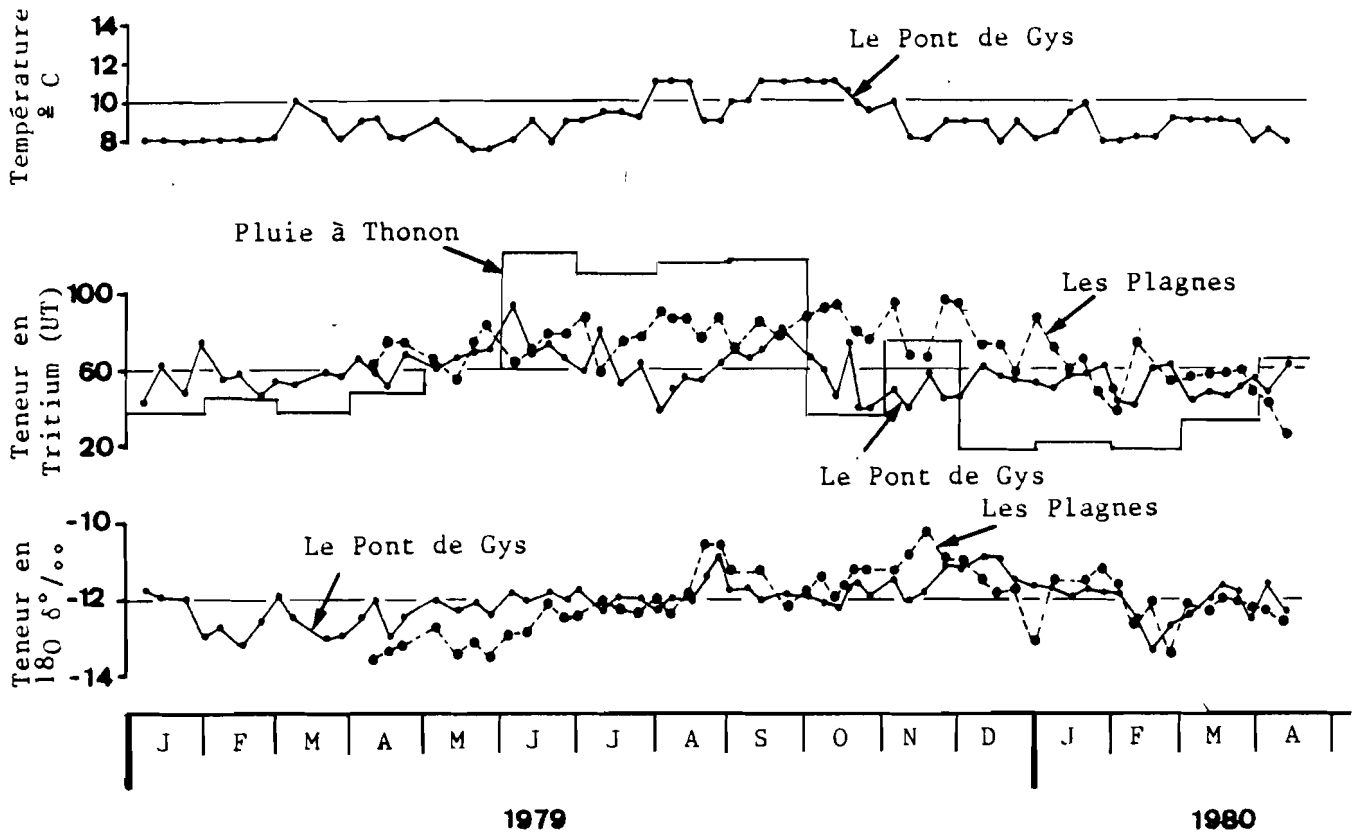


Fig. 46 : LES PLAGNES ET LE PONT DE GYS : OXYGENE 18 ET TRITIUM

de comportement, et des périodes (juillet-août, octobre-janvier) où la courbe du Pont de Gys est significativement en-dessous de celles des Plagnes. La teneur des Plagnes suit une porteuse sinusoïdale plus régulière que celle du Pont de Gys : les deux sources répercutent donc la sinusoïde de l'entrée. cependant cette teneur de la pluie mensuelle montre en 1979 des anomalies qui se répercutent sur les sorties : en juin 1979, on a une teneur de 120 UT encadrée par des valeurs de 60 et de 92. Le Pont de Gys monte instantanément à 95 UT, les Plagnes quatre semaines après à 88 UT. La teneur de la pluie en octobre (36 UT) fait descendre le Pont de Gys jusqu'à cette valeur, puis la teneur de novembre

(74 UT) la fait remonter à 62 UT, celle de décembre (18 UT) la fait redescendre à 44 UT. Dans le même temps, les Plagnes oscillent légèrement autour d'une génératrice descendante.

L'hiver est considéré comme une période où le gel bloque l'infiltration le Pont de Gys reste alors au moins 30 UT au-dessus des précipitations, les Plagnes mettent trois mois pour prendre les basses valeurs des précipitations de décembre-janvier.

Cette comparaison pluie-Plagnes-Pont de Gys permet de tirer les conclusions suivantes :

- Le Pont de Gys est un système moins inerte que les Plagnes, il répercute mieux les impulsions de l'entrée.

- en période de basses eaux (juillet) les basses teneurs du Pont de Gys traduisent la participation à l'écoulement d'eaux anciennes à faible teneur.

C'est cette dualité de fonctionnement-répercussion des infiltrations rapides et mise en mouvement d'eaux à long temps de séjour qui provoque l'irrégularité de sa courbe de variation.

Les Plagnes restituent des eaux mieux mélangées, dont le temps de résidence moyen est plus homogène à la sortie.

b) Oxygène 18 (fig. 46)

La teneur en oxygène 18 des deux sources décrit une sinusoïde annuelle avec un maximum d'automne et un minimum de printemps. L'amplitude générale de la courbe du Pont de Gys est légèrement moins grande que celle des Plagnes ; il apparaît surtout un décalage d'environ 2 mois entre la remontée des teneurs sur le Pont de Gys et sur les Plagnes au printemps, ce qui confirme la différence de la durée de l'enneigement sur le versant sud-est (Pont de Gys) et sur le versant nord-ouest (Plagnes).

Sur l'émergence des Plagnes, l'étude isotopique révèle donc des variations saisonnières de teneurs en tritium à plus faible amplitude que celles du Pont de Gys, et des variations d'oxygène 18 plus amples que celles du Pont de Gys : les Plagnes exhaurent des eaux à temps de séjours bref (faibles réserves) et plus homogène, le Pont de Gys, du fait de ses réserves, amortit mieux la sinusoïde de la pluie mais restitue des recharges à temps de résidence plus varié.

III.1.3. Courbes de variations de l'émergence pérenne de Las Hountas sur le système karstique du Baget

La période juillet-décembre 1981 se caractérise au Baget comme sur les autres émergences méridionales de la France par de basses eaux prolongées jusqu'à la fin novembre, seulement affectées par deux petits épisodes de crue à la mi-juillet et en octobre. Au mois de décembre, le Baget est plus précocement atteint par le début du cycle 1982 que les émergences vauclusiennes (voir p. 94). Cependant, l'examen des débits représentés sur une échelle semi-logarithmique montre l'inadéquation de la courbe de récession pour la détermination d'un coefficient de tarissement. En effet, seuls de très brefs épisodes (fig. 51) début septembre et fin septembre peuvent en toute rigueur être considérés comme du tarissement, les deux périodes étant séparées par de modestes remontées de débit (80 l.s^{-1}). Fin septembre le débit remonte au-dessus de 100 l.s^{-1} , et courant octobre il dépasse 300 l.s^{-1} , cette période ne peut être considérée comme du tarissement. M. BAKALOWICZ (1979) a montré que les épisodes de crue isolés de l'émergence pérenne de las Hountas étaient généralement accompagnée d'une croissance de la minéralisation. Cette observation est également remarquée sur le pas de temps hebdomadaire : les divers éléments ne réagissant pas de manière simultanée, mais selon la période de remontée du débit (fig. 47).

La crue qui a le plus d'impact sur les courbes de variations est l'épisode de la fin octobre, le débit n'y excède pas $1\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La crue de décembre, aux débits atteignant $5\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est également bien marquée dans la chimie. Les montées de débit du mois de juillet ont une influence importante sur certains paramètres (silice). Examinons le comportement des différents traceurs de l'eau au cours de cette séquence.

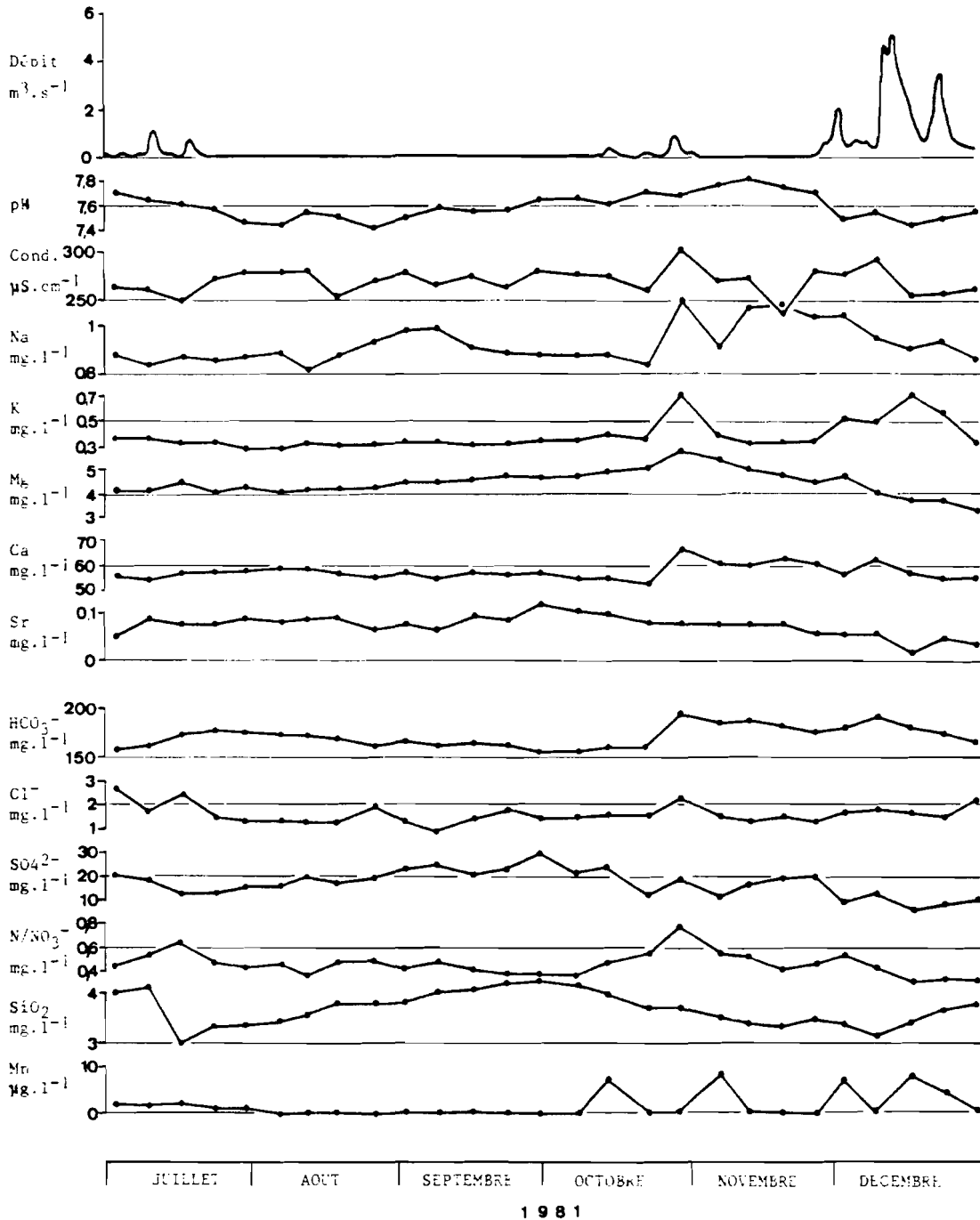


Fig. 47 : BAGET : VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

A - pH et conductivité (fig. 47 et 48)

A la décrue de juillet et pendant l'épisode de fin d'année, le pH diminue, alors qu'il croît pendant les épisodes d'octobre-novembre. Les basses valeurs

liées au passage rapide à l'exutoire d'eaux à pCO_2 élevée, encore agressives (sous-saturée) s'opposent au transit d'eau d'infiltration à faible pCO_2 , saturées ou sursaturées, ayant eu un séjour long dans l'aquifère épikarstique ou la zone noyée.

Les valeurs élevées de la conductivité s'observent pendant les décrues de juillet, fin octobre et les crues de novembre-décembre, les valeurs faibles en juillet, fin août, fin novembre et fin décembre. On remarquera que les débits les plus faibles ont des valeurs de conductivité moyennes et à peu près stabilisées, l'infiltration est donc responsable à la fois des phénomènes de pic et de dilution : l'infiltration mobilise au Baget à la fois des eaux minéralisées et des eaux peu chargées.

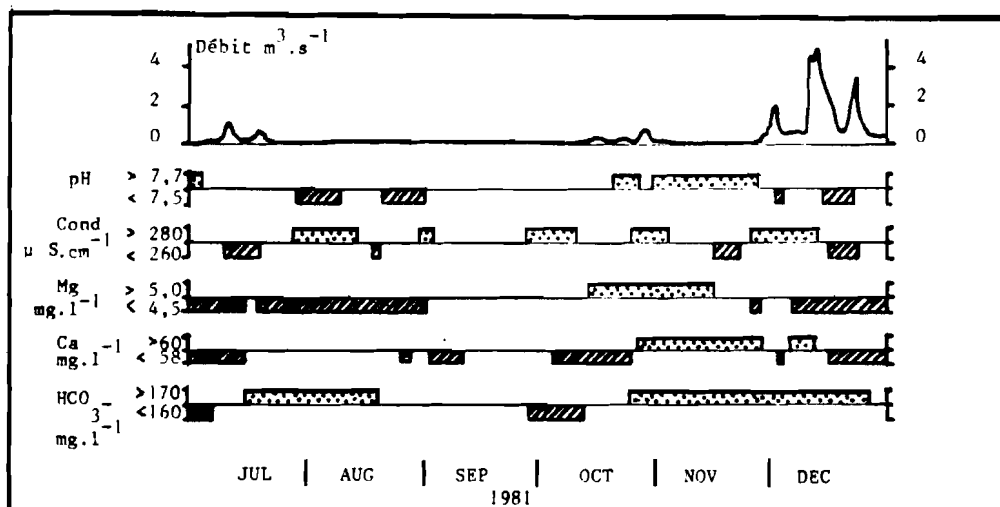


Fig. 48 : BAGET : TRACEURS CALCO-CARBONIQUES

B - Calcium, magnésium, bicarbonates (fig. 47 et 48)

Ces trois éléments signatures du fonctionnement calco-carbonique ont un comportement voisin avec des teneurs moyennes en début de période, et une montée importante fin octobre. On peut remarquer que le calcium reste à un niveau élevé jusque vers la mi-décembre, alors que le magnésium amorce sa diminution bien avant : il est revenu aux valeurs d'avant la crue dès la mi-novembre. Ce mois de décalage représente l'effet de la différence de cinétique de mise en solution des deux éléments. En effet les eaux plus minéralisées de l'épisode de crue proviennent de la zone noyée ou de l'aquifère épikarstique et le déstockage d'eau à temps de séjour long est marqué par de fortes teneurs en calcium et en magnésium. En revanche, lorsque cette composante se mélange avec la composante infiltration qui la mobilise, il apparaît dans l'écoulement des eaux à temps de séjour plus bref, n'ayant pas eu le temps de dissoudre beaucoup de magnésium, alors que le calcium (dont la cinétique d'acquisition est plus rapide - (BAKALOWICZ, 1979) demeure à une valeur plus élevée. Le magnésium est donc au Baget aussi un bon indicateur du temps de séjour relatif de l'eau dans l'aquifère.

C - Strontium, sulfates, silice (fig. 47 et 49)

Les trois composés ont un profil comparable. M. BAKALOWICZ considère qu'au Baget, les sulfates provenant de l'oxydation de la pyrite, sont originaires de la zone noyée.

Les trois courbes montrent des maxima début juillet et fin septembre - début octobre, et des minima fin juillet et en novembre-décembre. Les maxima interviennent pendant les périodes de tarissement, ce qui permet de confirmer l'origine de ces éléments dans la zone noyée. Les minima correspondent à la

élément dont la teneur est régulée par les échanges de base dans les systèmes, particulièrement dans les milieux argileux. On peut donc relever l'ubiquité de cet élément dans son comportement :

- teneur élevée dans les eaux de "tarissement" en septembre.
- pic dû au lessivage lors des crues de novembre-décembre.

Comme les chlorures, le sodium montre de faibles valeurs dans les crues intervenant sur une décrue, attestant aussi l'épuisement du stock disponible en surface.

Le potassium en revanche, aux propriétés voisines de celles du sodium, suit un cycle biogéochimique calqué sur celui de la matière organique. Son comportement enregistre ce cycle : les fortes teneurs, lessivées dans les litières après la chute des feuilles et la décomposition de l'herbe, apparaissent en pic dans les crues de début de cycle hydrologique, (novembre et décembre) alors que le potassium a une teneur régulière et faible au cours des crues et des basses eaux d'été juillet à octobre) lorsqu'il n'est pas disponible en surface.

L'azote nitrique est abondant au cours des pics de crue de juillet et d'octobre. Il est dilué par la crue de décembre.

Le manganèse, élément libéré des roches mères par la pédogénèse signe toujours l'infiltration et le lessivage qu'elle occasionne. Il faut noter un fond élevé du manganèse lors de la crue de juillet, un retour aux valeurs inférieurs à $1 \mu\text{g.l}^{-1}$ en août. Un traçage net de l'infiltration rapide au cours des premiers pics de débit des crues d'octobre et de décembre. On remarquera également le traçage de l'infiltration différée en novembre et au pic de crue de décembre : les eaux marquées émergent pendant la décrue.

La figure 51 synthétise les observations faites sur ces cinq traceurs des milieux superficiels : le graphique cumule le nombre d'éléments à teneur supérieure aux seuils de la figure 50 (concentration = valeurs positives) et à teneur inférieure aux seuils (dilution = valeurs négatives).

On peut remarquer au cours de la période étudiée un lessivage beaucoup plus marqué lors des crues de début de cycle que lors de la crue de juillet.

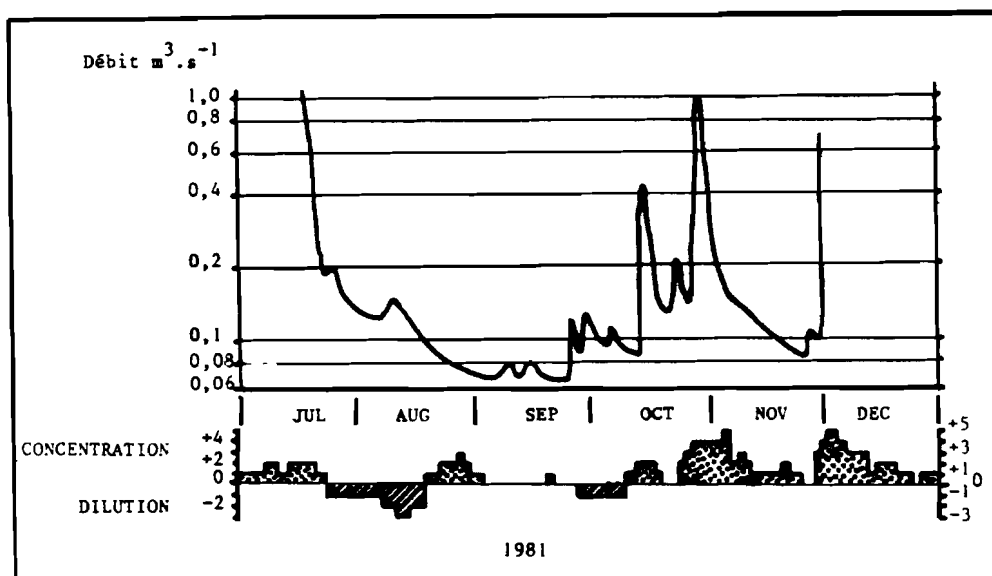


Fig. 51 : BAGET : NOMBRE D'INDICATEURS DE LESSIVAGE ET DE DILUTION

- la dilution importante lors des crues de faible amplitude (septembre-octobre) ou lors des crues intervenant au cours d'une décrue (fin juillet, mi-août). Il est nécessaire d'avoir une impulsion suffisante pour obtenir une réponse.

- le marquage des deux types d'infiltration : rapide en pic de crue (juillet, mi-octobre, fin octobre, fin novembre) et lente en décrue (fin août, mi-novembre).

E - Conclusion

Sur le système karstique du Baget, l'étude des variations de teneurs physico-chimiques nous a permis de décomposer le fonctionnement hydrocinématique en imputant à divers milieux la génération des fluctuations.

Au Baget les éléments dont la teneur est régie par les équilibres calco-carboniques (Ca, Mg, HCO_3^-) croissent lors des épisodes de crue, contrairement à la plupart des émergences karstiques. Cette seule observation pouvait conduire à deux interprétations :

- soit l'infiltration chasse de la zone noyée des eaux de composition chimique différente de celle de l'épisode précédent, il y aurait donc hétérogénéité de cette réserve noyée ;

- soit l'infiltration déplace des eaux de la zone non saturée, - sol et aquifère épikarstique- chargée en ces éléments.

L'examen des traceurs moins ubiquistes plaide en faveur de la deuxième interprétation. On note en effet le synchronisme des pics de calcium, magnésium, bicarbonates et des pics issus du lessivage de la zone non saturée : chlorures, alcalins, nitrates, manganèse, dont l'accumulation ne saurait être envisagée dans l'aquifère saturé. En outre, les paramètres marqueurs d'un temps de séjour long dans une réserve de type "zone noyée", par exemple le rapport $r\text{Mg}/r\text{Ca}$, indiquent une origine superficielle : lors des pics de début de crue (fin octobre) ce rapport diminue. De plus, les éléments liés au battement de la surface piézométrique (sulfates, silice), plus spécifiques de la zone noyée que les ions provenant de la dissolution des carbonates, montrent des teneurs maximales en basses eaux et une dilution lors des crues génératrices de pics des autres éléments.

Certains éléments permettent de mettre en évidence, outre l'infiltration rapide bien corrélée avec les pics de crue, une infiltration différée intervenant tard dans la décrue. L'existence de crues secondaires en cours de décrue, ou de très faibles remontées du débit lors des basses eaux ne se traduisent pas au Baget par une augmentation des teneurs :

Le premier cas est lié à l'épuisement des stocks d'ions disponibles en surface après un épisode de crue important, le second à l'inexistence de précipitations efficaces dans l'infiltration mobilisatrice des ions du sol : la seule infiltration directe par les pertes de cours d'eau provoque une dilution des teneurs, sans que l'impulsion pluviométrique soit suffisante pour lessiver le sol.

III.1.4. Courbes de variations de la Fontaine de Vaucluse (1981-1982)

Le cycle 1981 a déjà fait l'objet d'une description (MUDRY 1982) et les cycles 1981 et 1982 ont été partiellement décrits (MUDRY et PUIG 1987 en cours).

Les paramètres physico-chimiques étudiés permettent d'apprécier l'écart entre les deux cycles.

A - Caractéristiques hydrologiques

Cette variété de comportement hydrocinématique est inhérente à une différence climatique, particulièrement dans les hauteurs d'eau précipitées et

leur répartition temporelle :

- Pendant l'hiver 1981, on enregistre un débit très bas, inférieur à $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ alors que la moyenne interannuelle de janvier-février est comprise entre 20 et $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le cycle 1981 intervient après les années de sécheresse 1978, 1979, 1980 ; il démarre par des précipitations printanières (de 324,9 mm en mars-avril-mai-juin) à St Christol (contre une moyenne 374,7 mm en 1971-80), mais les débits observés sont toujours bas. La Fontaine de Vaucluse ne dépasse son débit moyen ($21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) que pendant 20 jours, début avril et fin mai. Les pluies printanières (fin mars, fin avril et début mai) donnent trois crues décalées d'une semaine par rapport aux précipitations. Les pluies de fin mai, de juin et de juillet n'affectent pas le débit de décrue et de tarissement, celles de septembre-octobre provoquent une remontée du débit de la Fontaine, remontée faible comparée à celle du printemps. Seules les précipitations de décembre parviennent à provoquer une montée de crue atteignant $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le 31 décembre. Pendant la période estivale, le débit atteint des valeurs exceptionnellement basses, comprises entre 4 et $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

- Le cycle 1982 en revanche démarre plus tôt, en décembre 1981 avec une hauteur d'eau importante. Le débit est soutenu par les précipitations d'hiver et de printemps qui durent jusqu'en juin. L'étiage prononcé ne se fait sentir qu'à partir d'août ($5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Dès octobre, le débit remonte et le cycle se termine avec d'abondantes précipitations (357,1 mm en octobre-novembre).

B - Température

Les auteurs ayant étudié la thermique du karst (SCHOELLER 1962, ANDRIEUX 1976, LACAS 1975, MARJOLET et SALADO 1975, PETITFILS 1981) ont montré que le déséquilibre thermique de l'eau à l'émergence provenait de la rapidité du transit à travers le système, l'eau n'ayant pas le temps d'acquérir la température stable du réservoir. Plus le système est karstifié, moins l'information thermique originelle est déformée.

Le comportement de la Fontaine de Vaucluse amène plusieurs remarques :

- l'émergence restituée, pendant les étiages de janvier à avril 1981 (cycle 80) et d'août à décembre 1981 des eaux à température "élevée" ($12,9$ à $13,1^\circ\text{C}$) conforme à l'altitude de 85m à laquelle se situe la source (voir 3ème partie p. 297). Ces eaux à l'équilibre thermique avec le réservoir ont eu un transit suffisamment lent pour acquérir cette marque du réservoir. Un seul prélèvement au cours du cycle 82 est à l'équilibre en octobre.

- Pendant les trois périodes de hautes eaux, la température descend peu au-dessous de 12°C , même lors des crues d'hiver : le système déforme fortement le signal d'entrée, soit grâce à une grande surface d'échange entre l'eau et la roche (infiltration difficile ou karstification peu développée) soit grâce à l'existence de la réserve noyée.

- pendant l'été 1982, la température montre la persistance d'un déséquilibre thermique avec l'encaissant, qui pourrait provenir de la permanence d'un transit d'eau d'infiltration.

C - La conductivité, les bicarbonates

La conductivité est un paramètre intégrateur caractéristique de la minéralisation du système (BAKALOWICZ 1974) ; elle montre l'évolution globale du contenu ionique de l'eau de la source et a ici le même comportement que la température. L'inconvénient majeur de ce paramètre tient au poids inégal des différents ions dans sa valeur : la minéralisation bicarbonatée calcique et magnésienne représente 93 % du total à Vaucluse. La courbe de la conductivité montre donc les mêmes variations que celle des bicarbonates.

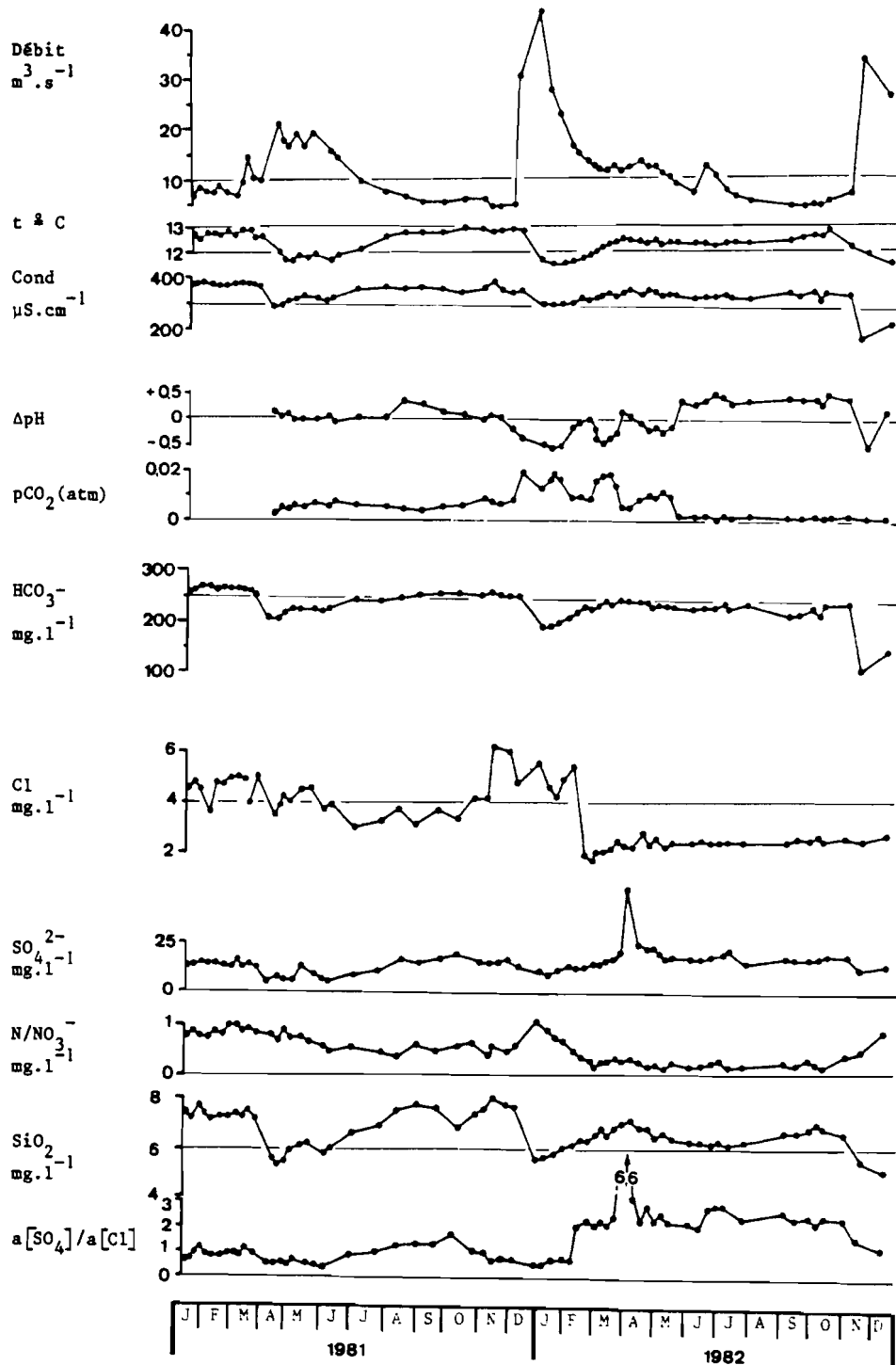


Fig. 52 A : VAUCLUSE HEBDOMADAIRE : VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

D - Le magnésium, le strontium, la silice (fig. 52 A et B)

Les éléments dont la cinétique d'acquisition est plus lente que celle du calcium et des bicarbonates apportent des informations complémentaires : la silice enregistre le passage de l'infiltration au moment de la crue d'octobre 1981 (diminution sensible), les valeurs de fin de cycle avoisinent 8 mg.l^{-1} : la source reprend ses valeurs d'avant la crue. On remarquera que ces valeurs sont légèrement supérieures à celles des basses eaux de fin du cycle 1980 (janvier-mars 1981). Le début du cycle 82 ressemble au précédent, la silice diminue, puis remonte, mais la teneur ne se stabilise pas aux alentours de 8 mg.l^{-1} , elle oscille entre 6 et 7.

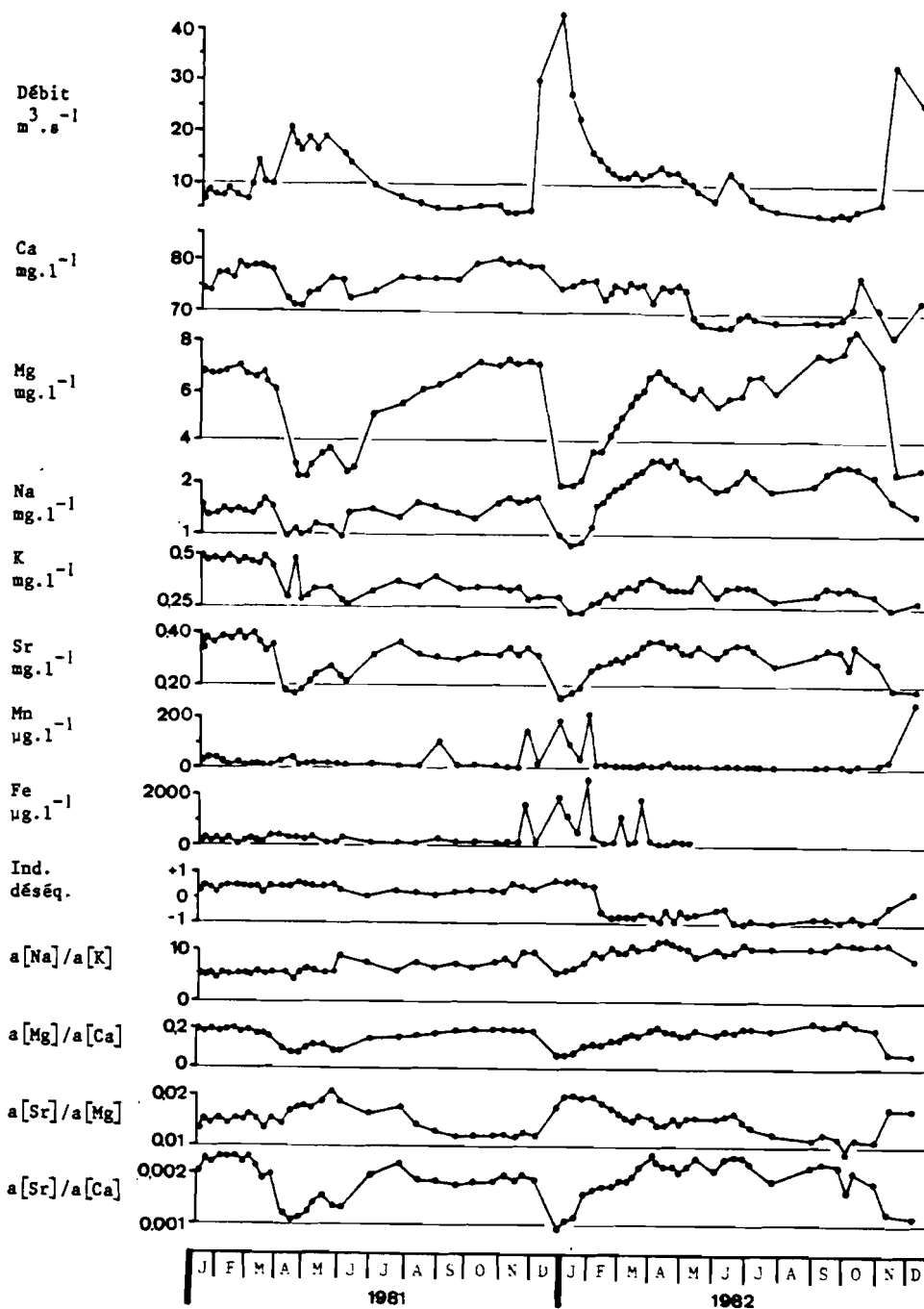


Fig. 52 B : VAUCLUSE HEBDOMADAIRE : VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

Le magnésium en revanche "boucle" son cycle 1981 sur une valeur voisine de 7mg.l^{-1} (avant et après la baisse de teneur du printemps). En 1982, cet élément dépasse les teneurs d'été de 1981 en fin de cycle. Le printemps et l'été sont caractérisés par des oscillations entre $5,5$ et $8,2\text{mg.l}^{-1}$.

Le strontium montre des teneurs plus faibles en été 1981 que l'hiver précédent. Des valeurs supérieures à $0,3\text{mg.l}^{-1}$ sont également observées en juillet et décembre 1981 et pendant tout le printemps et l'été 1982.

Ces trois éléments nous permettent donc de préciser que les tarissements 1981 et 1982 sont chimiquement, donc hydrocinématiquement différents.

E - Les autres cations (fig. 52B)

Le calcium a de basses valeurs en 1982, contrairement au sodium. Le potassium, peu abondant en début de cycle, a des teneurs plus fortes après.

F - Les chlorures (fig. 52A)

Dans le système de Vaucluse, la principale source de chlorures est l'atmosphère. Cet élément va donc tracer l'infiltration (SCHOELLER 1963, MBA 1971).

On remarque que le cycle 1982 débute par une importante restitution en dents de scie, et que le reste du cycle a de faibles valeurs. Le cycle 81 a des teneurs intermédiaires entre les pics et les faibles valeurs de 1982. Il faut noter que les premières restitutions importantes ont lieu avant la montée du débit fin 1981, les suivantes après, ce qui permet de distinguer avec cet élément trois types d'infiltration : une infiltration immédiate à faible débit, mais bien minéralisée (BLAVOUX et MUDRY 1986, voir 2ème partie, p. 141), une importante infiltration rapide et chargée en chlorures (flux importants), une infiltration lente appauvrie en chlorures (faibles flux).

G - Les nitrates (fig. 52A)

Les nitrates montrent un pic de restitution avec les crues de début de cycle. Comme les chlorures, les nitrates ont de plus faibles valeurs en 1982 qu'en 1981. Ils sont empruntés à l'activité biologique du sol (minéralisation de l'azote), il est donc normal d'observer l'augmentation de leur teneur à l'automne avec des pluies de début d'année hydrologique qui coïncident avec la chute des feuilles.

H - Les sulfates (fig. 52B)

Plus chargées en 1982 qu'en 1981, les eaux de la Fontaine montrent une diminution au début du cycle 81.

I - Le fer et le manganèse (fig. 52B)

Ces éléments traces sont produits par la pédogénèse, ils marquent donc l'infiltration (FIGUERES 1978). Leurs pics principaux (bien corrélés avec ceux des chlorures) s'observent au cours des crues d'hiver 81-82 et 82-83.

J - Les caractères déduits (fig. 52A et B)

A partir de ces éléments mesurés ou analysés, un calcul automatique effectué en PASCAL sur HP 1000 (programme PRACP de J.L. LARICE et J. MUDRY) a fourni les valeurs de la pCO_2 et du ΔpH (ROQUES 1963, BAKALOWICZ 1979, 1980, 1982) et quelques rapports caractéristiques (SCHOELLER 1962) calculés à partir des activités des ions analysés. L'écart entre pH mesuré et pH théorique d'équilibre (ΔpH) montre la succession à l'exutoire d'eaux agressives (sous-saturées), au cours de la décrue 1982 principalement, d'eaux sursaturées lors du tarissement 1981 et en basses eaux d'été 1982.

. La pCO_2 pression partielle d'une phase gazeuse fictive associée à la solution, montre des valeurs élevées lorsque les ΔpH sont négatifs.

. Le rapport $a|Mg|/a|Ca|$ présente une stabilisation d'étiage voisine d'une valeur de 0,16. L'allure générale est celle du magnésium mais en plus atténuée.

. Le rapport $a|Sr|/a|Mg|$, qui a la même variation que le strontium seul, permet de discerner trois types de comportement :

- valeurs faibles, voisines de 0,012 fin 1981 et fin 1982 (basses eaux),
- valeurs stabilisées à 0,015 début 81 et mi-82 (eaux moyennes),
- valeurs élevées (0,017 à 0,021) au printemps 81 et en hiver 82 (crues)

K - Interprétation

L'ensemble des courbes de variations permet de discerner plusieurs épisodes hydrocinématiques :

a) Le tarissement de la fin 1981,

avec des eaux à température maximale, à teneur élevée en magnésium, silice, bicarbonates. L'eau restituée a une pCO_2 faible, elle est sursaturée. Certains événements perturbent cet épisode :

◊ le transit d'eaux d'infiltration fait remonter le débit, mais seule la silice enregistre ce passage.

◊ sans variation du débit, les chlorures augmentent brutalement de 50 % : l'hydrodynamique ne permet pas d'identifier les passages d'une infiltration très marquée mais très peu abondante.

On remarquera que la remontée du débit ($7,5m^3.s^{-1}$) consécutive aux pluies de septembre-octobre (186,2 mm à St Christol) est sans commune mesure avec la crue du printemps ($38m^3.s^{-1}$) pourtant engendrée par une pluie de 117,1mm.

On doit admettre la reprise par l'évapotranspiration d'une partie de ces précipitations, ainsi que le stockage d'une autre partie dans un milieu capacitif temporaire, l'aquifère épikarstique ainsi que dans les zones accessibles des blocs capacitifs (bordure des blocs, irriguée par les drains). La chimie de l'eau n'a varié que deux mois après cet emmagasinement.

Le tarissement 1981 est donc un épisode composite, dans lequel on peut distinguer un tarissement au sens strict (absence de transit en provenance de la surface, réponse propre de l'aquifère capacitif), et des phases de basses-eaux avec transit d'eau d'infiltration très minéralisée, invisible sur le limnigramme, ou d'eau d'infiltration moins minéralisée, mais au débit non négligeable.

b) Les épisodes de crue

Au cours de début de cycle on a enregistré des débits supérieurs à $20m^3.s^{-1}$. La teneur en éléments acquis dans le système (Mg, SiO_2 , Sr) décroît grâce à la dilution par les eaux d'infiltration rapide, les teneurs en éléments originaires de l'atmosphère (Cl^-) ou du sol (Fe, Mn, NO_3^-) croissent, l'évapotranspiration* très intense qui règne en fin de cycle (été-automne 1981:554 mm) ayant reconcentré les chlorures (apportés par la pluie précédente) dans le sol et l'épikarst. Ces éléments signalent l'infiltration rapide. Dans la suite de la crue et la décrue on ne voit plus passer de teneurs élevées en ces éléments, le lessivage du début du cycle en a épuisé le stock disponible en surface. La crue du début de cycle 82 fait apparaître à l'émergence des eaux à forte pCO_2 et sous-saturées qui ont gardé leur agressivité de l'impluvium à l'émergence. Ce sont de telles eaux sous-saturées ayant gardé leurs potentialités dissolvantes qui font évoluer la karstification du système, M. BAKALOWICZ 1979 a écrit : "Certaines eaux d'infiltration gagnent très rapidement la zone noyée et l'exutoire, en introduisant en profondeur les conditions nécessaires à la dissolution de la roche carbonatée".

Au début des phénomènes de grandes crues du début de cycles 1981 et 1982, l'émergence restitue, à un débit élevé, une eau de même composition chimique (magnésium, bicarbonates...) et de même température maximale que celles du tarissement. Cette eau, originaire des drains de la zone noyée, est chassée par infiltration rapide (transfert de pression).

Cet effet piston est relayé par le transit effectif des eaux d'infiltration rapide, plus froides et moins minéralisées en éléments internes.

c) les basses eaux de 1982

montrent des caractères originaux : à très faible pCO_2 , sursaturées elles sont

*potentielle, méthode Turc. Réelle : 256,6 mm.

pauvres en nitrates et en chlorures (stock épuisé), fer et manganèse. Leur teneur en magnésium est directement influencée par les remontées de l'hydrogramme avec un décalage de 1 mois et demi : les variations de débit sont bien accompagnées d'un transit d'eau d'infiltration. Au cours de cette période, les eaux sont chargées en sodium, potassium, sulfates, elles sont pauvres en calcium. La silice, le magnésium n'atteignent pas leur valeur de tarissement vrai, et la température ne parvient pas à l'équilibre. Tous ces facteurs requièrent la persistance d'une infiltration retardée dans l'aquifère épikarstique, les teneurs en Na, K, SO₄ étant augmentée par l'évapotranspiration. On peut donc discerner une infiltration rapide chargée en chlorures, nitrates et manganèse et une infiltration lente, riche en sulfates et en alcalins, moins mobiles que les ions précédents.

Conclusion : le suivi hebdomadaire sur deux cycles permet d'accéder au fonctionnement du karst et de mesurer l'importance hydrochimique de l'histoire hydrocinématique antérieure.

III.2. UTILISATION DE LA METHODE DE LA DISTRIBUTION DES CONDUCTIVITES POUR LA COMPARAISON DES EMERGENCES ETUDIEES

M. BAKALOWICZ (1977, 1979) montre que la minéralisation de l'eau d'une émergence karstique est une variable régionalisée et que la distribution des fréquences de conductivité représente la loi de probabilité d'une fonction aléatoire.

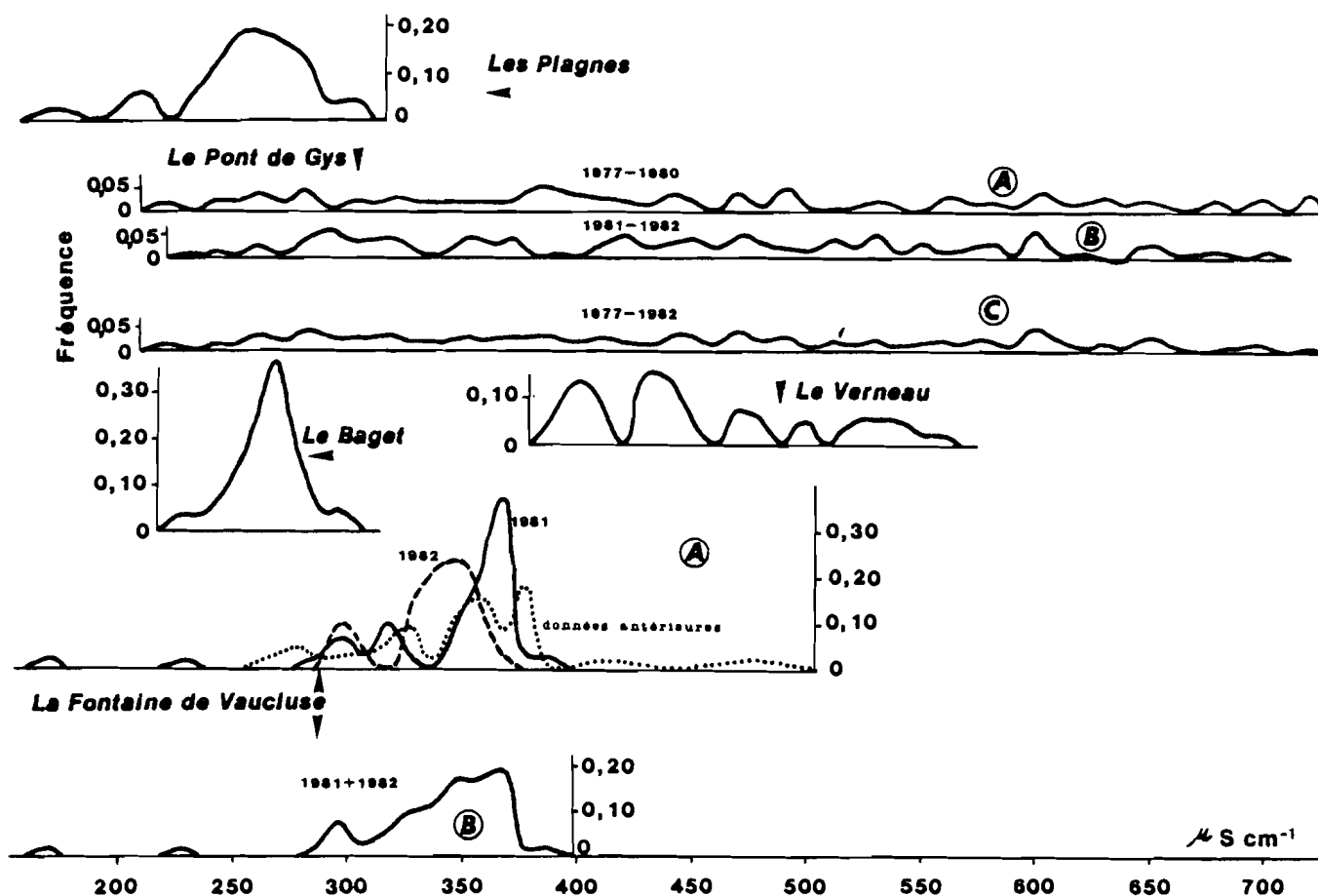


Fig. 53 : DISTRIBUTION DES CONDUCTIVITES DE 5 EMERGENCES (PLAGNES, PONT DE GYS, BAGET, VERNEAU, VAUCLUSE).

A l'aide du variogramme, il montre que le changement du pas de temps d'observation ne fait pas passer d'un niveau d'échelle d'observation à l'autre, et, qu'en particulier, un échantillonnage hebdomadaire représente les variations de la minéralisation au cours d'un cycle hydrologique.

Il démontre que la distribution des fréquences construite à partir d'un échantillonnage représentatif des variations saisonnières du paramètre choisi caractérise bien le système étudié, son fonctionnement et sa structure.

III.2.1. Comparaison des émergences

Une comparaison des émergences étudiées au pas de temps hebdomadaire donne les distributions de la figure 53. On remarquera l'intérêt de la méthode qui permet de caractériser sur un même cycle, les émergences : ainsi les émergences karstiques du massif du Niffion (Préalpes) se distinguent bien, malgré leur contexte d'émergence semblable : la source des Plagnes, presque unimodale, occupe une faible plage de variations (peu karstique), la source du Pont de Gys en revanche, occupe une plage d'environ $500 \mu\text{S.cm}^{-1}$ sans pics très caractéristiques.

Le Verneau (Jura) présente plusieurs modes bien séparés.

En revanche, l'échantillonnage de la seule séquence de décrue et tarissement de 1981 donne au Baget une allure symétrique et presque unimodale. L'échantillonnage n'est donc pas représentatif du phénomène observable sur d'autres cycles complets.

III.2.2. Limites de la méthode dans le cas d'un mélange entre deux systèmes dont l'un est très marqué

L'examen de la distribution des valeurs au Pont de Gys est intéressant et montre une limite de la méthode pour ce type d'aquifère : les valeurs mesurées par G. VUYLSTEEK (1983, sur les années 1977-1978-1979-1980) donnent, malgré l'allure très plate de la distribution, des modes sensiblement différents des miens. La somme des deux distributions efface les tendances de chacune. L'absence de valeurs marquées atteste l'existence d'un mélange en toutes proportions entre l'eau karstique proprement dite (Malm-Dogger-Lias) et l'eau en provenance des milieux évaporitiques du Trias. On remarquera cependant l'existence d'eaux aussi peu conductrices que celles des Plagnes (220 à $320 \mu\text{S.cm}^{-1}$) signant la quasi exclusivité des eaux du Karst dans l'écoulement de l'émergence pour ces échantillons. Les familles d'eaux karstiques donnant des pics de distribution ne doivent donc pas être occultées par une unité trop marquée telle que le Trias gypsifère des Médiannes Plastiques.

III.2.3. Importance de la période d'étude

L'examen des courbes de la Fontaine de Vaucluse est révélateur de plusieurs phénomènes :

- la représentation en pointillés est celle de valeurs anciennes, publiées par M. BAKALOWICZ - 1979. Cette courbe est plus étalée (260 à $520 \mu\text{S.cm}^{-1}$) que celle de l'année 1981, qui pourtant inclut un étiage très sévère. Les courbes des années 1981 et 1982 montrent deux cycles différents :

- le cycle 1982 présente deux modes symétriques : un secondaire à 300 - $310 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (10 %), un principal à 350 - $360 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (24 %)

- le cycle 1981 montre des phénomènes différents : si le mode à 300 - 310 existe aussi, il en apparaît un à 320 - $330 \mu\text{S.cm}^{-1}$. Le mode principal ($370 \mu\text{S.cm}^{-1}$) est dissymétrique, la pente très forte est située vers les fortes valeurs, attestant le fait que le tarissement 1981 a mobilisé des eaux à teneur stabilisée, la faible pente traduisant un mélange de cette composante souterraine avec les eaux moins minéralisées de l'infiltration. On remarquera donc que le

pic des eaux minéralisées de la zone noyée :

- devient symétrique en 1982, au cours de ce cycle, la teneur stabilisée de la zone noyée, observée en 1981, n'est pas atteinte.

- a une valeur plus basse qu'en 1981, car à ce pic contribuent des mélanges d'eau ayant les caractéristiques physico-chimiques de la zone noyée et celles de l'infiltration.

La somme des deux cycles sauvegarde le mode à $300-310 \mu S.cm^{-1}$ et efface les différents modes situés à des conductivités plus élevées. Ce graphique est très dissymétrique, il tient compte de la teneur stabilisée du tarissement 1981, et des mélanges en proportions variables avec les eaux d'infiltration.

De plus, comme des cycles différents produisent des courbes différentes sur un même système, la comparaison de systèmes ne pourra se faire que sur une région climatiquement homogène, les précipitations étant le moteur des dilutions.

Ainsi, si une année est plus pluvieuse dans le Jura et sèche dans les régions méditerranéennes, on ne pourra pas comparer des données synchrones d'émergences situées sous ces deux climats.

III.2.4 Conclusion

La méthode permet donc de mettre en évidence les caractéristiques hydrocinématiques des aquifères karstiques étudiés. Il convient cependant, afin de pouvoir révéler tous les comportements de répéter les courbes de distribution sur des cycles différents, avec cumulation éventuelle des cycles. La comparaison de sources différentes ne peut dès lors s'effectuer que sur des séries de données synchrones, les courbes n'étant pas reproductibles d'un cycle à l'autre, et sous des climats homogènes.

III.3. ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES AU PAS DE TEMPS HEBDOMADAIRE

Les courbes de variation permettent, élément par élément ou groupe d'éléments par groupe d'éléments, de décrire les phénomènes mis en jeu. La distribution des conductivités autorise la comparaison des émergences.

Cependant, la prise en compte simultanée de l'ensemble des descripteurs acquis nous impose le recours à une analyse multidimensionnelle des données.

Les résultats acquis au pas de temps hebdomadaire à l'échelle du cycle ont été confrontés à ceux acquis au pas de temps quotidien voire horaire à l'échelle de la crue par d'autres auteurs, pour un nombre important de descripteurs.

La nature continue des paramètres chimiques nous a suggéré l'emploi d'une méthode reposant sur l'analyse d'une matrice des variances et covariances des descripteurs : l'analyse en composantes principales. LEFEBVRE (1980) donne les principes et la mise en oeuvre de cette méthode sur laquelle nous ne reviendrons pas. La disparité des teneurs et des valeurs entrant dans un tableau de données d'analyses physico-chimiques est grande, et les gammes de variation des paramètres sont très variées. Ainsi, à la Fontaine de Vaucluse la teneur en bicarbonates oscille-t-elle entre 116,1 et 267,8 $mg.l^{-1}$ pendant que la teneur en manganèse varie de 0,0005 à 0,0258 $mg.l^{-1}$. Pour atténuer cette disparité qui accorde, dans le calcul des variances un poids prépondérant aux descripteurs à forte valeur numérique, on emploie l'ACP centrée réduite, c'est à dire une ACP où la moyenne de chaque colonne est ramenée à zéro et où la variance est égale à 1, tous les descripteurs ont alors un poids équivalent (sous réserve que les valeurs soient réparties de manière continue entre le maximum et minimum).

Les premières ACP ont été effectuées sur le calculateur Olivetti-Programma au Laboratoire Souterrain du CNRS à Moulis, l'essentiel des analyses a été opéré sur le HP1000 du centre de calcul d'Avignon.

III.3.1. Etude de la source du Verneau par l'analyse en composantes principales

L'hydrochimie du Verneau a déjà fait l'objet d'une analyse de données sur l'échantillonnage de la crue du 4 novembre 1977 (TISSOT et TRESSE 1978), et à fins de comparaison, nous avons tout d'abord traité les mêmes descripteurs.

A - Comparaison du suivi chimique de la crue de novembre 1977 (pas horaire, 45 échantillons) et du cycle 1981-1982 (pas hebdomadaire, 43 échantillons) avec 10 paramètres.

La matrice des coefficients de corrélation (tableau 4 et 5) montre que les principaux ions ont le même type de corrélation (par exemple calcium-bicarbonates ou encore sulfates silice), mais que les valeurs du pas de temps horaire sont souvent meilleures que celles du pas de temps hebdomadaire. Nous avons essayé de calculer une régression entre les coefficients de corrélation des deux pas de temps. La relation n'est pas significative. Cependant, le coefficient de corrélation de rang de Spearman (voir Annexe 3) montre que le rang des coefficients dans les deux matrices est corrélé de manière hautement significative entre les deux pas de temps (coefficient $R_{sp} = 0,533$, hautement significatif à 0,372 pour 45 degrés de liberté). Ce résultat prouve que même pour une émergence "à haute fréquence" comme le Verneau dont les variations hydrométriques et chimiques doivent être surveillées à l'échelle horaire, le prélèvement systématique d'échantillons hebdomadaires à l'échelle du cycle apporte le même type d'information qu'un suivi intensif limité dans le temps à un épisode de crue; les deux pas de temps permettent le même accès au fonctionnement du système. M. BAKALOWICZ (1979) arrive à la même conclusion par la méthode des variables régionalisées. La comparaison des diagrammes factoriels 1-2 correspondant au pas de temps horaire (fig. 54A) et hebdomadaire (fig. 54B) montre que l'axe 1 oppose les éléments du karst (Ca, TAC, conductivité) aux éléments empruntés à des milieux marneux (Silice, sulfates). A l'échelle de la crue, l'axe 2 est mal défini. A l'échelle du cycle, il oppose sodium, potassium et phosphates aux autres éléments, il paraît donc traduire des facteurs agropédologiques. TISSOT et TRESSE ne fournissent malheureusement pas de projection de l'espace des individus. Pour le pas hebdomadaire, (fig. 55), le diagramme des individus montre la différence de comportement le long des axes factoriels 1 et 2. Le long de l'axe 1, les trajets sont courts d'un point à l'autre, alors que le long de l'axe 2, les points du haut sont généralement isolés et l'on observe des sauts

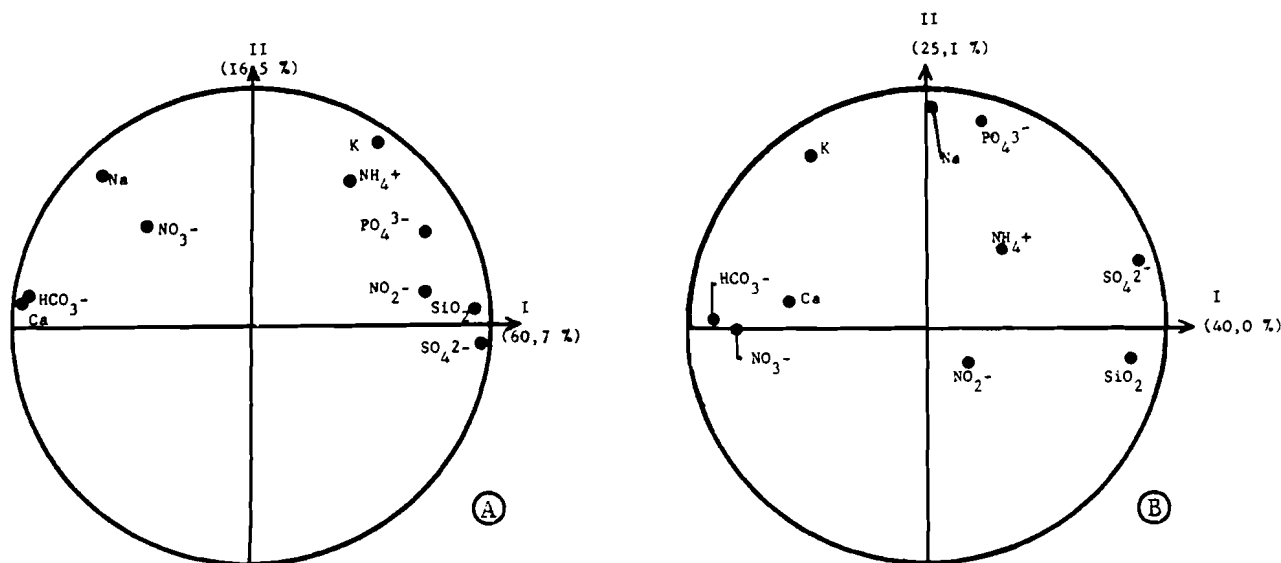


Fig. 54 : VERNEAU : ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan I x II, 10 descripteurs)

- (A) : crue de novembre 1977 (TISSOT et TRESSE 1978)
- (B) : cycle 1981-82

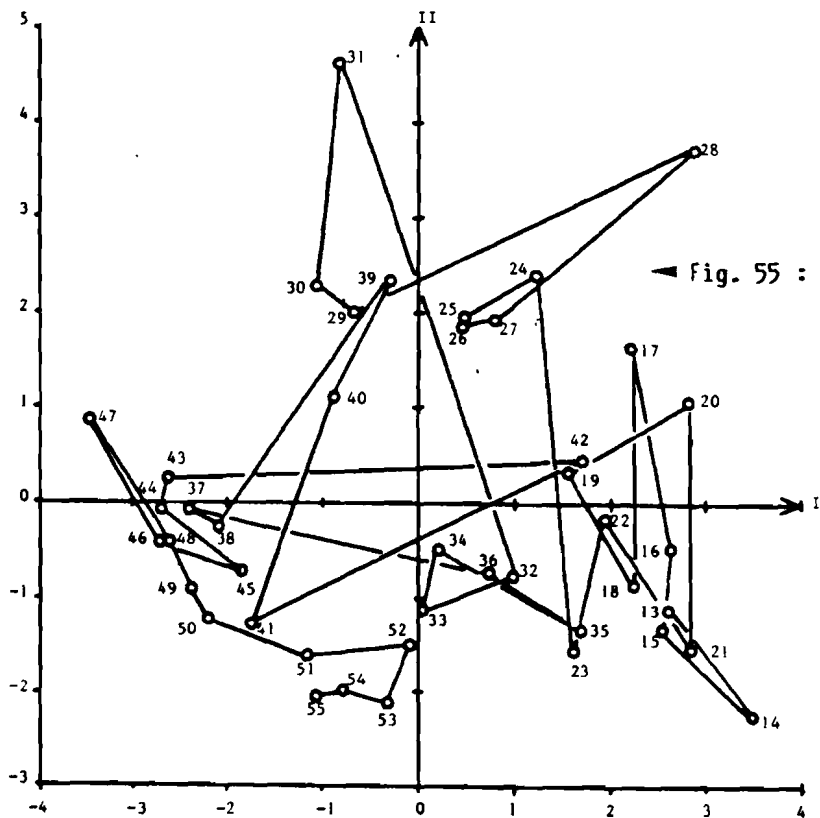
Tabl. 4 et 5 - MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION LINEAIRE ENTRE DESCRIPTEURS AU VERNEAU

◀ 4 - CRUE DU 4 novembre 1977, pas horaire
(TISSOT et TRESSE 1978)

Na	1									
K	0,246	1								
Ca	0,671	-0,443	1							
SO ₄	-0,636	0,472	-0,962	1						
HCO ₃	0,655	-0,430	0,951	-0,932	1					
NO ₃	0,313	-0,037	0,463	-0,477	0,465	1				
NO ₂	-0,442	0,410	-0,609	0,607	-0,589	-0,167	1			
NH ₄	-0,003	0,542	-0,328	0,403	-0,232	0,097	0,337	1		
PO ₄	-0,196	0,696	-0,635	0,644	-0,691	-0,202	0,562	0,325	1	
SiO ₂	-0,532	0,529	-0,861	0,885	-0,891	-0,395	0,763	0,423	0,698	1
	Na	K	Ca	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	SiO ₂

◀ 5 - CYCLE 1981-82, PAS HEBDOMADAIRE

Na	1									
K	0,649	1								
Ca	0,098	0,263	1							
SO ₄	0,334	-0,238	-0,382	1						
HCO ₃	0,055	0,426	0,521	-0,775	1					
NO ₃	0,013	0,358	0,319	-0,650	0,660	1				
NO ₂	-0,097	-0,077	-0,171	0,080	0,054	-0,045	1			
NH ₄	0,224	0,111	-0,089	0,307	-0,309	-0,211	-0,021	1		
PO ₄	0,847	0,476	-0,051	0,435	-0,109	-0,170	-0,029	0,177	1	
SiO ₂	-0,080	-0,484	-0,352	0,757	-0,673	-0,610	0,284	0,088	0,165	1
	Na	K	Ca	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	SiO ₂



◀ Fig. 55 : VERNEAU 1981-82, ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII, 10 DESCRIPTEURS)

importants. Le fonctionnement est continu le long de l'axe 1, beaucoup plus impulsif le long de l'axe 2. Il y a donc un passage progressif de l'influence des milieux marneux à l'influence prépondérante des milieux carbonatés, alors que l'arrivée d'eaux issues du sol est beaucoup plus brutale.

B - Suivi hydrochimique hebdomadaire de la source du Verneau : le cycle 1981-1982 (43 individus, 17 variables)

Sur le diagramme des variables (fig. 56) le plan factoriel 1-2 montre quatre pôles. Comme dans l'analyse précédente avec 10 descripteurs, l'axe 1 oppose les indicateurs du milieu carbonaté (bicarbonates, calcium et nitrates) aux indicateurs du lessivage du sol (sulfate, silice, chlorure, manganèse). L'axe factoriel 2 oppose l'ensemble débit-fer-nitrites aux phosphates, au sodium, au magnésium et au potassium, c'est donc un axe lié aux conditions du milieu et au temps de séjour. A partir de cette répartition des variables, on peut formuler plusieurs remarques :

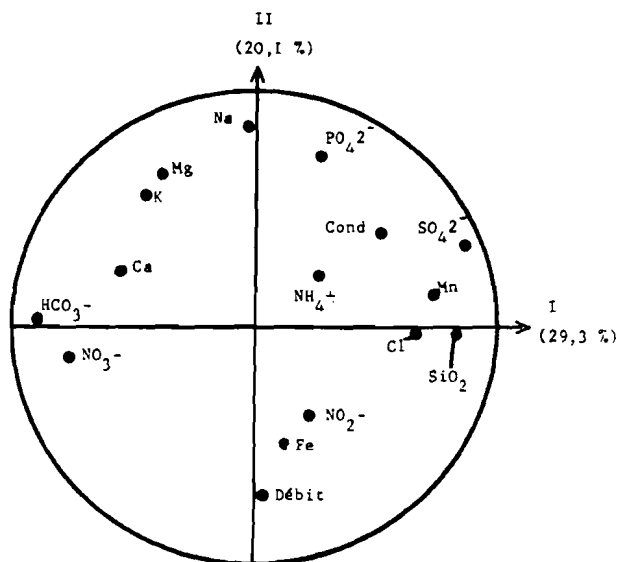


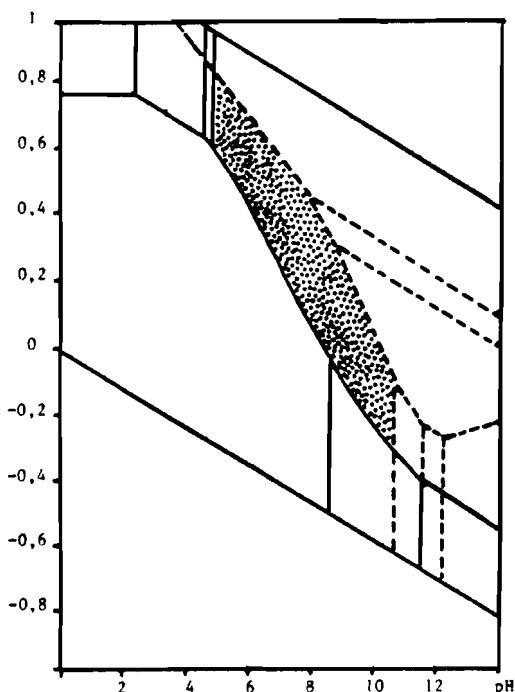
Fig. 56 : VERNEAU 1981-82, ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (PLAN IxII, 17 DESCRIPTEURS) ▶

- la conductivité est proche du groupe "sol" et non du groupe "karst" : au Verneau, elle ne constitue pas un paramètre de choix pour l'étude du fonctionnement karstique.

- le groupe débit-nitrites-fer atteste le transit jusqu'à l'émergence des conditions réductrices nécessaires à l'existence de ces formes : les forts débits empêchent les équilibres de se réaliser : l'azote n'a pas le temps de s'oxyder en nitrates et le fer de précipiter sous forme d'hydroxyde, ces deux formes réduites signent donc des transits très rapides.

- le Fer n'est pas associé au Manganèse, bien que ces deux éléments aient un comportement géochimique voisin lié à l'activité pédogénétique : (FIGUERES 1978). Les diagrammes d'équilibre pH-potentiel rédox (GARRELS et CHRIST 1967 - fig. 57) montrent qu'à des pH voisins de 7, la limite hydroxyde de fer solide-fer ionique est à Eh plus élevé (oxydant) que la limite hydroxyde - manganèse ionique. Dans cette gamme de potentiels rédox et de pH, observés sur les émergences karstiques, la solubilité du fer est donc astreinte à des conditions réductrices plus sévères que celle du manganèse, les fortes teneurs en fer ne s'observeront que lorsque l'hydrocinématique sera plus rapide que la cinétique des réactions, alors que le manganèse s'observera à tous débits, dès lors qu'il y aura lessivage du sol et des marnes, accompagnant les sulfates et la silice. Cette différence de comportement a été mise en évidence aussi pour l'aquifère

Eh



La zone grisée correspond au domaine du fer solide (Fe sol) et du manganèse dissous (Mn aq.)

◀ Fig. 57 : DIAGRAMME pH-POTENTIEL REDOX. SITUATION DES COURBES-LIMITES Fe^{2+}/Fe et Mn^{2+}/Mn .

alluvial d'Avignon (MALLESSARD 1983).

Le diagramme des individus (fig. 58) montre deux groupes principaux de points, l'un expliqué par le pôle karstique 1 (Ca, HCO_3 , NO_3), l'autre par le pôle sol-marnes (3) (SO_4 , Mn, Cl, SiO_2) ; des points plus dispersés (4) traduisent les fugaces conditions réductrices à fort débit (Q , Fe, NO_2) au bas du diagramme et d'autres points (2) montrent une affinité avec phosphates, sodium, magnésium, potassium.

Temporellement et hydrologiquement, les points se succèdent dans une logique cohérente (fig. 59).

Les eaux typiquement karstiques (groupe 1) ne se rencontrent que lors des périodes à pluie assez abondante et à débit moyen, il faut un transit suffisant pour qu'existent de telles eaux.

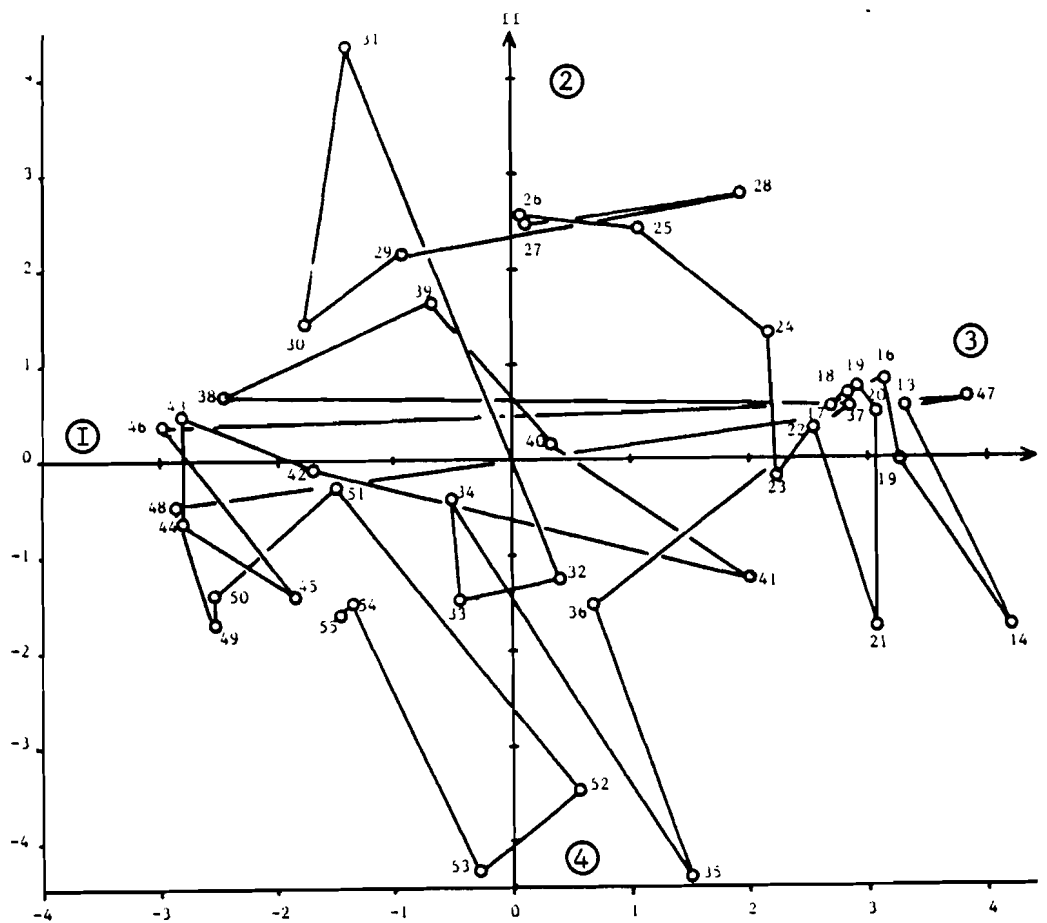


Fig. 58 : VERNEAU 1981-82, ACP, diagramme des individus (plan IxII, 17 DESCRIPTEURS)

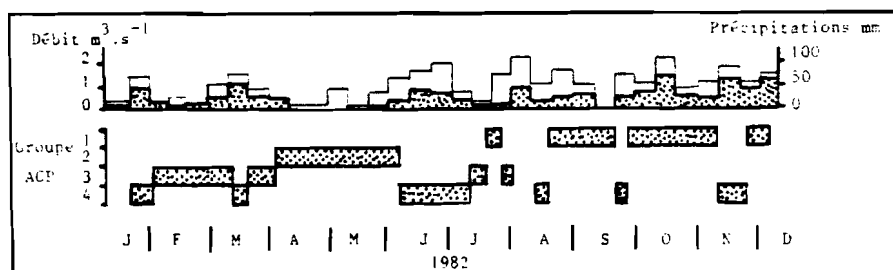


Fig. 59 : VERNEAU 1981-82, RESUME DU COMPORTEMENT HYDROCINEMATIQUE, 17 DESCRIPTEURS

Lorsque les débits sont faibles et que les précipitations efficaces sont emmagasinées dans le manteau d'altération et l'épikarst, les eaux d'infiltration (groupe 2), riches en éléments empruntés à la surface (sodium, potassium et phosphates des engrais, et des égoûts rejetés directement dans le système), ont le temps de se charger en magnésium dans l'encaissant. Les éléments typiquement issus du lessivage des sols (groupe 3) apparaissent en décrue et en basses eaux. Ils traduisent la pérennité d'une infiltration retardée par les milieux capacitifs temporaires (sol, épikarst). Les eaux en déséquilibre avec les conditions oxydo-réductrices du milieu (groupe 4) n'émergent qu'à fort débit.

Dans le temps, la période étudiée du cycle démarre par une phase d'infiltration différée, entrecoupée de transits directs déséquilibrés, puis passe à un "tarissement" mobilisant des eaux de réserve du karst (fig. 59) et une infiltration très ténue et marquée par la pollution. Les crues mobilisent ensuite des eaux déséquilibrées puis des eaux bicarbonatées calciques franches dans

lesquelles l'azote est oxydé.

Cette étude du Verneau permet de mettre en évidence plusieurs facteurs intéressants :

- le pas de temps hebdomadaire sur un cycle décrit des phénomènes de même nature que le pas de temps horaire sur une crue.
- la nature marneuse de la couverture du karst pénalise l'étude du comportement hydrochimique, d'autant que la masse carbonatée est restreinte au Verneau. Ainsi la conductivité n'est elle pas corrélée au calcium. En revanche cette nature marneuse permet de caractériser parfaitement l'infiltration différée généralement difficile à percevoir dans un système totalement carbonaté, cette composante de l'écoulement présentant souvent un important mimétisme hydrochimique avec les eaux de la réserve noyée.
- Dans le système du Verneau, les apports polluants signent toutes les composantes de l'écoulement. Ce marquage est inhérent au mode d'infiltration des eaux de surface dans des pertes concentrées, les recharges ne s'opèrent donc pas à partir de zones exemptes de pollution.

Cette pollution nous a permis d'utiliser les nitrites, forme fugace de l'azote comme indicateur de transit rapide.

III.3.2. Etude de la source du pont de Gys au pas de temps hebdomadaire (1977-82) au moyen de l'ACP

A - La première ACP

Elle porte sur 221 individus prélevés de décembre 1976 à décembre 1982. Les prélèvements 1976-1980 ont été étudiés par G. VUYLSTEEK (1983). Huit ions ont été utilisés en plus du débit, de la conductivité et de la température. L'axe 1 (fig.60) oppose le débit à la conductivité, aux sulfates, au calcium, au magnésium, au sodium et au strontium. Cet axe représente la contribution des eaux très minéralisées en provenance des milieux évaporitiques du Trias : plus le débit est faible, plus la proportion d'eau triasique est grande à l'émergence.

L'axe 2 montre la contribution des eaux météoriques à l'écoulement : il est bien corrélé avec les chlorures.

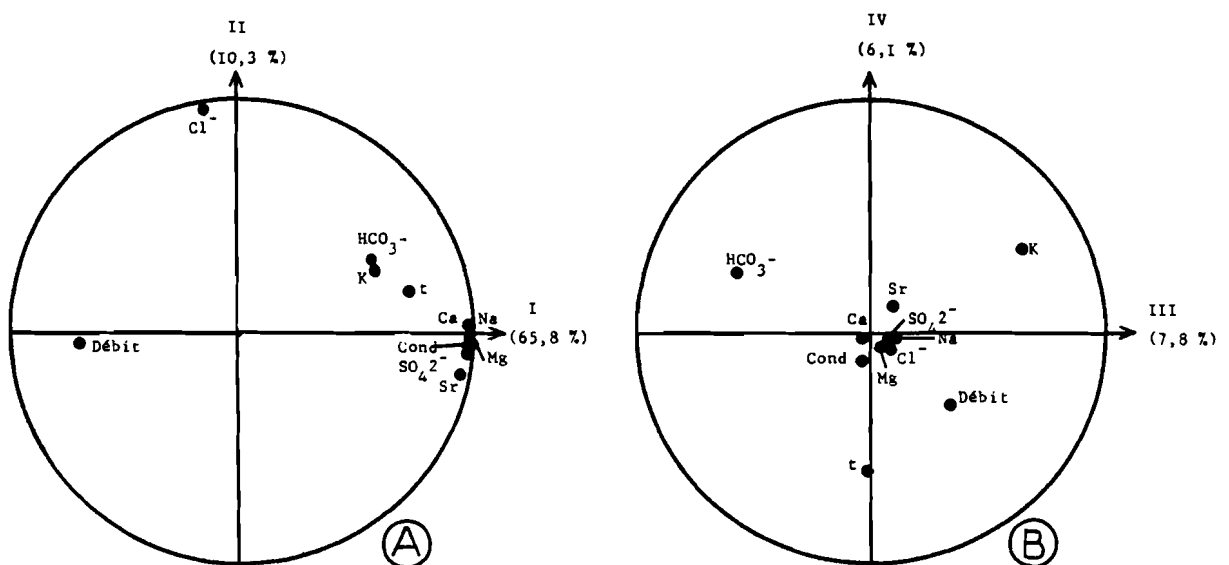


Fig. 60 : PONT DE GYS - ACP DIAGRAMME DES VARIABLES ; (A) : plan IxII et (B) : plan III x IV)

Bicarbonates et potassium forment un groupe distinct des ions déterminant la signification de l'axe 1 : ils s'opposent sur l'axe 3 : les bicarbonates montrent le rôle de la dissolution dans le sol et l'épikarst. Le calcium libéré par le même processus est insuffisant devant celui qui provient de la dissolution du gypse pour être corrélé aux bicarbonates. Le potassium, dans le même milieu, vient de la matière organique du sol. Cette opposition rappelle donc que les bicarbonates ne sont liés qu'à un cycle hydro-climatique (précipitations et températures) et que le potassium est lié en plus au cycle de la matière organique.

La température explique le facteur 4, elle n'est donc pas directement liée aux évaporites triasiques profondes.

Le diagramme 1-2 des individus (fig. 61) montre le bon mélange des points "VUYLSTEEK" et des points "MUDRY", attestant la bonne corrélation entre les laboratoires de Thonon et d'Avignon, qui utilisent les mêmes méthodes de dosage.

Les points extrêmes sont les moins superposés : leur fréquence d'apparition est faible à l'échelle de quelques cycles, on ne saurait chercher une comparaison sur des événements exceptionnels.

L'axe 1 absorbe dans ce diagramme 66 % de la variance totale, et le mélange eau triasique - eau météorique occulte complètement le fonctionnement karstique du système.

L'analyse de la série complète des individus (221) n'a pu se faire que sur les ions communs à tous. L'azote nitrique, le pH, l'oxygène 18 et le tritium ont imposé le traitement séparé des prélèvements comportant ces descripteurs.

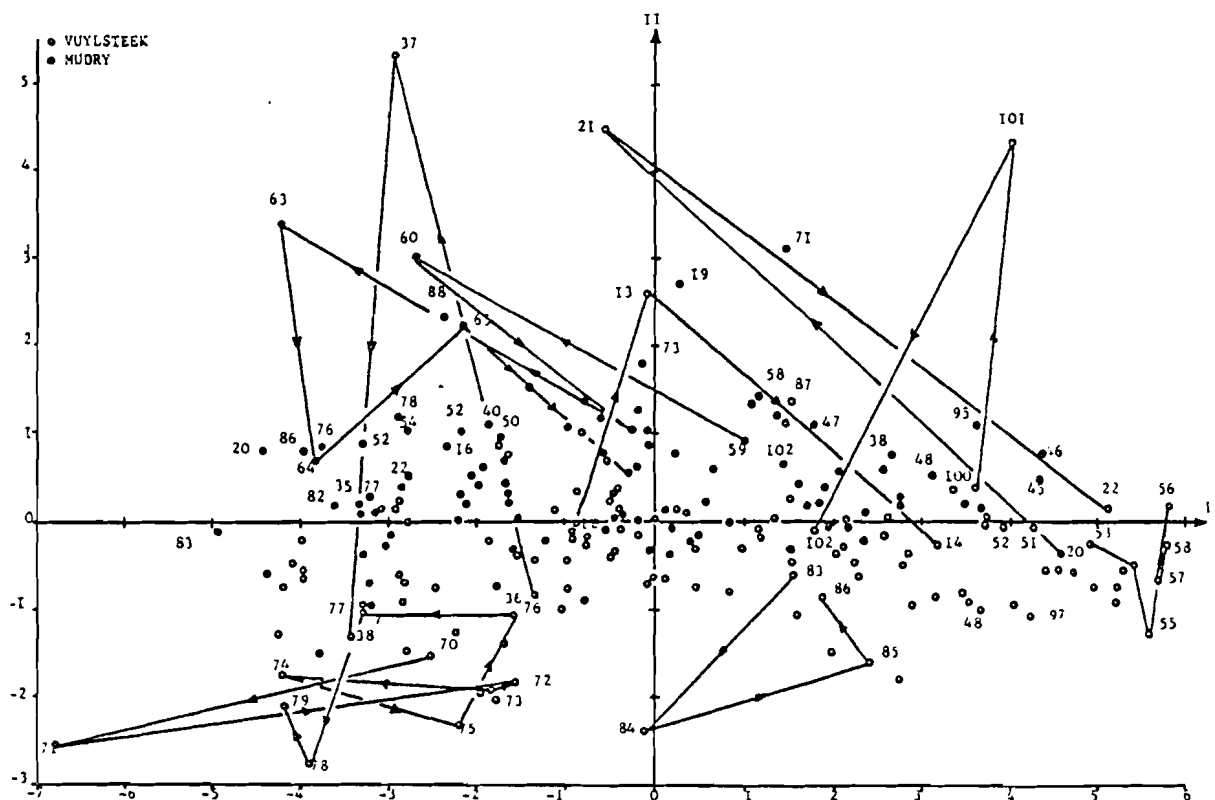


Fig. 61 : PONT DE GYS - ACP DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII, 221 individus).

B - Etude du Pont de Gys avec le pH (1977-1982)

Les échantillons analysés appartiennent aux séries "VUYLSTEEK" (116 éch.) et "MUDRY" (95éch.) le pH a permis de calculer le ΔpH et la pCO_2 (ROQUES 1961, 1963, 1967, BAKALOWICZ 1979, 1980, 1982).

Le plan factoriel 1-2 (projection des variables) (fig. 62) se trouve modifié par rapport au diagramme précédent n'incluant pas ces paramètres : l'axe 1 est encore défini par le débit (en négatif) et les descripteurs des milieux évaporitiques, mais l'axe 2 n'est plus défini par les chlorures, il oppose la pression partielle de CO_2 (en négatif) au ΔpH . Si le ΔpH est une grandeur parfaitement définie dans ce type de milieu (le pH d'équilibre tenant compte du calcium associé aux sulfates), la pCO_2 est calculée avec une activité totale en calcium, non décompté cet élément à origine gypseuse, pourtant prépondérant dans ces eaux. Le diagramme "variables" est néanmoins intéressant :

a) - il atteste que les chlorures et le ΔpH ne décrivent pas le même phénomène : les chlorures tracent l'infiltration des eaux météoriques dans la pédosphère, le système sous jacent (épikarst, zone non saturée et zone noyée) y est transparent. le pH d'équilibre subit une marque de l'intégralité du transit de l'eau dans le système, depuis l'atmosphère jusqu'à l'exutoire.

b) il montre que le ΔpH est indépendant de la teneur en bicarbonates au Pont de Gys, les ions caractéristiques du ΔpH étant majoritairement issus des milieux non karstiques.

c) il met en relief la position ubiquiste de la température dissociée du groupe "évaporites" et des bicarbonates : la marque thermique à l'exutoire provenant sans doute de milieux capacitifs (calcaires du Malm ?) dont la marque chimique est écrasée par celle du Trias.

L'axe factoriel 3 est défini par les chlorures, le 4 par les bicarbonates, il importerait donc, afin d'étudier le seul fonctionnement karstique du système, de passer à une simple représentation bi-variée $HCO_3^- - Cl^-$ de l'espace des individus. Cependant, une telle représentation ne fait pas apparaître de phénomènes clairs, le pas de temps hebdomadaire n'étant pas assez fin pour étudier le fonctionnement purement karstique de cette émergence.

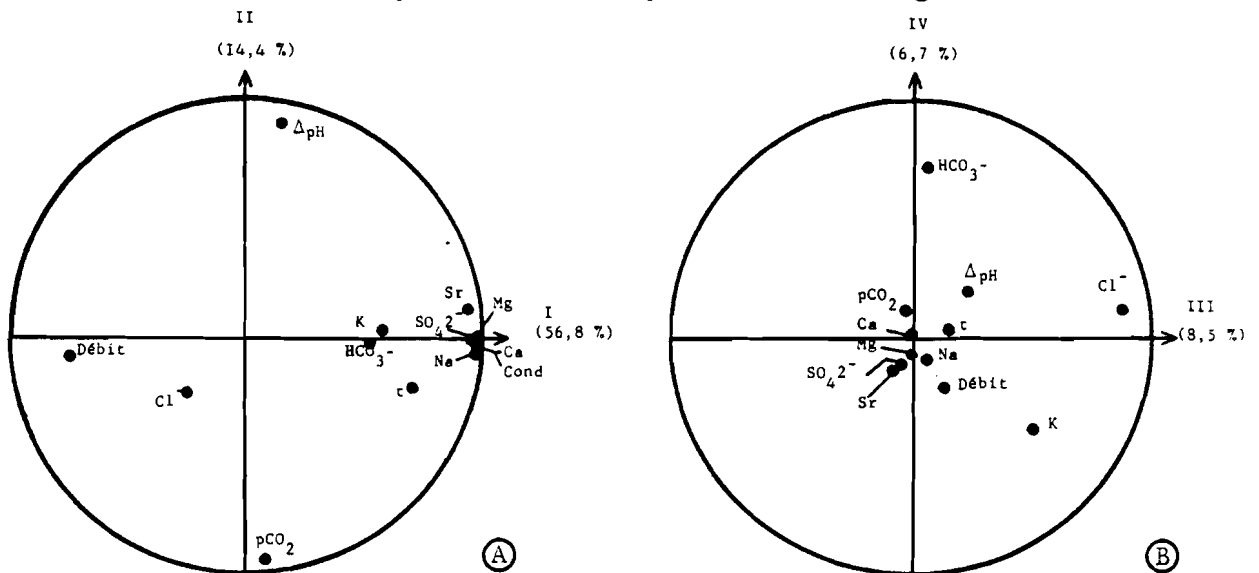
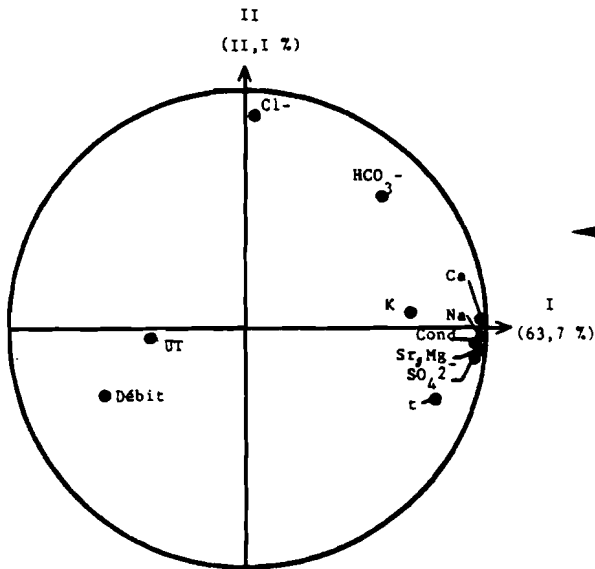


Fig. 62 : PONT DE GYS AVEC pH - ACP DIAGRAMME DES VARIABLES (A) : plan IxII ; (B) : plan IIIxIV)

C - Etude du Pont de Gys avec Tritium

Le diagramme 1-2 (fig. 63) confirme les observations précédentes :

- le groupe évaporitique opposé au débit, indépendant de l'infiltration (Cl^-), bicarbonates peu liés aux deux groupes,
- On remarque que le tritium s'oppose aux traceurs des milieux triasiques, en étant voisin du débit : les eaux du réservoir triasique, assez anciennes, sont plus pauvres en tritium que les diverses eaux d'infiltration.



◀ Fig. 63 : PONT DE GYS AVEC TRITIUM
ACP DIAGRAMME DES
VARIABLES (plan IxII)

D - Etude de l'année 1979 au Pont de Gys

Cette année est la plus complète au point de vue variables L'axe 1 (fig. 64) a la même signification que dans les analyses précédentes. Aux chlorures est associé l'azote sur l'axe 2 (confirmant cette composante atmosphérique et pédologique) et opposé le tritium. Le tritium est à lui seul expliqué par l'axe 3 et l'oxygène 18 par l'axe 4, ce qui montre que contrairement à la chimie très contrastée des différentes composantes, leur

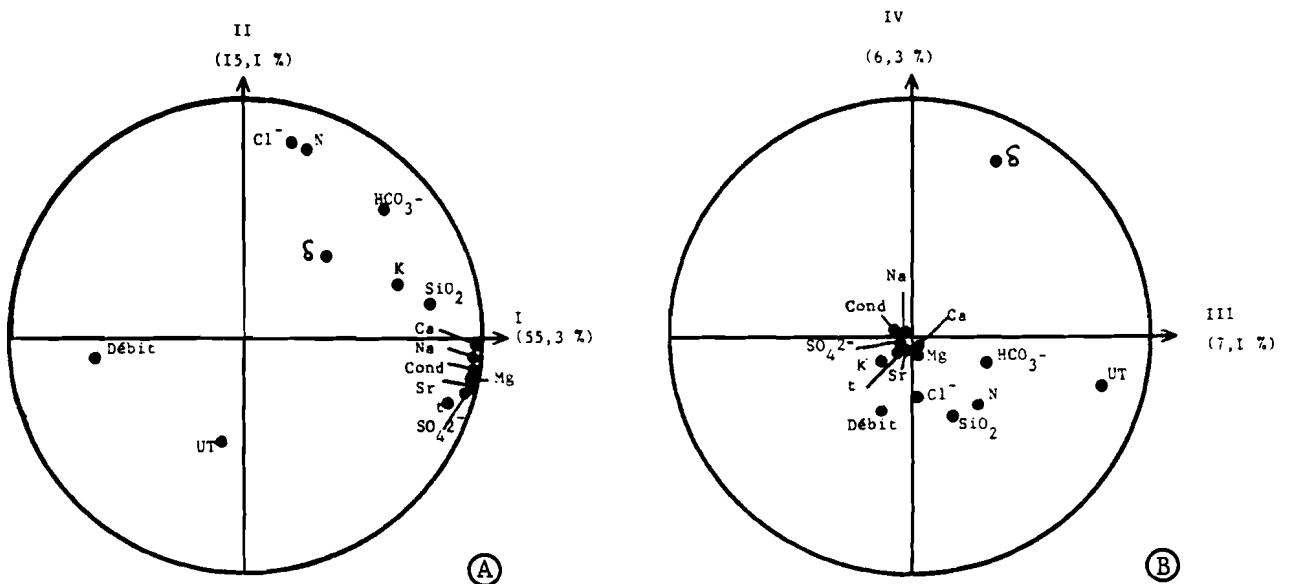


Fig. 64 : PONT DE GYS 1979 - ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (A) : plan IxII, (B) : plan IIIxIV)

signature isotopique est très ubiquiste, sans doute à cause de la variabilité des isotopes à l'entrée du système. En effet, si les réserves du Trias, du Dogger et du Malm peuvent avoir chacune ses caractéristiques isotopiques, le mélange permanent de ces composantes avec une infiltration à teneur fluctuante efface toute marque spécifique.

Le diagramme bi-varié Oxygène 18-Tritium avec en 3ème variable la conductivité permettra donc mieux que l'ACP l'étude du fonctionnement (fig.65).

Nous avons vu (fig. 60) que la conductivité au Pont de Gys est un bon indicateur de la minéralisation de l'eau dans les milieux évaporitiques du Trias ; nous avons représenté la relation oxygène 18-Tritium au cours des cycles 78 et 79. Les traits entre les points représentent l'enchaînement temporel du cycle, les figurés représentent la conductivité, qui va nous renseigner sur l'importance relative de l'apport triasique et de l'apport karstique par l'infiltration.

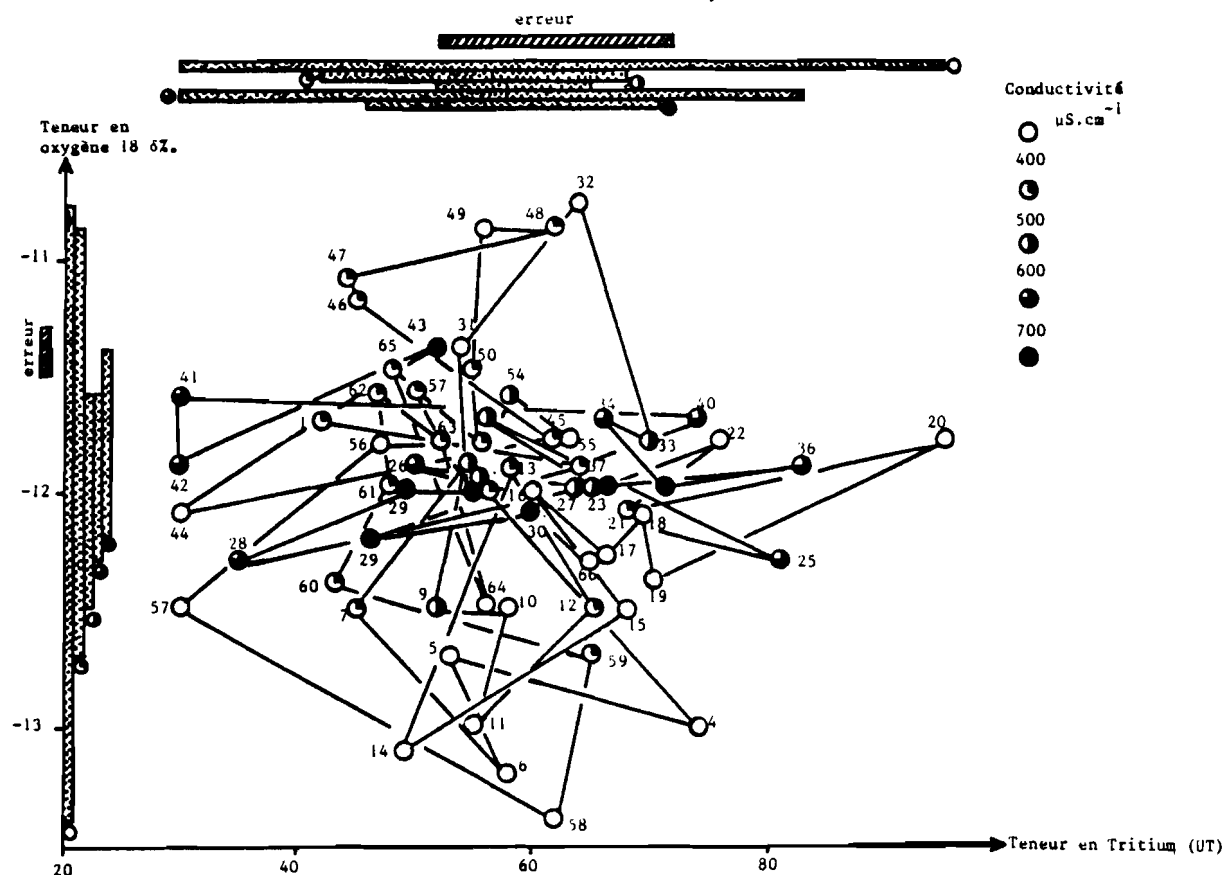


Fig. 65 : PONT DE GYS 1979 - DIAGRAMME OXYGENE 18 - TRITIUM-CONDUCTIVITE

On remarquera que toutes les familles définies par la conductivité ont une gamme de variation plus grande que l'erreur de mesure sur l'oxygène 18, alors que pour le Tritium, seulement deux familles occupent une plage significativement plus étalée que celle de l'erreur. L'étalement des gammes est maximal pour la famille la moins minéralisée, et minimal pour la plus minéralisée, tant pour l'oxygène que pour le Tritium. Comme l'aquifère triasique est alimenté par les mêmes précipitations que le massif karstique, force est d'admettre que cet aquifère triasique subit un amortissement considérable des variations qualitatives de l'entrée à l'échelle de l'averse, responsables de la dispersion des points de la famille la moins minéralisée ou prédomine la contribution de l'infiltration. Il faut également remarquer que les valeurs les plus basses du Tritium n'appartiennent pas à la famille triasique. Ces valeurs d'automne et d'hiver peuvent provenir :

- soit du passage à l'exutoire d'eaux de précipitations pauvres en tritium.
- soit du passage à l'exutoire d'eaux de réserve à temps de séjour long.

Dans ce cas, ces eaux n'étant pas très minéralisées en traceurs du réservoir triasique, auraient acquis leur temps de séjour élevé dans un autre milieu que le Trias, par exemple le Dogger. Cette observation confirme celles que l'on a faites sur la figure 63.

Les eaux les plus conductrices ont des teneurs très moyennes en oxygène 18, ce qui permet de considérer le réservoir profond comme un bon mélangeur des recharges typées. Les eaux peu minéralisées occupent toute la gamme de variation en oxygène 18, elles répercutent ainsi les variations dues à l'entrée dans le système.

E - Compléments apportés par la source des Plagnes (1979) appartenant au seul domaine carbonaté

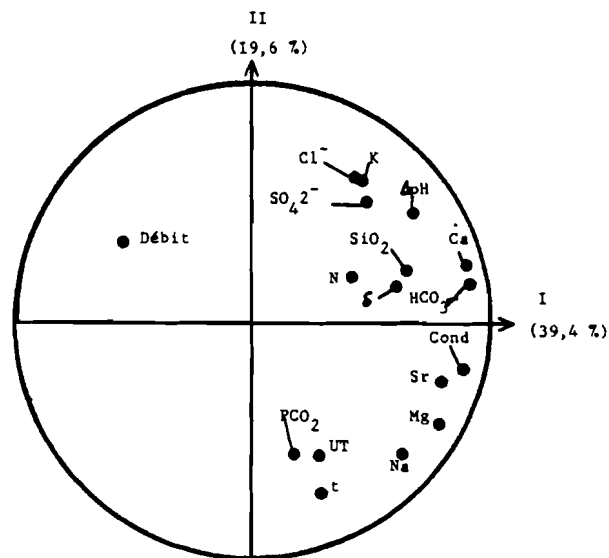
Bien que située sur l'autre versant de l'impluvium du Niffion, cette émergence temporaire ne draine pas de réserve triasique. Par rapport au Pont de Gys, l'ACP fait éclater le groupe des marqueurs évaporitiques.

On remarquera des axes factoriels beaucoup moins bien expliqués par les variables originelles (fig. 66). Cette dispersion provient d'une part de l'absence d'une contribution de l'aquifère triasique dont le marquage en plusieurs éléments se traduisait par de bonnes corrélations au Pont de Gys, d'autre part de la mauvaise karstification du système des Plagnes, les dilutions de l'entrée sont mal répercutées à la sortie. Les Plagnes montrent les mêmes phénomènes que le Groseau, système également mal karstifié (voir IV.3.1.).

Le débit est opposé sur un axe oblique, à l'ensemble Na, Mg, Sr, conductivité représentant les séjours longs dans l'encaissant. Indépendamment de ce groupe, sur un axe perpendiculaire, l'ensemble ΔpH , Cl^- , K, SO_4^{2-} - représente les transits rapides déséquilibrés impluvium-émergence. Il faut noter que cette composante est indépendante du débit.

Définissant mieux les axes 1, et 2, les paramètres Silice, $\delta 18O$, Ca et HCO_3^- (axe 1) sont indépendants des paramètres pCO_2 , Tritium, Température. Ce dernier groupe montre l'association "eau avec Tritium, chaude, et à pCO_2 élevée".

Fig. 66 : LES PLAGNES 1979 - ACP - DIAGRAMME DES VARIABLES (Plan IxII)



L'axe 1 est donc un axe "minéralisation-temps de séjour".

L'axe 2 est un axe "infiltration".

On remarquera donc dans les bas débits plusieurs qualités d'eau du réservoir, l'une conductrice, riche en magnésium et en strontium (d'acquisition lente), une autre riche en calcium, bicarbonates, silice, plus négative, (d'acquisition plus rapide).

La projection 1-2 de l'espace des individus montre : (fig. 67)

- une grande variabilité en début d'année (indiv. 1 à 21)

- un parcours en arc de cercle en fin de printemps, en été, automne et début d'hiver(22 à 53) le système restitue tour à tour, des eaux riches en magnésium, puis en calcium, puis des eaux marquées par l'infiltration (sous-saturées, chlorurées, sulfatées et potassiques).

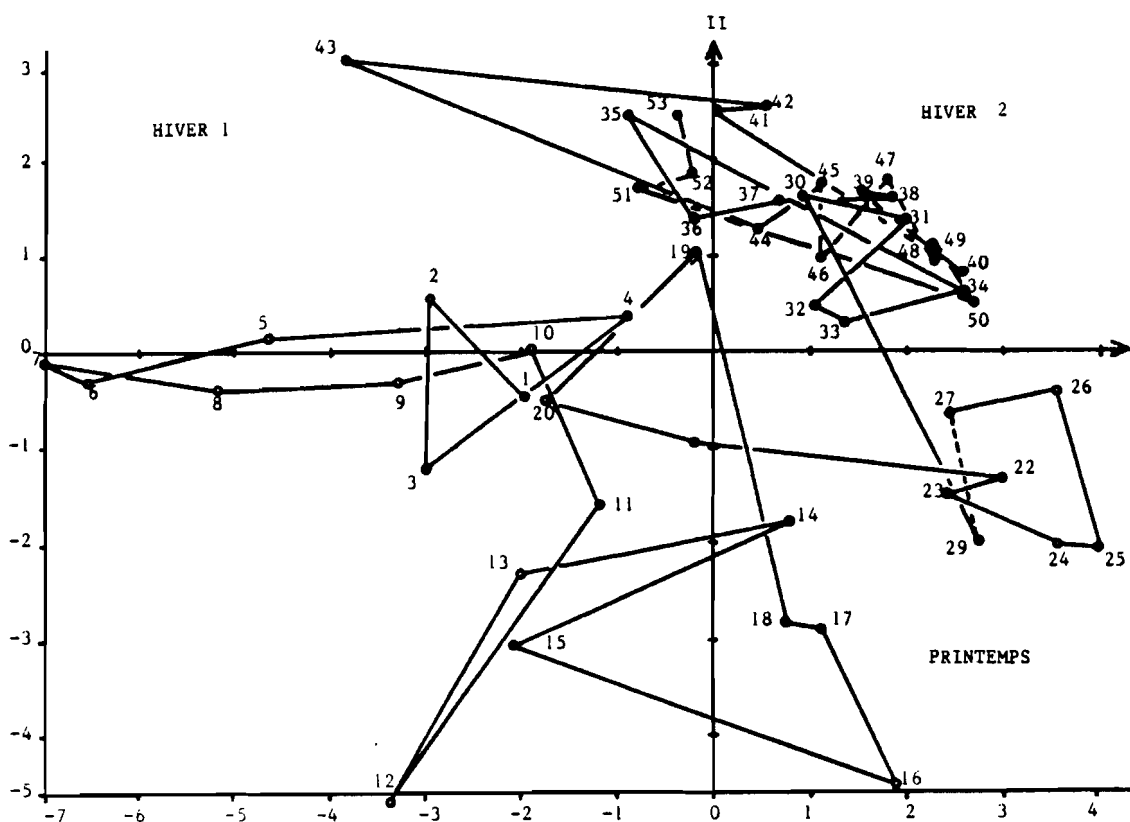


Fig. 67 : LES PLAGNES 1979 - ACP DIAGRAMME DES INDIVIDUS (Plan IxII)

III.3.3. Analyse en composantes principales des données physico-chimiques de l'émergence pérenne de Las Houtas, (système karstique du Baget)

A - Etude de 27 individus (juillet-décembre 1981 avec 8 descripteurs (fig. 68)

Afin de pouvoir comparer cette analyse avec celle effectuée par M. BAKALOWICZ, 1979 sur une crue de début de cycle, nous avons réduit le nombre de descripteurs total à 8.

Le diagramme des variables sur plan factoriel I-II (fig. 68B) ne recueille que 56 % de la variance totale (contre 85 % pour l'analyse de BAKALOWICZ). Cette différence est inhérente à la plus grande homogénéité des différentes

composantes de l'écoulement lors d'une crue isolée que pendant une fraction de cycle, par exemple la composition de l'eau de la réserve noyée est plus homogène au cours d'une crue qu'au cours d'un cycle, les différentes recharges ayant chacune ses caractéristiques propres.

L'axe 1 oppose les éléments dont la teneur varie dans le même sens que le débit (voir fig. 47) aux sulfates originaires de la zone noyée, dilués lors des crues.

L'axe 2 oppose des marqueurs lithologiques (sulfates, magnésium ...) aux éléments apportés par les précipitations (K, Cl). Le calcium et les bicarbonates, dont l'essentiel de la teneur est acquis près de la surface, occupent une position intermédiaire, et le sodium dont la teneur est régulée par les milieux argileux, se rapproche des marqueurs lithologiques. l'axe 1 représente donc en partie les temps de séjour, l'axe 2 l'origine spatiale de la minéralisation.

Les groupements mis en évidence par BAKALOWICZ (fig. 68A) opposent les ions apportés par la surface (Cl, Na, K) aux autres traceurs et c'est l'axe 3 qui discrimine dans ce nuage le magnésium et les sulfates des autres marqueurs.

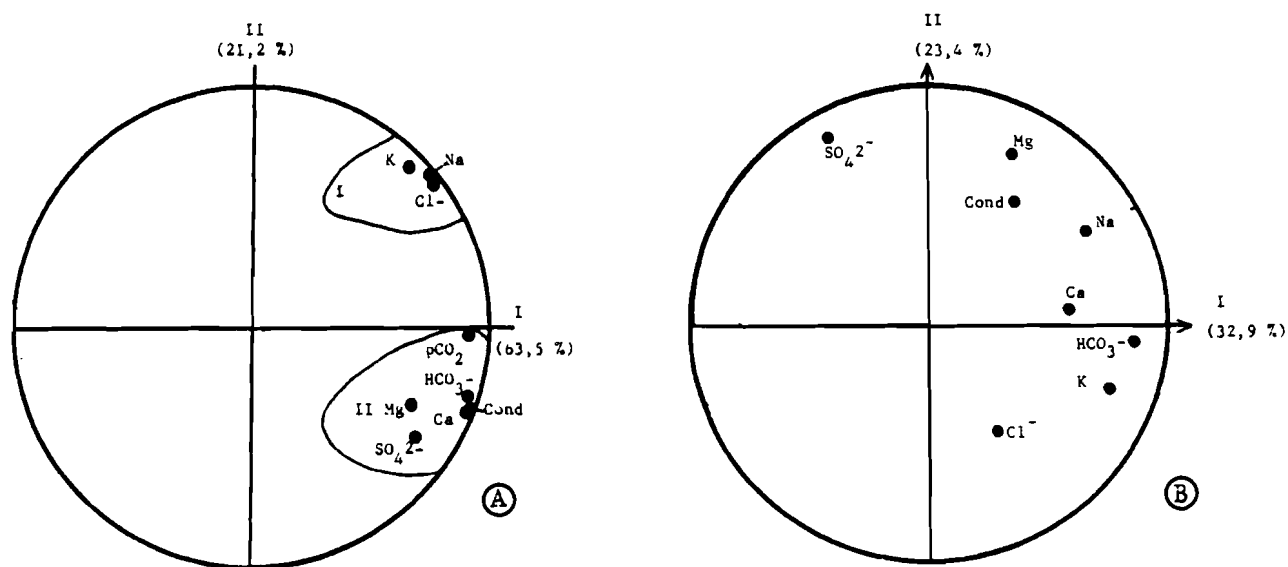


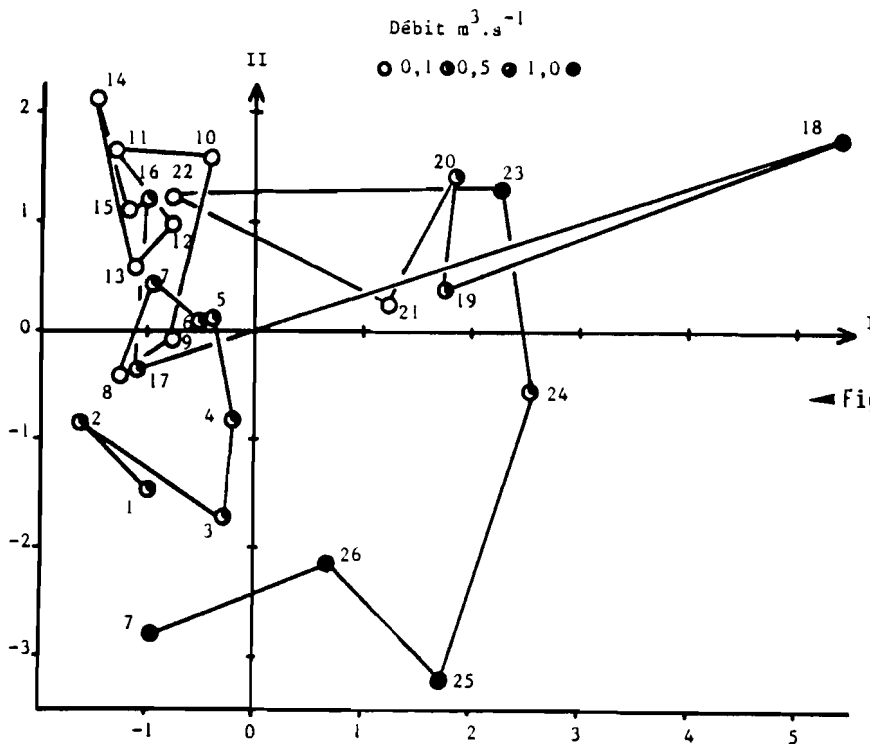
Fig. 68 : BAGET, ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (Plan IxII, 8 descripteurs).

- Ⓐ : Crue début cycle (BAKALOWICZ 1979)
- Ⓑ : 1981

Pour nos données, le diagramme des individus est agrémenté de figurés représentant les débits (fig. 69).

De la première crue de juillet (éch. 1 à 3) aux pics de crue de fin octobre (éch. 4 à 17), la décrue, le "tarissement", les petites remontées du débit; et le premier pic de crue et la montée du 2ème pic d'octobre apparaissent comme de simples relais de l'infiltration par les eaux de la réserve noyée, les remontées n'apportant qu'une infiltration chimiquement peu marquée.

La crue de fin octobre en revanche montre une croissance des indicateurs de l'infiltration (éch. 17 à 23) : ions liés à un épikarst carbonaté et traceurs de la pédospère. Par la suite, les crues de décembre amènent à l'exutoire des eaux riches en chlorures et potassium, mais pauvres en marqueurs lithologiques (éch. 24 à 27).



◀ Fig. 69 : BAGET, ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII, 8 descripteurs)

B - Etude de 27 individus avec 14 descripteurs (fig. 70)

Cette analyse, avec tous les descripteurs mesurés, montre des axes ayant une signification un peu différente.

L'axe factoriel I (recueillant 30 % de la variance) oppose les éléments caractéristiques de l'écoulement de basses eaux (Sr, SO₄, SiO₂) aux paramètres liés aux débits élevés (K, Mn, Cl). L'axe factoriel II (23 % de la variance) montre les paramètres perturbés indépendamment de la valeur du débit (pH, N, conductivité).

Le groupe Ca, HCO₃, Na a une position intermédiaire entre les marqueurs de l'infiltration liés au pic de crue et ceux qui en sont indépendants, ils tracent donc mieux que le manganèse, le potassium et les chlorures, l'infiltration lente. Pour l'interprétation de l'espace des individus (fig. 71) on peut donc distinguer trois grands groupes selon la fréquence de leurs variations :

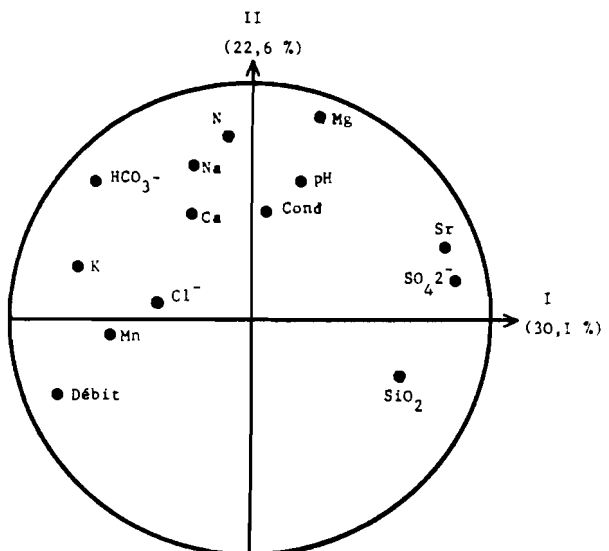


Fig. 70 : BAGET 1981, ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (Plan IxII, 14 descripteurs) ▶

- a : moyenne fréquence, infiltration retardée : axe 2 positif
- b : basse fréquence, zone noyée : axe 1 positif
- c : haute fréquence, infiltration rapide : axe 1 négatif

avec un groupe intermédiaire composé de HCO_3 , Na et Ca.

La fraction de cycle étudiée nous permet (fig. 71) de distinguer une phase de diminution du débit, avec relais de l'infiltration par le seul écoulement de la zone noyée entre juillet et septembre (éch. 1 à 14) puis de chasse en octobre-novembre des eaux riches en marqueurs de la zone non saturée karstique (éch. 15 à 22), puis de lessivage du sol avec de forts débits.

L'analyse en composantes principales permet donc de résumer le tableau d'analyse et de confirmer l'examen des courbes de variation en précisant l'interdépendance des variables. Les résultats obtenus à un pas de temps hebdomadaire sur une fraction de cycle sont en accord avec ceux obtenus sur plusieurs cycles au même pas de temps et sur des crues isolées à un pas de temps plus serré par M. BAKALOWICZ.

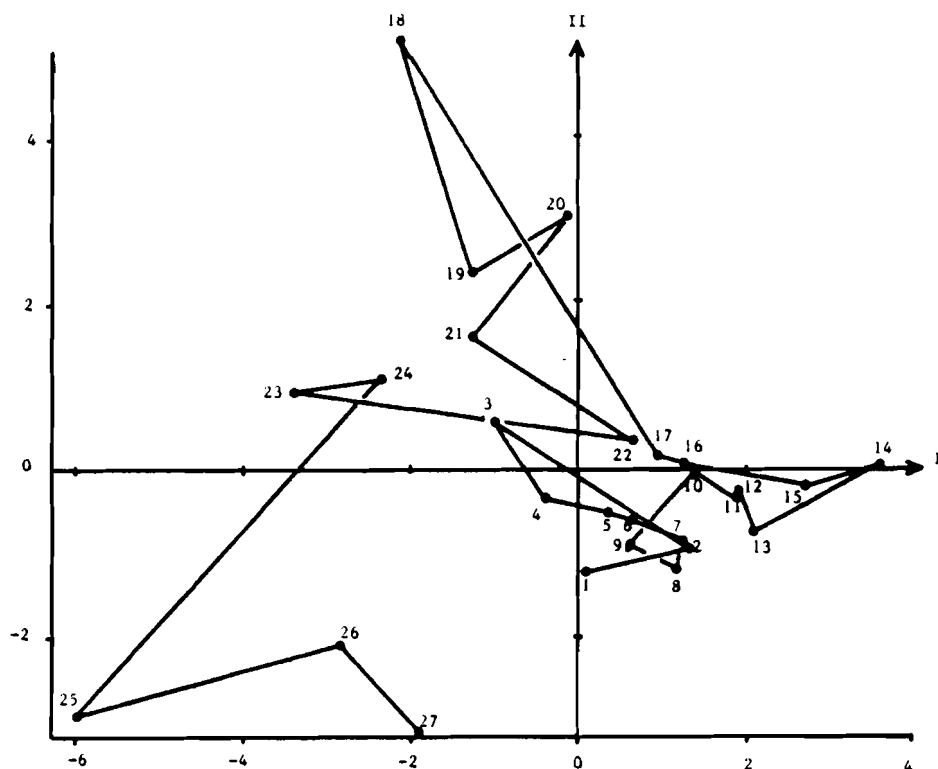


Fig. 71 : BAGET 1981, ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII, 14 descripteurs)

III.3.4. Etude de deux sources de la Montagne Noire (Poussarouet Malibert) au moyen de l'ACP

L'examen des histogrammes de fréquence (fig. 72 - GUYOT 1983) fait apparaître les caractéristiques des deux émergences : plage de variation de Poussarou plus étalée que celle de Malibert, pour les éléments à acquisition interne au système (éléments de l'équilibre calco-carbonique) : Malibert évacue des eaux mieux mélangées, en provenance de milieux plus homogènes. La plurimodalité de la distribution des bicarbonates et du magnésium, la dissymétrie de celle du calcium montrant qu'à Poussarou coexistent dans le réservoir des milieux

hétérogènes bien hiérarchisés, capables de faire transiter vers l'exutoire une information peu déformée.

Les chlorures et le potassium en revanche, ont des distributions dissymétriques et des teneurs plus élevées à Malibert qu'à Poussarou, conséquence de l'existence d'un sol et d'une végétation sur l'impluvium : le sol permet la concentration des chlorures par évapotranspiration, la végétation concentre le potassium que libère la matière organique en décomposition.

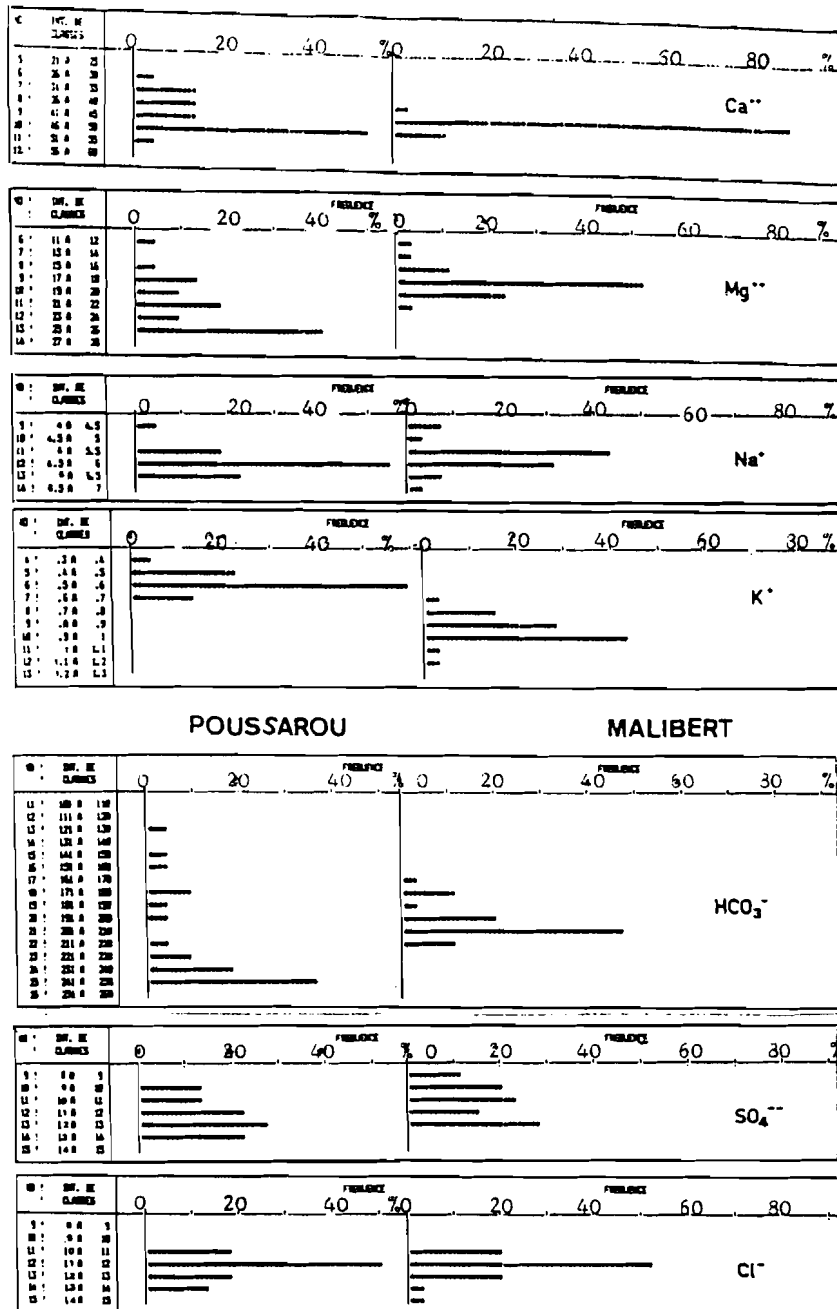


Fig. 72 : POUSSAROU ET MALIBERT : HISTOGRAMMES DES TENEURS (GUYOT 1983)

L'examen de la crue étudiée simultanément par J.L. GUYOT (1983) sur les deux sources confirme le comportement de l'ion chlorure (fig. 73) montrant un pic à Malibert, une dilution à Poussarou.

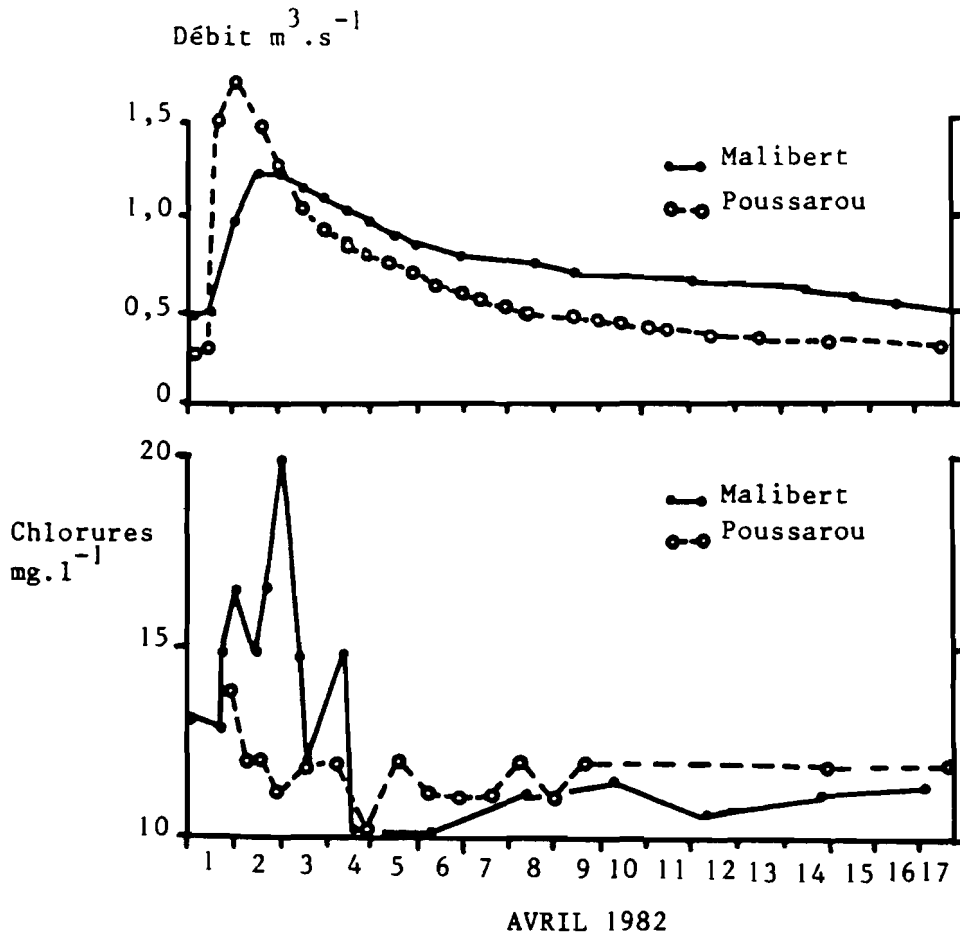


Fig. 73 : POUSSAROU ET MALIBERT : VARIATION DES TENEURS EN CHLORURES (d'après GUYOT 1983)

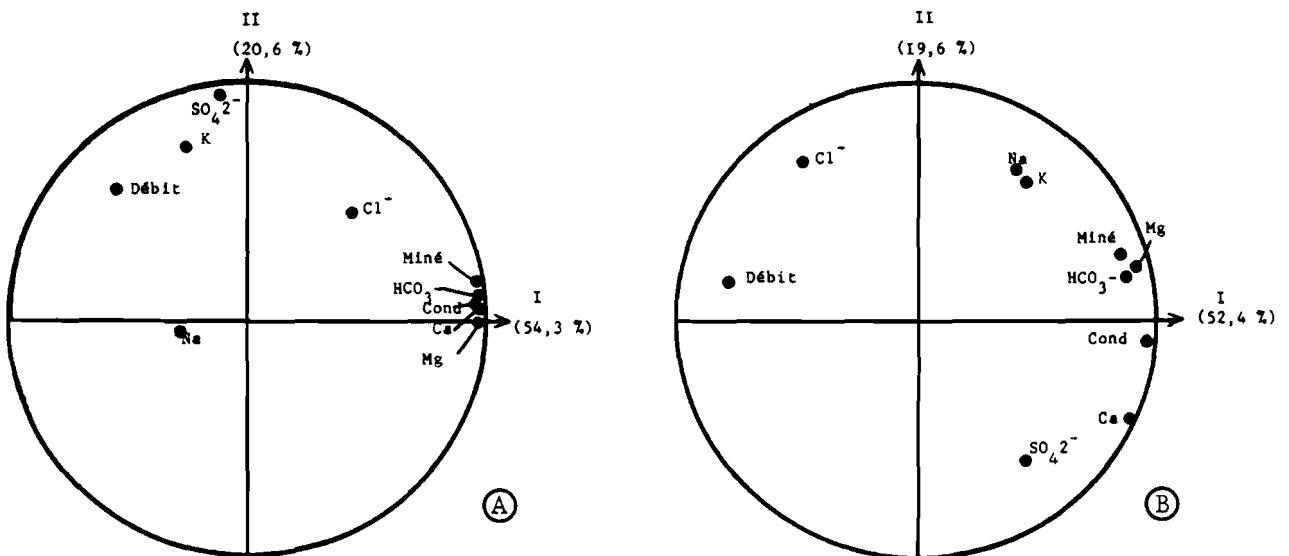


Fig. 74 : (A) : POUSSAROU ; (B) : MALIBERT - ACP - DIAGRAMME DES VARIABLES (Plan I xII)

L'analyse en composantes principales des valeurs hebdomadaires des teneurs chimiques a été faite séparément sur les deux sources. Les diagrammes des variables (fig. 74) ont un aspect voisin : l'axe 1 représente la minéralisation et la dilution inversement proportionnelle au débit. L'axe 2, à Malibert, oppose les éléments marqueurs de l'infiltration (Cl, Na, K) aux éléments pouvant venir des marnes (SO₄).

À Poussarou une telle opposition n'existe pas, et les sulfates, le potassium et dans une moindre mesure les chlorures, directement issus de la pluie sans stockage intermédiaire dans le sol, sont liés aux débits élevés. On remarquera particulièrement, la bonne relation Mg-Ca dans le système dolomitique (Poussarou) par opposition à Ca-SO₄ dans le système calcaire (Malibert), ainsi que la meilleure relation débit-infiltration (potassium...) à Poussarou qu'à Malibert, rappelant que le sol joue un rôle considérable dans l'hydrocinématique de l'entrée des systèmes. Le diagramme des individus montre la similitude de comportement des deux exutoires eu égard aux diagrammes des variables (fig. 75).

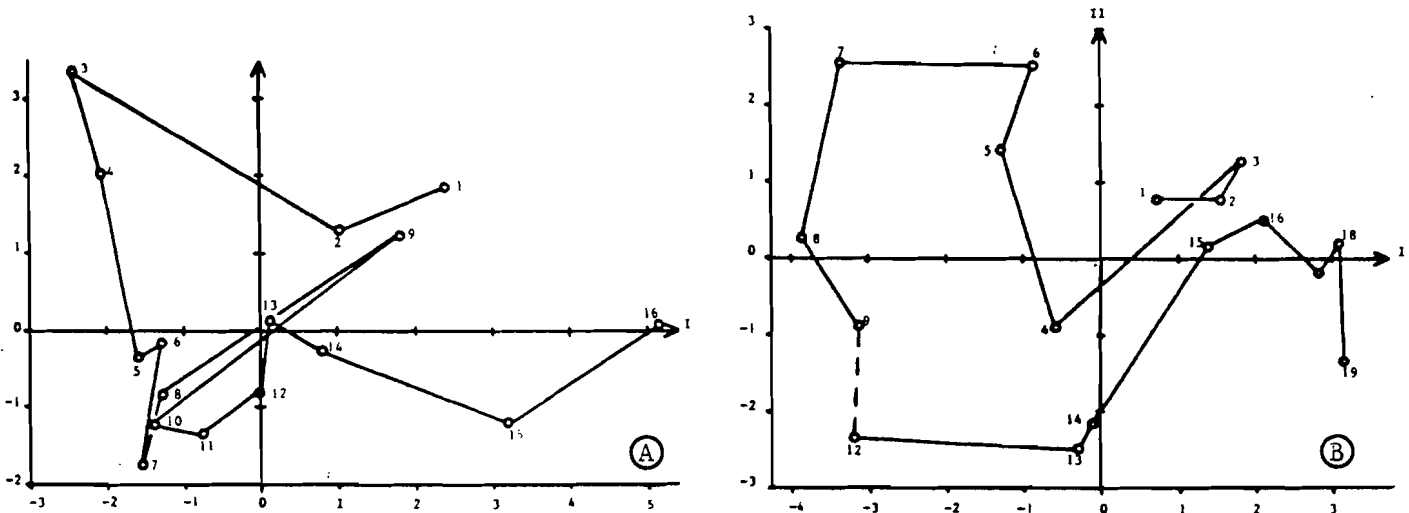


Fig. 75 : (A) : POUSSAROU ; (B) : MALIBERT - ACP - DIAGRAMME DES INDIVIDUS (Plan IxII)

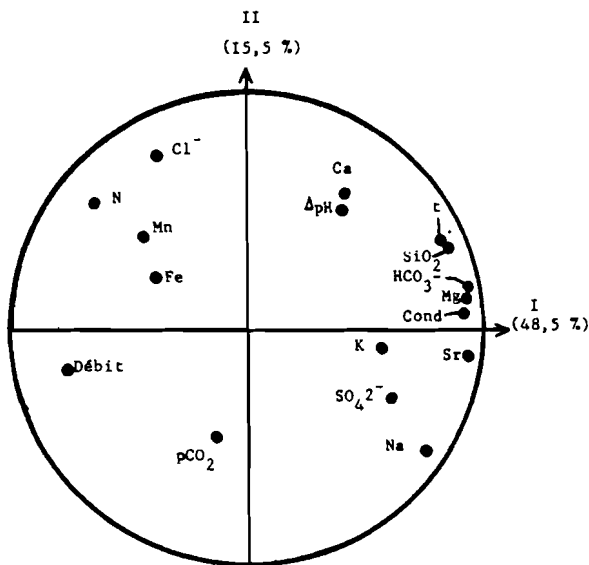


Fig. 76 : VAUCLUSE HEBDOMADAIRE : ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan IxII)

III.3.5. Etude de la Fontaine de Vaucluse au pas hebdomadaire au moyen de l'ACP (Cycle 81-82)

Les trois analyses montrées ici sont complémentaires, la première traite de 17 descripteurs sur 36 individus, il s'agit des analyses les plus complètes (printemps 1981 - hiver 1982-83), la seconde regroupe les trois périodes de crue (printemps 81, hiver 81-82, hiver 82-83) la troisième traite les étiages (hiver 80-81, été 81, été 82).

A - Analyse globale des deux cycles :

Le diagramme factoriel des variables (fig. 76) montre un axe 1 opposant les descripteurs qui sont liés aux débits élevés (Cl⁻, N, Mn, Fe, pCO₂) à ceux qui sont liés aux basses eaux du tarissement (Ca, sursaturation, t, SiO₂, HCO₃⁻, Mg, conductivité, Sr, K, SO₄²⁻, Na).

Le diagramme des individus (fig. 77) différencie les basses eaux de 1981 de celles de 1982 : le tarissement 1981, comme nous l'avons vu sur les courbes de variations est un tarissement vrai, qui ne sollicite que l'écoulement de la zone noyée (température de 13,1°C en équilibre avec celle du réservoir, absence de précipitations) les eaux restituées sont sursaturées vis à vis de l'équilibre calco-carbonique (pH élevé), riches en Ca, Mg, HCO₃⁻, SiO₂.

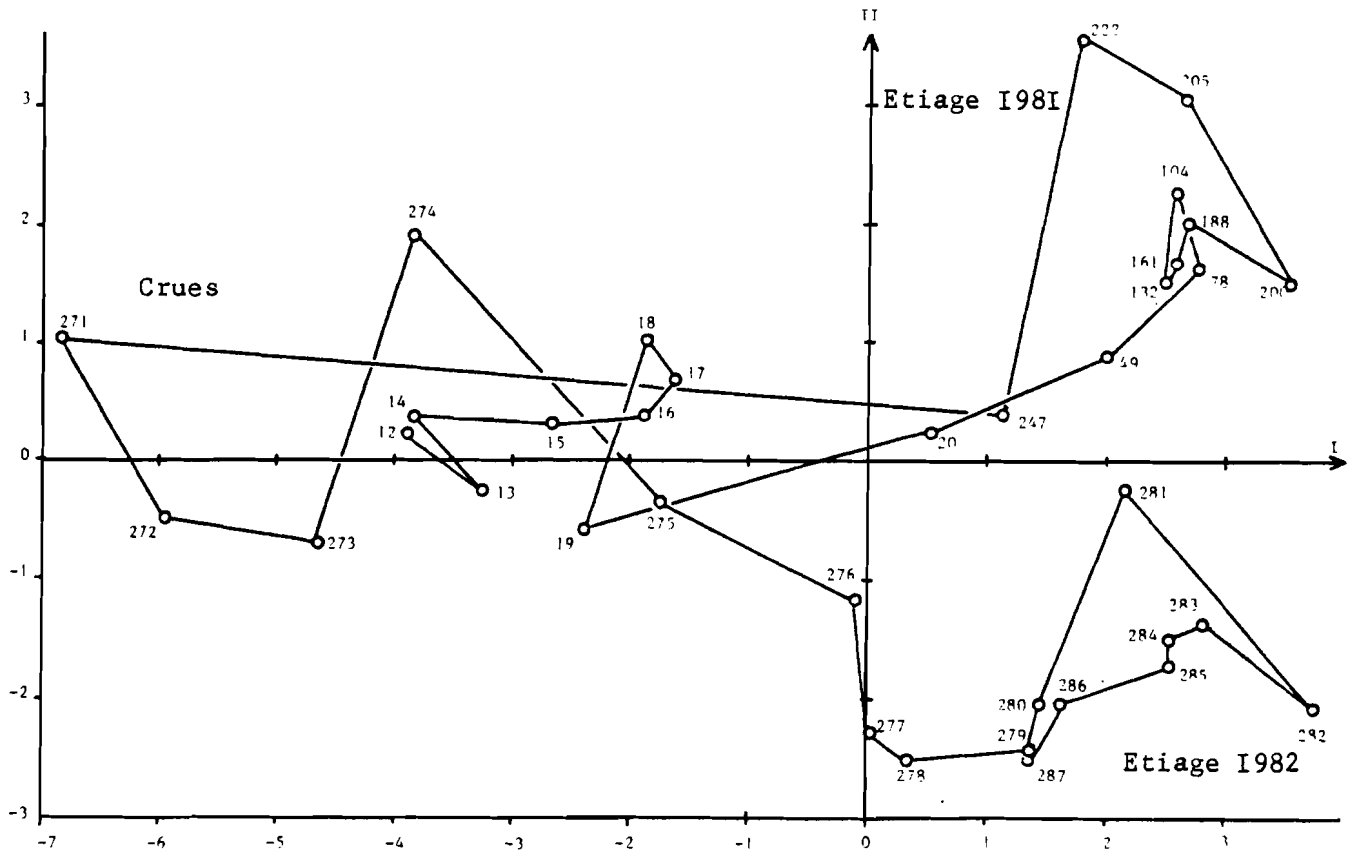


Fig. 77 : VAUCLUSE HEBDOMADAIRE : ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII)

Les basses eaux de 1982 en revanche, riches en potassium, sulfates et sodium, témoignent d'une persistance, au cours de ce cycle, d'une infiltration retardée, marquée sur les courbes de variation (fig. 52) par le non retour de la température à la valeur stable de 13,1°C et du magnésium à 7mg.l⁻¹.

L'analyse en composantes principales discrimine donc bien, pour les faibles

débits, les eaux ayant la marque de la zone noyée de celles en provenance du sol et de l'épikarst. Les périodes de débit élevé ne sont pas bien distinctes.

B - Les périodes de crue

Le plan factoriel 1-2 (fig. 78) sépare bien quatre groupes de descripteurs: l'axe 1 oppose les débits élevés d'eau chargée en manganèse aux eaux minéralisées en marqueurs de la zone capacitive noyée (conductivité, température, HCO_3^- , SiO_2 , Mg, Sr).

L'axe 2 oppose les éléments apportés par l'infiltration : N et Cl aux restitutions brutales et brèves signant l'infiltration immédiate et rapide, SO_4 et Na aux perturbations à plus basse fréquence, plus étalées. On notera que si N et Cl sont restitués indépendamment du débit et de la minéralisation acquise au cours de séjours longs, le groupe Na, SO_4 est caractérisé par des débits faibles et une minéralisation calco-carbonique assez importante (abscisse sur l'axe 1). Cette position confirme la remarque faite sur le traitement global des deux cycles : ce groupe caractérise une infiltration retardée mélangée à la restitution d'eau des milieux capacitifs noyés.

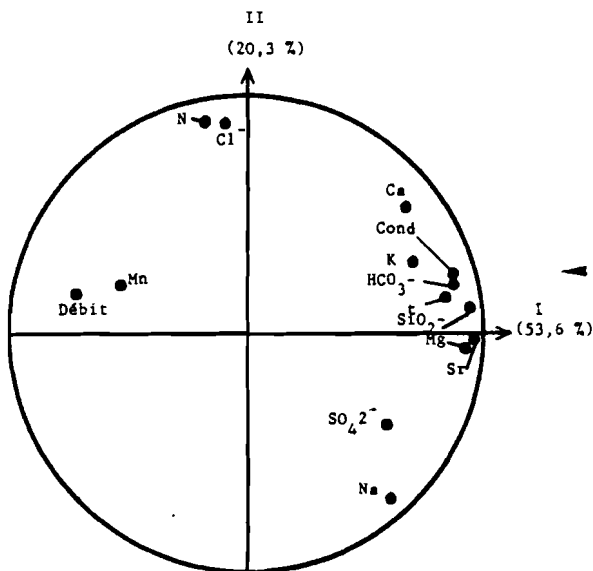


Fig. 78 : VAUCLUSE CRUES HEBDOMADAIRE ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan IxII)

L'examen du diagramme des individus (plan I - II) (fig. 79) permet de différencier les trois épisodes pluvieux des cycles 81 et 82 :

a) L'épisode du printemps 1981 (7 à 49)

qui n'intervient pas à la suite d'une période d'intense évapotranspiration, occupe une faible plage le long de l'axe 2 : cette crue-décru se traduit presque exclusivement par une dilution des eaux issues des blocs de la zone noyée par les eaux météoriques, puis par l'élimination progressive de l'écoulement de cette composante d'infiltration.

b) L'épisode d'hiver 81-82 (247 à 281)

qui intervient après un long étiage avec petites précipitations, occupe une vaste plage le long de l'axe 2 avec plusieurs variantes : la crue se traduit par une dilution des éléments marqueurs du temps de séjour, avec augmentation

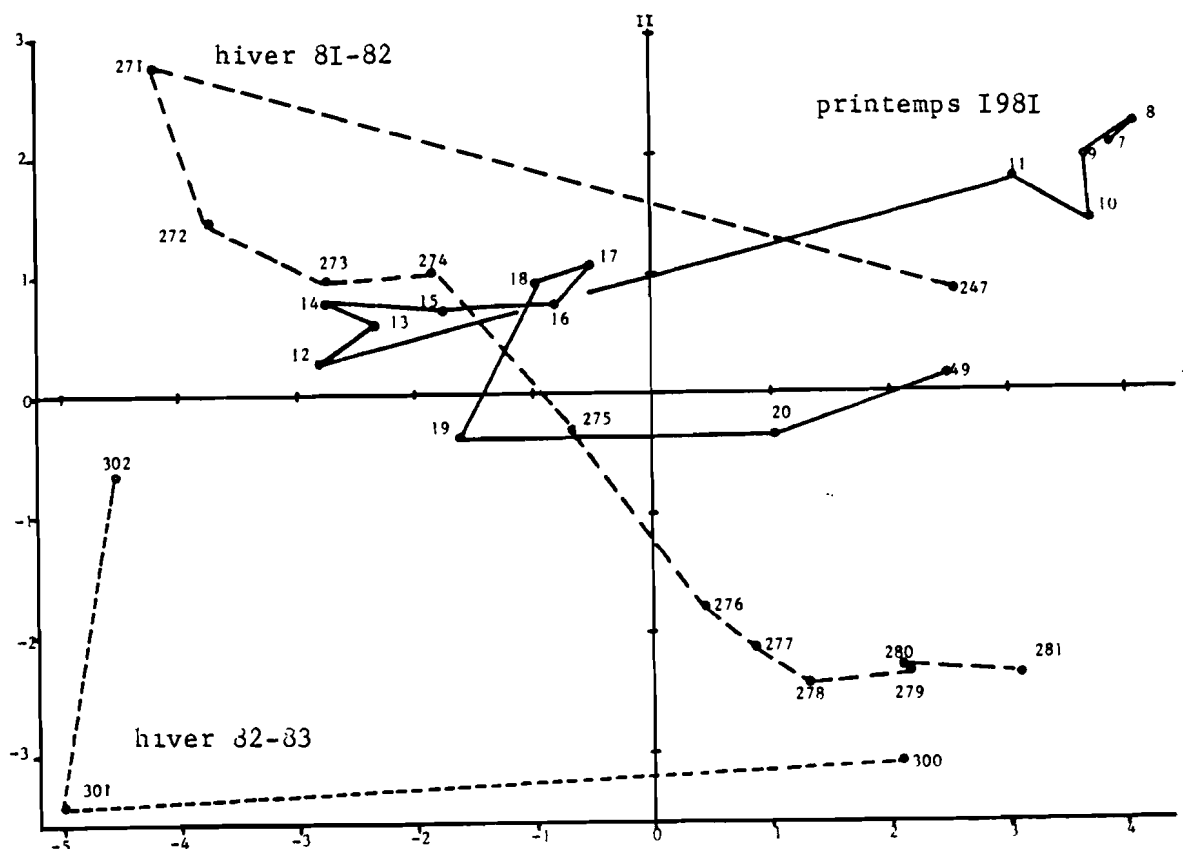


Fig. 79 : VAUCLUSE CRUES HEBDOMADAIRE : ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII)

(pic de crue) des chlorures et nitrates empruntés au sol (infiltration directe). A la décrue, l'infiltration directe est relayée par l'infiltration retardée par l'épikarst, riche en sulfates et sodium.

c) L'épisode d'hiver 82-83 (300-302)

mobilise des eaux pauvres en chlorures et nitrates, riches en sulfates et sodium, apportées par l'infiltration retardée dont la persistance a été montrée au cours de l'épisode de basses eaux 1982.

La différence entre ces trois crues montre le rôle de l'histoire hydrocinématique dans la chimie des crues.

C - Les étiages (fig. 80 et 81)

La différenciation des trois périodes de basses eaux oppose l'hiver 1981 dont les eaux bicarbonatées, conductrices, riches en K et N, gardent la mémoire de l'infiltration antérieure (lessivage des sols au cours de la crue précédente). L'été 1981 en revanche mobilise les eaux plus chaudes, plus riches en Ca, Mg, SiO₂, éléments dont la teneur élevée a été acquise lors d'un séjour prolongé dans les blocs. L'étiage 1982 restitue des eaux moins minéralisées mais dont la teneur en sulfates décroît avec le débit au cours de cet épisode, l'infiltration retardée persiste.

Cette méthode nous permet donc de mesurer l'impact des épisodes de crue sur la chimie des étiages qui suivent, elle illustre aussi le rôle de l'histoire hydrocinématique des systèmes.

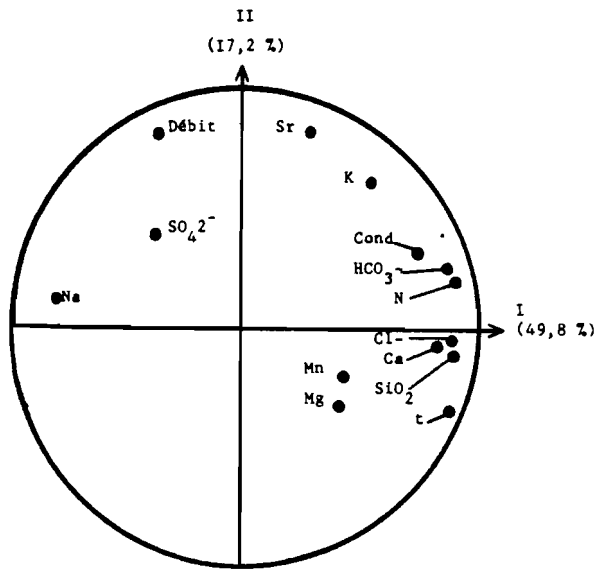


Fig. 80 : VAUCLUSE ETIAGES HEBDOMADAIRE : ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan IxII)

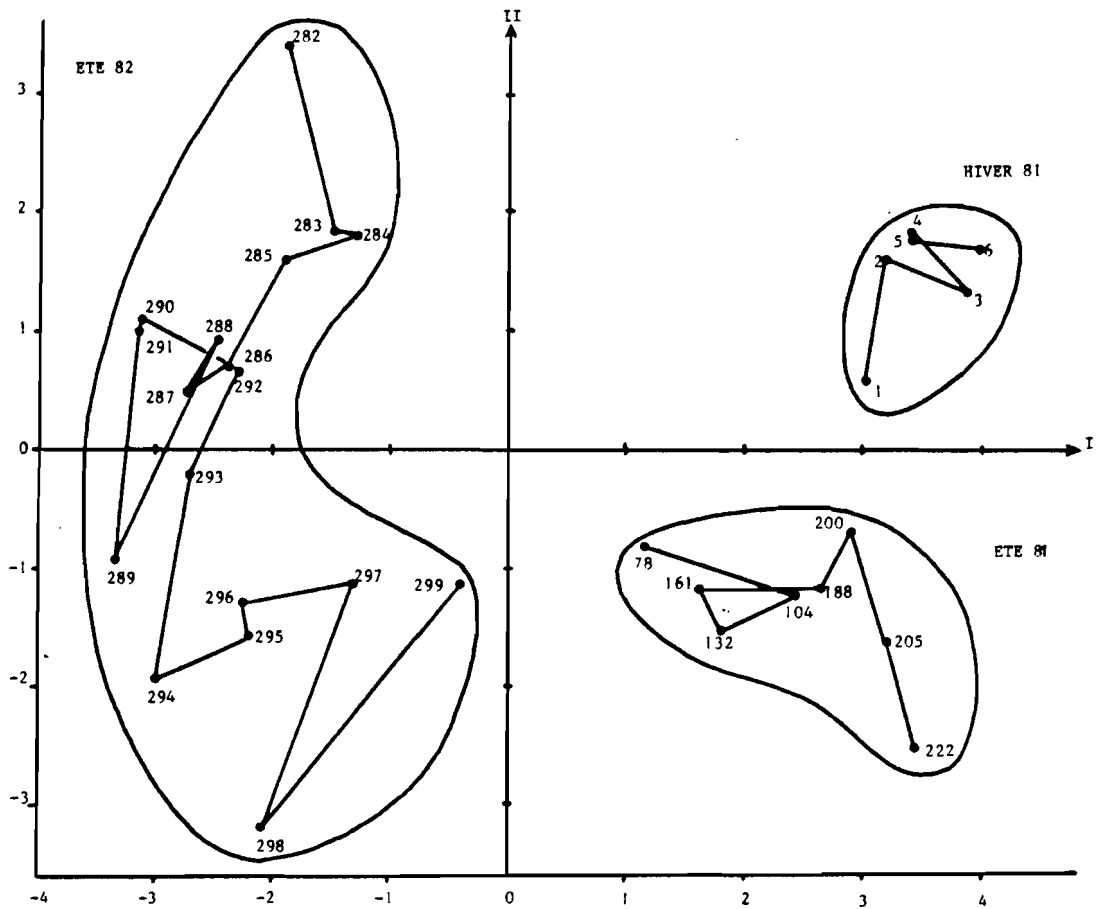


Fig. 81 : VAUCLUSE ETIAGES HEBDOMADAIRE : ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII)

III.4. INTERET DES SUIVIS AU PAS DE TEMPS HEBDOMADAIRE

L'étude au pas de temps hebdomadaire et à l'échelle du cycle d'émergences de systèmes carbonatés situés dans le Jura, le Chablais, les Pyrénées, la Montagne Noire et la Provence a été abordée par plusieurs méthodes complémentaires:

- examen détaillé et synthétique des courbes de variations physico-chimiques diachroniques,
- distribution des fréquences des conductivités,
- analyse en composantes principales, requise par la prise en compte simultanée de l'intégralité intemporelle du contenu physico-chimique.

L'approche hebdomadaire à l'échelle du cycle confirme les fonctionnements mis en évidence par les auteurs ayant travaillé au pas horaire ou journalier à l'échelle de la crue sur les mêmes émergences : même sur des systèmes à haute fréquence de variation, le pas hebdomadaire échantillonne significativement les phénomènes. La vision plus globale fournie par l'étude simultanée de plusieurs systèmes sur plusieurs cycles permet, mieux que l'étude intensive d'un seul système sur une durée limitée, de bien accéder aux variations saisonnières et à leur reproductibilité inter-cycles. Cette approche démontre que la comparaison du comportement hydrocinématique des émergences n'a de sens que sur la même période, et que dans une région climatiquement homogène.

Le suivi hebdomadaire, interprété à l'aide de l'ACP centrée réduite, est une méthode bien adaptée à l'identification des phases de

- tarissement ou contribution exclusive des eaux de réserve,
- infiltration "immédiate" ou passage quasi-instantané à l'exutoire, sans variation de débit, d'eaux marquées par la surface,
- infiltration "rapide", ou passage à l'exutoire d'eaux en provenance directe de la surface, marqué par une augmentation du débit.
- infiltration "différée", ou passage à l'exutoire d'eaux à transit retardé par une réserve tampon, l'aquifère épikarstique. Cette composante est surtout mise en évidence lors de la décrue.

Les eaux d'infiltration, selon leur "histoire" en surface (importance du retard dans l'épikarst et intensité des phénomènes d'évapotranspiration) apparaissent à l'émergence avec des teneurs supérieures (Baget, Malibert...) ou inférieures (Pont de Gys...) à celles de la phase de tarissement.

C H A P I T R E IV

A N A L Y S E S A U P A S D E
'
T E M P S Q U O T I D I E N

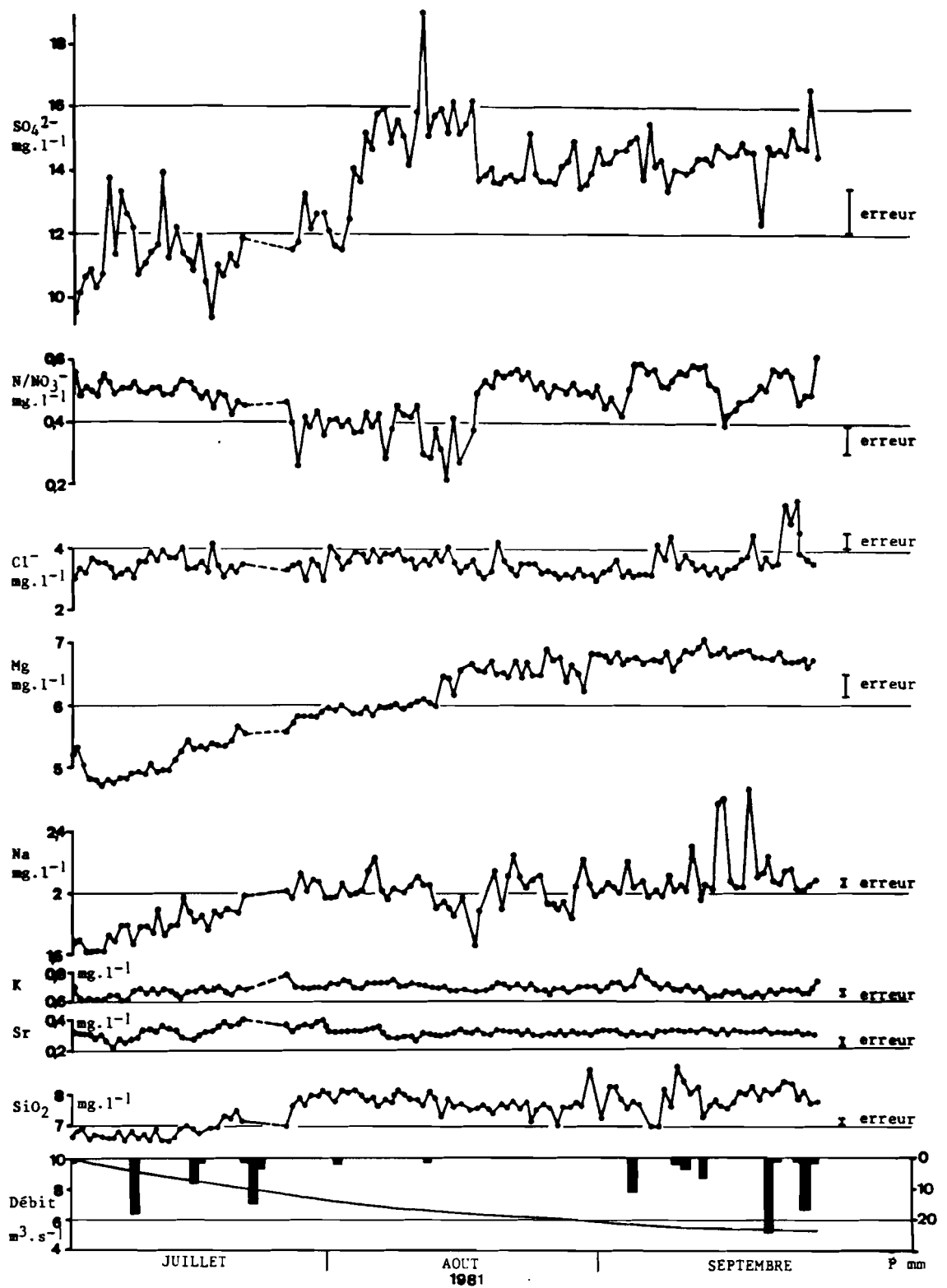


Fig. 82 : FONTAINE DE VAUCLUSE 1981 : DECRUE ET TARISSEMENT, VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

ANALYSES AU PAS DE TEMPS QUOTIDIEN

Menée en France depuis les années soixante dix, l'analyse physico-chimique des crues des émergences karstiques apporte de nombreux renseignements sur l'aptitude de l'aquifère à transférer ou à faire transiter un signal d'entrée, de l'impluvium à l'émergence. Elle renseigne sur les lieux de stockage et sur les modalités du transit dans l'aquifère. Malheureusement, elle relie un grand nombre de paramètres de sortie à un grand nombre de variables d'entrée, et de nombreuses réponses physico-chimiques demeurent mal expliquées à ce jour, parce que le marquage physico-chimique des eaux est évolutif avec des conditions thermodynamiques, en particulier avec le temps de résidence du fluide dans son encaissant. La crue est donc un phénomène complexe. Le suivi des étiages en revanche s'intéresse au coeur même du fonctionnement de l'aquifère en l'absence de stimulation récente, c'est pourquoi j'ai étudié des aquifères karstiques (Aurel, Groseau, Vaucluse, voir II.7.) en lointaine décrue et en tarissement, afin de simplifier le nombre des unités de drainage en service.

L'étiage 1981 et les remontées de débit qui l'ont perturbé ont été suivis au pas "quotidien" (voir II.1.) sur les trois émergences vauclusiennes (plus de 600 échantillons). Sur ces émergences j'ai étudié les courbes de variation physico-chimiques, la distribution des conductivités (adaptée au paramètre silice, voir III.2 et IV.2.

Les données ont été ensuite traitées en ACP et en analyse discriminante.

IV.1. COURBE DE VARIATION QUOTIDIENNE DE TROIS SOURCES DU BASSIN DE LA FONTAINE DE VAUCLUSE

IV.1.1. Etude des variations en décrue et tarissement

La fig. 82 montre l'évolution des teneurs en huit éléments à la Fontaine de Vaucluse au cours de la décrue et du tarissement 1981. On remarquera, au cours de ces deux épisodes que les précipitations à la station de St Christol sont peu abondantes et ne modifient pas le débit de l'émergence qui décroît régulièrement de 10 à 5 m³.s⁻¹ de début juillet à fin septembre.

Le passage de la décrue au tarissement, repéré sur le diagramme semi-logarithmique de la fig. 83 se marque diversement selon l'élément, dans la chimie de la source : début août les sulfates passent des valeurs diluées de la crue (10-12 mg.l⁻¹) aux valeurs stabilisées du tarissement (14 à 15 mg.l⁻¹) par l'intermédiaire de teneur élevée au cours de la décrue, les valeurs les plus basses ont remonté à la mi-août, la teneur d'étiage étant plus élevée.

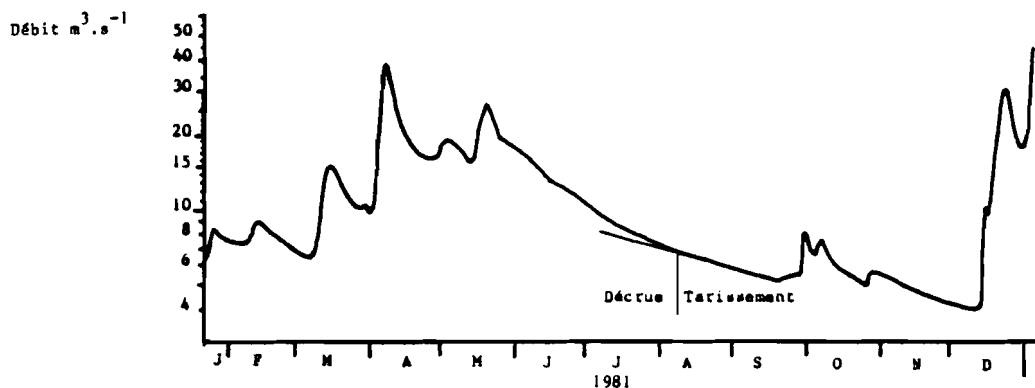


Fig. 83 : FONTAINE DE VAUCLUSE 1981 : HYDROGRAMME (ECHELLE SEMI-LOGARITHMIQUE)

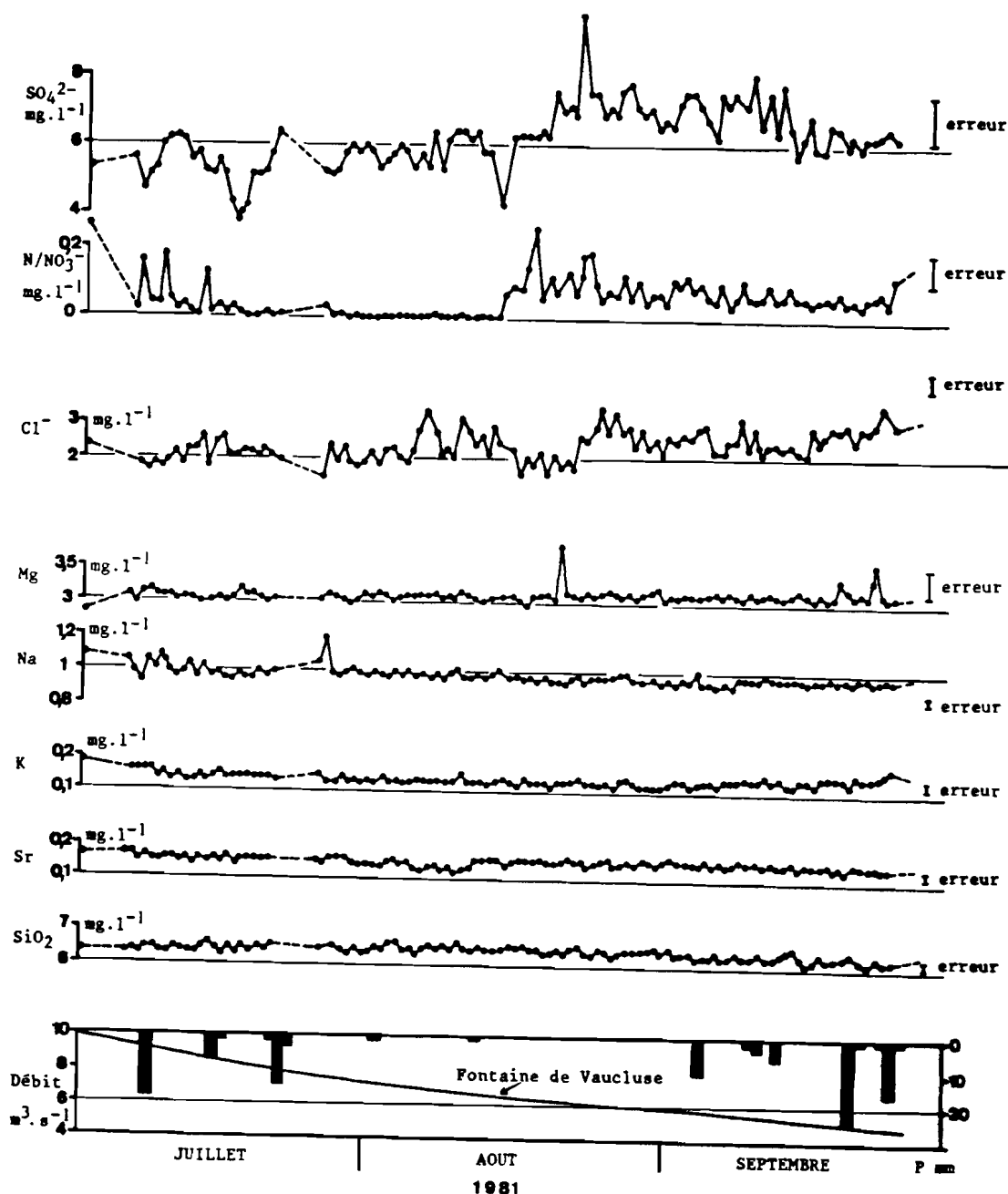


Fig. 84 : GROSEAU 1981 : DECRUE ET TARISSEMENT, VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

Les chlorures varient peu à cette période, seuls quelques pics liés aux précipitations estivales signalent le passage direct et rapide d'eau d'infiltration très chargée. La remontée du magnésium depuis début juillet marque un palier début août avant un saut de teneur d' 1 mg.l^{-1} environ, précédant la stabilisation au cours du tarissement. Cet élément est le plus lent à atteindre un palier. Le sodium atteint son palier voisin de 2 mg.l^{-1} à la fin de juillet. Après, les précipitations estivales font monter sa teneur, mais pas de manière synchrone avec les chlorures. Le potassium et le strontium varient peu. La silice a ses valeurs maximales fin juillet - début août.

Ces variations démontrent que la cessation du transit des eaux d'infiltration, lors du passage de la décrue au tarissement est un phénomène bien marqué dans la chimie de l'émergence. La fin de la décrue montre le passage des eaux d'infiltration lente, qui se sont chargées en sulfates, en chlorures et en silice dans la zone non saturée, mais qui sont pauvres en nitrates,

parce qu'elles ont suivi le lessivage massif du sol de la crue de printemps : le stock disponible de nitrates était faible au moment de leur infiltration. En revanche, ayant séjourné plus longtemps dans la matrice carbonatée, elles ont acquis une teneur en magnésium intermédiaire (6mg.l^{-1}) entre celle des eaux d'infiltration rapide, au séjour plus bref, et les eaux de la zone noyée, au séjour beaucoup plus long. Au cours du tarissement, le système est transparent aux chlorures et au sodium, qu'il restitue à faible débit et à forte concentration.

Au Groseau (fig. 84) on remarque le maximum des sulfates fin août, c'est à dire 15 jours après le maximum de Vaucluse. Les nitrates, à basse teneur à la fin de la décrue, montent en même temps qu'à Vaucluse. Les chlorures ne montrent pas de tendance marquée, les eaux de tarissement sont plus chargées que celles de la décrue, la conductivité, le magnésium, le strontium et la silice ne varient pas de manière significative. Le sodium et le potassium diminuent en juillet, ils sont très stables ensuite.

Contrairement à la Fontaine de Vaucluse, la décrue et le tarissement mobilisent au Groseau des faciès hydrochimiques très homogènes, le système du Groseau semble donc être un meilleur "mélangeur" d'eaux, donc un système moins ksrstifié (au sens de hiérarchisé) que celui de Vaucluse.

IV.1.2. Etude des variations en crue d'été et basses eaux d'automne

La pluies de la fin septembre (fig. 85) font monter le débit de la Fontaine de Vaucluse de 5 à $8\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. On observe trois maxima de débit, et, au début novembre, elle a repris sa valeur de fin septembre. Les modifications de la chimie concernent les sulfates : un grand pic, à la mi-octobre, précède une période d'oscillations plus amples qu'avant la crue. Les nitrates dépassent la valeur de $0,6\text{mg.l}^{-1}$ fin septembre quand la pluie commence et avant que le débit ne monte. En même temps, le sodium augmente jusqu'à $2,3\text{mg.l}^{-1}$, le potassium est dilué. En octobre, le strontium ne varie pas, le manganèse ne montre de petits pics que début décembre.

C'est la silice qui enregistre la variation la plus spectaculaire, très peu de temps (trois jours) après le premier pic de crue.

Elle présente des oscillations en dents de scie. Après cet épisode, la teneur ne dépasse plus 8mg.l^{-1} .

On peut donc dans ces épisodes distinguer l'impact d'une infiltration immédiate, signé par les pics de chlorures, de sodium, de sulfates, de celui d'une infiltration rapide, puis lente, marqué par la dilution des teneurs en silice, puis en potassium, et par l'augmentation des teneurs en sodium et en magnésium. La faible augmentation du débit eu égard à la lame d'eau précipitée montre les transferts d'eau opérés dans la zone non saturée (recharge de l'épikarst) et dans la zone noyée (recharge des blocs capacitifs). On remarquera que les très faibles pluies de début décembre ont un fort impact sur la chimie, augmentation des sulfates, du manganèse, augmentation suivie d'une diminution des nitrates, des chlorures et du magnésium. Cette petite pluie mobilise donc les eaux de la zone non saturée ou l'évapotranspiration a reconcentré certains éléments présents dans la pluie ou le sol. Les éléments dont la teneur est limitée par la cinétique de mise en solution (Mg) ou par l'importance d'un stock disponible (N, Cl) montrent un pic au-dessus de la teneurs d'étiage, suivi d'un pic négatif de dilution.

Au Groseau (fig. 86), on observe une augmentation, puis une dilution des teneurs en sulfates. Les teneurs en nitrates augmentent en juillet, mais les maxima sont synchrones de la dilution des sulfates (novembre), les chlorures montrent également des pics pendant cette période, mais leur teneur à globalement monté fin septembre, début octobre. La teneur en magnésium monte légèrement à la mi-octobre et les pics s'observent fin septembre et fin novembre. Le potassium monte un peu à la mi-octobre, les autres éléments demeurent stables comme en décrue et en tarissement. Le Groseau répercute mal

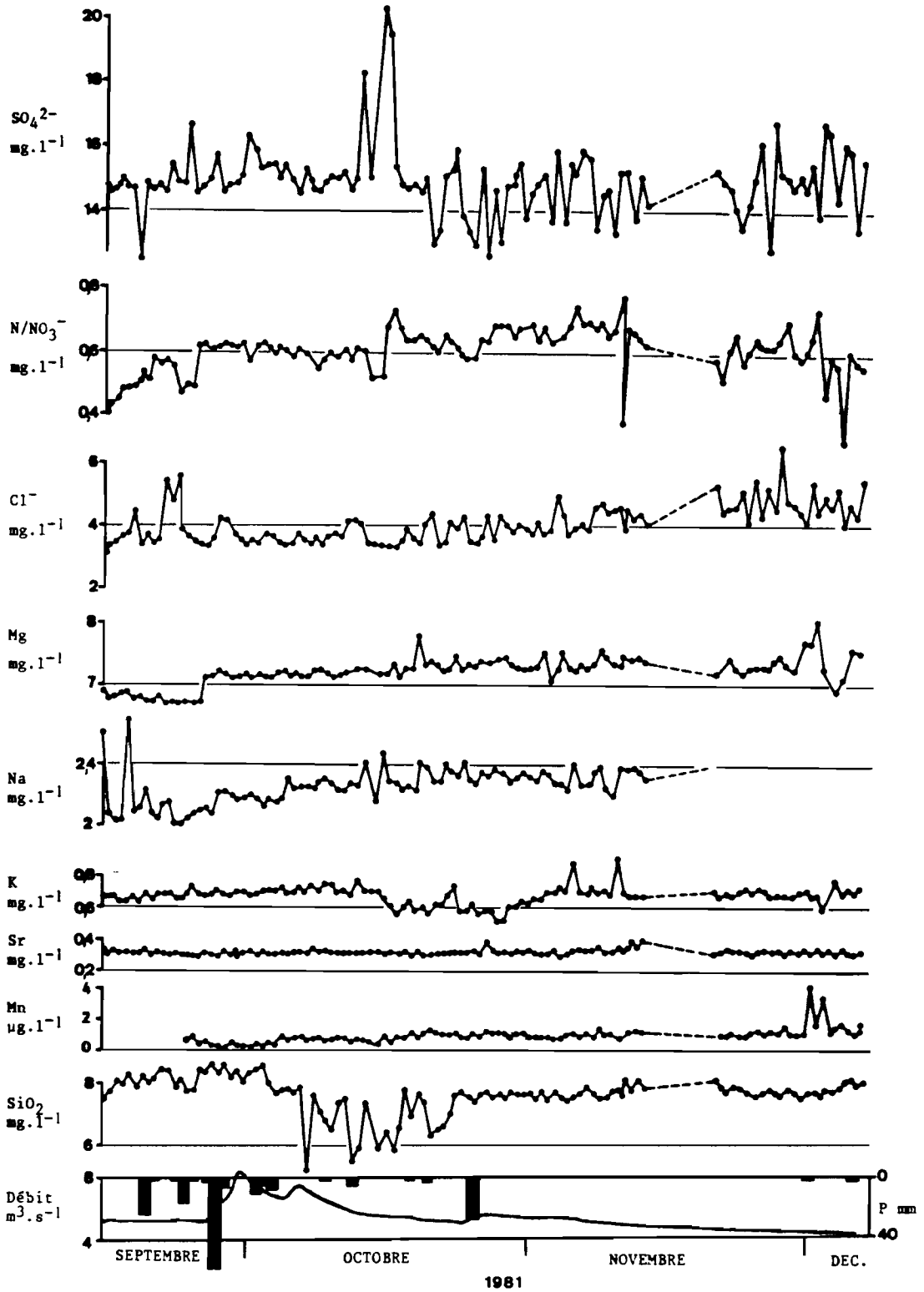


Fig. 85 : FONTAINE DE VAUCLUSE 1981 : CRUE D'ETE ET BASSES EAUX D'AUTOMNE, VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES.

les impulsions pluviométriques, il reproduit ici certains phénomènes observés à la "Fontaine" trois semaines auparavant.

IV.1.3. Etude des variations en crue d'hiver

A la Fontaine de Vaucluse, au cours de cette crue (fig. 87) tous les éléments analysés varient, mais leurs comportements sont très différents.

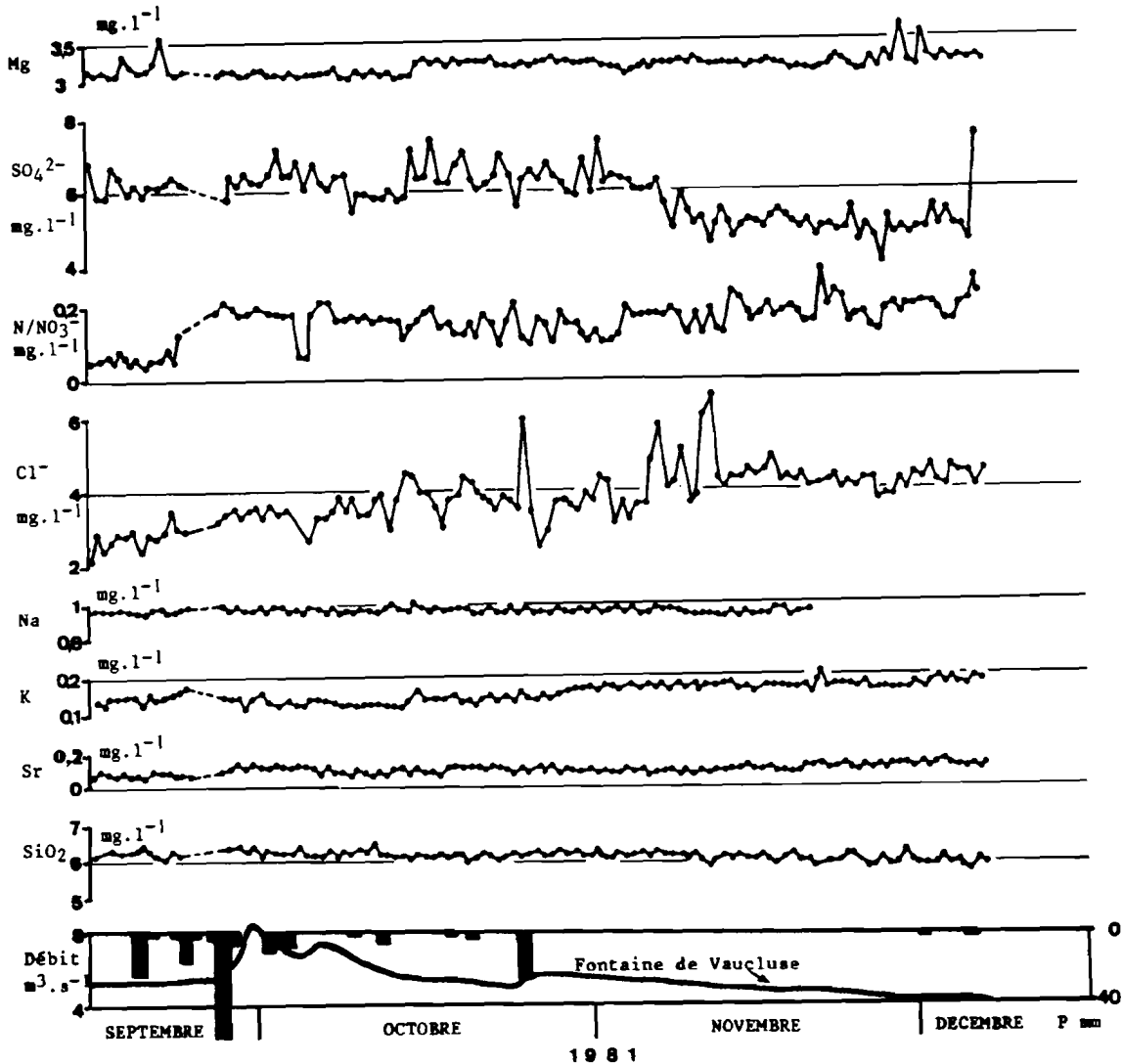


Fig. 86 : GROSEAU 1981 : CRUE D'ETE ET BASSES EAUX D'AUTOMNE, VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

Comme les précipitations se sont étalées sur trois semaines, les tendances observées sont périodiques. Certains éléments suivent des pics brefs avec retour aux valeurs initiales ainsi les chlorures, le potassium et le manganèse éléments empruntés aux précipitations et au lessivage du sol (MBA 1971, FIGUERES 1978). Ces pics sont bien corrélés avec les épisodes pluvieux (infiltration immédiate), mais il n'y a pas de relation entre la hauteur du pic et l'importance de la pluie : les faibles lames d'eau engendrent parfois des réponses intenses. Par ailleurs, les eaux chargées en chlorures en sont pas forcément chargées en manganèse et réciproquement. Ainsi le pic très intense de manganèse est-il synchrone d'un petit pic de chlorures, alors que le pic principal des chlorures (corrélé avec silice, sulfates, nitrates, sodium et potassium) arrive sans manganèse : le manganèse semble véhiculé par l'infiltration immédiate, les autres ions surtout par l'infiltration rapide.

Après sa montée, le sodium descend en dents de scie, la silice, le magnésium le strontium sont dilués après le premier pic de crue, les sulfates diminuent pendant que les nitrates montent presque en opposition de phase.

Au Groseau (fig. 88), les variations ne se font pas avec une tendance nette, on remarquera cependant une augmentation de la teneur en sulfates, suivie d'une diminution, les nitrates suivent l'évolution inverse. Les chlorures montrent des pics bien corrélés avec les épisodes pluvieux, le manganèse avec certains d'entre eux, ceux du début.

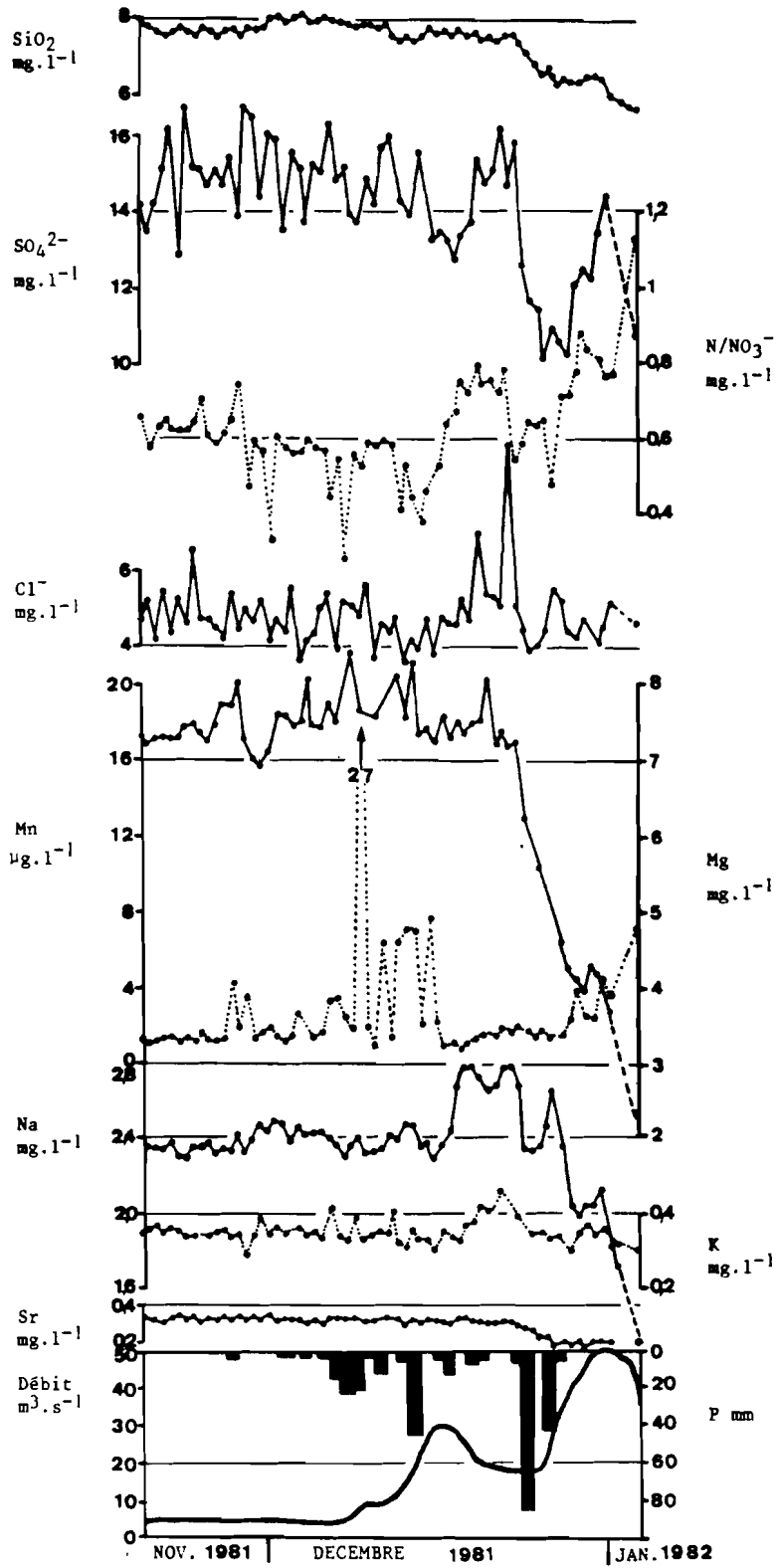


Fig. 87 : FONTAINE DE VAUCLUSE 1981 : CRUE D'HIVER, VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

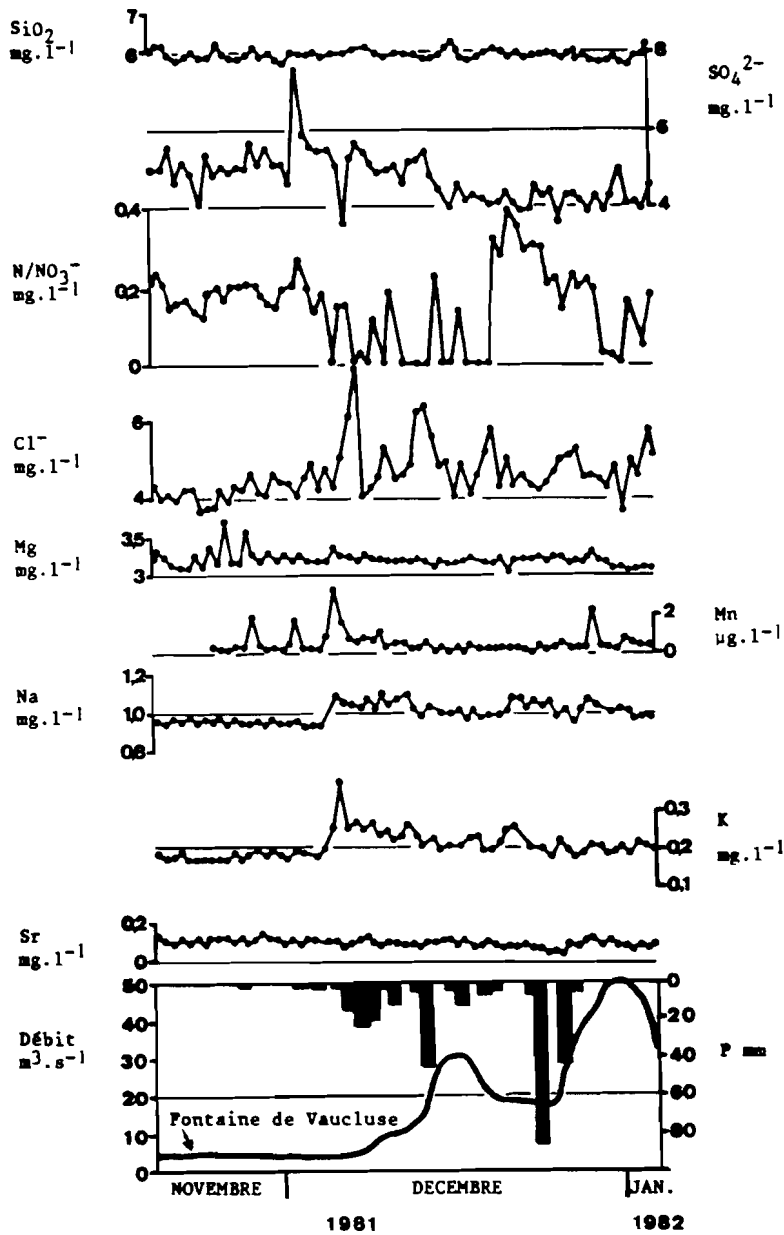


Fig. 88 : GROSEAU 1981 : CRUE D'HIVER, VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

Le magnésium et le strontium, éléments internes au système, ne varient pas de manière significative, mais le sodium et le potassium augmentent avec les premiers épisodes pluvieux importants.

Le Groseau est donc capable de faire transiter une information-entrée, mais il est peu sensible aux informations concernant l'interaction eau-roche dans le réservoir : ce système comporte donc une perméabilité hétérogène, mais non hiérarchisée : il y a coexistence de fissures d'ouverture différente, mais il n'y a pas coalescence de ces fissures.

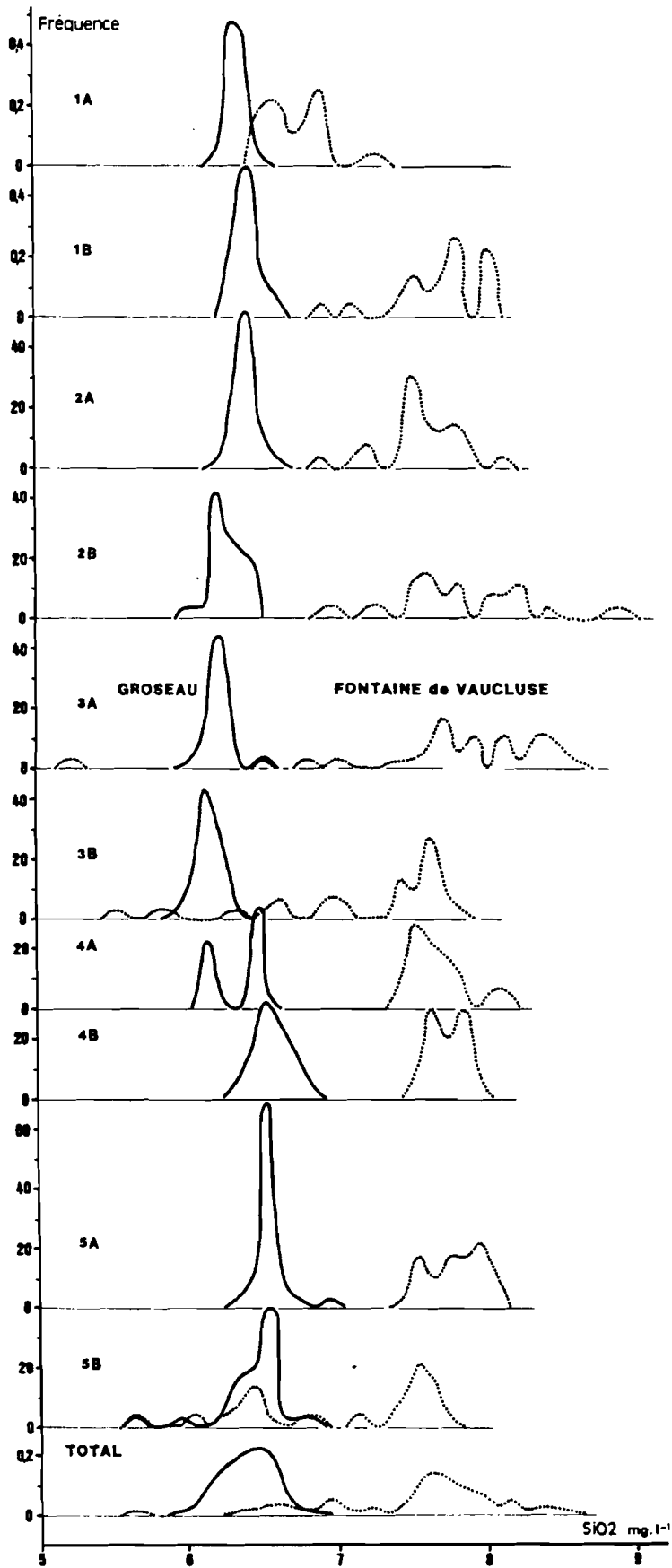


Fig. 89 : DISTRIBUTION DES TENEURS EN SILICE - FONTAINE DE VAUCLUSE ET GROSEAU 1981

IV.2. ADAPTATION DE LA METHODE DE LA DISTRIBUTION DES CONDUCTIVITES AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

Cette méthode, utilisée avec succès pour les valeurs hebdomadaires de conductivité a été employée sur le problème Groseau-Vaucluse avec quelques modifications : la période d'étude est un cycle incomplet (juillet 81 - janvier 82), qui comprend cependant décrue et tarissement d'été, crue d'automne, tarissement d'automne, crue d'hiver. Les valeurs étudiées sont journalières. Etant donnée la non conservation des paramètres de l'équilibre calco-carbonique, (voir annexe 1), la conductivité n'était pas utilisable. J'ai donc pris la silice comme indicateur.

Les courbes de distribution (fig. 89) portent sur cinq épisodes hydrocinématiques subdivisés en deux :

- 1A et 1B : décrue,
- 2A et 2B : tarissement,
- 3A et 3B : crue d'automne,
- 4A et 4B : "tarissement" d'automne,
- 5A et 5B : crue d'hiver.

Au cours de ces épisodes, on peut remarquer l'opposition nette entre les deux émergences :

- faible bande passante (de 0,6 à 1,3 mg.l⁻¹) du Groseau, étalement beaucoup plus grand de la Fontaine de Vaucluse (0,6 à 3,6 mg.l⁻¹).

- plurimodalité de la Fontaine de Vaucluse, le Groseau ayant au plus deux modes,

- mobilité beaucoup plus importante de la plage de variation de la Fontaine de Vaucluse que de celle du Groseau, sensiblement constante. Les valeurs prises par la Fontaine de Vaucluse viennent d'ailleurs chevaucher celles prises par le Groseau au cours de certains épisodes.

- déphasage entre les phénomènes mis en évidence à la Fontaine et au Groseau.

. Au cours de la décrue 1A, 1B, 2A, la Fontaine de Vaucluse restitue des eaux dont la minéralisation en silice va des valeurs du Groseau (1A) à des valeurs beaucoup plus élevées (plus de 8 mg.l⁻¹) (2A). Le Groseau en revanche montre un seul pic très haut et presque symétrique : cette émergence n'est pas encore affectée par l'infiltration de la crue de printemps. Elle ne le sera qu'à partir de la phase 2B pendant laquelle son mode se déplacera.

. Le tarissement de la Fontaine (2B) montre les mêmes minima de teneur que la décrue : l'émergence restitue les eaux stockées dans les parties les plus accessibles des blocs (eaux qui y ont été stockées au cours de la crue précédente, et qui n'ont pas encore eu le temps de s'y charger en silice) (KIRALY et MULLER, 1979), mais aussi des eaux en provenance des zones les plus minéralisées de l'aquifère, avec des teneurs proches de 9 mg.l⁻¹. A ce moment seulement, l'émergence du Groseau est atteinte par l'infiltration différée de la crue du printemps : son pic à 6,4 mg.l⁻¹ glisse à 6,2 mg.l⁻¹.

La période des pluies d'automne (3A et 3B) fait disparaître les eaux les plus minéralisées de l'écoulement de la Fontaine, et il y apparaît des eaux très peu minéralisées (5,3 et 6,4 mg.l⁻¹). Dans le même temps au Groseau, le pic à 6,2 mg.l⁻¹ remplace toujours celui à 6,4, cette émergence restitue toujours son eau d'infiltration lente et éventuellement une eau d'infiltration rapide de l'épisode pluvieux présent, qui fait descendre légèrement la teneur du mode.

Avec le retour aux conditions de basses eaux (4A et 4B), la Fontaine élimine ses eaux peu minéralisées de l'infiltration (minimum 7,3 mg.l⁻¹), mais les eaux les plus minéralisées n'atteignent plus les teneurs du tarissement, ce sont

des mélanges d'eaux stockées dans les marges accessibles des blocs capacitifs, rechargées, au cours de la crue précédente. Le Groseau en revanche a résorbé son infiltration différée et il reprend une valeur plus élevée. On observe en 4A la transition entre les deux teneurs.

Au début de la crue d'hiver (montée de crue 5A) on observe, tant pour le Groseau que pour la Fontaine, un état identique à celui des basses eaux d'automne: l'infiltration n'a pas encore atteint les émergences et les eaux sortant avec un débit élevé ont les caractéristiques d'eaux du karst noyé, c'est "l'effet de chasse".

Lorsque les eaux d'infiltration atteignent l'émergence (5B), elles modifient la distribution des teneurs : à la Fontaine de Vacluse, apparait une composante de teneur équivalente à celle du Groseau d'une part, la famille la moins minéra-

Fig. 90 : PLATEAU DE VAUCLUSE 1981, ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan IxII)

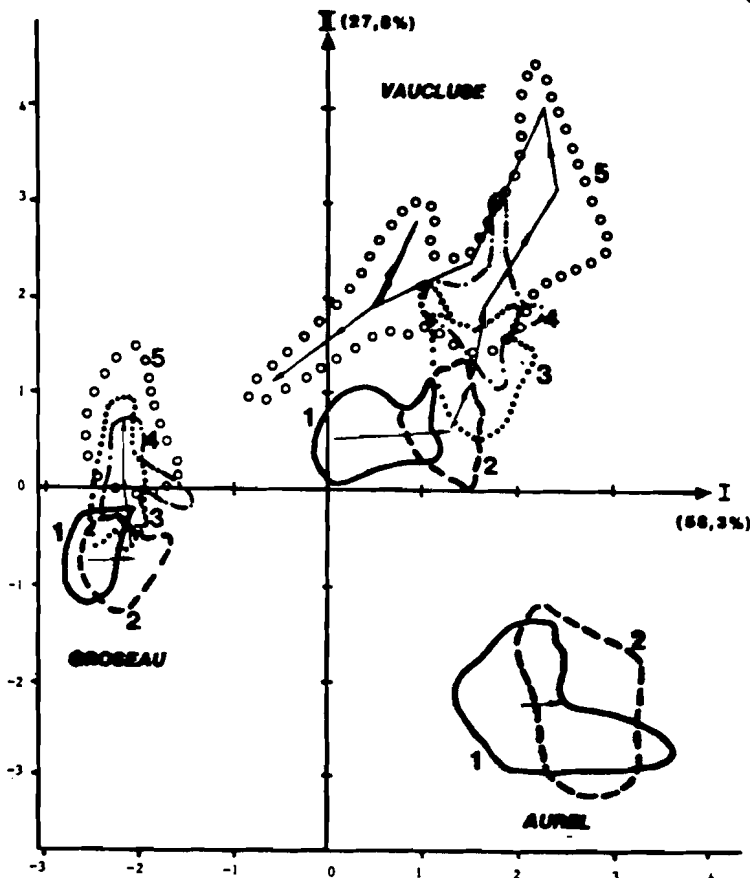
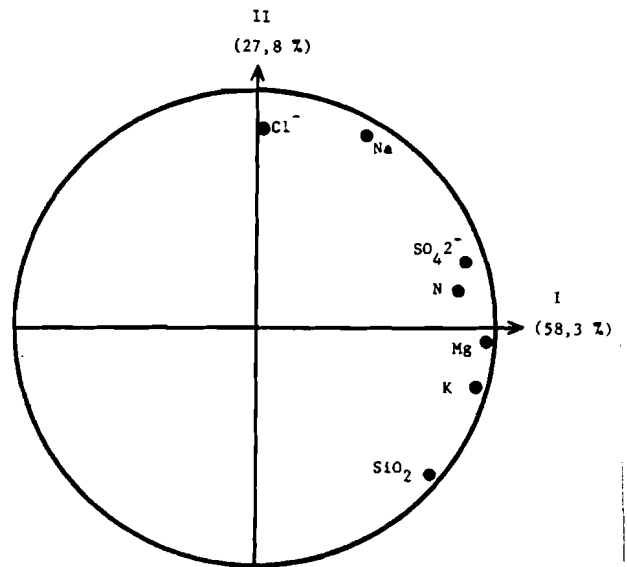


Fig. 91 : PLATEAU DE VAUCLUSE 1981, ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII)

lisée étant un mélange entre l'eau de la réserve observée au cours des phases antérieures et les eaux d'infiltration, les teneurs qui allaient de 7,4 à 8,2 mg.l⁻¹ auparavant (5A), vont de 7 à 8 mg.l⁻¹ au cours de cette phase. Le Groseau s'il conserve son mode principal à 6,6 mg.l⁻¹, exhaurit des eaux d'infiltration rapide qui le rendent dissymétrique et produisent des modes secondaires à 5,7 et 6mg.l⁻¹.

Cette méthode permet donc d'ordonner les très faibles variations des courbes de teneur en silice en fonction du temps, de suivre pas à pas le comportement hydro-cinématique des aquifères, et de comparer, sur des données synchrones, des émergences de systèmes à comportement différent.

En revanche, elle repose sur le choix à priori d'un élément ou d'un paramètre physique, qui dans le cas présent s'est avéré intéressant, mais qui pourrait ne pas être judicieux, c'est pourquoi les données journalières des émergences ont été étudiées par des méthodes d'analyses multidimensionnelles.

IV.3. ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES AU PAS DE TEMPS QUOTIDIEN

IV.3.1. Trois systèmes du Vaucluse (1981)

L'analyse centrée réduite, porte sur environ 600 échantillons (250 à Groseau et à Vaucluse, 100 à Aurel) et 7 paramètres (Na, K, Mg, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃ - SiO₂). Les cinq épisodes déjà utilisés pour la distribution des fréquences, repérés sur la courbe de débit de la Fontaine de Vaucluse, ont été distingués dans les représentations (décrue, tarissement d'été, crue d'automne, basses eaux d'automne, crue d'hiver).

Les axes 1 et 2 (tableau 6 et fig. 90) expliquent 86 % de la variance totale. L'axe 1 est bien corrélé avec potassium, magnésium, (dans une moindre mesure sulfates et nitrates). Ces éléments aux variations à longue période caractérisent la minéralisation de l'eau dans son encaissant (magnésium, sulfates) et dans sa zone non saturée (potassium, nitrates). L'axe 2 est bien corrélé avec les chlorures et le sodium, éléments météoriques à courte période auxquels le système est transparent.

* NO *	VALEUR	* POUR-CENT *	* CUMUL *
* * *	PROPRE	* * *	* * *
* 1 *	4.0798	* 56.2830 *	* 56.2830 *
* 2 *	1.9470	* 27.8141 *	* 86.0971 *
* 3 *	.4991	* 6.9872 *	* 93.0842 *
* 4 *	.3257	* 4.6528 *	* 97.7370 *
* 5 *	.0938	* 1.1966 *	* 98.9336 *
* 6 *	.0566	* .8092 *	* 99.7428 *
* 7 *	.0180	* .2573 *	* 100.0000 *

Tabl. 6 - SOURCES KARSTIQUES DU VAUCLUSE- ACP - VALEURS PROPRES, POURCENTAGES ET CUMULS

On peut donc en première approximation considérer l'axe 1 comme un axe minéralisation - temps de séjour et l'axe 2 comme un axe origine spatiale de la minéralisation. Si le chlore est indépendant du groupe sulfates-azote-magnésium-potassium, le sodium et la silice n'en sont pas indépendants (expliqués par les deux axes).

La distribution des unités statistiques sur le plan factoriel 1-2 apparaît sur la figure 91. Les trois sources s'opposent : la source d'Aurel est la plus riche en marqueurs d'origine lithologique (silice, magnésium ...) le Groseau la plus pauvre, la Fontaine est intermédiaire. Pour l'axe 2, Aurel est la plus pauvre en éléments hérités des précipitations, le Groseau est intermédiaire, et la Fontaine de Vaucluse la plus riche. La position d'Aurel s'explique :

- par son altitude d'alimentation ; les chlorures et les alcalins décroissent avec la distance à la côte. De plus, les phénomènes d'évapotranspiration sont moins intenses en altitude, les chlorures sont donc moins concentrés dans le sol.

- par la nature peu karstifiée de son encaissant (calcaire en plaquettes et marnes oligocènes).

Les deux émergences typiquement issues des calcaires urgoniens se distinguent par leur bonne discrimination sur l'axe 1 et sur l'axe 2 : la Fontaine de Vaucluse est plus influencée par les éléments "météoriques" que le Groseau (axe 2), et plus riche en indicateurs de la minéralisation dans l'aquifère.

On remarquera la différence de surface occupée par les trois systèmes (tableau 7 et fig. 91). Seuls les épisodes 1 et 2 (décrue et tarissement) peuvent être comparés sur les trois émergences, le préleveur ayant été retiré de la source d'Aurel après le 2ème épisode.

		EPISODES						TOTAL
		1	2	1+2	3	4	5	
AXE 1 Minéralisation dans l'aquifère principal et dilution	GROSEAU	0,52	0,98	1,12	0,50	0,58	1,11	1,40
	VAUCLUSE	1,19	0,73	1,64	1,03	1,14	3,61	3,61
	AUREL	2,22	1,35	2,22	-	-	-	-
AXE 2 Origine spatiale de la minéralisation	GROSEAU	1,04	1,02	1,16	1,63	1,48	1,80	2,79
	VAUCLUSE	0,98	1,31	1,31	1,21	1,31	3,51	4,43
	AUREL	1,54	1,96	1,96	-	-	-	-

Tabl. 7 - PLAGE OCCUPEE PAR LES ABCISSES DES UNITES STATISTIQUES DANS LES CINQ GROUPES DE POINTS SUR LES AXES FACTORIELS I et II (SOURCES DU GROSEAU, DE LA FONTAINE DE VAUCLUSE ET D'AUREL)

. Le passage de la décrue (1) au tarissement (2) se traduit pour les trois émergences par une translation le long de l'axe 1, dans le sens d'une augmentation de la minéralisation donc du temps de contact eau-encaissant.

C'est à la Fontaine de Vaucluse que la différence est la plus significative, au Groseau la translation est faible et à Aurel les deux groupes se chevauchent. Pour ces deux épisodes, la surface occupée par Aurel est maximale, celle occupée par la Fontaine de Vaucluse est moyenne et celle du Groseau occupe la plus petite plage. Cette surface occupée est fonction de l'homogénéité de l'aquifère : l'aquifère fissuré du Groseau est assez homogène, l'aquifère karstique de Vaucluse est plus hétérogène, mais le caractère superficiel de l'aquifère

d'Aurel, ses réserves limitées et sa faible karstification lui confèrent une grande hétérogénéité géochimique.

. Les épisodes de crue d'automne et de basses eaux consécutives se chevauchent presque totalement au Groseau, ils sont mieux séparés à la Fontaine.

. L'épisode de crue d'hiver, compact au Groseau, est beaucoup plus étalé à la Fontaine. A cette émergence, une partie de la projection du nuage n°5 est dans la trajectoire 2-3-4 (fig. 91), une autre tend vers le Groseau.

On remarquera donc que le passage de l'épisode 2 à l'épisode 5 se fait quasiment par translation le long de l'axe 2 au Groseau, alors qu'à Vaucluse le trajet se fait obliquement, avec des composantes sur l'axe 2 et sur l'axe 1. Le Groseau n'est donc sensible qu'aux apports météoriques, sa minéralisation n'évoluant pas, alors que la Fontaine restitue, au cours de l'été 1981, des eaux de plus en plus minéralisées, tant en éléments météoriques qu'en éléments intrinsèques. L'épisode 5 montre une dilution générale des teneurs au cours du transit des eaux d'infiltration.

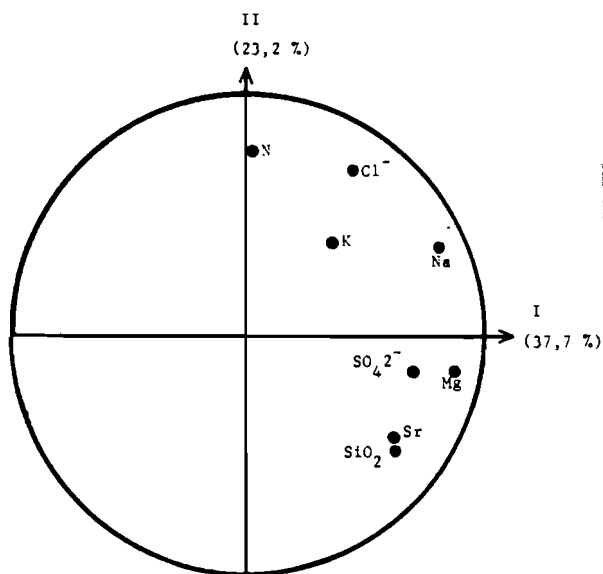
Le Groseau, au cours de la période étudiée n'a donc montré qu'une aptitude au transit d'eaux chargées en chlorure de sodium, le reste de sa minéralisation majeure pouvant être considérée comme invariant. Au point de vue hydrogéologique, ce comportement implique que ce système soit peu karstifié et n'ait que des réserves limitées. L'infiltration d'eau depuis la surface ayant le temps (infiltration différée) de se minéraliser en marqueurs de l'apport météorique (croissants pendant l'été) fait évoluer la chimie de l'ensemble de la réserve. A la Fontaine de Vaucluse en revanche, on observe un double phénomène lié à une karstification plus élaborée : l'apport météorique se mélange avec les eaux de la réserve ayant eu le temps d'acquérir une minéralisation importante dans la zone noyée : il en résulte une augmentation globale des teneurs entre l'épisode 2 et l'épisode 5. L'afflux massif d'eaux d'infiltration rapide, puis lente par les drains noyés provoque la dilution de toutes les teneurs (épisode 5).

IV.3.2. FONTAINE DE VAUCLUSE (1981)

Afin de donner une signification plus fine aux axes factoriels (faisant abstraction des différences de caractéristiques géochimiques et hydrocinématiques des trois aquifères), les trois émergences ont été traitées séparément ; l'exemple choisi ici sera celui de la Fontaine de Vaucluse. Il comprend 253 individus et sept variables. Le plan factoriel I - II exprime 61 % de la variance totale.

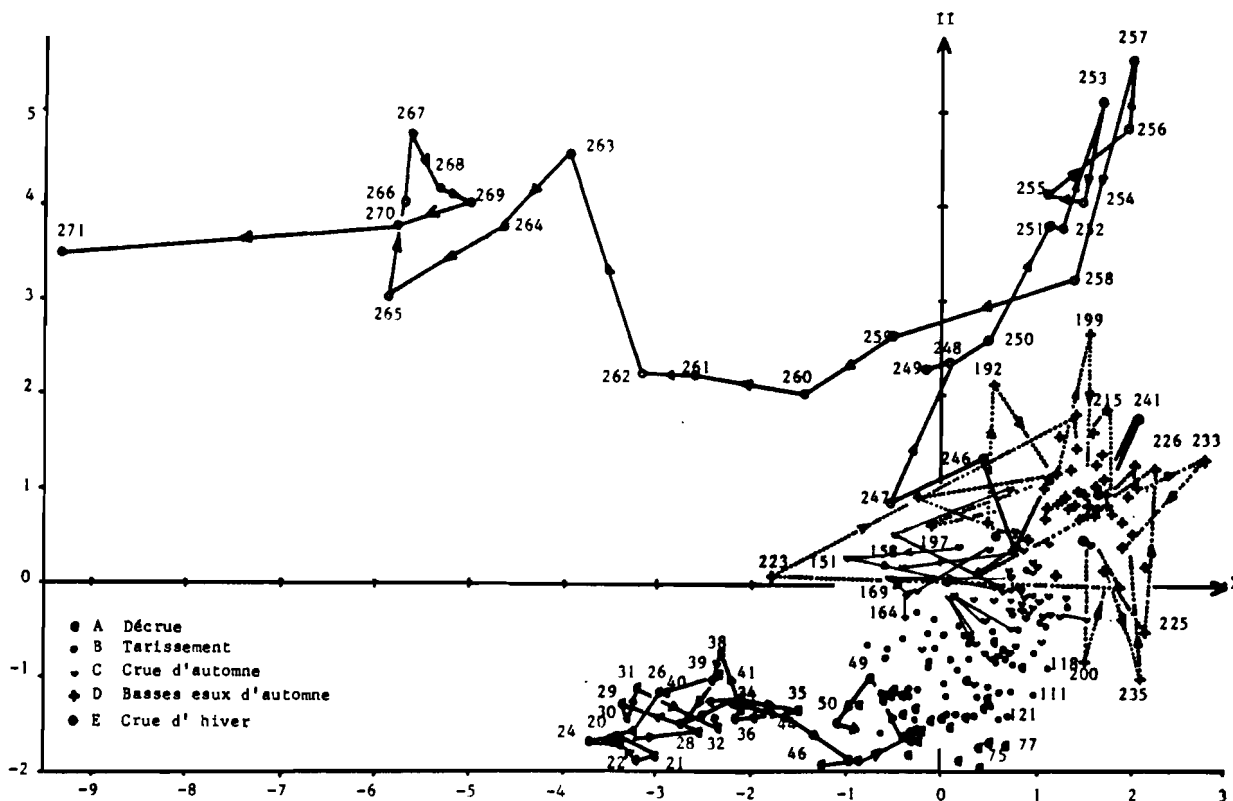
L'axe factoriel I (fig. 92), caractérisé par la teneur en magnésium, sulfates, dans une moindre mesure par celle en strontium et silice, représente les éléments à acquisition lente dans la partie capacitive de l'aquifère. L'axe II est déterminé par les teneurs en nitrates et chlorures, dans une moindre mesure en potassium et sodium. c'est donc un axe à régulation des restitutions auxquels le système est transparent, qui oppose les éléments du sol (N, Cl), aux éléments de l'aquifère, (Mg...) issus d'une interaction eau-roche. Dans ce plan factoriel, il faut remarquer l'ubiquité du sodium, lié sur l'axe I aux marqueurs d'un temps de contact prolongé entre l'eau et son encaissant, et lié sur l'axe II aux éléments injectés depuis la surface par l'infiltration. Le sodium n'est pas régulé par l'aquifère karstique lui-même, mais par des échanges de base dans les milieux argileux (sols, marnes). Le potassium est régulé par le cycle de la matière organique en surface. Les éléments déterminant l'axe II sont ceux qui montrent des pics positifs de teneurs au cours des épisodes de crue (lessivage) ceux déterminant l'axe I montrant des pics négatifs (dilution).

Cette ACP peut donc fait apparaître la dualité de comportement de l'aquifère karstique de Vaucluse : transit d'eaux marquées par leur passage dans le sol



◀ Fig. 92 : VAUCLUSE-QUOTIDIEN 1981, ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan IxII)

Fig. 93 : VAUCLUSE QUOTIDIEN 1981, ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan IxII)



et l'épikarst (éventuellement avec une régulation des alcalins par échange de bases et cycles biologiques) et alimentation et l'émergence par la vidange des milieux capacitifs du système, lors de la cessation de l'infiltration. Sur le diagramme des individus (fig. 93) (plan factoriel 1-2) le facteur temps est représenté par des segments de droite joignant les points successifs.

Dans ce diagramme, on remarque cinq comportements différents :

- le groupe A montre un déplacement parallèle à l'axe I : la minéralisation en éléments à acquisition lente augmente pendant la décrue, quand la part de l'eau d'infiltration récente diminue dans le débit total.

- Dans le groupe B, il y a un accroissement à la fois de la teneur en éléments issus de la zone non saturée et des réserves de l'aquifère : pendant le tarissement, les petites pluies injectent à forte concentration des eaux du sol et de l'épikarst qu'elles mélangent à l'eau de vidange de la zone noyée. On remarquera que cet épisode B recouvre à la fois le tarissement et le début de la petite crue d'automne.

- Le groupe C, dans la trajectoire du groupe B, s'en distingue par une variabilité plus grande tant le long de l'axe I que le long de l'axe II. Ce groupe s'étend sur la période de basses-eaux d'automne et pour partie sur la crue d'hiver.

- Le groupe D montre une croissance rapide de l'abscisse sur les axes I et II, puis une décroissance rapide : il signe le transit d'eaux ayant lessivé le sol et l'épikarst : pics d'alcalins, de chlorures, de nitrates, avec épuisement du stock disponible en surface. Ce groupe (comme le suivant), appartient à la crue d'hiver.

- Le groupe E montre une forte dilution des éléments à acquisition lente, corrélativement à une remontée des marqueurs superficiels, il représente le passage de l'infiltration différée.

- Cette période ne montre pas le retour aux conditions de l'été car il nous manque le passage des eaux d'infiltration lente appauvries en éléments superficiels et plus enrichies en éléments acquis en zone noyée.

IV.3.3. Détail des différents épisodes

Certains épisodes (à durée limitée) ayant, comme nous l'avons vu une variabilité importante le long de l'axe I, la structure des sous-nuages de points plus compacts n'apparaît pas clairement. Les cinq épisodes ont donc été traités séparément.

Les diagrammes "variables" (fig. 94 à 98) font apparaître la liaison toujours forte du magnésium avec l'axe I, alors que d'autres marqueurs (silice, sulfates, strontium) à acquisition lente sont tantôt liés positivement ou négativement à cet axe, tantôt liés à l'axe II. Les éléments apportés par l'infiltration peuvent être liés aux deux axes selon la période étudiée ainsi l'azote, en décrue est-il un pôle négatif sur l'axe I, opposé aux marqueurs de la zone noyée (Mg, SiO₂), en tarissement d'été et en crue d'automne il se rapproche du magnésium, ce qui indique que les eaux de la zone noyée sont plus riches en nitrates que celles de l'infiltration immédiate qui apporte des chlorures. En revanche les basses eaux d'automne voient le passage de potassium et de nitrates lors des épisodes pluvieux. En crue d'hiver les nitrates signalent de nouveau les eaux pauvres en éléments marqueurs du séjour dans l'aquifère.

Cette différence de comportement doit nous faire prendre garde à interpréter des épisodes trop composites, les éléments étudiés n'ayant pas forcément le même rôle géochimique d'une période à l'autre : il est bon de multiplier les ACP sur les mêmes données, en allant du plus général au plus particulier.

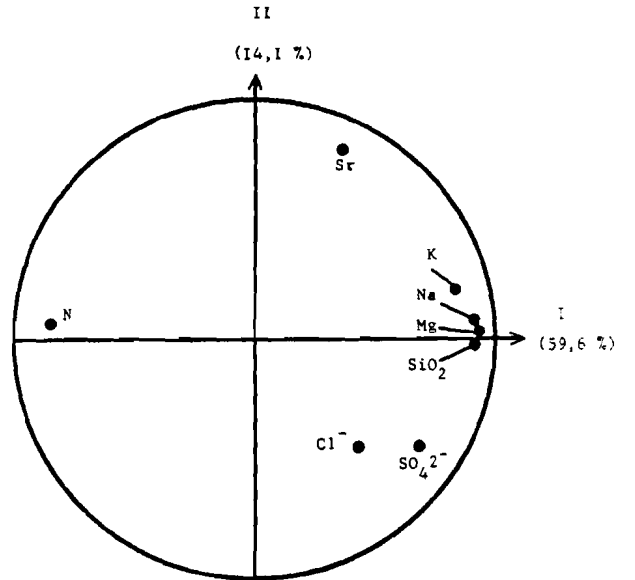
Les diagrammes "individus" montrent plusieurs cas (fig. 99 à 103)

♦ trajectoires "linéaires" : la série d'échantillons subit une évolution continue d'un pôle à l'autre. Ainsi la décrue est un appauvrissement progressif en azote, corrélativement à un enrichissement en marqueurs de la zone noyée.

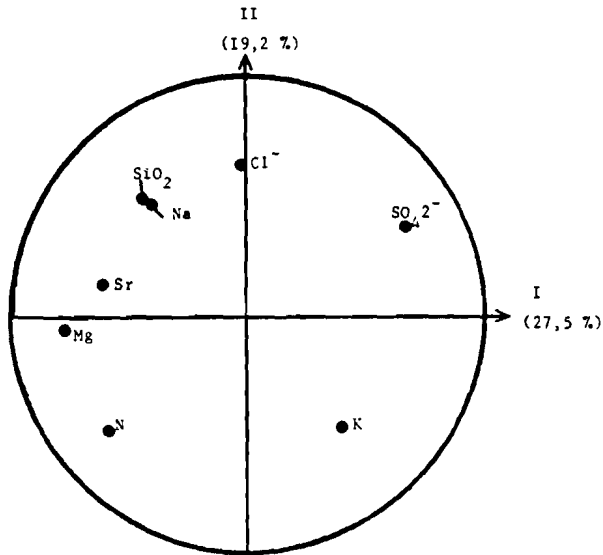
- La crue d'automne montre un appauvrissement en silice, puis un enrichissement en magnésium, azote, strontium, sodium.

- La fin de la crue d'hiver à un trajet linéaire montrant le phénomène inverse de la décrue.

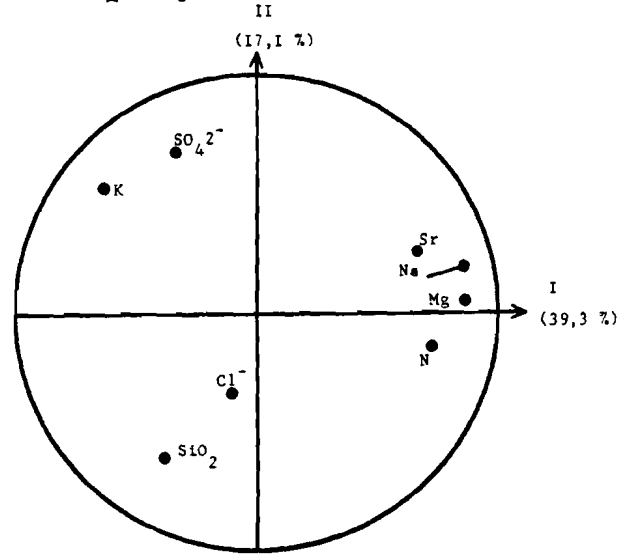
Fig. 94 à 98 : VAUCLUSE QUOTIDIEN,
ACP PAR EPISODES,
DIAGRAMME DES VARIABLES
(plan IxII)



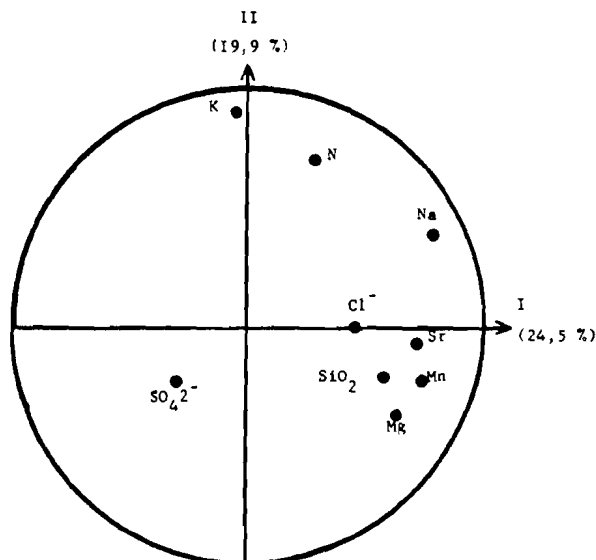
▲ Fig. 94 : DECRUE



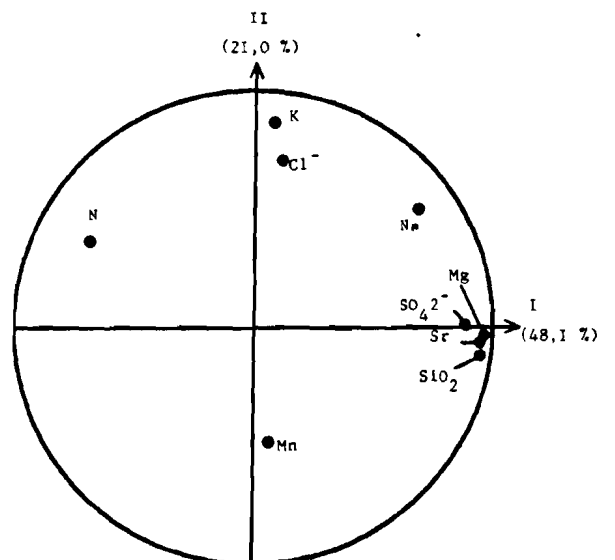
▲ Fig. 95 : TARISSEMENT



▲ Fig. 96 : CRUE D'AUTOMNE

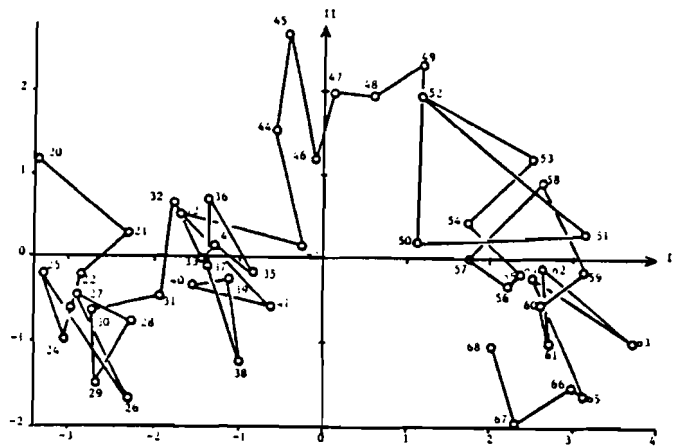


▲ Fig. 97 : BASSES EAUX D'AUTOMNE

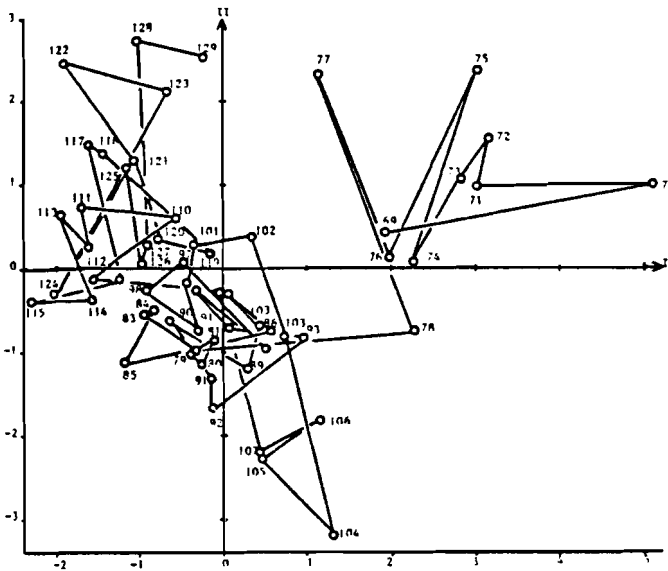


▲ Fig. 98 : CRUE D'HIVER

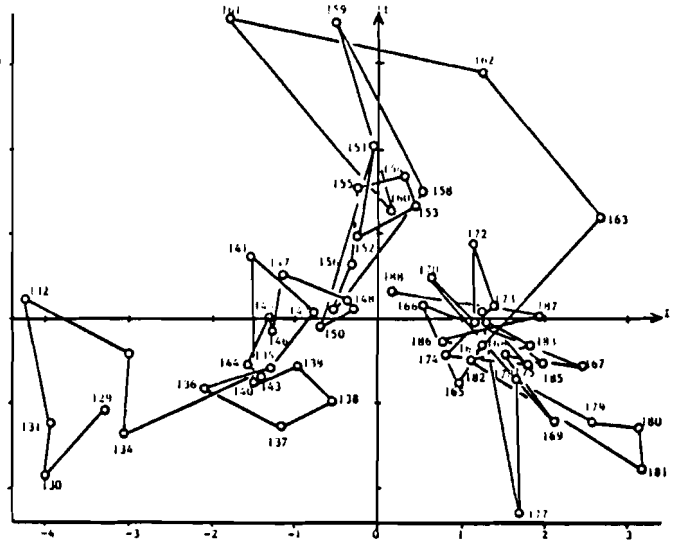
Fig. 99 à 103 : VAUCLUSE QUOTIDIEN,
ACP PAR EPISODES,
DIAGRAMME DES INDIVIDUS,
(plan IxII)



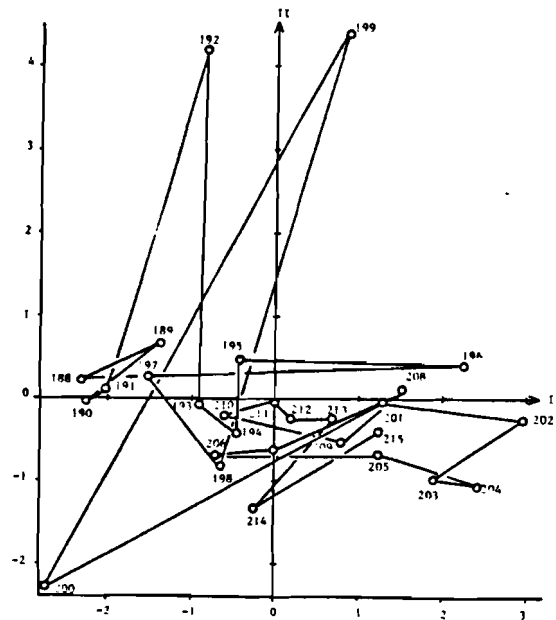
▲ Fig. 99 : DECRUE



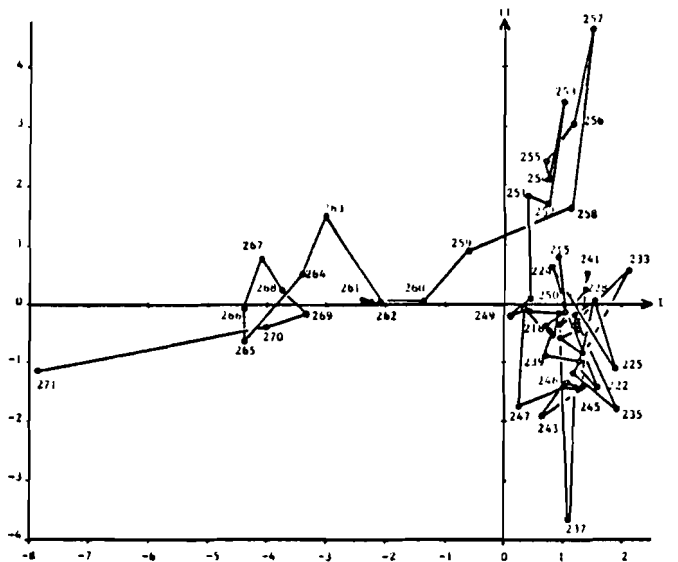
▲ Fig. 100 : TARISSEMENT



▲ Fig. 101 : CRUE D'AUTOMNE



▲ Fig. 102 : BASSES EAUX D'AUTOMNE



▲ Fig. 103 : CRUE d'HIVER

◇ Absence d'orientation nette dans la séquence :

- le tarissement tourne autour du repère de coordonnées alors que les basses eaux d'automne et le début de la crue d'hiver ne montrent pas de structure nette (oscillations aléatoires).

Cette méthode nous permet donc de préciser la structure des sous-nuages de points mal différenciés par le traitement global, et de montrer l'absence de pérennité dans la signification géochimique des variables, un élément pouvant signer tour à tour -par son abondance ou sa faiblesse- à la fois l'infiltration et la zone noyée. Les matrices de corrélation par épisode (tableaux 9 à 14) sont étudiées avec l'analyse discriminante.

IV.4. ANALYSE DISCRIMINANTE

IV.4.1. But

L'analyse discriminante (voir annexe 4) est une méthode d'analyse multidimensionnelle qui se propose de comparer au sein d'une population statistique préalablement rangée dans les classes, la variance intergroupes à la variance intragroupes (LEFEBVRE 1980).

En hydrochimie, cette méthode permet de valider des choix de classement fondés sur l'analyse des débits et des concentrations. Ainsi l'examen du débit des courbes de variation des éléments chimiques et les coordonnées des individus dans les diagrammes factoriels de l'analyse en composantes principales nous ont permis de distinguer cinq phases hydrocinématiques et chimiques dans la période juillet 1981 - janvier 1982.

La fig. 104 nous rappelle les cinq épisodes retenus : A décrue, B tarissement d'été, C crue d'automne, D tarissement d'automne, E crue d'hiver.

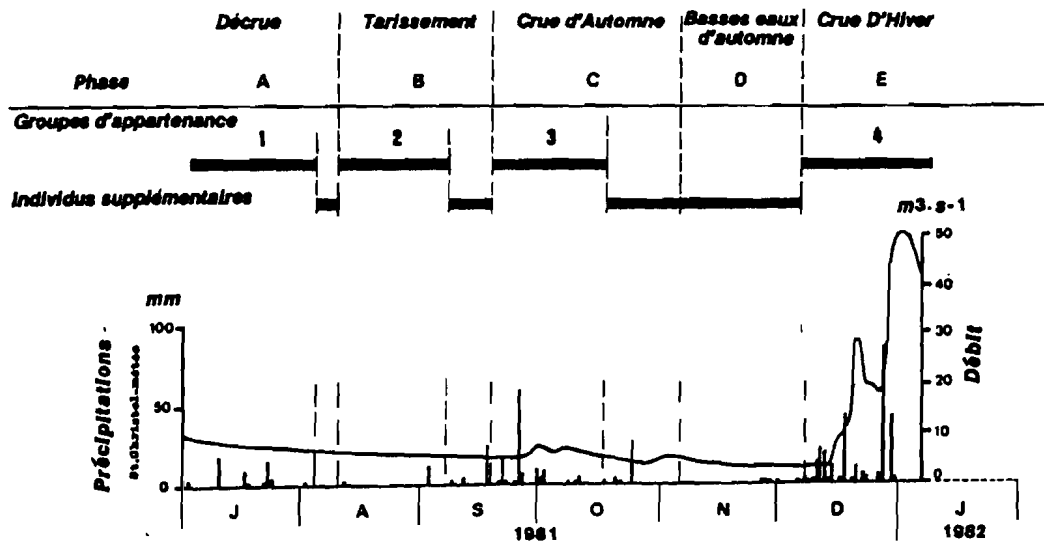


Fig. 104 : VAUCLUSE - ANALYSE DISCRIMINANTE : EPISODES ANALYSES

L'analyse discriminante va nous servir à confirmer l'hypothèse selon laquelle les eaux du "tarissement d'automne" ont une chimie distincte de celles du tarissement d'été.

Ce type d'analyse permet à la fois de redéfinir l'appartenance des indi-

vidus traités aux groupes choisis à priori (affectation des individus appartenant à des groupes) et de classer dans ces groupes des individus supplémentaires en fonction de la variance multidimensionnelle qu'ils y apportent. Nous avons donc sélectionné 164 individus (parmi les 252 que compte la séquence), pris à nombre égal (41) dans les phases A, B, C, D, E pour vérifier l'adéquation de notre classement à "priori". Le reste des groupes A,B et C a été entré comme individus supplémentaires pour vérifier son appartenance aux groupes mitoyens. Les prélèvements de la phase D ont été également traités comme individus supplémentaires, afin d'observer leur affectation aux groupes préalablement définis (1 décrue, 2 tarissement d'été, 3 crue d'automne, 4 crue d'hiver).

IV.4.2. Résultats

A - Grandeurs statistiques par groupe

Les résultats apparaissent dans les annexes 4. Ils sont synthétisés sur la figure 105. Sur cette figure, on a représenté pour chaque variable et pour chaque phase hydrocinématique :

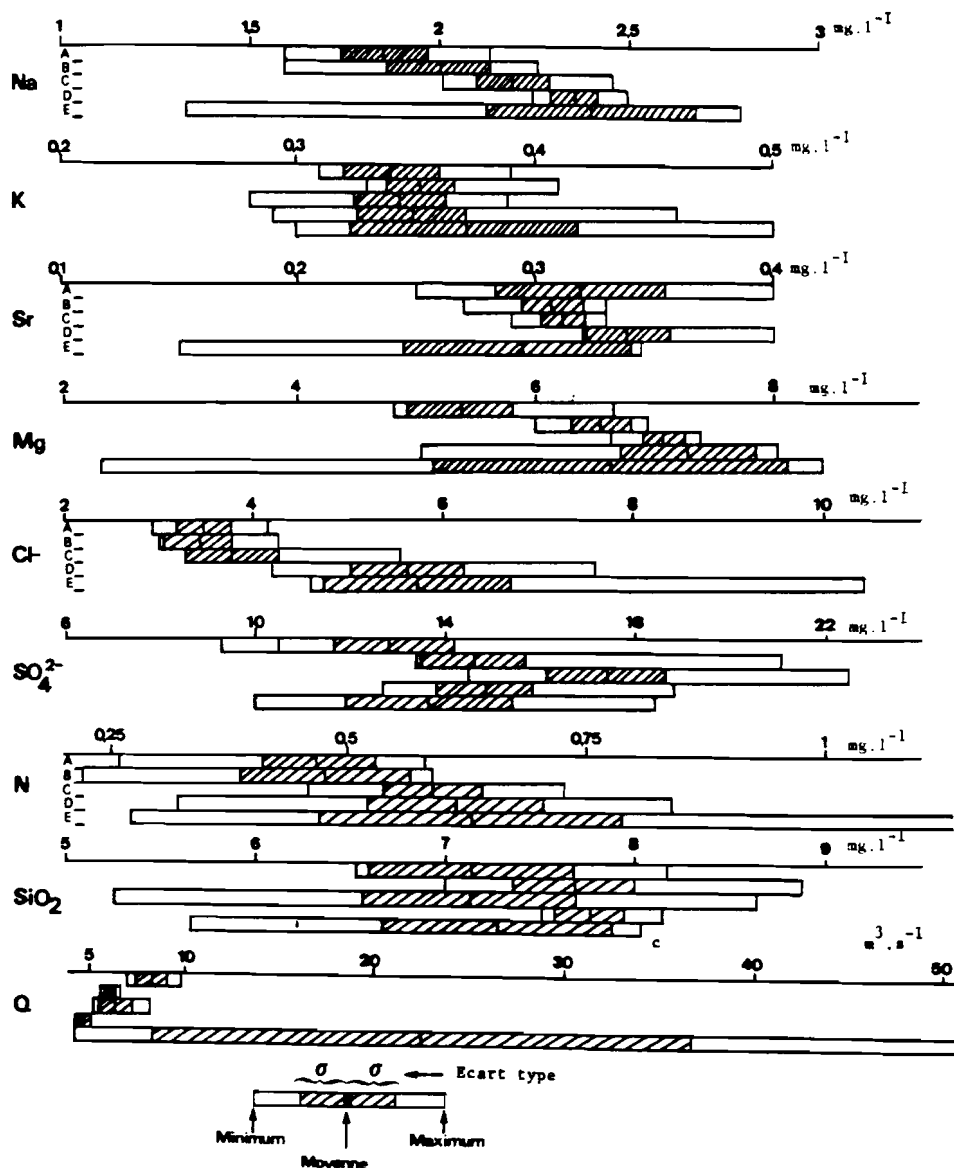


Fig. 105 : VAUCLUSE - ANALYSE DISCRIMINANTE : PLAGES DE VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES PAR EPISODE ET PAR ELEMENT

	A Décrue	B Tariissement d'été	C Crue d'automne	D Basses eaux d'automne	E Crue d'hiver
Na	8,2	8,8	4,6	2,5	11,6
K	5,4	4,7	9,1	6,6	13,0
Sr	11,1	4,0	3,1	5,1	17,8
Mg	8,3	3,8	6,0	7,8	22,9
Cl	8,4	9,9	14,9	10,6	17,1
SO ₄	13,8	6,6	8,6	6,8	12,7
N/NO ₃	14,6	1,7	9,0	14,9	25,1
SiO ₂	8,0	5,1	9,2	2,2	8,5
Q	11,5	6,6	13,4	7,0	63,3

Tabl. 8 - COEFFICIENTS DE VARIATION DES DESCRIPTEURS, AU COURS DES CINQ PHASES HYDROCINEMATQUES (CV = 100 σ_x/\bar{x})

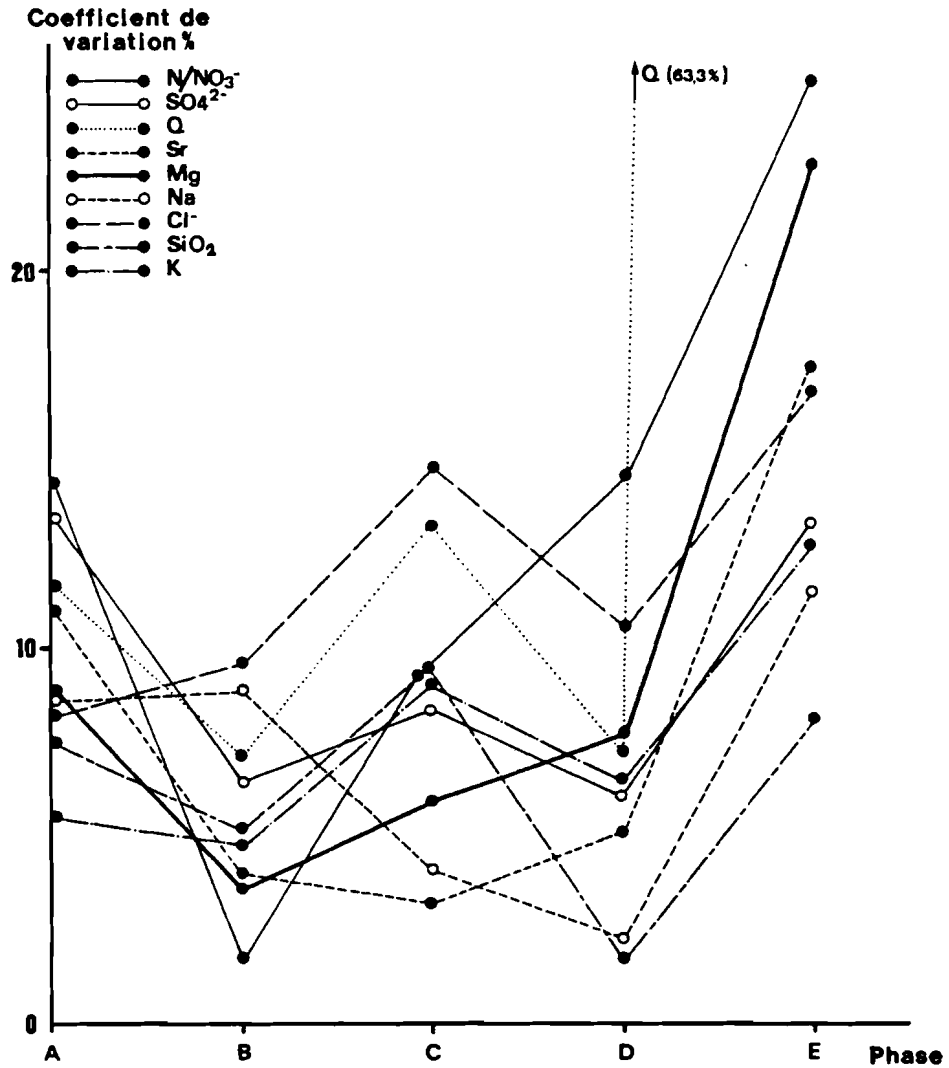


Fig. 106 : VAUCLUSE - ANALYSE DISCRIMINANTE : COEFFICIENTS DE VARIATION PAR EPISODE ET PAR ELEMENT

- la moyenne
- l'intervalle situé à 1 écart-type de la moyenne (en hachures)
- la gamme complète de variation (en bâtonnets vides).

On peut remarquer :

a) Le passage de la décrue (A) au tarissement (B)

Il se marque par une augmentation des teneurs en Na, K, Mg, SO_4 , SiO_2 , par une stabilité avec augmentation de la plage de variation de Cl, et N, avec une diminution de la plage de SiO_2 .

b) La crue d'automne (C) et les basses eaux qui la suivent (D)

Elles montrent une poursuite de la montée de Na et Mg, une augmentation de Sr et surtout de Cl et N, une chute, suivie d'une augmentation de SiO_2 , une augmentation suivie d'une diminution de SO_4 , une stabilité de K.

On remarquera, toutefois, que si l'épisode de crue d'automne et les basses eaux consécutives ont peu d'incidence sur la moyenne de certains éléments, les plages de variation deviennent très importantes soit vers les basses valeurs (Mg, N) soit vers les hautes valeurs (K, Sr).

c) La crue d'hiver (E)

Elle amène une diminution spectaculaire des teneurs en Na (avec une augmentation de la moyenne) Sr, Mg, SO_4 , SiO_2 , alors que K, Cl, et N augmentent. Il faut cependant mentionner l'existence au cours de cet épisode, d'eaux plus minéralisées que celles du tarissement ou des basses eaux d'automne, même pour les éléments dont la teneur diminue globalement (Na, Mg).

L'examen des plages de variation montre donc l'absence d'incompatibilité entre la restitution d'eaux minéralisées en marqueurs internes de l'aquifère noyé (Na ?, Mg, SiO_2) et celles d'eaux tracées par l'infiltration dans le sol, (K, Cl, N). Cette coexistence est cependant possible dans la mesure où d'une part ces deux types d'eau peuvent se succéder en alternance à l'exutoire, et où d'autre part l'infiltration peut représenter une infime fraction de l'écoulement total lorsqu'il y a mélange, cette infiltration ayant des concentrations très importantes.

Les statistiques par groupe permettent de calculer les coefficients de variation de SHUSTER et WHITE (1971). Les auteurs utilisent un paramètre exprimé en pourcentage, le rapport écart type sur moyenne $CV = 100\sigma/\bar{x}$.

Ces auteurs prétendent caractériser des aquifères karstiques à l'aide de ce coefficient, alors que, nous l'avons vu à partir du Pont de Gys, la variation des teneurs est due pour une part à l'hétérogénéité de l'écoulement (coexistence de zones à perméabilité différente), pour une autre à l'hétérogénéité des formations encaissantes (lithologique et géochimique).

Nous avons donc utilisé le coefficient de variation sur une même source la Fontaine de Vaucluse, au cours des cinq phases hydrocinématiques (tabl. 8 et fig. 106). On remarquera à l'étude des profils que :

- les variations sont maximales pour les phases de décrue (A) de crues (C et E), et minimales pour les phases de "tarissement" (B et D).

- Les profils de l'azote nitrique et du magnésium sont voisins, bien que ces éléments aient une origine géochimique différente ; ils rappellent la dualité de fonctionnement du karst, dont l'émergence restitue des mélanges en proportion variable d'eaux d'infiltration et d'eau de la réserve.

Tabl. 9 à 14 - VAUCLUSE QUOTIDIEN : CORRELATION PAR EPISODES

Na	1								
K	0,727	1							
Sr	0,512	0,498	1						
Mg	0,788	0,736	0,413	1					
Cl	0,234	0,138	0,119	0,162	1				
SO ₄	0,435	0,255	0,070	0,335	0,118	1			
N	-0,754	-0,562	-0,396	-0,747	-0,279	-0,402	1		
SiO ₂	0,796	0,618	0,380	0,906	0,137	0,392	-0,880	1	
Q	-0,906	-0,839	-0,533	-0,893	-0,240	-0,403	0,786	-0,870	1
Na	K	Sr	Mg	Cl	SO ₄	N	SiO ₂	Q	

▲ 9 - DECRUE

Na	1								
K	-0,289	1							
Sr	-0,097	0,142	1						
Mg	-0,049	0,172	0,320	1					
Cl	-0,097	0,012	0,280	-0,276	1				
SO ₄	-0,192	0,202	-0,327	-0,364	0,198	1			
N	0,106	0,262	0,066	0,436	-0,459	-0,485	1		
SiO ₂	0,088	0,111	0,077	-0,018	-0,033	0,076	-0,176	1	
Q	-0,028	-0,205	-0,163	-0,758	0,338	0,433	-0,592	0,065	1
Na	K	Sr	Mg	Cl	SO ₄	N	SiO ₂	Q	

▲ 10 - TARISSEMENT

Na	1								
K	-0,002	1							
Sr	0,624	0,157	1						
Mg	0,712	0,051	0,510	1					
Cl	-0,242	0,061	0,025	-0,407	1				
SO ₄	0,168	0,139	0,169	0,154	-0,150	1			
N	0,405	-0,337	0,009	0,505	-0,390	-0,030	1		
SiO ₂	-0,521	-0,007	-0,443	-0,376	0,196	-0,234	-0,186	1	
Q	0,279	0,346	0,212	0,450	-0,214	-0,060	0,105	0,029	1
Na	K	Sr	Mg	Cl	SO ₄	N	SiO ₂	Q	

▲ 11 - CRUE D'AUTOMNE

Na	1								
K	0,254	1							
Sr	-0,097	-0,062	1						
Mg	0,252	0,003	0,137	1					
Cl	0,017	-0,004	-0,226	0,013	1				
SO ₄	-0,089	-0,367	-0,270	-0,665	0,025	1			
N	-0,081	0,320	0,204	0,207	0,192	-0,336	1		
SiO ₂	0,478	-0,008	0,000	0,065	-0,131	0,071	-0,208	1	
Q	-0,479	0,197	0,457	-0,200	-0,290	-0,152	0,309	-0,154	1
Na	K	Sr	Mg	Cl	SO ₄	N	SiO ₂	Q	

▲ 12 - BASSES EAUX D'AUTOMNE

Na	1								
K	0,542	1							
Sr	0,655	-0,113	1						
Mg	0,674	0,116	0,976	1					
Cl	0,344	0,512	0,055	0,049	1				
SO ₄	0,362	0,252	0,723	0,702	0,180	1			
N	-0,369	0,230	-0,633	-0,681	0,085	-0,441	1		
SiO ₂	0,574	0,047	0,968	0,948	0,034	0,727	-0,645	1	
Q	-0,509	-0,046	-0,834	-0,858	0,05	-0,628	0,646	-0,846	1
Na	K	Sr	Mg	Cl	SO ₄	N	SiO ₂	Q	

▲ 13 - CRUE D'HIVER

Na	1								
K	0,511	1							
Sr	0,183	0,052	1						
Mg	0,649	0,221	0,534	1					
Cl	0,624	0,499	-0,153	0,154	1				
SO ₄	0,387	0,196	0,194	0,677	0,044	1			
N	0,269	0,238	-0,467	-0,104	0,376	-0,037	1		
SiO ₂	0,203	0,092	0,393	0,547	0,058	0,383	-0,330	1	
Q	0,181	0,216	-0,616	-0,435	-0,569	-0,306	0,584	-0,420	1
Na	K	Sr	Mg	Cl	SO ₄	N	SiO ₂	Q	

▲ 14 - SEQUENCE COMPLETE

- La variabilité est plus grande en crue d'hiver qu'en crue d'automne.

- Au cours des deux épisodes de basses eaux, la variabilité des éléments est voisine, sauf en ce qui concerne l'azote et le magnésium qui varient plus en basses eaux d'automne qu'en tarissement d'été. L'examen des plages de variation et des coefficients de variation confirme l'examen des courbes de variation en fonction du temps : les deux épisodes de crue sont géochimiquement et hydrocinématiquement différents, les deux épisodes de basses eaux aussi.

B - Corrélation par groupe

Les matrices de corrélation globale et par groupe (tabl. 9 à 14) doivent nous faire prendre conscience des limites de l'analyse linéaire (tableau 15) :

:	:	A	:	B	:	C	:	D	:	E	:	Σ	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	Significatif	:	1	:	1	:	1	:	0	:	2	:	1
:	-----	:	-----	:	-----	:	-----	:	-----	:	-----	:	-----
:	Hautement	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	Significatif	:	13	:	1	:	1	:	0	:	13	:	17

Tabl. 15 - NOMBRE DE RELATIONS SIGNIFICATIVES ET HAUTEMENT SIGNIFICATIVES PAR PHASE HYDROCINEMATIQUE

Ainsi les dix sept relations hautement significatives de la somme A+B+C+E ne sont expliquées que par les phases de décrue et de crue d'hiver, les phases de basses eaux ne montrent pas de relation, c'est-à-dire qu'au cours des épisodes d'été et d'automne, il n'y a pas de tendance : l'accroissement de certains paramètres à acquisition lente (tels le magnésium) n'est pas accompagné d'une variation des autres, qui présentent une teneur stabilisée caractéristique de l'étiage, oscillant, aux erreurs analytiques près, autour de la moyenne. Par ailleurs certains éléments montrent une réponse impulsionnelle aux épisodes de pluie estivale (chlorures), c'est donc essentiellement la présence importante d'eau d'infiltration peu minéralisée qui conditionne les corrélations, seuls les forts épisodes pluvieux provoquent une dilution responsable des bonnes corrélations. Dans le détail, on remarquera que le magnésium est lié négativement au débit, même en tarissement, ce qui en fait un remarquable indicateur de temps de séjour, son abondance n'étant pas seulement liée à l'élimination des eaux d'infiltration. L'azote lié positivement au débit en décrue et en crue d'hiver, y est lié négativement en tarissement. La teneur en nitrates de la réserve noyée peu accessible est plus élevée que celle de l'eau de fin de décrue qui a rechargé les marges accessibles des mêmes blocs : au cours de l'infiltration la teneur en nitrates est diluée une fois le stock disponible lessivé ; ainsi au cours du tarissement, l'émergence restitue d'abord ces eaux peu nitratées (à un débit fort) puis les eaux plus nitratées des blocs, à un débit plus faible. En crue, l'apport direct d'eau d'infiltration fait monter la teneur en nitrates corrélativement au débit.

C - Matrice des centres de gravité

Le centre de gravité des groupes de points n'est autre que le vecteur point moyen dont les composantes ont pour valeur la moyenne du descripteur choisi. La matrice des centres de gravité (tabl. 16) a donc les mêmes composantes que les paramètres statistiques de l'annexe 4.

	Na	K	Sr	Mg	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	N	SiO ₂	Débit
DECRUE	1.86	0.34	0.32	5.36	3.49	11.71	0.47	7.14	8.41
TARISSEMENT	2.01	0.35	0.31	6.55	3.44	14.60	0.48	7.70	6.10
CRUE AUTOMNE	2.20	0.34	0.31	7.07	3.78	15.38	0.59	7.61	6.29
CRUE HIVER	2.40	0.37	0.29	6.61	5.73	13.69	0.63	7.29	22.52

Tabl. 16 - ANALYSE DISCRIMINANTE : MATRICE DES CENTRES DE GRAVITE

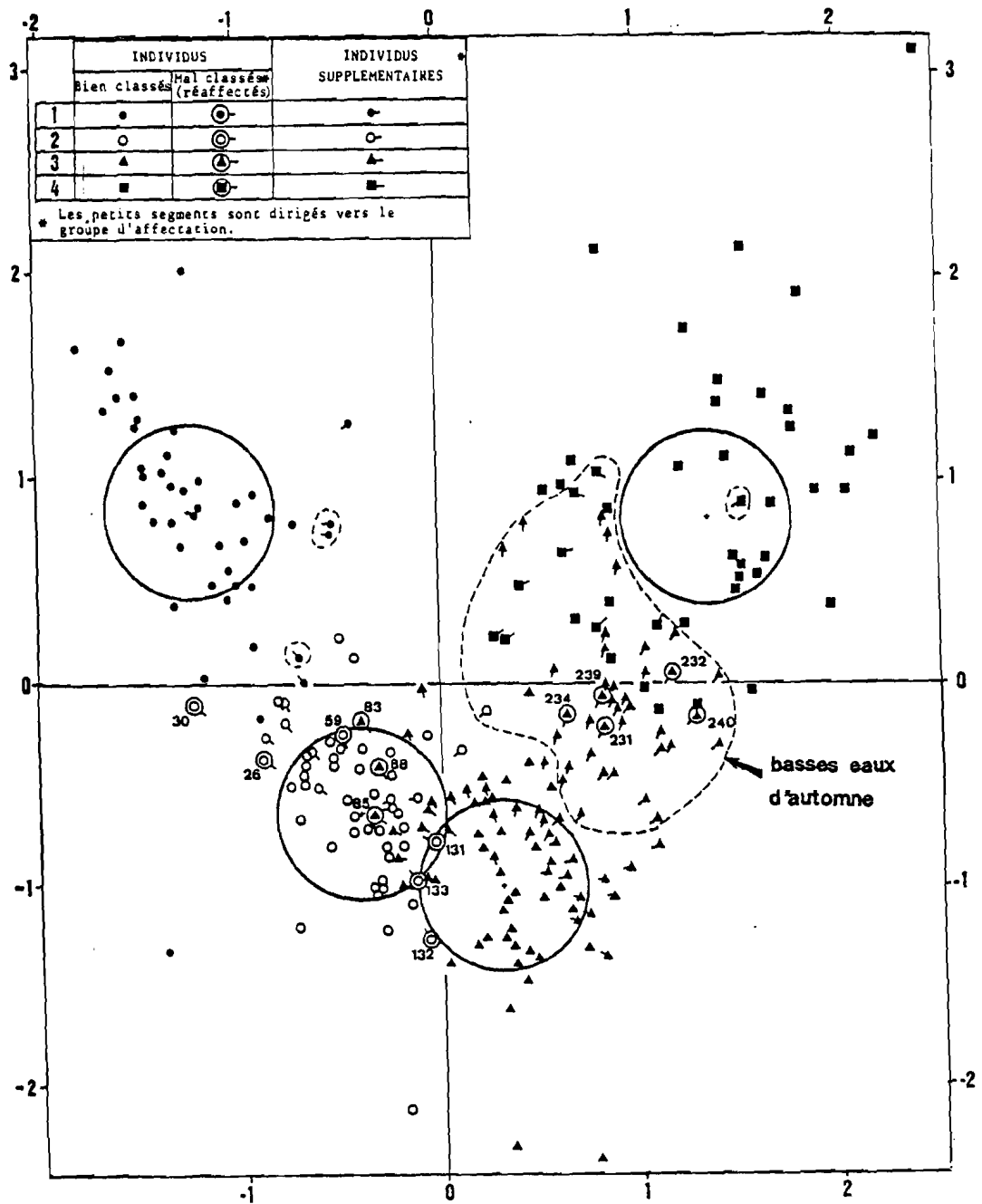


Fig. 107 : VAUCLUSE QUOTIDIEN - ANALYSE DISCRIMINANTE
DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan IxII)

L'analyse discriminante cherche ensuite à maximiser la distance (variance intergroupes) entre les centres de gravité des groupes, en cherchant par une méthode itérative, les valeurs propres et les vecteurs propres de cette matrice. Deux axes factoriels suffisent à expliquer 88 % de la variance.

D - Coordonnées des centres de gravité des groupes et des individus

La fig. 107 représente le plan factoriel I-II qui discrimine au mieux les centres de gravité des quatre groupes. Autour de ces centres de gravité, ont été tracés les rayons de confiance à 1 % (les coordonnées des individus sont en annexe 4). Les groupes 1 décrue et 4 crue d'hiver sont nettement différenciés, en revanche les groupes 2 et 3 sont conjoints. On remarquera que si un grand nombre d'individus des groupes 1, 2 et 3 sont situés dans ce cercle, très peu d'individus du groupe 4 le sont, ce qui nous rappelle l'extrême variabilité des paramètres lors de la crue d'hiver. On mentionnera aussi le fait que certains individus situés dans les cercles sont en fait affectés à un autre groupe ; les coordonnées sur le 3ème axe factoriel en sont responsables.

Au total, 90 % des individus (tabl. 17) étaient bien classés à priori.

Groupe d'APPARTENANCE	Groupe d'AFFECTION			
	1	2	3	4
1	38	3	0	0
2	0	38	3	0
3	0	4	36	1
4	0	0	5	36

Nombre de Bien classés : 148
 Pourcentage : 90,24

Tabl. 17 - ANALYSE DISCRIMINANTE : REAFFECTATION DES INDIVIDUS PRINCIPAUX

Les individus supplémentaires (coordonnées en annexe 4) ont été représentés dans le repère ainsi défini : ils occupent des positions intermédiaires entre les groupes définis à priori. Les individus situés chronologiquement entre le groupe 1 et le groupe 2 se rattachent au groupe 2. Ceux situés entre 2 et 3 sont rattachés majoritairement au 3, la fin de l'épisode de crue d'automne est également rattachée au groupe 3.

Cette analyse nous a permis de vérifier l'adéquation du choix des groupes à priori (90 % de "bien classés) et de démontrer la représentativité de ces groupes (formés de 41 individus sélectionnés au début de chaque phase) : les individus supplémentaires (fin des phases 1, 2 et 3) se rattachent aux groupes mitoyens. Les individus de la phase de basses eaux d'automne, malgré la proximité spatiale des groupes tarissement et crue d'automne, attestent que cette phase hydrocinématique a perturbé la chimie des eaux de la zone noyée.

La figure 108 synthétise les résultats : y sont représentés les cinq phases A,B,C,D,E (définies sur des critères de précipitations, de débit, de chimie) les quatre groupes analysés et les individus supplémentaires à classer dans le repère.

La base de la figure montre comment sont réaffectés les individus appartenant aux groupes 1,2,3,4, et comment sont affectés les individus supplémentaires.

Il faut remarquer plusieurs phénomènes intéressants :

- en cours de décrue, les précipitations n'ont aucun effet sur le classement des individus : la quantité d'eau d'infiltration de l'épisode de crue précédent masque les transits directs impluvium-émergence.

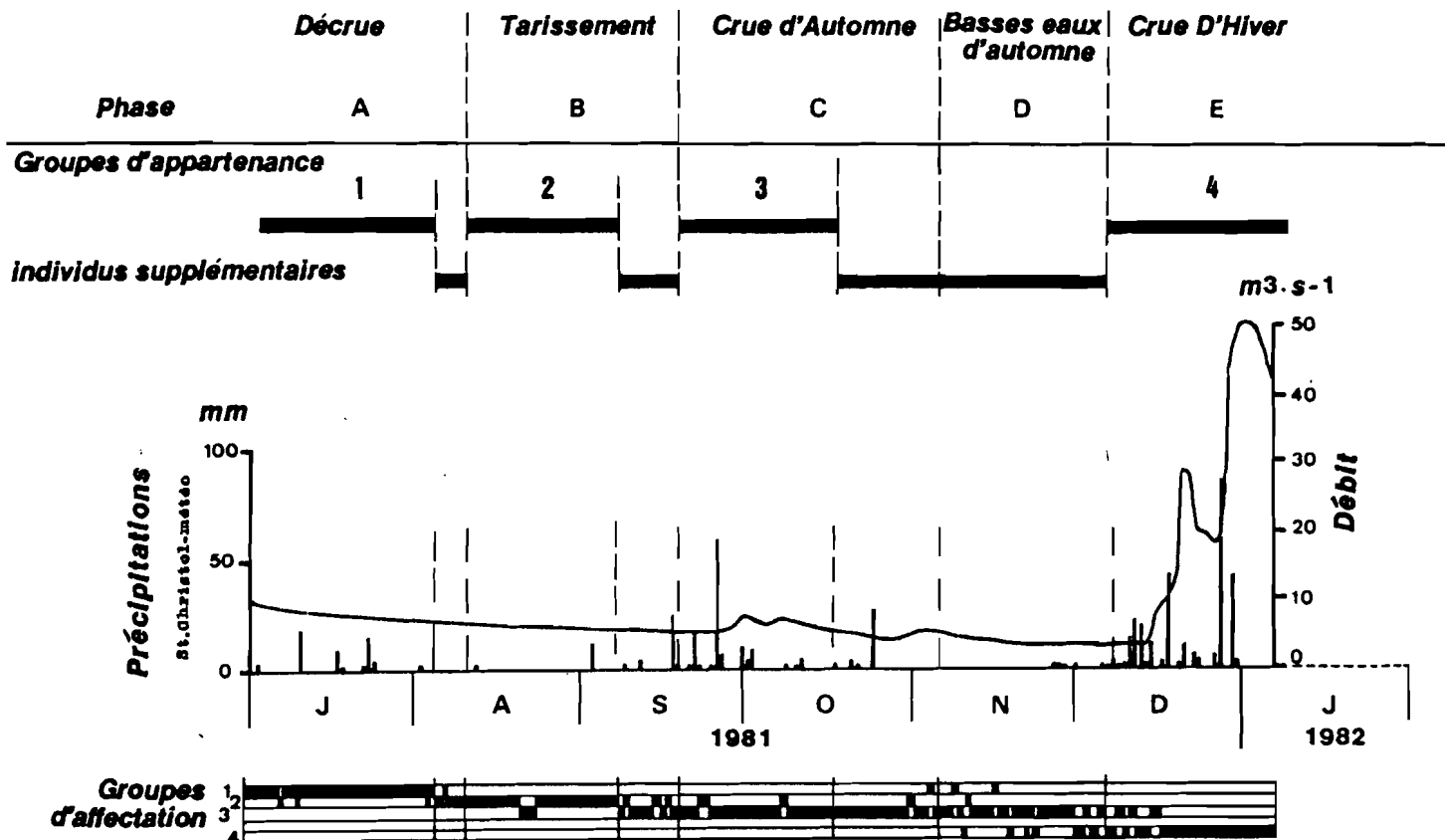


Fig. 108 : VAUCLUSE QUOTIDIEN - ANALYSE DISCRIMINANTE, AFFECTATION DES INDIVIDUS AUX GROUPES DETERMINES A PRIORI

- Le passage de la décrue au tarissement se fait assez brièvement et sans à-coups : cette transition "passive" ne correspond, au point de vue hydrocinématique, qu'à la disparition de la composante infiltration et à la persistance de la seule composante "zone noyée".

- Le tarissement est marqué, pendant trois jours à la fin du mois d'août par le transit d'eaux tracées comme celles de la crue d'automne, neuf jours après la petite pluie de la mi-août : l'aquifère karstique en tarissement est très vulnérable à l'infiltration, même si, comme ici, la précipitation est très faible (quelques mm) et si le débit n'est pas affecté. Les eaux injectées dans le système ont par conséquent un débit très faible et une minéralisation très forte (lessivage du sol, voir VI.4.3.)

- Les pluies de septembre vont, sans que le débit remonte, bouleverser la chimie et faire passer le système du tarissement à la crue d'automne. Contrairement au passage décrue-tarissement, la transition est ici "active", elle est induite par la pluviométrie. Le détail du passage est très instructif: cinq jours après la première pluie de septembre, l'émergence prend une chimie de crue d'automne, six à sept jours après les quatre premiers épisodes pluvieux de septembre, l'émergence restitue des eaux ayant la chimie du tarissement : cet effet "piston" provoque donc une réminiscence du tarissement au milieu d'une chimie marquée par l'infiltration.

Il faut noter que ces variations apparaissent en l'absence de remontée du débit.

Ensuite, le débit remonte, mais on peut observer d'autres épisodes de "chasse" d'eau de la zone noyée indemne d'une contamination par l'infiltration, sept jours après les épisodes pluvieux du début et de la fin d'octobre.

L'hydrocinématique n'est donc pas directement liée au débit de la source.

- On trouve des eaux à chimie de crue d'automne jusqu'à la mi-décembre : les basses eaux de novembre, malgré l'absence de précipitations, n'ont plus la chimie du tarissement d'été. L'épisode de crue d'automne a donc, par sa recharge de la marge des blocs capacitifs de la zone noyée, fait évoluer de manière indélébile la chimie de ce milieu.

L'hypothèse de départ est donc pleinement vérifiée : après un épisode de recharge marqué par l'évapotranspiration et le lessivage du sol (Cl, N), la chimie de la noyée est modifiée et on ne peut plus parler de tarissement s.s., même si le débit est inférieur à celui du tarissement.

- Le passage à la crue d'hiver se fait début décembre, quand les précipitations apportent une eau d'infiltration plus diluée.

IV.5. INTERET DES SUIVIS AU PAS DE TEMPS QUOTIDIEN

L'utilisation du pas de temps journalier à l'étude d'une période de plus de six mois sur deux émergences est une procédure lourde du point de vue analytique et pose d'importants problèmes de conservation des échantillons. Néanmoins, cette approche des basses eaux s'est révélée très fructueuse.

- Elle a permis le suivi "pas à pas" des variations physico-chimiques et ainsi de distinguer la part des phénomènes hydrocinématiques de celle des incertitudes analytiques. Ainsi le tarissement s.s. est-il une phase de fluctuations aléatoires autour d'une moyenne (multidimensionnelle). Elle autorise donc l'estimation de la représentativité d'un échantillon d'étiage.

- Grâce à la finesse du pas de temps, elle permet de suivre la réponse immédiate de l'émergence, à un événement pluviométrique isolé : l'infiltration immédiate mobilise des eaux chimiquement très marquées (Cl, Mn), mais à débit très faible. Ce mode d'infiltration, précédant l'infiltration "rapide" de la littérature a d'une part pour conséquence les pics de restitution à haute fréquence (journalière) mal décrits par un suivi au pas de temps hebdomadaire, d'autre part, la modification de la composition chimique des "marges accessibles" des blocs de la zone noyée (parties des blocs bien "irriguées" au voisinage des drains).

L'infiltration immédiate, l'infiltration rapide et l'infiltration diffuse rechargent **pro-parte** les blocs capacitifs noyés et la zone non saturée, ce qui entraîne pour les basses eaux consécutives à cet épisode de précipitations une modification notable de la composition chimique. On ne peut dès lors plus considérer ces épisodes consécutifs à de petites précipitations estivales comme du tarissement s.s., on ne peut par conséquent pas utiliser dans la détermination de la loi de vidange de l'aquifère noyé ces périodes qui suivent des précipitations, l'eau qu'elles délivrent n'étant pas stockée depuis le début du phénomène de tarissement.

C H A P I T R E V

A P P O R T D E S S U I V I S A L A

C O N N A I S S A N C E H Y D R O C I N E M A T I Q U E

D E S S Y S T E M E S

APPORT DES SUIVIS A LA CONNAISSANCE HYDROCINEMATIQUE DES SYSTEMES

V.1. APPORT METHODOLOGIQUE

Les moyens d'investigation hydrodynamique (ajustement des courbes de tarissement et de décrue) ont permis à des auteurs le calcul des volumes mis en jeu par la vidange de la zone noyée et par le passage de l'infiltration (MAILLET 1905, SCHOELLER 1965, DROGUE 1969, MANGIN 1975, KULLMAN 1982), à partir des débits observés lors des récessions. Si le débit permet de quantifier ces volumes en transit, il est aveugle sur la localisation du stockage ou du transit dans le système. Les paramètres physico-chimiques, plus qualitatifs, permettent de localiser l'origine des masses d'eau en transit dans les systèmes. Cependant, si la chimie permet de démontrer finement les mécanismes du transit, elle nécessite la bonne connaissance des épisodes pluvieux et des débits écoulés pour être interprétable.

La mise en oeuvre de suivis requiert une infrastructure lourde :

- la répétition des prélèvements nécessite, pour le pas de temps hebdomadaire, des observateurs scrupuleux et pour le pas journalier, des préleveurs automatiques fiables. Les conditions d'installation de ces appareils sont très importantes : les captages des sources abritent les échantillons du vandalisme et des conditions thermiques préjudiciables à leur conservation, les installations de plein air ne mettant pas les flacons à l'abri du gel ni des températures excessives (voir annexe I).

- Le pas de temps de prélèvement doit être adapté à l'inertie du système mais aussi à l'objectif visé : ainsi, sur un système à haute fréquence de variations comme le Pont de Gys ou le Verneau, le pas hebdomadaire sur deux cycles suffit pour faire apparaître tous les types de fonctionnement observables à l'échelle journalière. En revanche, l'étude fine des mécanismes d'infiltration "immédiate" et de tarissement sur un système à grande inertie comme celui de Vaucluse a demandé l'utilisation d'un pas journalier.

- Après leur collecte, les prélèvements doivent être soigneusement stockés au frais et à l'abri de la lumière, les dosages d'ions fragiles (HCO_3^-) promptement effectués et la fraction destinée au dosage des cations rapidement acidifiée.

- Les analyses doivent autant que possible être faites en série, afin de minimiser les barres d'erreur. Plus le pas de temps sera fin (par exemple, la journée pour l'étude d'un phénomène à période bimestrielle comme le tarissement) et plus la sensibilité analytique devra être grande.

Cet ensemble de contraintes fait exclure l'emploi des suivis pendant de longues périodes. Ainsi, en France, rares sont les émergences karstiques suivies pendant plusieurs cycles consécutifs (Baget, Pont de Gys).

L'analyse des données acquises au cours de suivis diachroniques soit mettre en oeuvre des méthodes diverses en commençant par les plus simples : de nombreuses interprétations peuvent être directement obtenues à la simple comparaison des courbes de variation en fonction du temps, ou de leur simplification. L'utilisation des courbes de distribution des fréquences a fourni de très intéressantes interprétations du fonctionnement hydrocinématique. Elle requiert la simultanéité des suivis analysés, ainsi que l'homogénéité pluviométrique du secteur étudié.

Malgré la puissance et la rusticité de ces méthodes l'interprétation juste demande la prise en compte simultanée de tous les descripteurs sur tous les

individus, l'analyse multidimensionnelle est inéluctable. L'analyse en composantes principales sur variables centrées réduites, afin d'homogénéiser le poids numérique des variables, s'est révélée être la méthode la mieux adaptée à l'analyse des suivis. L'ACP étudie le degré de corrélation entre les variables, et à l'aide de ces relations, permet d'expliquer la progression des individus au cours du temps. L'analyse discriminante permet de valider des choix de participation du suivi selon des critères définis préalablement (avec l'aide de l'ACP).

On ne peut pas choisir les traceurs naturels intéressants à priori : ce n'est qu'au prix de cette analyse des données (analyse des longues séquences de variation, analyses statistiques multidimensionnelles) que l'on peut déterminer à postériori ces traceurs.

Ainsi, la magnésium, dont la cinétique d'acquisition est lente, est un bon indicateur des temps de séjour relatifs dans un grand nombre de système lorsque c'est un traceur interne des milieux carbonatés. Au Pont de Gys en revanche, cet élément est inutilisable dans l'étude du fonctionnement karstique du système parce que fourni par une autre unité que le karst (évaporites triasiques)

En outre, certains éléments ubiquistes, tel le calcium apporté autant par la zone non saturée que par la zone noyée ne permet pas d'imputer à l'un ou l'autre des milieux son origine. On a ainsi un "mimétisme" hydrochimique des deux ensembles.

Cependant il est plus aisé de ce point de vue d'utiliser la chimie de l'eau qui est plus "perspicace" que le débit dans de nombreux cas : ainsi au Verneau, l'eau destockée au cours du "tarissement" est-elle marquée par les éléments caractéristiques des marnes de l'impluvium.

V.2 APPORT A L'HYDROCINEMATIQUE

L'étude des teneurs physico-chimiques et l'analyse de ces données sur les émergences karstiques ont permis de mettre en évidence les modes de fonctionnement suivants :

- des tarissements au sens hydrodynamique ; ces phénomènes sont en fait composites d'un point de vue chimique :

+ on observe des teneurs stabilisées caractéristiques de la chimie de l'aquifère principal : la zone noyée (Vaucluse, Baget), la zone noyée plus les évaporites plus l'aquifère épikarstique (Pont de Gys), la zone non saturée (Plagnes, Groseau), les marnes altérées (Verneau).

+ les basses eaux sont vulnérables au transit des eaux de lessivage du sol et de l'épikarst ; en l'absence de variation de débit (Vaucluse) des pics très intenses et brefs de Cl⁻ et Mn signalent l'existence d'une infiltration immédiate à très faible débit et à très forte concentration, dès les précipitations.

+ L'existence d'une teneur stabilisée en tarissement est liée à une qualité de recharge assez homogène, la participation d'eaux marquées par certains éléments (empruntés à la surface) à la recharge, même avec de faibles précipitations, fait évoluer la chimie du tarissement : ainsi à la Fontaine de Vaucluse une faible recharge estivale modifie-t-elle la chimie du tarissement.

- des crues : elles montrent aussi une variété de familles d'eaux qui se succèdent à l'émergence.

+ Souvent l'infiltration chasse, à fort débit, les eaux de l'étiage présentes dans les drains. Cet "effet piston" fait souvent que le "pic de crue" est en fait une restitution d'eau chimiquement équilibrée avec son encaissant.

+ Le transit vrai de l'infiltration fraîche (rapide) intervient au cours de la décrue hydrodynamique et la vidange des milieux de moins en moins transmissifs amène à l'exutoire des eaux ayant séjourné de plus en plus longtemps dans les milieux épikarstiques ou pédologiques.

+ Parfois, lorsque les précipitations durent pendant une période suffisamment longue, l'émergence prend des débits de tarissement alors que la chimie atteste la permanence d'un transit d'eaux d'infiltration lente.

Ainsi le cycle 82 ne permet-il pas une stabilisation de la chimie de la Fontaine de Vaucluse sur des valeurs d'étiage, et les cycles 81 et 82 comportent-ils en permanence des indicateurs d'infiltration dans l'écoulement de la source du Pont de Gys : c'est alors un mélange d'infiltration-lente-réserve noyée qui s'écoule à la source, qui montre néanmoins un hydrogramme de tarissement. Le tarissement au sens hydrodynamique est donc parfois un tarissement sensu stricto, parfois le tarissement d'un aquifère non karstique (Verneau), parfois une décrue à long terme de la zone non saturée (Plagnes, Pont de Gys, Groseau). Cette décrue à long terme, observable à la Fontaine de Vaucluse les années à importante pluviométrie printanière et estivale, est facilitée par l'existence d'une zone d'infiltration ayant 800m d'épaisseur par endroits.

Cette remarque permet d'invalider l'assertion selon laquelle à un même débit correspond un même état de la réserve. En effet à un débit donné peuvent correspondre plusieurs localisations de l'origine de l'eau, par exemple aquifère noyé dans un cas et aquifère noyé + épikarst dans l'autre, ce qui permet d'expliquer les différences de composition chimique dans les deux cas.

+ Les faibles remontées de débit pourtant liées à des précipitations estivales importantes s'accompagnent de variations de teneur (accroissement) en éléments externes au système (traceurs du sol et de l'épikarst) sans retour aux teneurs chimiques du tarissement. Les précipitations estivales sont donc capables d'une part de recharger *proparte* les blocs noyés, d'autre part de maintenir une infiltration chimiquement très marquée qui se mélangera ultérieurement à l'écoulement de la zone noyée. Ces deux modes de stockage empêchent le retour aux conditions hydrochimiques et hydrocinématiques du tarissement.

Il y a donc rémanence dans le comportement du système.

D'un point de vue méthodologique, il convient donc d'être prudent, car, hormis en phase de tarissement sensu stricto (période, quel que soit le débit, exempte de précipitations et à la chimie stabilisée) et en phase de crue à la chimie stationnaire (beaucoup plus rares à observer) un échantillon n'est représentatif que de lui-même. Inversement, la comparaison des systèmes pourra s'effectuer lors des périodes pendant lesquelles la chimie est stable.

Dans tous les cas de chimie observée, le débit seul ne constitue pas un critère de choix de l'instant du prélèvement, mais une indication : les variations physico-chimiques peuvent se produire sans augmentation du débit (infiltration immédiate), ou bien nettement après le pic de crue (après l'effet piston).

D E U X I E M E P A R T I E

SEPARATION DES COMPOSANTES DE L'ÉCOULEMENT

D'UN EXUTOIRE KARSTIQUE À L'AIDE DES

METHODES PHYSICO-CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

C H A P I T R E VI

PRINCIPE DE LA DECOMPOSITION

CHIMIQUE DE L'HYDROGRAMME DE CRUE

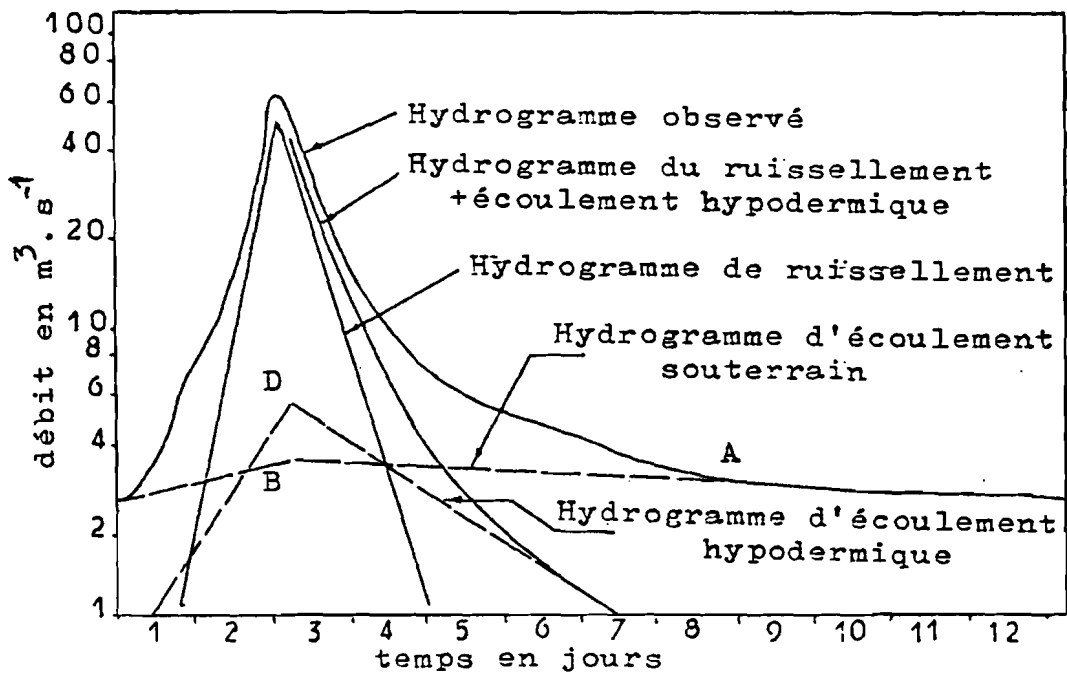


Fig. 109 : DECOMPOSITION HYDRODYNAMIQUE D'UN HYDROGRAMME DE CRUE (BARNES 1940)

L'émergence karstique, comme nous l'avons vu précédemment à l'aide de la physico-chimie et comme les hydrodynamiciens la conçoivent à l'aide de l'analyse des débits et de la piézométrie, est alimentée à la fois par une circulation rapide impluvium-chenaux transmissifs-drains principaux (ruissellement souterrain) et par une circulation lente à très lente issue du drainage des blocs capacitifs (réserves de l'aquifère principal -souvent la zone noyée-). A l'étiage, seule cette deuxième composante apparaît dans l'écoulement et lors des crues les deux unités fonctionnent. Ce mode de fonctionnement n'est pas sans analogie avec celui d'un bassin versant en hydrologie de surface, et déjà en 1879, E.A. MARTEL comparait le réseau de conduits souterrains d'un karst à des rivières de surface. Après lui, la comparaison du fonctionnement hydrologique d'un karst à celui d'un bassin versant de surface a été formulé à maintes reprises. Ces dernières années, les méthodes mathématiques utilisées en hydrologie de surface ont d'ailleurs été transposées avec succès à l'étude hydrologique du karst. Les méthodes physico-chimiques mises au point pour séparer les composantes de l'écoulement d'un bassin versant de surface peuvent être à leur tour transposées à l'étude hydrodynamique d'un système karstique.

PRINCIPE DE LA DECOMPOSITION CHIMIQUE DE L ' HYDROGRAMME DE CRUE

VI.1. METHODES UTILISEES EN HYDROLOGIE DE SURFACE

VI.1.1. Principes

Avant d'avoir recours aux méthodes physico-chimiques, les hydrologues ont utilisé les points remarquables des hydrogrammes des rivières pour délimiter la crue.

BARNES (1940) utilise la propriété des courbes de récession de s'ajuster à des droites sur papier semi-logarithmique : la prolongation (fig. 109) de la courbe de tarissement sous la pointe de crue donne la courbe de décroissance souterraine. En retranchant, point par point, l'ordonnée de cette droite à l'hydrogramme total, on obtient la somme de l'écoulement hypodermique et du ruissellement de surface. La courbe de récession de cette composante s'ajustant elle-même à une droite sur papier semi-logarithmique, on peut retrancher point par point de cet hydrogramme l'ordonnée du point sur la droite de l'écoulement hypodermique.

Le tracé, dès la montée de chacune des composantes est laissé à l'appréciation de l'opérateur.

Les méthodes physico-chimiques reposent sur la perturbation, apportée par une crue, au contenu chimique de l'écoulement. Elles admettent les suppositions suivantes :

- l'eau délivrée par la rivière provient de deux composantes contrastées au point de vue chimique : une composante "superficielle" et l'autre "souterraine" l'écoulement hypodermique étant inclus dans l'une ou l'autre ;
- il n'y a pas d'interaction chimique au cours du mélange ;
- les composantes ont une composition sensiblement constante au cours de la crue.

Les premières décompositions ont fait surtout appel aux variations de la conductivité (CORBETT et al., 1943 ; TOLER, 1965a et b ; KUNKLE, 1965 ; VISOCKY, 1970 ; NAKAMURA, 1971). L'étude des variations des teneurs ioniques (PINDER et JONES, 1969) est d'un emploi plus lourd (analyses), mais permet de sélectionner des ions ne provenant pas de la pollution par les engrais chimiques par exemple. L'analyse en routine des concentrations isotopiques (Oxygène 18, tritium) a fourni un outil supplémentaire, traceur intime de la molécule d'eau (OLIVE, 1970 ; CROUZET et al., 1970 ; MOOK et al., 1974 ; FRITZ et al., 1976 ; BLAVOUX, 1978), insensible aux pollutions agricoles et facile à mesurer dans la pluie elle-même.

- En période d'étiage, le débit de la rivière (Q) est uniquement dû à la vidange des aquifères du bassin. La concentration C de la rivière correspond alors à la concentration C_s de l'écoulement souterrain.

$$Q = q_s \quad (1)$$

et

$$C = C_s$$

- En période de crue, l'écoulement total (Q) provient de la superposition de l'écoulement souterrain (q_s) et du ruissellement total (q_r).

$$Q = q_s + q_r \quad (2)$$

Chaque composante a sa concentration chimique qui reste plus ou moins constante pendant la crue ; C_s pour la composante souterraine et C_r pour le ruissellement. On peut ainsi écrire, en flux à l'exutoire :

$$Q.C = q_s.C_s + q_r.C_r \quad (3)$$

et en éliminant q_r entre les équations 2 et 3, on obtient :

$$q_s = Q \cdot \frac{(C - C_r)}{(C_s - C_r)} \quad (4)$$

ou de la même façon en éliminant q_s :

$$q_r = Q \cdot \frac{(C - C_s)}{(C_r - C_s)} \quad (5)$$

. Le débit de la rivière est fourni par le limnigramme enregistré à la station de jaugeage.

. La concentration de la rivière (fonction de la conductivité) ou sa teneur en certains ions peut être contrôlé par des enregistreurs ou mesurée sur des échantillons prélevés pendant la crue.

. La minéralisation de l'écoulement souterrain supposée constante est pour la plupart des auteurs celle de la rivière à l'étiage prolongé. Parfois, cette minéralisation est mesurée sur des sources (TOLER, 1965), cette méthode permet de tester l'homogénéité des aquifères du bassin.

. La minéralisation du ruissellement est plus difficile à appréhender. Elle est estimée diversement suivant les auteurs : KUNKLE, 1965 et VISOCKY, 1970 considèrent qu'au pic de crue, le débit de la composante souterraine est nul, (fig. 110), on a donc directement accès à la conductivité des eaux de ruissellement. PINDER et JONES (1969), en plus du pic de crue, échantillonnent les écoulements temporaires représentant ce seul ruissellement de surface. NAKAMURA, 1971 utilise la relation entre le logarithme de la conductivité et la distance parcourue par les eaux de ruissellement. Pour un bassin donné, connaissant le trajet moyen de l'eau (surface/2 fois la longueur des thalwegs), il en déduit la conductivité moyenne de cette composante (fig. 111).

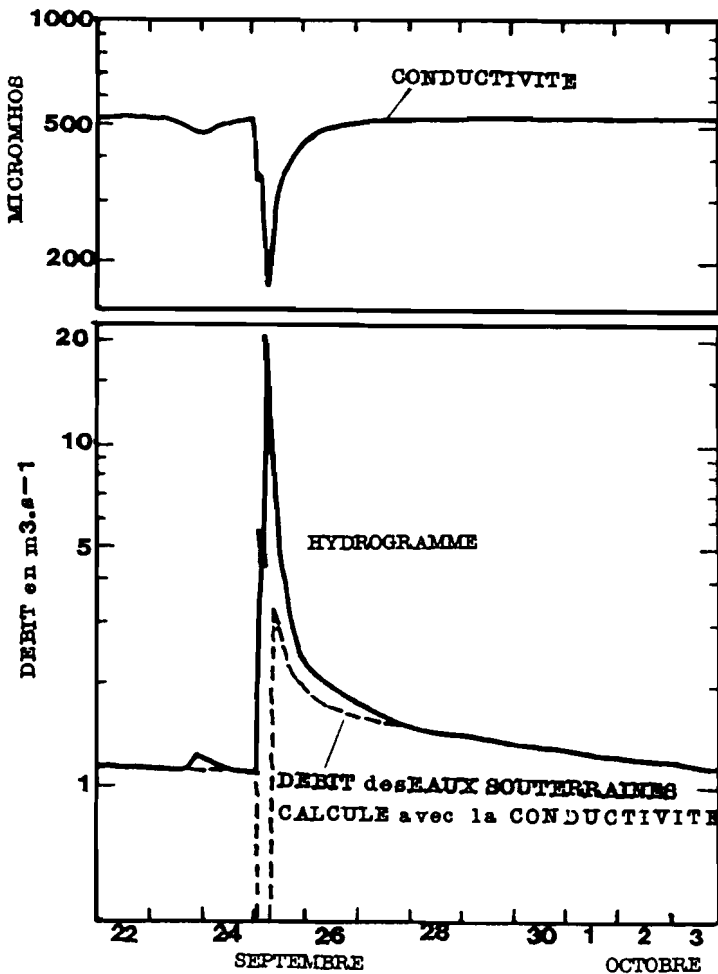
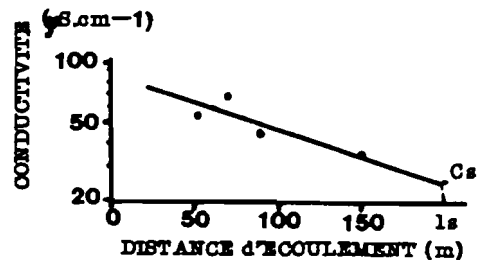


Fig. 110 : COURBES DE DEBIT, CONDUCTIVITE ET ECOULEMENT SOUTERRAIN CALCULE A FOUR MILE CREEK (TRACER, IOWA - SEP ET OCT 1963 - KUNKLE 1965)

Fig. 111 : RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE DES EAUX DE SURFACE ET LA DISTANCE DE L'ECOULEMENT (l_n EST LA DISTANCE MOYENNE D'ECOULEMENT AU COURS D'EAU DANS LE BASSIN (NAKAMURA 1971)



VI.1.2. Résultats en hydrologie de surface

L'utilisation de la conductivité comme paramètre de la décomposition fournit à KUNKLE l'hydrogramme de la fig. 110. On remarquera, - selon l'hypothèse d'annulation de la composante souterraine au pic de crue - le démarrage brutal du débit souterrain, et le pic de cette unité sous le maximum.

. PINDER et JONES (fig. 112), pour estimer le débit de cette composante souterraine, restituent d'une part des courbes qui sont voisines selon les éléments utilisés, d'autre part la courbe composite obtenue avec bicarbonate, calcium, magnésium et sodium.

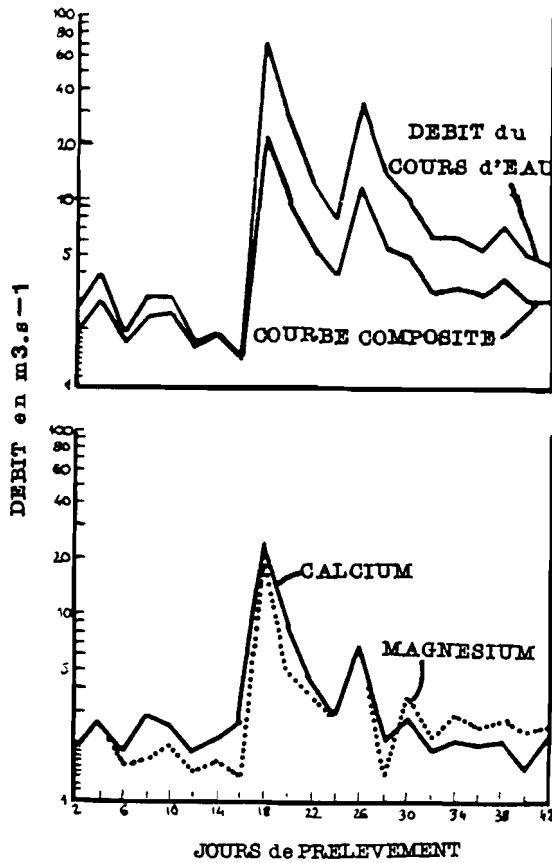
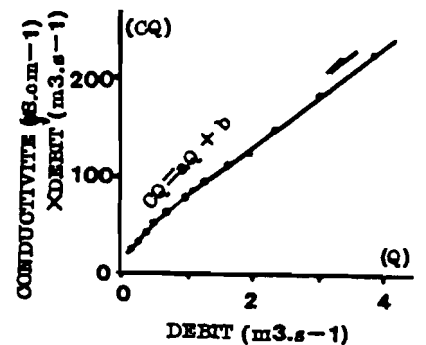


Fig. 112 : COMPOSANTE SOUTERRAINE DE L'ECOULEMENT TOTAL POUR LE BASSIN DE FRASER BROOK CALCULEE AVEC Ca et Mg. LA COURBE COMPOSITE EST ESTIMEE A PARTIR DE HCO_3^- , Ca, Mg et Na (PINDER et JONES, 1969)

Fig. 113 : RELATION CONDUCTIVITE x DEBIT-DEBIT DANS LA PHASE DE RESSION D'UN HYDROGRAMME (NAKAMURA 1971)



. NAKAMURA (fig. 113) remarque l'ajustement linéaire de la relation conductivité x débit = f(débit). Cette relation montre deux segments de droite, l'un pour les faibles débits et faibles flux, représentant la vidange des aquifères du bassin (tarissement) l'autre à pente plus faible pour les valeurs plus élevées des flux et des débits, représentant le mélange eau souterraine - eau de ruissellement (décru). Ce diagramme flux chimique-débit lui fournit l'hydrogramme (fig. 114) de l'ensemble eau souterraine-ruissellement hypodermique, pour la descente de crue.

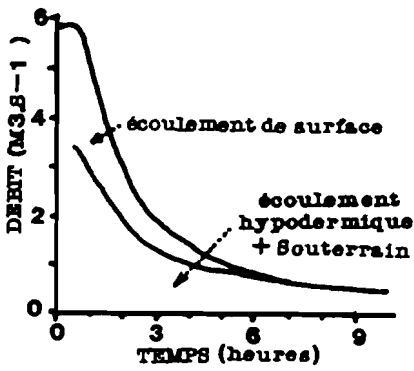


Fig. 114 : SEPARATION DE LA COMPOSANTE "ÉCOULEMENT DE SURFACE" (NAKAMURA 1971)

. Tous ces auteurs observent un parfait synchronisme entre les maxima des pics de crue et ceux des hydrogrammes reconstitués de la composante souterraine, alors que HEYDARPOUR (1974), sur les crues du Maravant (Hte Savoie) montre parfois un décalage temporel (fig. 115).

Fig. 115 : COMPARAISON DES HYDROGRAMMES SOUTERRAINS OBTENUS PAR LES METHODES CHIMIQUE ET GRAPHIQUE (CRUE DU 17 NOV. 1972 - HEYDARPOUR 1974)

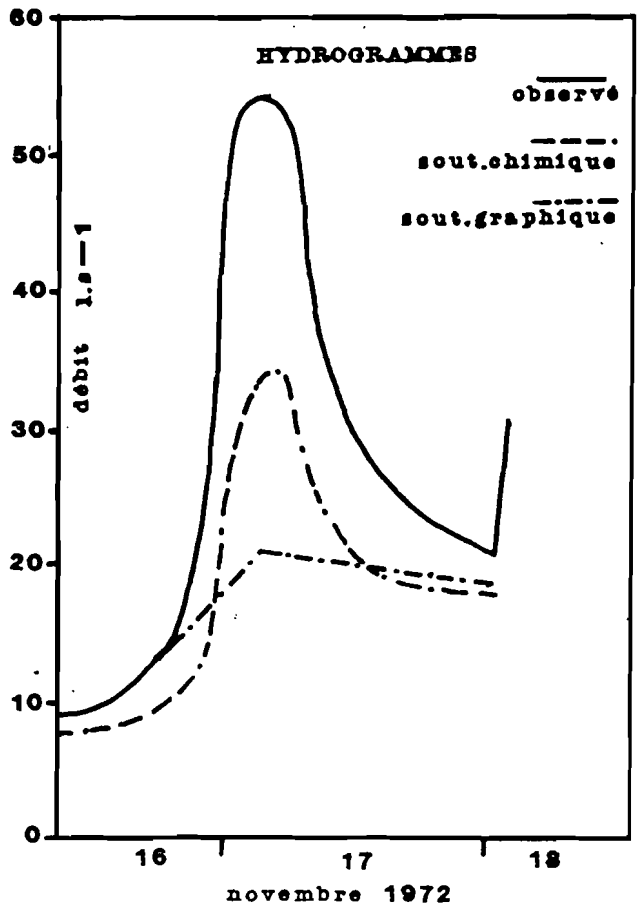
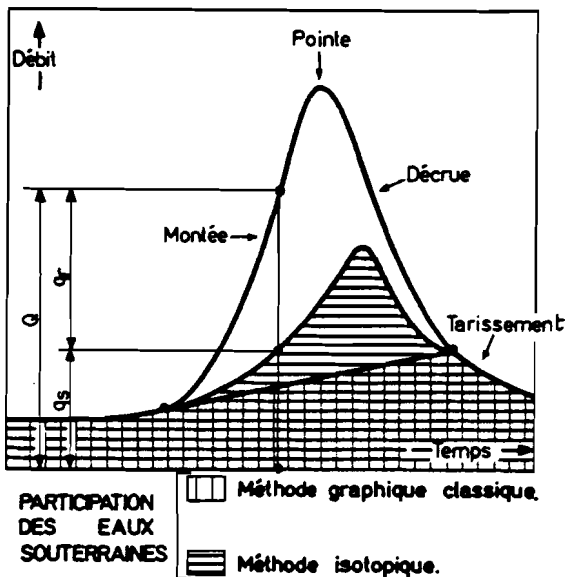


Fig. 116 : HYDROGRAMME D'UNE CRUE (OLIVE 1970)



. OLIVE (1970) observe également un décalage en utilisant le tritium (fig. 116).

. BLAVOUX (1978) a utilisé l'oxygène 18 et les bicarbonates sur le Maravant, les hydrogrammes de la composante souterraine obtenus avec le traceur chimique et le traceur isotopique sont très voisins (fig. 117).

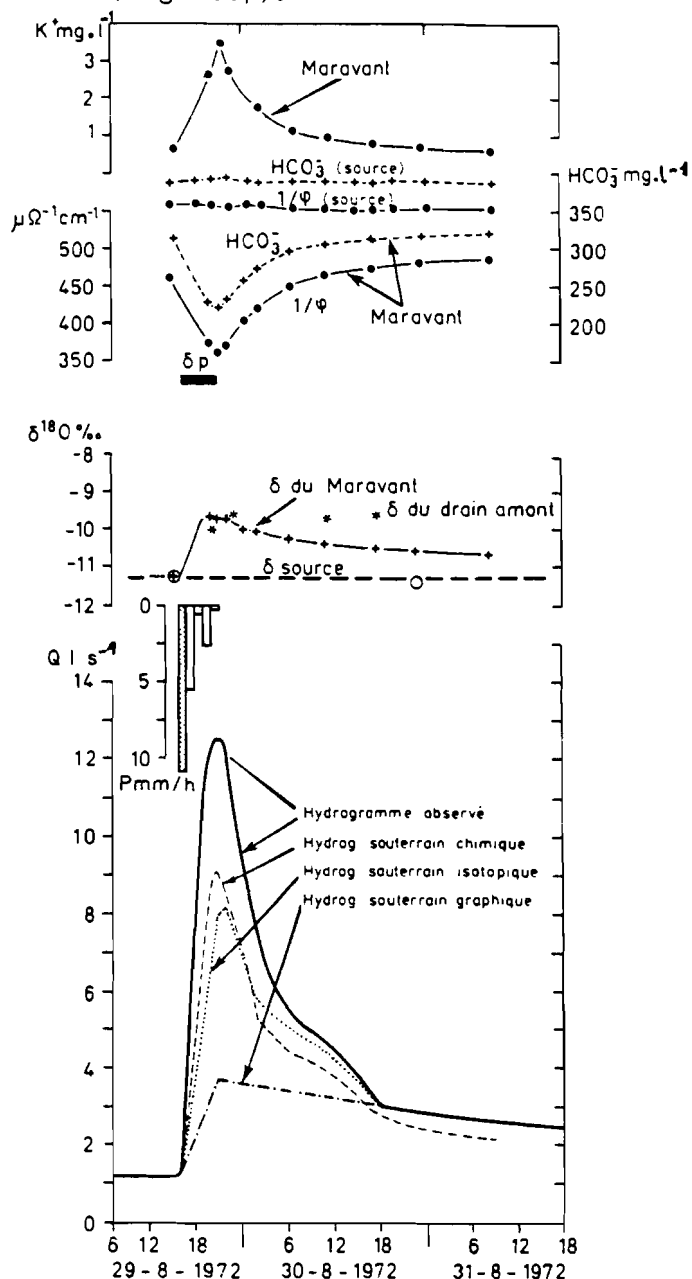


Fig. 117 : COMPARAISON DES HYDROGRAMMES SOUTERRAINS OBTENUS PAR LES METHODES ISOTOPIQUE, CHIMIQUE ET GRAPHIQUE (BLAVOUX 1978)

On conclura cette revue des méthodes physico-chimiques et isotopiques pour la décomposition des hydrogrammes des crues des cours d'eau en disant que :

- toutes les études présentées ici montrent une part importante de la composante souterraine sous le pic de crue. Plus ou moins décalé par rapport au maximum, on observe un pic de contribution des eaux souterraines du bassin, qui excède largement l'ajustement semi-logarithmique du tarissement, prolongé sous le pic de crue.

- La comparaison de plusieurs éléments chimiques (PINDER et JONES, 1969) ou d'un élément chimique et d'un traceur isotopique de la molécule d'eau (BLAVOUX, 1978) fournit des hydrogrammes reconstitués très semblables, à condition que les éléments utilisés soient judicieusement choisis.

VI.2. TRANSPOSITION AU SYSTEME KARSTIQUE

VI.2.1. Modèle de fonctionnement hydrodynamique du karst par analogie avec un bassin versant (BLAVOUX et MUDRY, 1983)

Ce fonctionnement a été schématisé sur la figure 118, d'après les modèles proposés par DROGUE, 1971 ; MANGIN, 1975 ; BLAVOUX, 1980.

A. Entrées du système

Les pluies efficaces pénètrent dans le karst sur toute sa surface sous forme d'infiltration dispersée. Des entrées beaucoup plus concentrées issues du ruissellement à la surface du karst ou sur des bassins imperméables extérieurs au système, se précipitent au niveau des pertes dans des chenaux verticaux reliés directement au réseau karstique général.

B. Circulation dans la zone d'infiltration

L'aquifère épikarstique reçoit les eaux d'infiltration diffuse et les restitue en profondeur par des fissures et des joints faisant partie du réseau karstique organisé. Il s'agit en fait d'une infiltration retardée et tamponnée par ce réservoir qui rejoint dans les drains principaux l'infiltration directe pour constituer par addition le ruissellement souterrain (Q_{RS}).

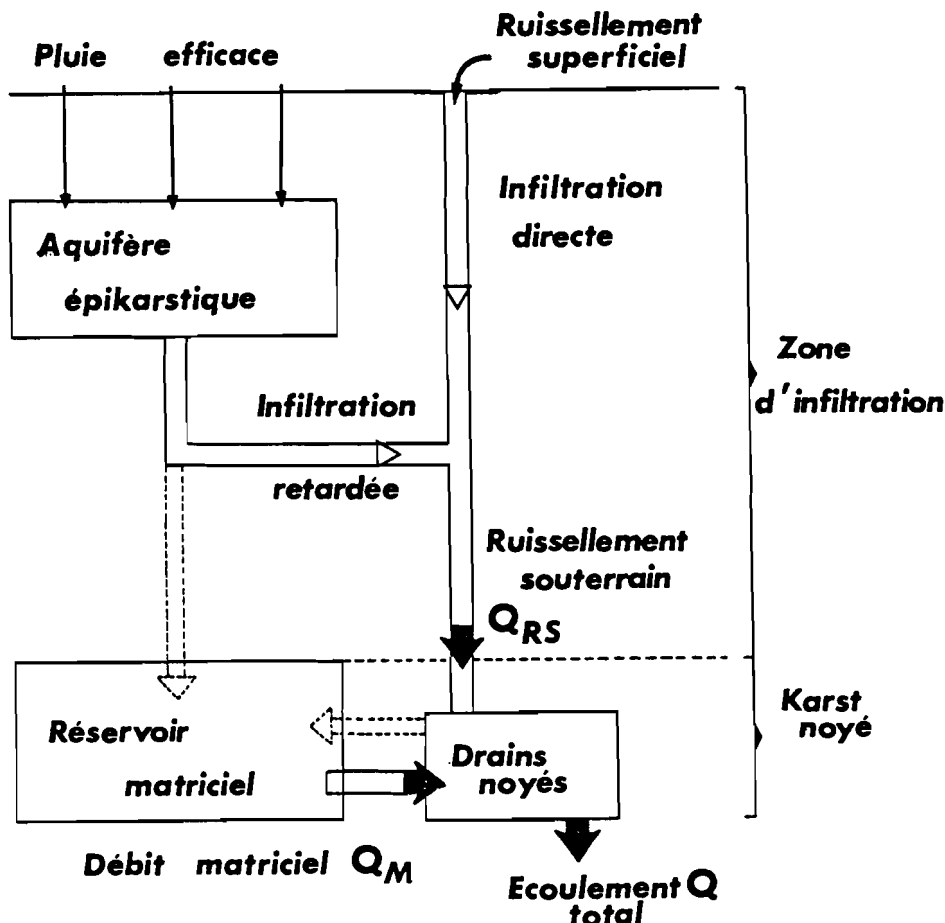


Fig. 118 : MODELE DE FONCTIONNEMENT DU KARST (BLAVOUX et MUDRY 1983, 1984)

C. Circulation dans la zone noyée

Les drains principaux se prolongent dans la zone noyée et convergent vers l'exutoire. En conséquence, le ruissellement souterrain lors d'une crue devra chasser devant lui un volume d'eau dont l'importance est fonction du **volume des drains noyés**.

Dans cette zone saturée, la karstification a préservé des blocs qui constituent grâce à leur porosité et leur microfissuration un **réservoir matriciel** à perméabilité réduite. Ce réservoir se vidange par les drains de la zone noyée et il est à l'origine du **débit matriciel** (Q_M).

Temporairement l'alimentation de ces blocs capacitifs s'effectue en période de hautes eaux par l'intermédiaire des drains noyés et de façon plus prolongée par drainance de l'aquifère épikarstique. L'importance relative de chaque alimentation dépend sans doute de la profondeur de la zone noyée et du degré de karstification du système.

D. Sorties du système

L'**écoulement total** à l'exutoire (Q) peut être considéré comme la somme du débit "matriciel" ($Q_{M'}$) et du ruissellement (Q_{RS}) transitant tous deux par les drains de la zone noyée. Le débit à composition chimique matricielle ($Q_{M'}$) correspond aux eaux issues de la matrice, présentes dans les zones transmissives. Ce débit $Q_{M'}$ représente le même volume que le débit Q_M qui s'est écoulé de la matrice vers les drains en un temps beaucoup plus long, la perméabilité des blocs étant très réduite. Dans la suite du texte, l'expression débit "matriciel" représentera ce débit $Q_{M'}$ d'eau à teneur matricielle.

VI.2.2. Décomposition chimique de l'hydrogramme de crue d'un exutoire karstique

Par cette schématisation nous considérons que l'écoulement total à l'exutoire provient de la superposition de deux composantes seulement, l'écoulement de la matrice calcaire et le ruissellement souterrain.

On considère que le débit total Q de concentration C d'une émergence, est la somme de sa composante "matricielle" $Q_{M'}$ de concentration C_M et de sa composante de ruissellement souterrain Q_{RS} de concentration C_{RS} (voir fig. 118).

$$(1) \quad Q = Q_{M'} + Q_{RS} \quad \text{donc} \quad Q_{RS} = Q - Q_{M'}$$

On peut écrire également l'égalité des flux chimiques liant ces trois débits.

Flux total = flux "matriciel" + flux de ruissellement souterrain.

$$(2) \quad Q.C = Q_{M'} \cdot C_M + Q_{RS} \cdot C_{RS}$$

d'où, en remplaçant Q_{RS} par sa valeur prise dans (1).

$$(3) \quad Q.C = Q_{M'} \cdot C_M + (Q - Q_{M'}) C_{RS}$$

$$Q.C - Q C_{RS} = Q_{M'} C_M - Q_{M'} C_{RS}$$

$$Q (C - C_{RS}) = Q_{M'} (C_M - C_{RS})$$

et finalement

$$(4) \quad Q_{M'} = Q \cdot \frac{C - C_{RS}}{C_M - C_{RS}} \quad \text{et} \quad (5) \quad Q_{RS} = Q \cdot \frac{C_M - C}{C_M - C_{RS}}$$

De cette façon on peut calculer à tout moment la participation de chaque composante à l'écoulement total si, ayant mesuré le débit et la concentration à l'exutoire nous sommes en mesure d'estimer leurs concentrations C_M et C_{RS} .

VI.3. ESTIMATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA MATRICE

En période de tarissement, le débit de l'exutoire karstique est uniquement assuré par la vidange du réservoir matriciel. La concentration de la source correspond alors à la concentration du réservoir matriciel. Ainsi donc par des mesures répétées en tarissement, nous pouvons étudier la variabilité chimique de cette composante et vérifier si sa minéralisation peut être considérée comme sensiblement constante malgré l'hétérogénéité de l'aquifère karstique.

Deux exemples nous permettent d'illustrer les variations des compositions chimiques de sources karstiques à l'étiage, le premier dans le Jura à l'échelle inter-annuelle, (voir 3ème partie, p.218), le second à la Fontaine de Vaucluse au cours de tarissement exceptionnel de l'année 1981 (voir 1ère partie, p. 54).

VI.3.1. Reproductibilité interannuelle des compositions chimiques en étiage des sources du Jura (BLAVOUX et MUDRY, 1983)

Les analyses chimiques et isotopiques des campagnes de prélèvements effectuées en étiage, de 1977 à 1982 sur les principales sources karstiques du Jura français et suisse ont été exploitées dans des publications récentes (BLAVOUX et al., 1979 ; MUDRY et al., 1979 ; MUDRY, 1981 ; BLAVOUX et al., 1982 ; CHAUVE et al., 1982). Il est bien difficile dans cette région climatique d'observer des étiages prolongés et généralisés à toute la chaîne. Malgré tout, le tableau 18 ci-après qui rassemble les conductivités et teneurs en magnésium mesurées

Conductivité à 20°C en $\mu S \text{ cm}^{-1}$

Moy. $\pm \delta x$		Janv. 77	Sept. 77	Oct. 78	Juil. 79	Oct. 79	Sept. 80	Mars 82
390 \pm 30	Capucin	413	403	399	346	-	418	360
455 \pm 23	Dard	444	452	475	-	415	473	473
310 \pm 17	Doubs	319	327	313	279	-	319	306
435 \pm 27	Verneau	445	417	449	-	451	463	390

Magnésium en mg.l^{-1}

Moy. $\pm \delta x$		Janv. 77	Sept. 77	Oct. 78	Juil. 79	Oct. 79	Sept. 80	Mars 82
9,8 \pm 2,0	Capucin	9,4	10,6	12,2	-	-	9,9	6,75
3,1 \pm 0,7	Dard	2,5	3,2	4,3	-	-	2,5	3,0
3,1 \pm 0,4	Doubs	3,1	3,6	3,3	-	-	2,8	2,5
5,4 \pm 0,7	Verneau	5,3	6,3	5,8	-	-	5,5	4

Tabl. 18 - CONDUCTIVITE ET TENEURS EN MAGNESIUM DE QUATRE SOURCES KARSTIQUES DU JURA AU COURS DES ETIAGES 1977 à 1982

sur 4 sources lors de 7 étiages montre l'assez bonne reproductibilité des valeurs d'une source d'un étiage à l'autre, et par là-même, la bonne conservation des concentrations relatives à chaque système.

On peut donc considérer que le débit matriciel qui est le seul présent en étiage a une composition chimique sensiblement constante d'une année sur l'autre.

VI.3.2. Comportement chimique de la Fontaine de Vaucluse au cours de l'étiage 1981 (BLAVOUX et MUDRY, 1983-1984)

La figure 119 détaille l'évolution de la température, des teneurs en magnésium, chlorures et nitrates de la Fontaine de Vaucluse lors de la décrue et du tarissement de 1981 (voir 1ère partie, p. 54).

On remarquera la stabilisation rapide des éléments externes caractéristiques de l'infiltration (chlorures et nitrates) un mois après le pic de crue. La température reprend sa valeur d'équilibre avec le réservoir trois mois après, et un des éléments internes acquis dans le système (magnésium) quatre mois après. Au-delà de ce délai et en l'absence de précipitations, les paramètres deviennent stables aux erreurs analytiques près (MUDRY, 1982 et 1ère partie, p.54).

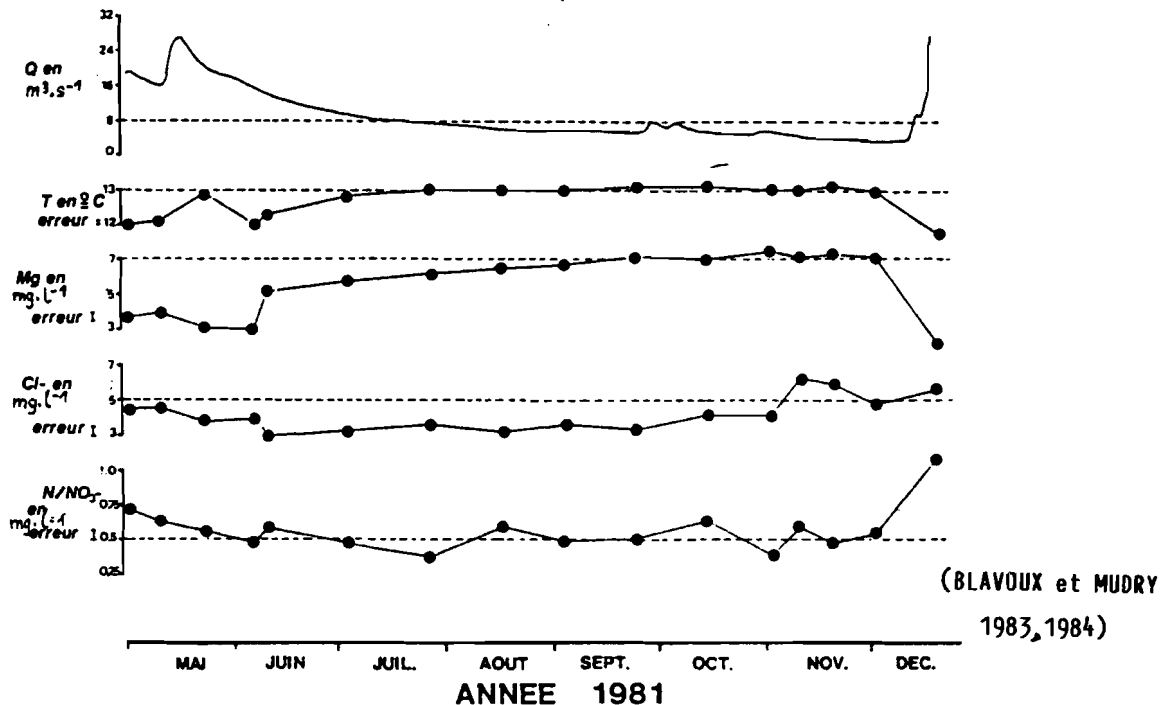


Fig. 119 : STABILISATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHEMQUES A LA FONTAINE DE VAUCLUSE - TARISSEMENT 1981

Ces observations attestent que le débit matriciel du système a une composition constante. On remarquera que le temps nécessaire pour que cette composante participe vraiment seule à l'écoulement est très élevé, de l'ordre de 4 mois. Ceci est certainement dû à la taille du bassin hydrogéologique de la Fontaine de Vaucluse (1 130 km²) ainsi qu'à l'épaisseur de sa zone non saturée (800 m).

VI.4. ESTIMATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU RUISELLEMENT SOUTERRAIN

VI.4.1. Variabilité chimique de l'exutoire au cours du cycle hydrologique

Si par l'étude des tarissements on peut accéder directement à la minéralisation du débit matriciel et avec raison la considérer comme constante, il est

très difficile d'isoler le ruissellement souterrain, autre composante de l'écoulement en crue, pour étudier son évolution. Notre approche se fera donc d'abord de façon indirecte par l'observation des variations chimiques d'un exutoire au cours d'un cycle hydrologique.

A. Relation conductivité - débit

Sur la figure 120, la conductivité à la Fontaine de Vaucluse (sensiblement proportionnelle à sa minéralisation) est reportée en fonction de son débit au cours du cycle hydrologique 1981-1982 (BLAVOUX et MUDRY, 1983, 1984).

Deux grandes familles d'eau apparaissent :

- l'une à minéralisation élevée et invariante correspondant aux faibles débits, traduit la sollicitation de la seule réserve en tarissement.

- l'autre à minéralisation décroissante en fonction du débit, traduit la dilution de l'eau de la réserve par l'eau d'infiltration en période de crue.

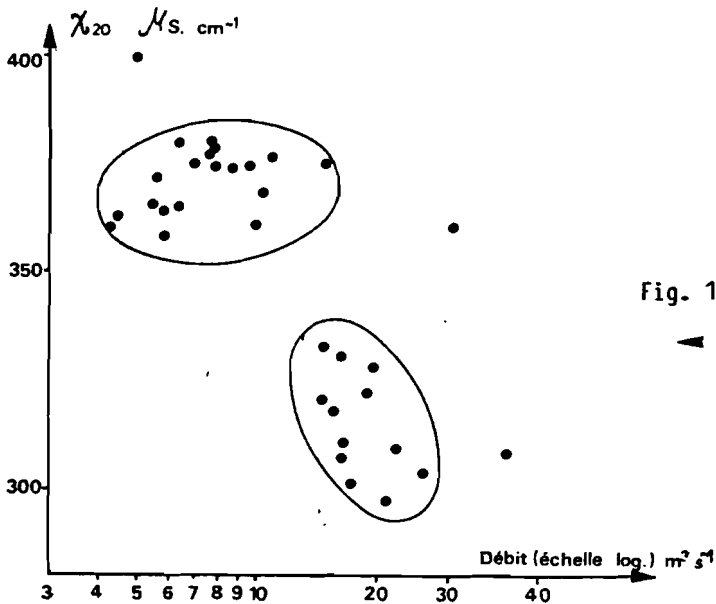


Fig. 120 : RELATION CONDUCTIVITE-DEBIT
A LA FONTAINE DE VAUCLUSE -
CYCLE HYDROLOGIQUE 1981-82
(BLAVOUX et MUDRY 1983-1984)

B. Variation de la teneur en magnésium

Les différents points représentant la teneur en magnésium en fonction du débit sont reliés dans l'ordre chronologique de leur apparition au cours du cycle hydrologique 1981-1982 (fig. 121).

Les concentrations en magnésium décrivent grossièrement un parallélogramme et nous allons expliquer leur trajectoire :

- Le point de départ en haut à gauche du diagramme correspond aux concentrations les plus élevées pour les débits les plus faibles. Ces teneurs les plus fortes, car le magnésium est un élément interne au système, caractérisent le débit matriciel seul présent en étiage.

- La teneur en Mg reste élevée et le débit augmente considérablement (côté 1). Il s'agit toujours d'eau à caractère matriciel chassée des drains de la zone noyée par l'onde de crue du ruissellement souterrain.

- Le débit augmente encore et la teneur en Mg chute brutalement (côté 2) car apparaît effectivement la contribution du ruissellement souterrain peu ou très peu minéralisé.

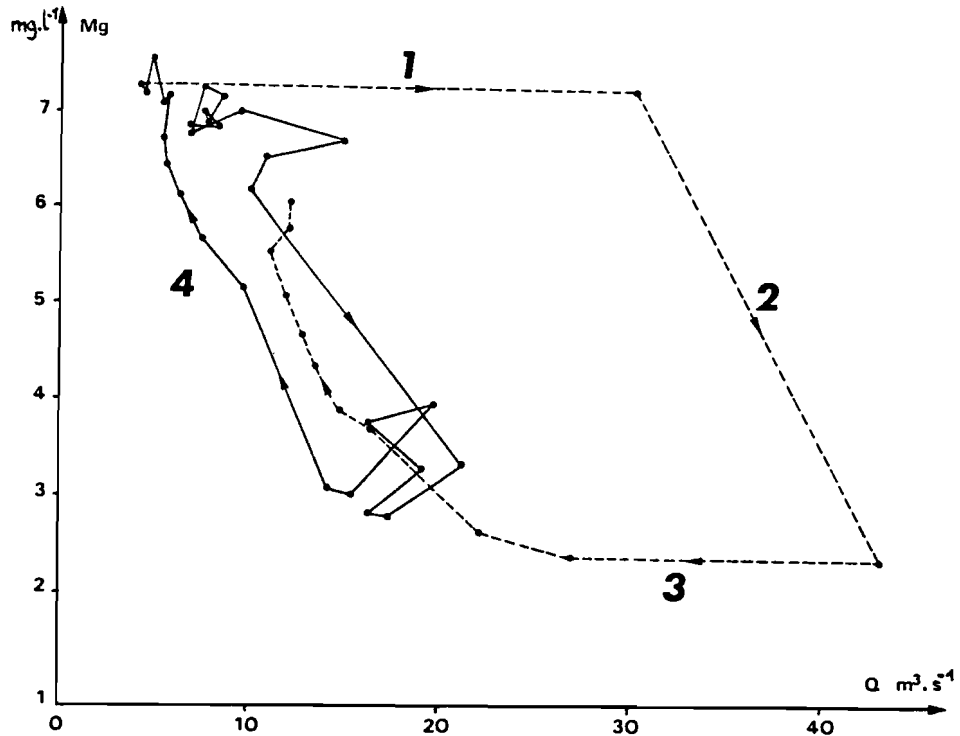


Fig. 121 : RELATION MAGNESIUM-DEBIT A LA FONTAINE DE VAUCLUSE - CYCLE HYDROLOGIQUE 1981-82 (BLAVOUX et MUDRY 1983-1984)

Les concentrations restent très faibles et les débits diminuent beaucoup (côté 3) car on aborde la décrue des deux composantes de l'écoulement.

- Les concentrations remontent progressivement vers les valeurs de tarissement alors que les débits diminuent plus lentement (côté 4). Ceci est dû au fait que la participation de la vidange du réservoir matriciel à l'écoulement total est de plus en plus importante par rapport au ruissellement souterrain qui disparaît.

Cette étude confirme bien la constance des compositions chimiques de l'exutoire en étiage et fait surtout apparaître la sollicitation d'eaux à caractère matriciel lors de la montée de crue, par effet piston du ruissellement souterrain sur les drains noyés.

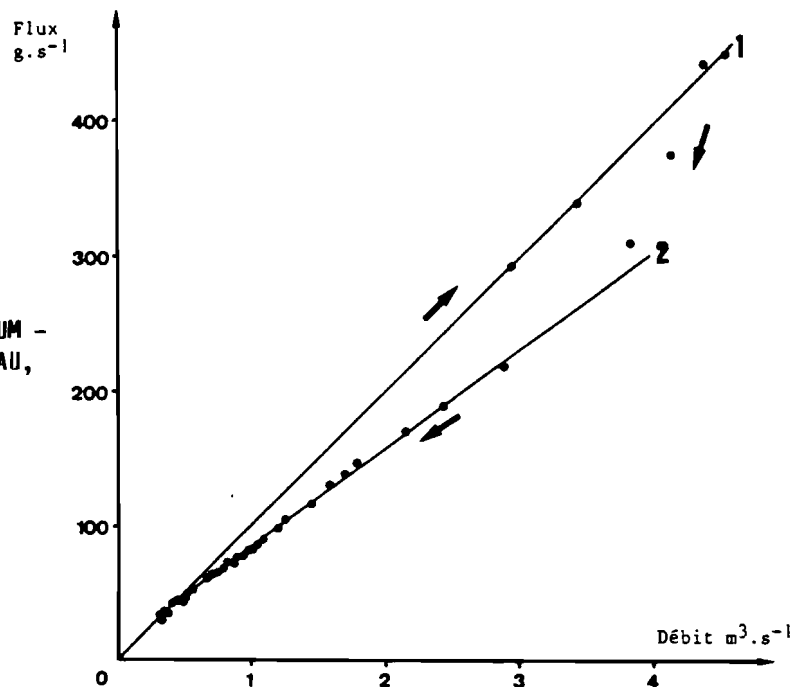


Fig. 122 : RELATION FLUX EN CALCIUM - DEBIT, SOURCE DU VERNEAU, CRUE DE NOVEMBRE 1977

VI.4.2. Les diagrammes flux chimique - débit

Si nous estimons la constance de la composition chimique du débit "matriciel" comme effective, il est nécessaire pour pouvoir décomposer les hydrogrammes d'évaluer à tout instant la composition chimique du ruissellement souterrain. Dans ce but, nous avons utilisé la représentation graphique proposée en hydrologie de surface par NAKAMURA (1971) qui consiste à reporter lors de la décrue et du tarissement, les flux chimiques (CQ) en fonction du débit (Q).

La figure 122 rend compte de la relation flux en calcium - débit au cours de la crue de novembre 1977 à la source karstique du Verneau (Doubs) étudiée par TISSOT et TRESSE (1978).

- Un premier segment de droite à pente forte reliant les points à faibles débits et flux correspond à l'écoulement de la "matrice" calcaire à minéralisation élevée et constante. On remarquera, d'une part que cette droite (1) passe par l'origine et que d'autre part, plusieurs points à flux élevé se situent exactement dans son prolongement. Ceci nous permet d'affirmer que jusqu'au point à flux maximum situé au sommet du pic de crue, le débit est assuré exclusivement par une composante à caractère "matriciel". C'est la chasse de l'eau des drains de la zone noyée par l'onde de crue du ruissellement souterrain. La pente de cette droite 1 est égale à la concentration de la composante "matricielle", ici $100,5 \text{ mg.l}^{-1}$.

- Un second segment de droite à pente plus faible (2) représentant les flux et débits décroissants mesurés à la décrue correspond au mélange des eaux de la "matrice" calcaire avec les eaux du ruissellement souterrain. Seuls deux points occupent, après le pic de crue, une position intermédiaire entre la droite des flux à composition "matricielle" et celle du mélange.

- La minéralisation des eaux de la "matrice" calcaire étant constante, celle du mélange également (puisque les flux observés sont corrélés linéairement avec le débit), la minéralisation des eaux de ruissellement est par conséquent constante pendant cet épisode. La figure 123 fait apparaître un phénomène tout à fait analogue sur la crue de novembre 1977 à la source de l'Areuse (Neuchâtel, Suisse) étudiée par KIRALY et MULLER (1979). Ici, aucun point n'échappe aux deux relations flux-débit.

La linéarité des courbes flux "matriciel" - débit (1) et flux de mélange - débit (2) suggère donc que, la composition de l'eau de la réserve étant constante,

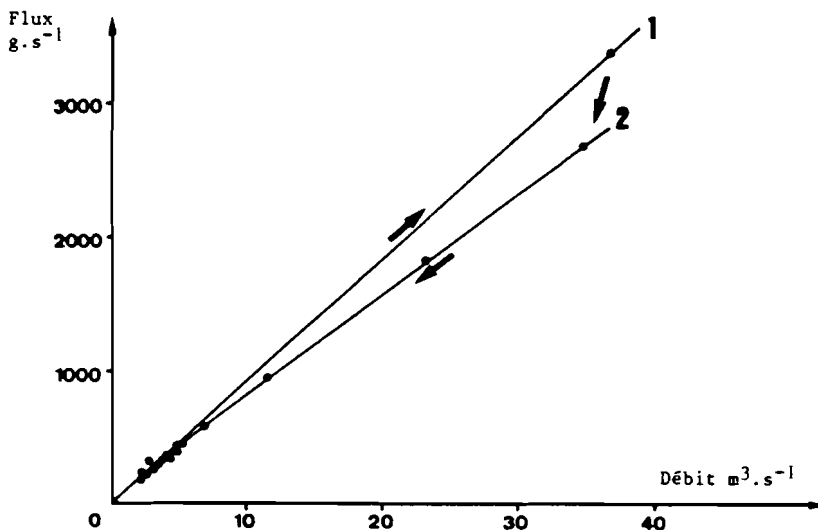
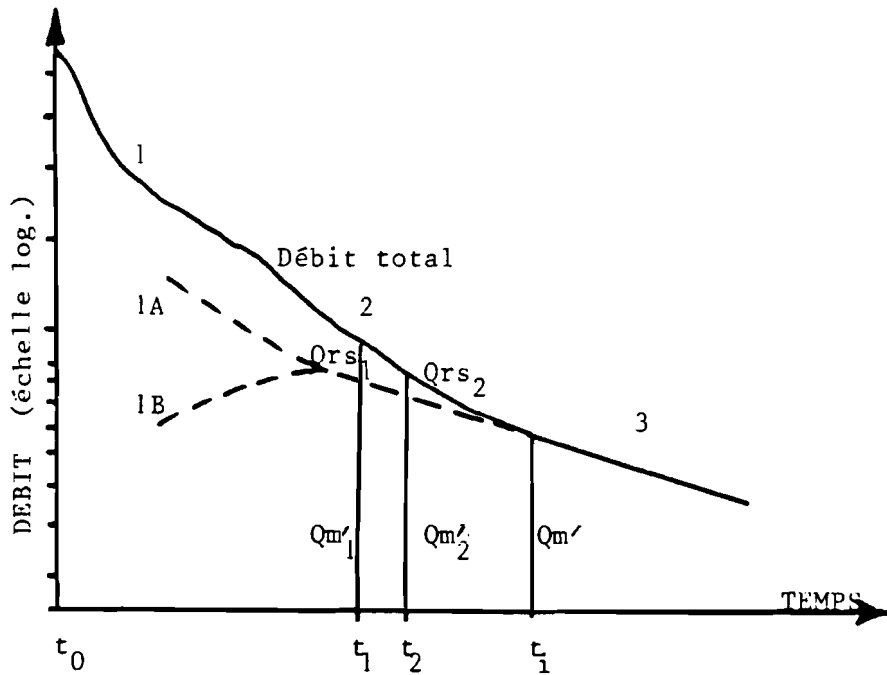


Fig. 123 : RELATION FLUX EN CALCIUM-DEBIT, SOURCE DE L'AREUSE, CRUE DE NOVEMBRE 1977

la composition du ruissellement souterrain le soit aussi pendant une bonne partie de la décrue. Ce phénomène est dû à ce que le réservoir épikarstique sert de tampon à l'infiltration retardée et à un degré moindre à ce que l'infiltration directe et le ruissellement de surface déplacent aussi l'eau ayant séjourné dans les sols.

Afin de ne pas prendre en compte l'influence de l' "effet de chasse" mis précédemment en évidence sur le comportement de l'hydrogramme, nous allons calculer la teneur en CRS du ruissellement souterrain à la fin de la décrue, en soustrayant le débit de la réserve à l'hydrogramme total, comme dans la méthode de décomposition hydrodynamique de MANGIN (1970). En coordonnées semi-logarithmiques, à la fin de la décrue (fig. 124) l'écart entre la demi-droite $\log Q = f(t)$ et l'hydrogramme de décrue représente la part du ruissellement souterrain dans l'écoulement total.



- 1 : crue - Le débit de la composante à marque chimique de la réserve peut être hydrocinématiquement influencé par la composante de ruissellement souterrain par exemple 1A : effet-piston, 1B : recharge des blocs.
- 2 : fin de la décrue - Cette influence se réduit ; la source écoule un mélange d'eau de la réserve et d'eau de ruissellement souterrain.
- 3 : tarissement - Seules les réserves contribuent au débit de l'émergence.

Fig. 124 : DETERMINATION DU DEBIT DE LA COMPOSANTE DE RUISSellement SOUTERRAIN A PARTIR DES COURBES DE DECRUE ET DE TARISSEMENT

Pour chaque point de cette fin de décrue, on peut écrire :

$$QC = Q_M \cdot C_M + Q_{RS} \cdot C_{RS} \quad ,$$

en particulier entre deux instants voisins, 1 et 2, à la fin de la décrue, on aura :

$$Q_1 \cdot C_1 = Q_{M1} \cdot C_M + Q_{RS1} \cdot C_{RS}$$

$$- Q_2 \cdot C_2 = Q_{M2} \cdot C_M + Q_{RS2} \cdot C_{RS}$$

$$Q_1 \cdot C_1 - Q_2 \cdot C_2 = (Q_{M1} - Q_{M2}) \cdot C_M + (Q_{RS1} - Q_{RS2}) \cdot C_{RS}$$

- . Les concentrations C_1 et C_2 sont mesurées aux instants 1 et 2 dans la source ;
- . La concentration C_M des eaux de la "matrice" est la pente de la relation flux-débit pour cette unité.
- . Les débits Q_{M1} et Q_{M2} sont calculés aux instants t_1 et t_2 à partir de la loi de vidange de cette unité.

$$Q_{Mt} = Q_{Mo} \cdot e^{-\alpha t}, \text{ le paramètre } \alpha \text{ étant égal à } \frac{Q_{M1} - Q_{M2}}{t_2 - t_1}$$

Pour pallier les imprécisions de la mesure du débit, on fait la moyenne de plusieurs valeurs calculées de C_{RS} .

VI.4.3. Estimation de la teneur en chlorures des eaux d'infiltration

A partir des pics de chlorures observés à la Fontaine en septembre 1981, alors qu'aucune anomalie hydrologique ne se manifeste dans le tarissement (fig. 83), il semble possible d'estimer la concentration en chlorures de l'eau d'infiltration transitant par l'épikarst, (BLAVOUX et MUDRY, 1986).

Les précipitations enregistrées au début du mois de septembre à Saint-Christol entre Sault et Banon, n'ont aucune répercussion sur le limnigramme qui continue sa descente (fig. 82). On peut donc en déduire que le débit maximal des eaux d'infiltration responsables de la montée des chlorures reste inférieur à la précision de la mesure du débit total estimée à 20 l.s⁻¹ à ce stade du tarissement. Dans ces conditions on sait que l'eau en provenance de la matrice capacitive du karst noyé a une teneur en chlorures de 3,2 ppm. On peut donc calculer la teneur minimale en chlorures de l'eau d'infiltration qui se rajoute à celle-ci à partir de l'équation des flux suivante :

$$Q_t \cdot C_t = Q_M \cdot C_M + Q_I \cdot C_I$$

$$\text{d'où} \quad C = \frac{Q_t \cdot C_t - Q_M \cdot C_M}{Q_I}$$

$$\text{Soit} \quad \Delta \phi = C_M \cdot \Delta Q_M + C_{RS} \cdot \frac{(Q_1 - Q_{M1} - Q_2 + Q_{M2})}{(Q_1 - Q_2 + Q_{M2} - Q_{M1})}$$

$$\Delta \phi = C_M \cdot \Delta Q_M + C_{RS} \cdot (\Delta Q - \Delta Q_M)$$

$$\text{Donc} \quad C_{RS} = \frac{\Delta \phi - C_M \cdot \Delta Q_M}{\Delta Q - \Delta Q_M} = \frac{(Q_1 \cdot C_1 - Q_2 \cdot C_2) - C_M \cdot (Q_{M1} - Q_{M2})}{(Q_1 - Q_2) - (Q_{M1} - Q_{M2})}$$

- . Les débits Q_1 , Q_2 sont les débits de l'émergence mesurés grâce au limnigraphe, aux instants 1 et 2.

avec Q_t et C_t le débit total et sa concentration
 Q_M et C_M le débit "matriciel" et sa concentration
 Q_I et C_I le débit d'infiltration et sa concentration

Le tableau 19 ci-après montre que les teneurs en chlorures de l'eau d'infiltration responsable des pics de septembre sans répercussion visible sur le débit s'élèvent au minimum à 150 mg.l^{-1} .

Ces concentrations élevées sont sans commune mesure avec celles de la pluie, à Avignon-Montfavet.

M. FRESLON (1980) n'a jamais observé entre le 22.11.1978 et le 24.04.1980, des pluies dépassant 15 mg.l^{-1} de chlorures.

Date	Débits en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			Concentrations en mg.l^{-1} de Cl		
	Q_t	Q_M	Q_s	C_t	C_M	C_I
7/9	5.66	5.64	0.02	4.2	3.2	> 286
8/9	5.62	5.60	0.02	4.48	3.2	> 363
10/9	5.57	5.55	0.02	3.84	3.2	> 181
17/9	5.34	5.32	0.02	4.44	3.2	> 334
19/9	5.29	5.27	0.02	3.76	3.2	> 151

Tabl. 19 - CONCENTRATION EN CHLORURES DES EAUX D'INFILTRATION

De telles teneurs supposent une reconcentration des eaux météoriques par évapotranspiration, dans le sol et l'aquifère épikarstique. Les eaux ainsi concentrées sont chassées de ces milieux par les premières pluies efficaces de la fin de l'été. Ce phénomène a déjà été signalé par M. MBA (1971) sur les karsts de la région languedocienne.

Une conséquence de ce passage des eaux chlorurées dans le réseau hiérarchisé du système karstique est la recharge des marges accessibles des blocs capacitifs. C'est pourquoi l'hydrochimie du tarissement est affectée par les pluies efficaces d'été même si les débits le sont très peu.

C H A P I T R E VII

APPLICATION A L'ESTIMATION DES
COMPOSANTES DE L'HYDROGRAMME DE
CRUE D'UNE SOURCE KARSTIQUE

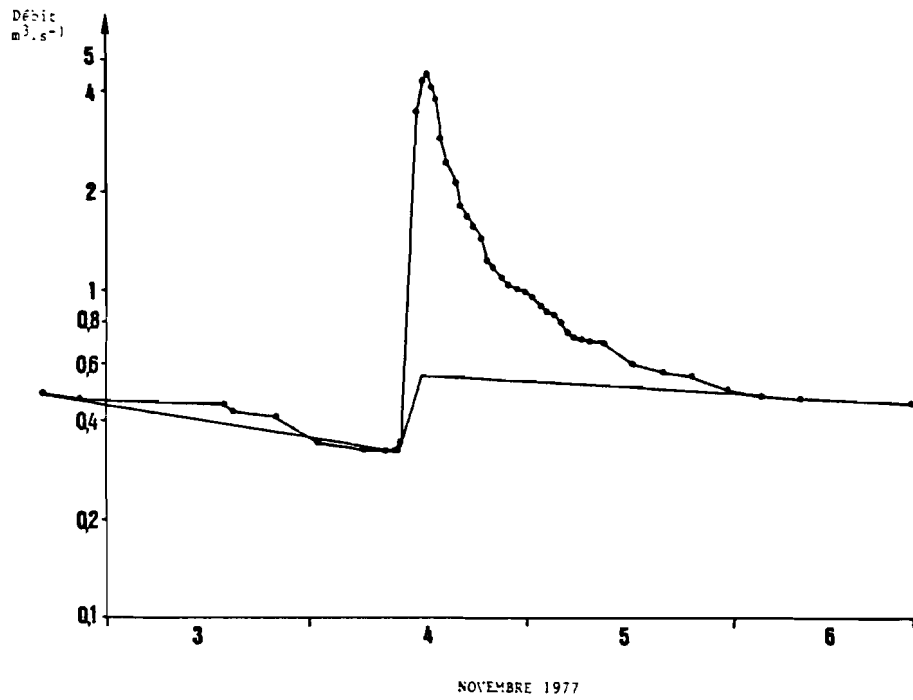


Fig. 125 : COURBES DE DECRUE ET DE TARISSEMENT, SOURCE DU VERNEAU, CRUE DE NOVEMBRE 1977

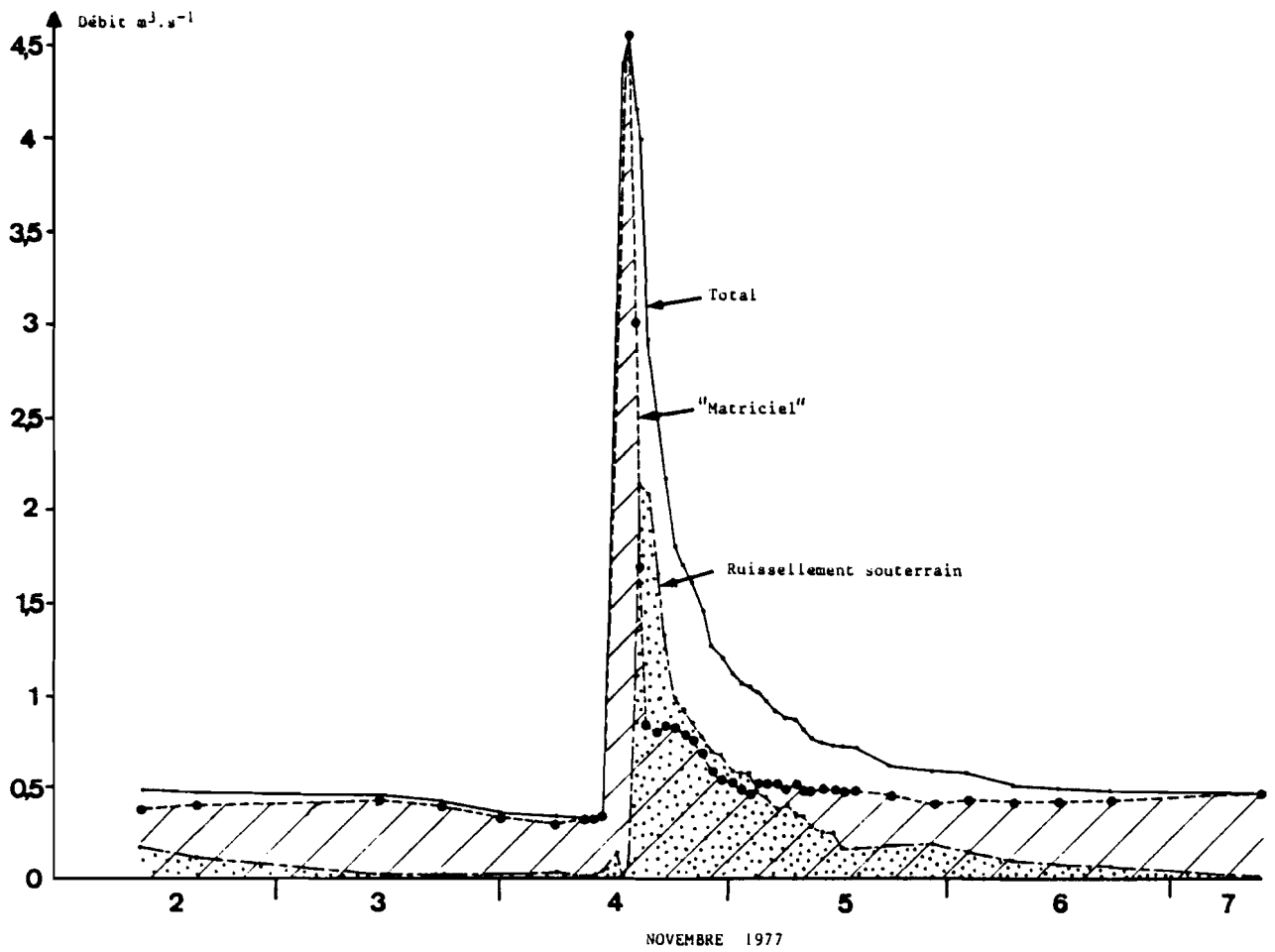


Fig. 126 : DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE LA CRUE DE NOVEMBRE 1977 AU VERNEAU

APPLICATION A L'ESTIMATION DES COMPOSANTES DE L'HYDROGRAMME
DE CRUE D'UNE SOURCE KARSTIQUE

VII.1. UTILISATION DES MARQUEURS PHYSICO-CHIMIQUES

VII.1.1. Crue de novembre 1977 au Verneau (Doubs)

Le traceur utilisé est le calcium. La teneur de l'unité "matricielle", déterminée par la pente du premier segment de droite sur la figure 122, est égale à 100,5 mg.l⁻¹. Le coefficient de tarissement α de 0,0669 (fig. 125), a permis l'estimation de la teneur de l'unité de ruissellement souterrain à 65,6 mg.l⁻¹ en fin de décrue (voir VI.4.2.). La décomposition obtenue avec ses concentrations apparaît sur la figure 126.

On remarquera que le pic principal de la composante "matricielle" atteint le débit maximum de l'hydrogramme ("effet piston"), et qu'il est rapidement relayé par un pic du ruissellement souterrain (décalé par rapport au maximum de l'hydrogramme). La décrue de ce ruissellement souterrain a une pente plus forte que la récession de l'unité "matricielle" et trois jours après le pic de débit, l'infiltration a totalement disparu.

Cette décomposition fait apparaître des propriétés connues de cette émergence : gros conduits (sensibles à l'effet piston), crues vite résorbées.

Les volumes de chaque composante obtenus par intégration des différents hydrogrammes nous montrent (tab. 20) la prépondérance de l'unité "matricielle" (72%) au cours de cette crue, sans préjuger du lieu de stockage des eaux de réserve dans ce système (voir III.1.1.F.).

Volume total.....	297 000 m ³		
Volume "matriciel".....	213 000 m ³	72 %	
Volume du ruissellement souterrain....	84 000 m ³	28 %	

Tabl. 20 - VOLUMES ECOULES - CRUE DE NOVEMBRE 1977, SOURCE DU VERNEAU

VII.1.2. Crue de novembre 1977 à l'Areuse (Neuchâtel, Suisse)

Le marqueur retenu est ici aussi le calcium.

La fig. 127 nous montre l'ajustement du logarithme du débit en fonction du temps, permettant le calcul du coefficient de tarissement α (0,0222) et de la teneur de la composante du ruissellement souterrain (65,7 mg.l⁻¹). La teneur matricielle a été évaluée à 91,2 mg.l⁻¹. Au cours de cette crue (fig. 128) l'Areuse restitue (en montée) une eau à seule composition matricielle. Cet effet piston s'annule vite et le débit de l'unité "matricielle" devient inférieur à ce

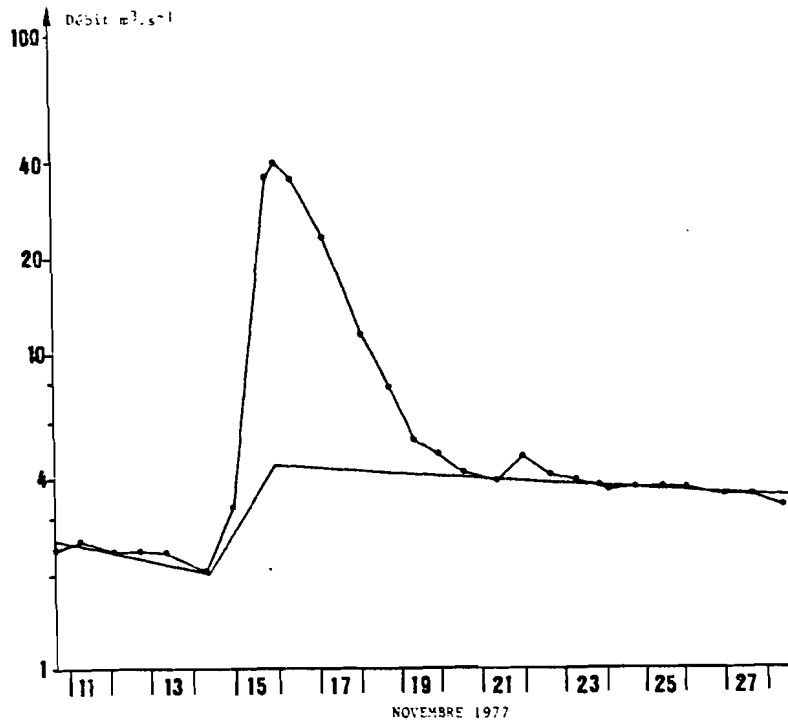


Fig. 127 : COURBES DE DECRIE ET DE TARISSEMENT, SOURCE DE L'AREUSE, CRUE DE NOVEMBRE 1977

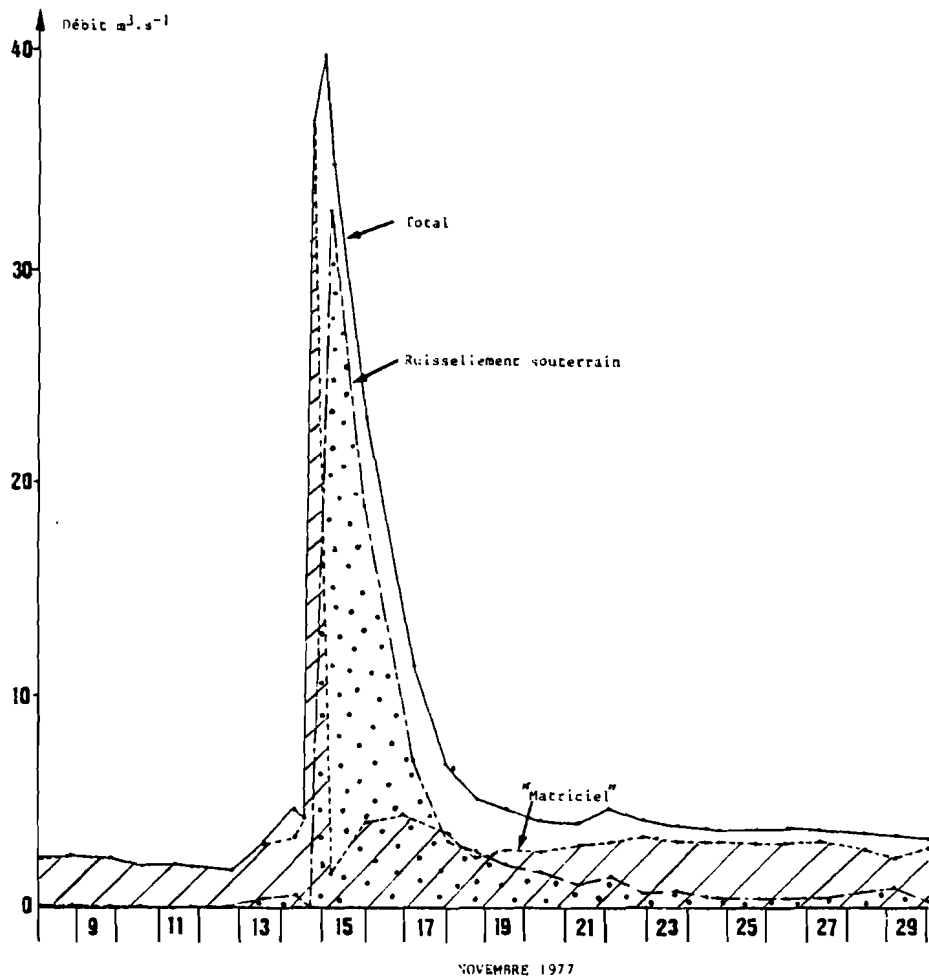


Fig. 128 : DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE LA CRUE DE NOVEMBRE 1977 SUR L'AREUSE

qu'il était avant la crue lorsque le ruissellement souterrain contribue presque seul à l'hydrogramme total (début de décrue). L'infiltration décroît alors rapidement jusqu'à la fin de l'épisode, mais sans s'annuler.

Ce comportement de l'unité "matricielle" (effet piston puis tendance à l'annulation) appelle deux comparaisons.

- Un phénomène analogue est observé par BLAVOUX (1978) sur le Maravant, avec une décomposition isotopique (pic positif suivi par un négatif).
- La diminution du débit "matriciel" sous le pic maximum du ruissellement souterrain est en parfait accord avec le modèle proposé par TRIPET (1972) sur la source de l'Areuse : le niveau piézométrique des joints de 2ème ordre (drains, voir introduction, p. 6) étant plus élevé que celui des joints du 1er ordre (fissures), il existe un gradient hydraulique dirigé vers celui-ci et le système de 2ème ordre alimente les joints moins perméables par injection, (recharge des blocs capacitifs). Le débit "de la matriciel" diminue donc sous le pic. La différence observée avec le modèle de TRIPET est l'effet piston que cet auteur ne fait pas apparaître.

. La décomposition de l'hydrogramme de la source de l'Areuse est donc en accord avec les connaissances antérieures sur ce système.

Le tableau 21 détaille les volumes mis en jeu :

Volume total.....	12 477 000 m ³	
Volume "matriciel".....	7 011 000 m ³	56%
Volume du ruissellement.....	5 466 000 m ³	44%

Tabl. 21 - VOLUMES ECOULES - CRUE DE NOVEMBRE 1977, SOURCE DE L'AREUSE

Pour l'Areuse aussi la composante "matricielle" prédomine.

VII.1.3. Crue de janvier-février 1980 au Pont de Gys (Haute-Savoie)

Nous avons vu dans la première partie (p. 43) que l'existence d'une composante évaporitique pénalisait l'étude du comportement karstique de cette émergence. L'analyse en composantes principales (p. 69) atteste que si la plupart des ions sont en relation avec cette unité, les bicarbonates permettent de décrire correctement le fonctionnement carbonaté du système. Cet élément a donc été utilisé. Les deux crues de janvier-février 1980 étudiées par VUYLSTEEK (1983) ont été décomposées.

Chacune a ses caractéristiques propres (tableau 22).

	1° crue	2° crue
Teneur matricielle CM.....	157,0 mg.l-I	150,0 mg.l-I
Teneur du ruissellement sout. CRS...	149,0 mg.l-I	128,6 mg.l-I
Coefficient de tarissement α	0,1936	0,1920

Tabl. 22 - TENEUR EN BICARBONATES AU COURS DES CRUES DE JANVIER-FEVRIER 1980 AU PONT DE GYS

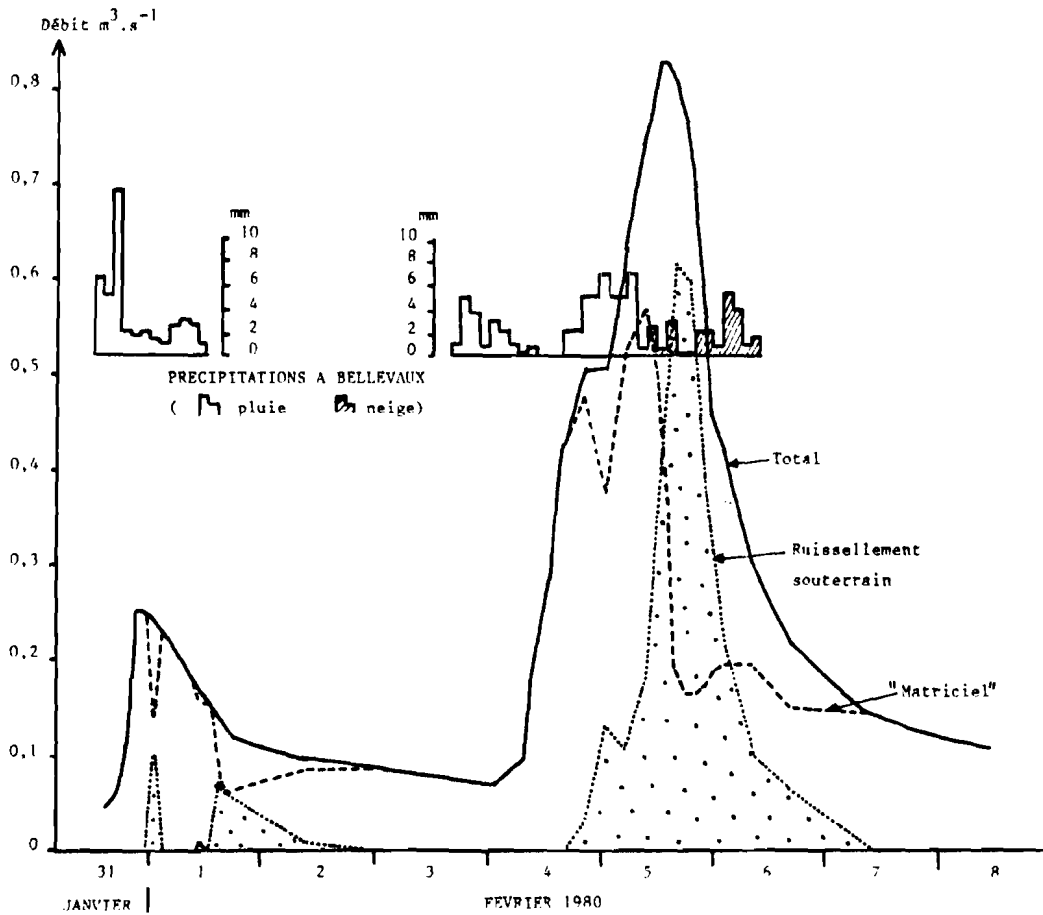


Fig. 129 : DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DES CRUES DE JANVIER-FEVRIER 1980 AU PONT DE GYS

	I° crue	2° crue	Total
Volume total m^3	34 600	124 200	158 800
Volume "matriciel" m^3	30 800	86 000	116 800
Volume "matriciel" %.....	89	69	74
Volume ruissellement souterrain m^3	3 800	38 200	42 000
Volume ruissellement souterrain %.....	11	31	26

Tabl. 23 - VOLUMES ECOULES - CRUES DE JANVIER-FEVRIER 1980 AU PONT DE GYS

On remarquera que la teneur de la composante "matricielle" à la deuxième crue est voisine de celle de l'infiltration de la première, ce qui atteste d'une part qu'à la première crue l'infiltration a rechargé les milieux capacitifs, d'autre part que cette eau n'a pas eu le temps de se charger en bicarbonates entre les deux crues.

La figure 129 montre la décomposition des hydrogrammes à l'aide de ces quatre teneurs. Il faut noter les phénomènes d'effet piston très importants sur les deux crues, le décalage temporel pic de crue-pic de la composante infiltration, ainsi que la diminution de la composante "matricielle" sous les pics de ruissellement souterrain, ce qui au Pont de Gys aussi permet de mettre en évidence la recharge des milieux de stockage. La pluviométrie génératrice de la première crue (43,2 mm) n'engendre qu'une montée limitée de l'hydrogramme ($0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) alors que le deuxième épisode (29,6 mm sous forme liquide) fait monter le pic à $0,83 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ce rendement faible de la première crue est lié au stockage dans l'aquifère carbonaté non saturé ; cette eau est mobilisée avec la qualité d'eau de la réserve lors du deuxième épisode.

Le tableau 23 donne les volumes après intégration des hydrogrammes (programme DECOMPODER en basic).

Comme pour le Verneau et l'Areuse, on mentionnera l'importance de l'eau à marque chimique de la réserve. La diminution de la part de cette réserve entre première et deuxième crue est imputable au remplissage de la zone non saturée qui, lorsqu'il est satisfait (2ème crue), permet le transit de l'infiltration jusqu'à l'émergence.

VII.1.4. Crue de Fonte de Neige en mai 1979 aux Plagnes et au Pont de Gys

La figure 130 (VUYLSTEEK, 1983) montre la réaction de la conductivité et du débit des sources du Pont de Gys (A) et des Plagnes (B) aux cycles nycthéméraux gel-dégel. Ce phénomène thermique, décrit sur plusieurs systèmes karstiques de montagne (par exemple le système de la source du Doubs (JEANBLANC et SCHNEIDER, 1981) module donc l'infiltration dans le karst.

(flux en $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, débits en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

	PENTE	ORIGINE	CORRELATION	NOMBRE DE COUPLES
PLAGNES	269,5	I,168	0,999	29
PONT 1° oscillation	270,9	7,862	0,992	16
DE 2° oscillation	226,5	II,323	0,998	15
GYS 3° oscillation	199,8	13,952	0,999	10

Tabl. 24 - RELATIONS FLUX EN CONDUCTIVITE-DEBIT - CRUE DE FONTE DE NEIGE (MAI 1980) AUX PLAGNES ET - AU PONT DE GYS

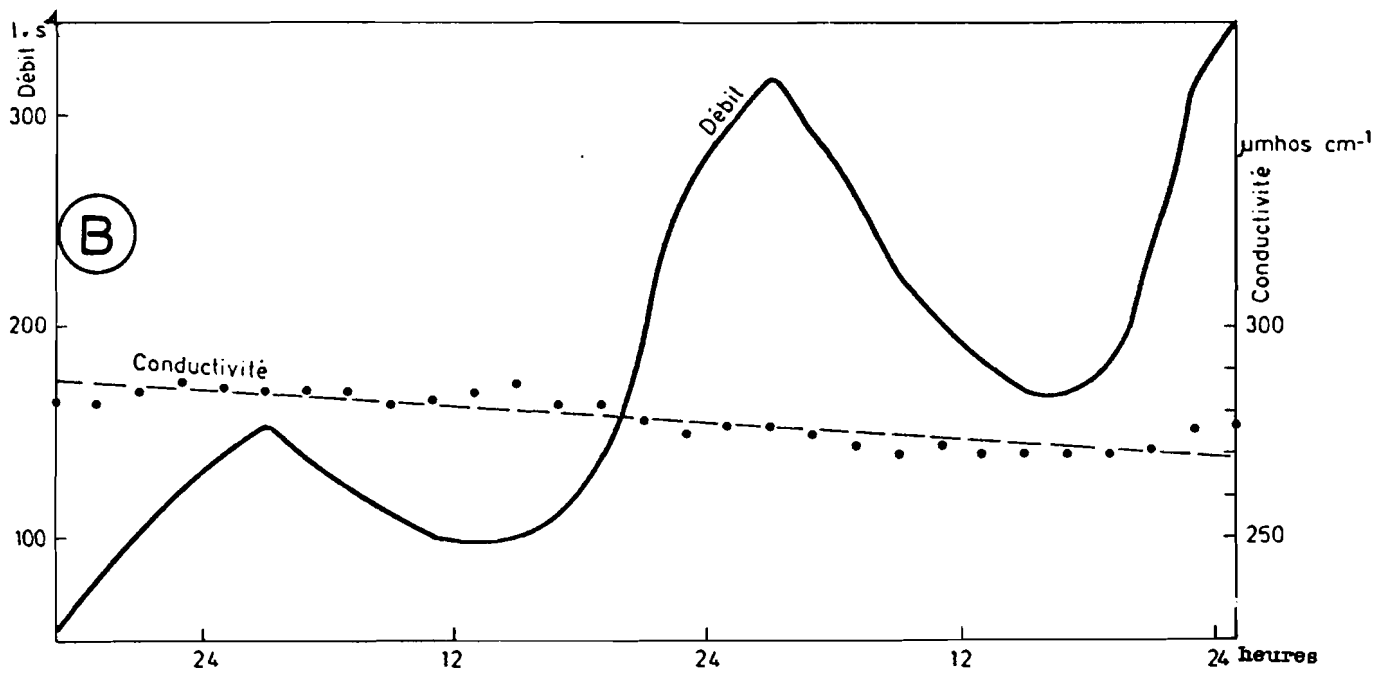
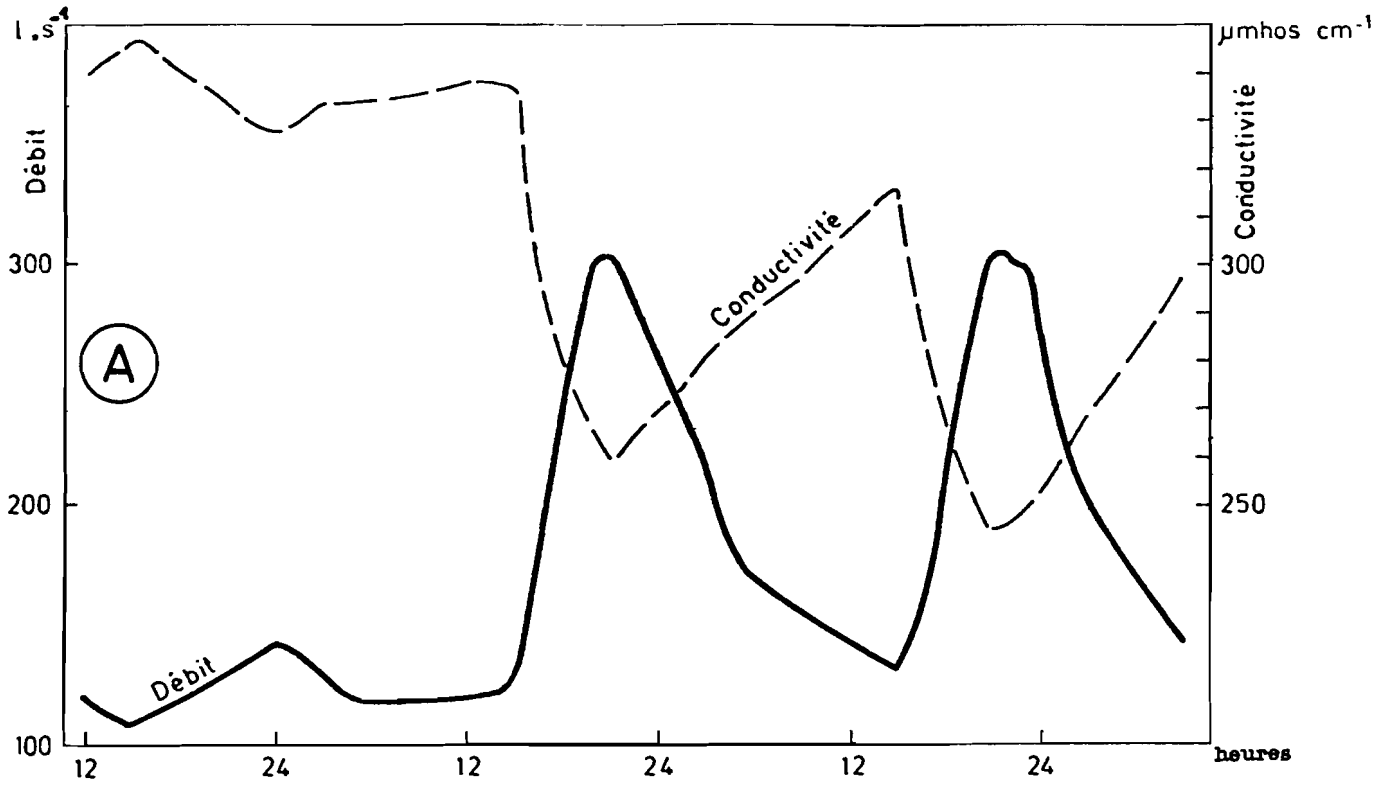


Fig. 130 : REACTION DU DEBIT ET DE LA CONDUCTIVITE AUX CYCLES NYCTHEMERAUX GEL-DEGEL (MAI 1979, (A) : LE PONT DE GYS, (B) : LES PLAGNES (VUYLSTEEK 1983)

On remarquera, pour des variations de débit comparables de l'ordre de 200 l.s⁻¹ sur une journée, une réaction très dissemblable de la conductivité des deux émergences : le Pont de Gys subit des oscillations de plus de 50 μ S.cm⁻¹, alors que les Plagnes ne varient pas de plus de quelques unités : si les sources subissent un transfert de pression, seul le Pont de Gys enregistre un transit signé d'eau d'infiltration. Aux Plagnes, un mélange important au sein d'un milieu tampon amortit les fluctuations de l'entrée.

Le tableau 24 fait apparaître les relations flux en conductivité-débit pour les deux émergences.

Il faut noter l'existence de 3 lois flux débits différentes pour les 3 oscillations de débit du Pont de Gys.

La pente des relations diminue à chaque oscillation, et l'ordonnée à l'origine augmente : bien que l'émergence "laisse passer" les différentes impulsions de l'infiltration, la qualité chimique des eaux de la réserve subit une atteinte (dilution) par ce transit, comme dans l'exemple des crues de janvier-février 1980 (voir p. 147).

La relation caractérisant la première oscillation de débit n'a pas une ordonnée à l'origine nulle : l'impact de l'infiltration existe donc déjà lors de cet épisode.

La source des Plagnes offre, au cours du même phénomène, une relation univoque flux-débits démontrant l'unicité de son alimentation à travers un milieu meilleur mélangeur et moins hiérarchisé.

La tendance (fig. 130b) est cependant à la dégradation de la teneur de ce réservoir au cours du temps (décroissance de la conductivité).

L'étude comparée des deux émergences illustre deux phénomènes intéressants :

- karstification plus élaborée (hiérarchisation des perméabilités) dans le système du Pont de Gys que dans celui des Plagnes qui homogénéise les apports.
- importance de l'histoire hydrodynamique du réservoir : l'aquifère restitue une eau dont la composition est fonction de l'épisode hydrocinématique antérieur, il y a dégradation de cette qualité au cours du temps.

On doit cependant noter que l'hétérogénéité de réponse du Pont de Gys peut être en partie expliquée par l'hétérogénéité géochimique de son alimentation (Trias, voir p. 43). Pourtant, l'étude de la crue de janvier-février nous a montré que les bicarbonates, espèce typiquement carbonatée et indépendante de l'unité évaporitique montraient un comportement analogue à celui de la conductivité.

La décomposition de ces oscillations de fonte de neige n'est pas possible car on ne peut pas calculer les teneurs des composantes (faute de passage de la décrue au tarissement).

VII.1.5. Grotte de Sainte Catherine au Baget : Relation flux-débit dans la zone non saturée (d'après données BAKALOWICZ, 1979)

L'équipe de Moulis a étudié le phénomène d'infiltration dans la grotte de Ste Catherine, et BAKALOWICZ (1979) montre le comportement de la conductivité au cours d'épisodes de crue de l'eau d'infiltration.

La distribution du flux de conductivité en fonction du débit (fig. 131) ne fait apparaître qu'une relation.

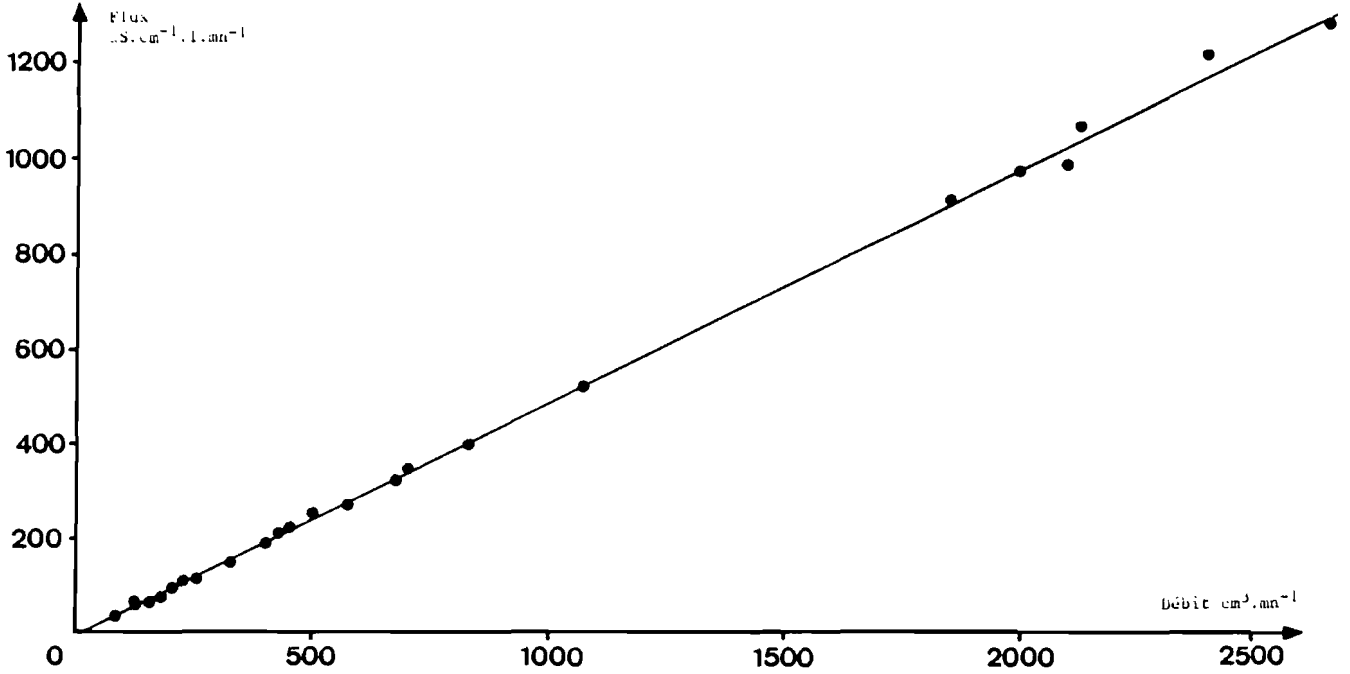


Fig. 131 : RELATION FLUX EN CONDUCTIVITE-DEBIT-INFILTRATION, GROTTTE DE St CATHERINE (ARIEGE), CRUE DE FEVRIER-MARS 1976

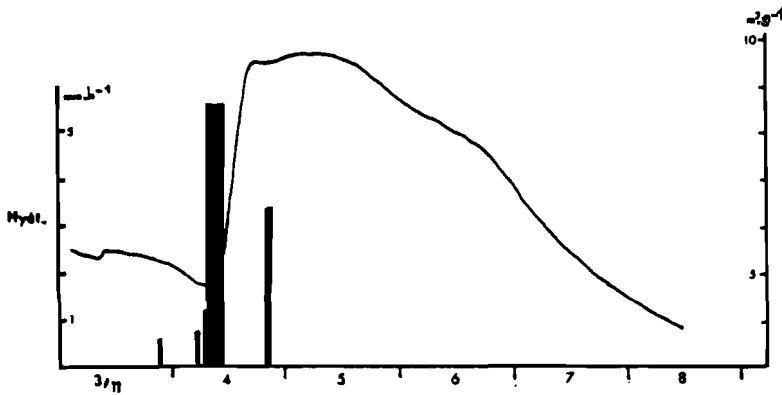
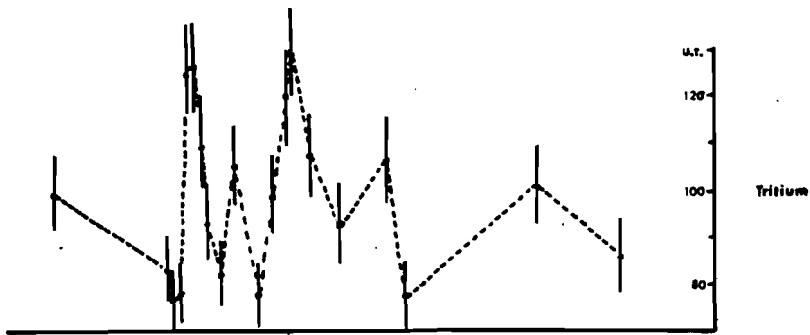


Fig. 132 : EVOLUTION DES TENEURS EN ISOTOPES ISOTOPES (¹⁸O,T) AU COURS DE LA CRUE DU 4 NOVEMBRE 1977 AU LISON (ISSOT et TRESSE 1978)

L'unicité de cette relation lors des crues de février-mars 1976 traduit la relative homogénéité des eaux prélevées, elles appartiennent toutes à une seule composante, même en tarissement (ordonnée à l'origine nulle).

M. BAKALOWICZ considère ces eaux comme de l'infiltration lente.

VII.2. ESSAI DE DECOMPOSITION DES HYDROGRAMMES DES EXUTOIRES KARSTIQUES A L'AIDE DES ISOTOPES DE L'ENVIRONNEMENT

Les résultats intéressants obtenus par OLIVE (1970), FRITZ et al. (1976), BLAVOUX (1978) dans la décomposition des hydrogrammes de cours d'eau à l'aide des isotopes de la molécule d'eau sur des bassins versants expérimentaux m'ont incité à tenter une telle décomposition dans les systèmes karstiques où ces paramètres ont été analysés en série, en France essentiellement aux émergences du Baget (EBERENTZ, 1975) et à la source du Lison (TISSOT et TRESSE, 1978), en Suisse à la source de l'Areuse (SCHOTTERER et MULLER, 1982 ; SIEGENTHALER et al., 1983).

VII.2.1. Crue du 4 novembre 1977 à la source du Lison (Doubs) (d'après données TISSOT et TRESSE, 1978)

Sur la source du Lison (fig. 132) une succession de pics (tant pour le tritium que pour l'oxygène 18) atteste l'hétérogénéité de la réponse à un événement pluviométrique simple : toutes les eaux analysées à l'émergence ont une teneur plus négative en oxygène 18 et plus forte en tritium que le signal-pluie (-5,94‰ et 14 UT en moyenne pondérée sur l'averse).

Cette constatation est faite également sur le ruissellement de surface qui mobilise déjà, à l'amont du karst, une eau plus négative et plus chargée en tritium que la pluie : la crue met donc en mouvement des eaux stockées dans les divers milieux capacitifs du système : zone noyée, épikarst, mais aussi marnes et sols de l'impluvium.

L'étude des relations flux-débit pour cet épisode du 4 novembre 1977 montre pour l'oxygène 18 (fig. 133) une trop grande homogénéité pour tenter une décomposition, à l'exception des points 1, 2 et 3 situés significativement en-dessous de la droite, qui représentent l'impact d'une recharge précédente sur la composition de l'eau qui émerge alors.

L'alternance de pics forts et de valeurs faibles de tritium traduit l'hétérogénéité globale du système, la restitution d'eau à l'exutoire étant une succession de flots à qualité isotopique différente.

La relation flux-débit (fig. 134) est trop dispersée pour permettre une décomposition.

Cette crue du Lison est donc trop influencée par les épisodes précédents, bien que les teneurs de la pluie soient très marquées par rapport aux eaux stockées, ce qui rappelle une fois de plus l'importance de l'histoire hydrodynamique du réservoir. Cette étude montre que la crue du 4 novembre mobilise des eaux déjà présentes dans le système.

Une tentative de décomposition du même épisode avec un marqueur chimique, l'anion bicarbonate a montré en revanche une variation significative de la pente flux-débit entre le début et la fin de la crue, c'est-à-dire une différence significative de minéralisation entre les eaux de la matrice et celle du mélange matrice-ruissellement souterrain à la décrue. Malheureusement, l'insuffisance de la durée

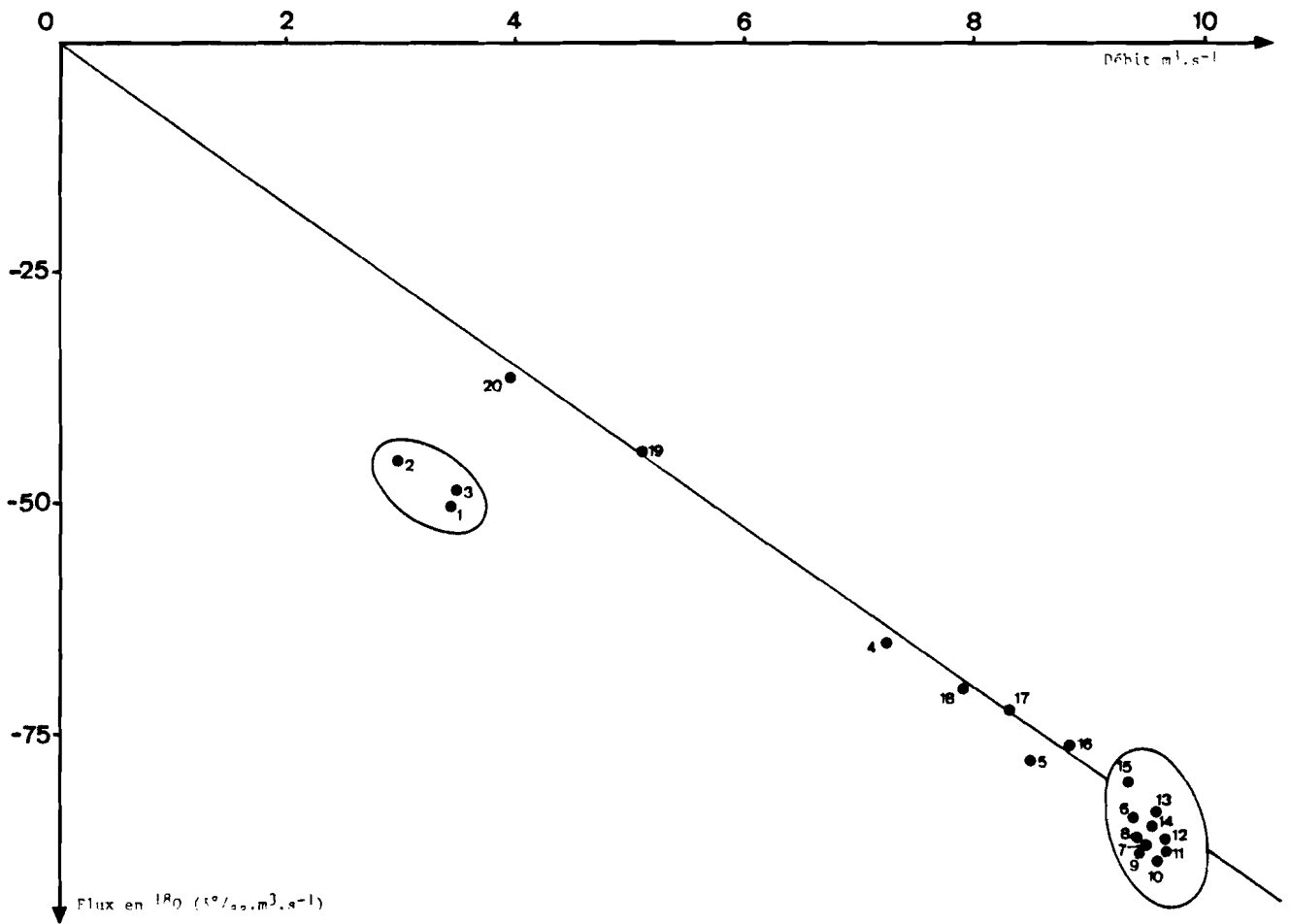


Fig. 133 : RELATION FLUX EN OXYGENE 18-DEBIT - SOURCE DU LISON, CRUE DU 4 NOVEMBRE 1977

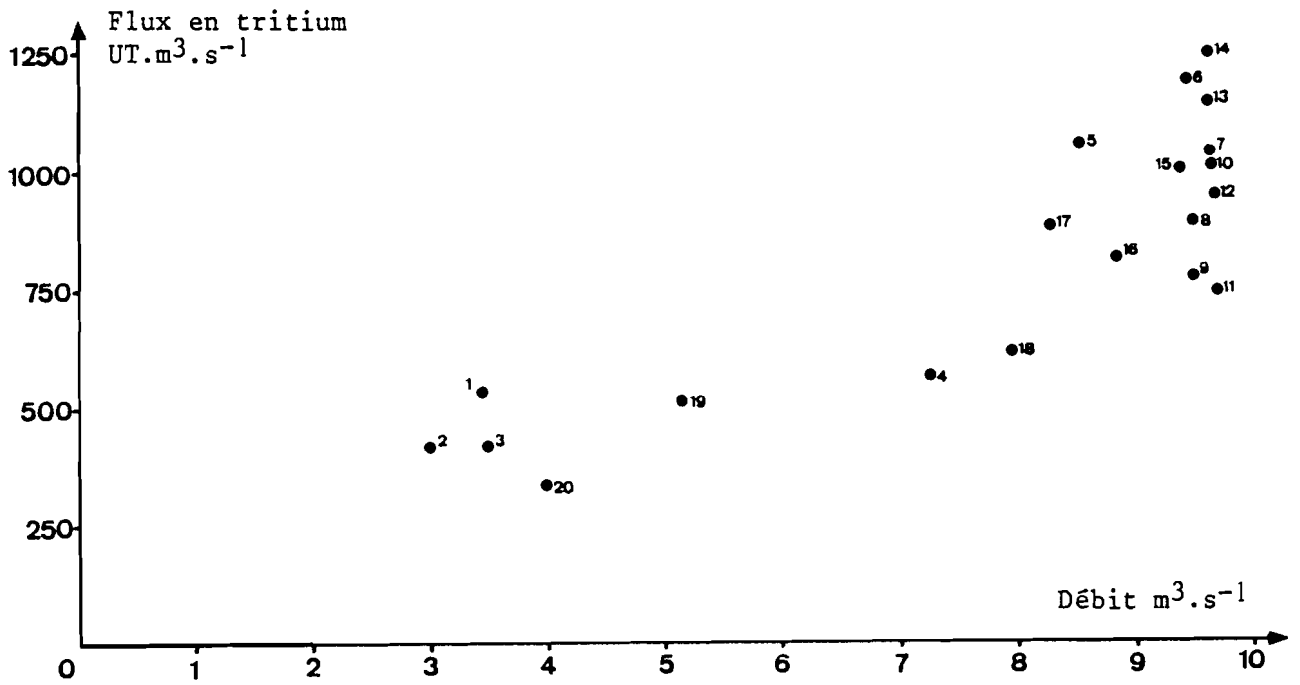


Fig. 134 : RELATION FLUX EN TRITIUM-DEBIT. SOURCE DU LISON, CRUE DU 4 NOVEMBRE 1977

du suivi de cette crue n'a pas permis le passage de la décrue au tarissement, donc n'a pas permis le calcul de la teneur en bicarbonates des eaux du ruissellement souterrain. Cette apparente contradiction entre ce que l'on observe avec les isotopes et avec les bicarbonates s'explique par l'existence d'un contraste entre la teneur en bicarbonates du ruissellement souterrain (effet de dilution) et celle de la réserve, alors que la teneur en isotopes de la pluie et des réserves épikarstiques n'est pas suffisamment différenciée de celle de la réserve noyée, les précipitations servant à la recharge des deux milieux. On met donc ainsi en évidence la différence de comportement entre les traceurs chimiques internes au système et les traceurs isotopiques externes.

VII.2.2. **Crue du 24 janvier au 1er février 1973 au Baget.** (Emergence pérenne de las Hountas, d'après données EBERENTZ, 1975)

En montée et sous le pic de crue (fig. 135), la teneur en oxygène 18 monte de manière significative, après le point 88, elle a des variations d'amplitude inférieures à la précision de la mesure. La relation flux-débit (fig. 136) est en apparence très homogène : tous les points sont situés sur une droite de pente -8,33 %, à l'exception des points 86,87,88. Ce mode de représentation fait apparaître des eaux enrichies en oxygène 18 par rapport à la relation générale (86-87) ce qui confirme la chasse de solutions évaporées des milieux de stockage superficiels (sol, épikarst).

L'échantillon 88 est le seul déficitaire en oxygène 18 (plus négatif que l'ensemble des points).

Débit $m^3.s^{-1}$

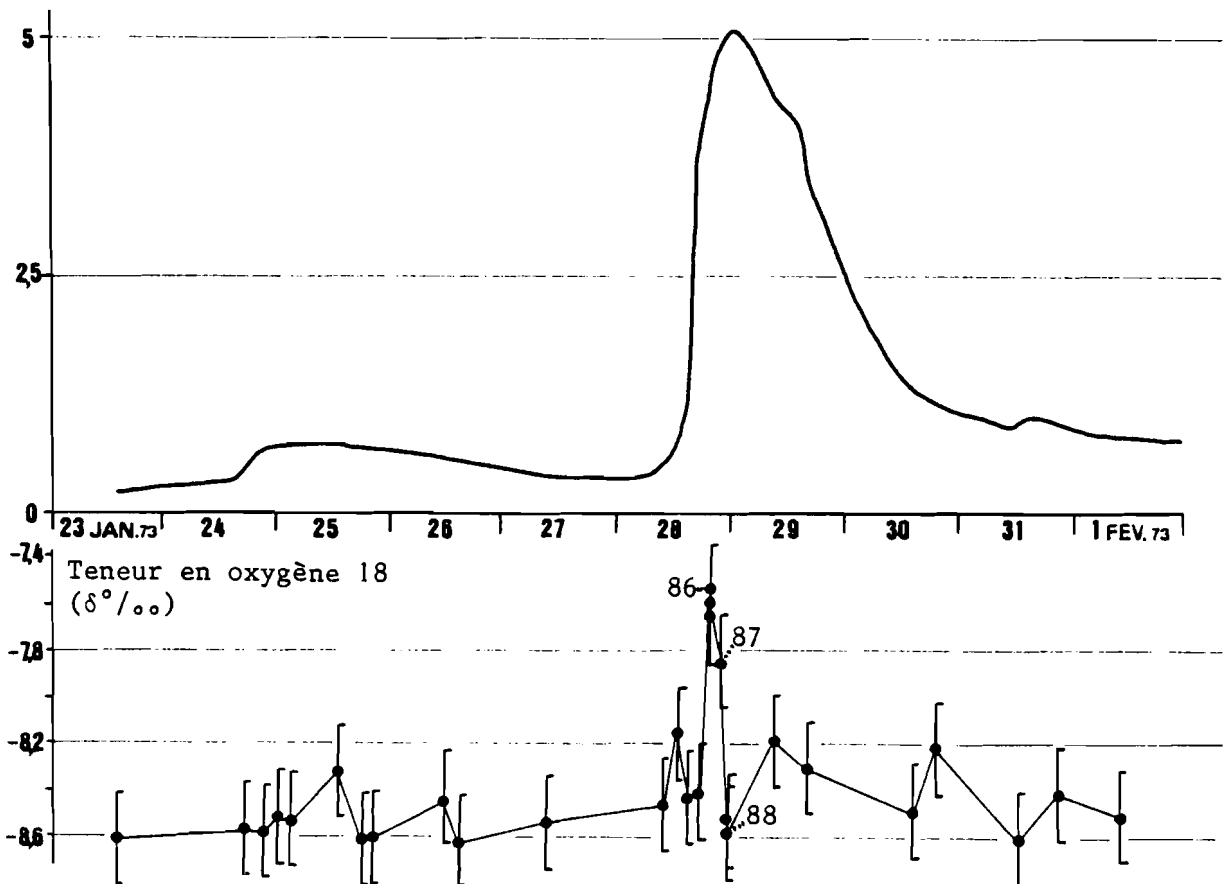


Fig. 135 : EVOLUTION DE LA TENEUR EN OXYGENE 18. SOURCE DU BAGET, CRUE DE JANVIER 1973 (D'APRES EBERENTZ 1975, MODIFIE)

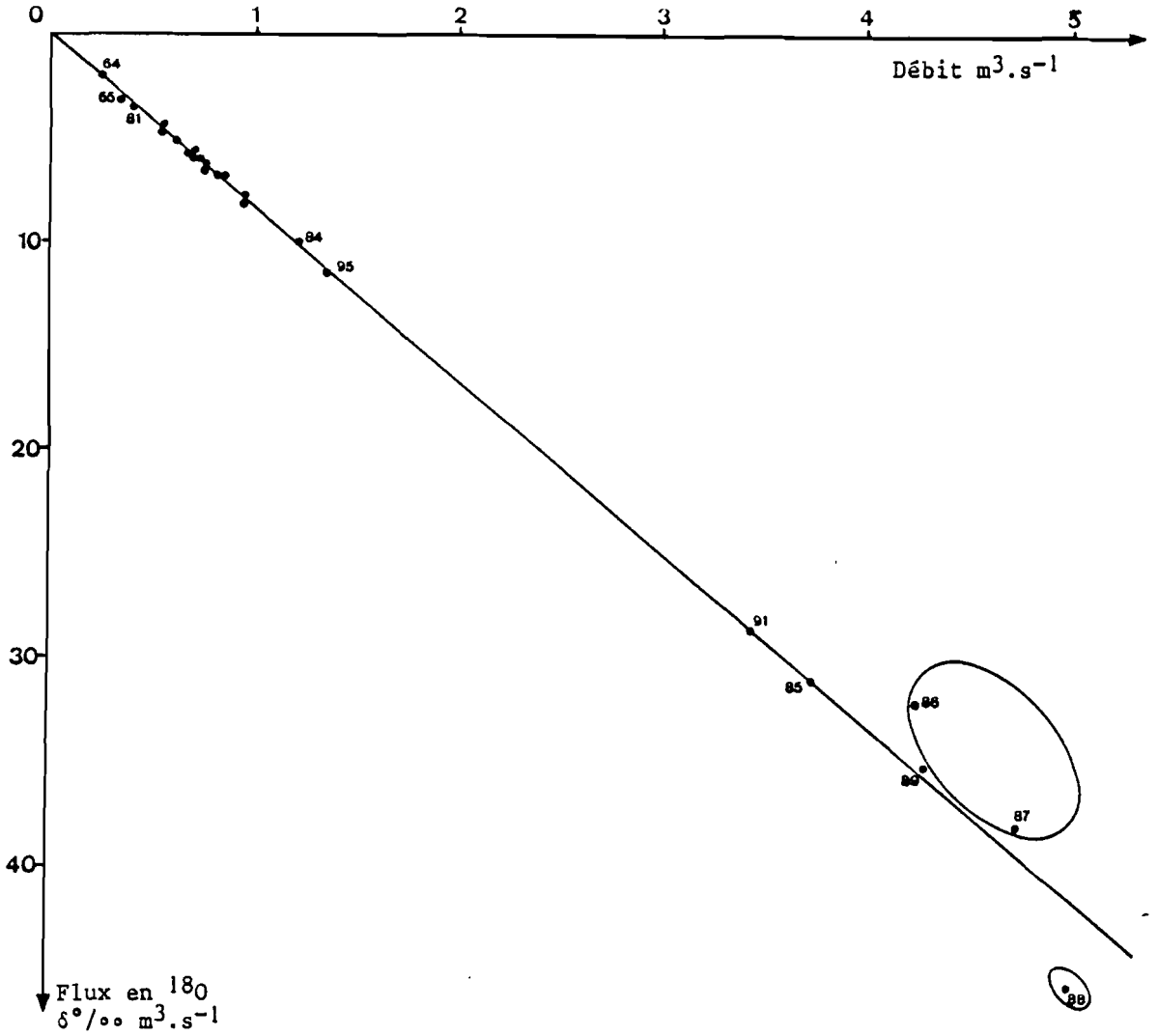


Fig. 136 : RELATION FLUX EN OXYGENE 18-DEBIT. SOURCE DU BAGET, CRUE DE JANVIER 1973.

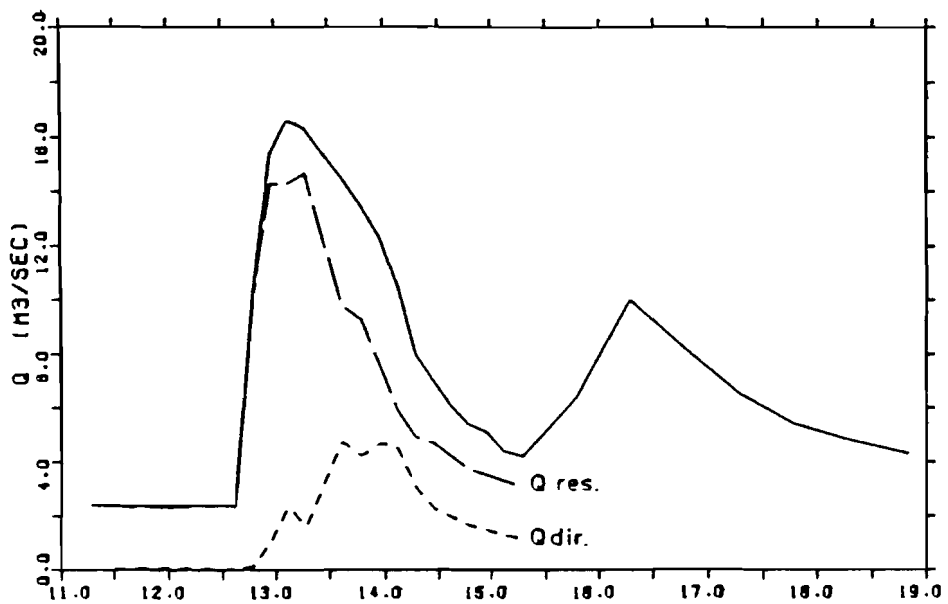


Fig. 137 : DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE L'AREUSE AVEC L'OXYGENE 18, CRUE DE JUIN 1979 (SIEGENTHALER et al. 1983)

On ne peut donc pas tenter de décomposer cet hydrogramme en utilisant les isotopes de la molécule d'eau, les eaux apportées par les différents milieux n'étant pas suffisamment contrastées : en effet, les recharges d'une qualité isotopique donnée s'opèrent à la fois sur la zone non saturée et sur la zone noyée. Seuls des systèmes très bien drainés permettant un transit très rapide de la pluie efficace vers l'émergence pourraient se prêter à une décomposition fondée sur les isotopes, à condition que l'épisode pluvieux soit très marqué par rapport aux milieux capacitifs. En outre, l'échantillonnage de cette crue n'a pas eu une fréquence de prélèvement suffisamment élevée.

VII..2.3. Crue de juin 1979 à la source de l'Areuse

SIEGENTHALER et al. (1983) proposent une décomposition de l'hydrogramme de crue par une méthode simple issue de l'hydrologie de surface, utilisant oxygène 18 et sodium (nous avons eu connaissance de cette tentative après avoir mis au point notre méthode - BLAVOUX et MUDRY, 1983,1985). Ils considèrent la teneur du réservoir égale à $-10,8 \delta\%$. Ils mesurent la teneur de la pluie ($-7,8 \delta\%$) et celle de chacun des échantillons. Ils déduisent pour chacun des prélèvements le pourcentage d'eau de pluie passant à l'exutoire. Cette méthode simple fournit une décomposition comparable à la nôtre (fig. 137). Elle fait apparaître l'effet piston de début de crue et minimise aussi la part de la pluie. La différence essentielle réside dans les unités analysées : ce que SIEGENTHALER et al. appellent eau de réserve correspond à la fois aux milieux capacitifs permanents (zone noyée) et aux milieux capacitifs temporaires (zone non saturée et aquifère épikarstique).

La méthode proposée par ces auteurs utilise donc une unité "pluie" et une unité "réserves", cette dernière comprenant l'épikarst et le karst noyé, ils comparent donc des teneurs d'entrée à des teneurs de sortie. La méthode physico-chimique ci-avant développée oppose au contraire deux unités internes au massif karstifié : le ruissellement souterrain et l'écoulement de la zone noyée. Dans la décomposition de SIEGENTHALER et al., les milieux karstiques non saturés sont considérés comme partie intégrante de l'unité "de réserve", dans la nôtre comme unité de ruissellement souterrain, cette composante incluant pour nous l'eau météorique mélangée aux eaux déjà présentes dans le complexe non saturé (sol, épikarst, zone d'infiltration). Ceci explique la modique contribution de la pluie à l'écoulement avec la méthode suisse, la plus grande part prise par l'écoulement de la zone non saturée (voir VII.1.2. et fig. 128) avec la méthode physico-chimique, les deux méthodes minimisant de toute façon cette contribution par rapport aux décompositions utilisant les courbes de décrue et de tarissement (voir fig. 127).

VII.2.4. Intérêt et limites de l'emploi des isotopes

Les teneurs en isotopes de la molécule d'eau sont acquises dans la pluie, ce qui constitue un avantage pour le traçage global des systèmes hydrogéologiques mais devient un handicap pour l'étude des flux en provenance des divers milieux du système.

Pour les isotopes stables, si on excepte les phénomènes d'échanges isotopiques entre l'eau et l'encaissant, absents des karsts superficiels, le seul phénomène susceptible de modifier cette teneur initiale est l'évaporation à l'interface karst-atmosphère. Les isotopes stables peuvent donc, sous climat aride ou semi-aride être pressentis comme de bons traceurs de la composante infiltration.

La teneur en tritium en revanche, insensible à l'évaporation, décroît par désintégration radioactive, elle semble donc mieux adaptée à estimer les flux en provenance des milieux capacitifs.

Comme en hydrologie, la décomposition des hydrogrammes karstiques par les isotopes de la molécule d'eau n'est possible que lorsque les précipitations qui engendrent une crue sont suffisamment marquées par rapport à la teneur des milieux capacitifs du système. Cependant, la localisation des unités contribuant à l'écoulement n'est pas la même dans le cas de l'hydrologie de surface : sur un bassin versant, les composantes mises en évidence sont d'une part la pluie et de l'autre les eaux issues des aquifères superficiels du bassin. Dans le cas du karst (voir fig. 118), les composantes utilisées sont le plus souvent le ruissellement souterrain (qui constitue en fait l'unité "aquifères superficiels" de l'hydrologie de surface) et la zone noyée. Dans le cas de l'hydrologie de surface, pour que l'hydrogramme puisse être décomposé, il faudra qu'il existe un contraste de teneurs entre la pluie et les aquifères du bassin. Cette condition, nous l'avons vu, peut être souvent réalisée, et elle a permis à OLIVE (1970) et BLAVOUX (1978) d'effectuer des décompositions.

Dans le cas du karst, la décomposition exigera un contraste de teneurs entre la zone noyée et la zone non saturée, ces deux milieux étant rechargés par les mêmes épisodes de précipitations. L'averse déplaçant l'eau des milieux capacitifs superficiels, l'eau tombée n'apparaît jamais directement comme composante à l'exutoire : seules donc les solutions évaporées du sol, ou les mélanges à forte teneur en eau de pluie permettent la décomposition avec l'oxygène 18 dans le cas du karst. Avec le tritium, si la zone noyée restitue des teneurs suffisamment anciennes (très faibles ou très fortes) la décomposition peut être tentée.

Les cas étudiés ici (Lison Baget) sont peu nombreux, car une étude isotopique nécessite des moyens analytiques spécifiques et elle est très lourde.

La mise sur pied d'une décomposition fondée sur les isotopes de la molécule d'eau requiert de plus une fréquence de prélèvements adaptée à la durée des phénomènes observés. Elle implique le contrôle de la variation de paramètres indicateurs de l'interface karst-atmosphère, chlorures par exemple, ainsi que du temps de séjour, silice par exemple.

Des marqueurs spécifiques de certains milieux peuvent également être contrôlés, par exemple les sulfates ou la conductivité, dans le cas d'une zone noyée renfermant des évaporites.

Plus encore que pour une décomposition "chimique", il est nécessaire d'adapter le pas de prélèvements à la brièveté des phénomènes pour une décomposition "isotopique".

C H A P I T R E VIII

DECOMPOSITION DES HYDROGRAMMES AU COURS

D'UN (OU DE PLUSIEURS) CYCLES

HYDROLOGIQUES

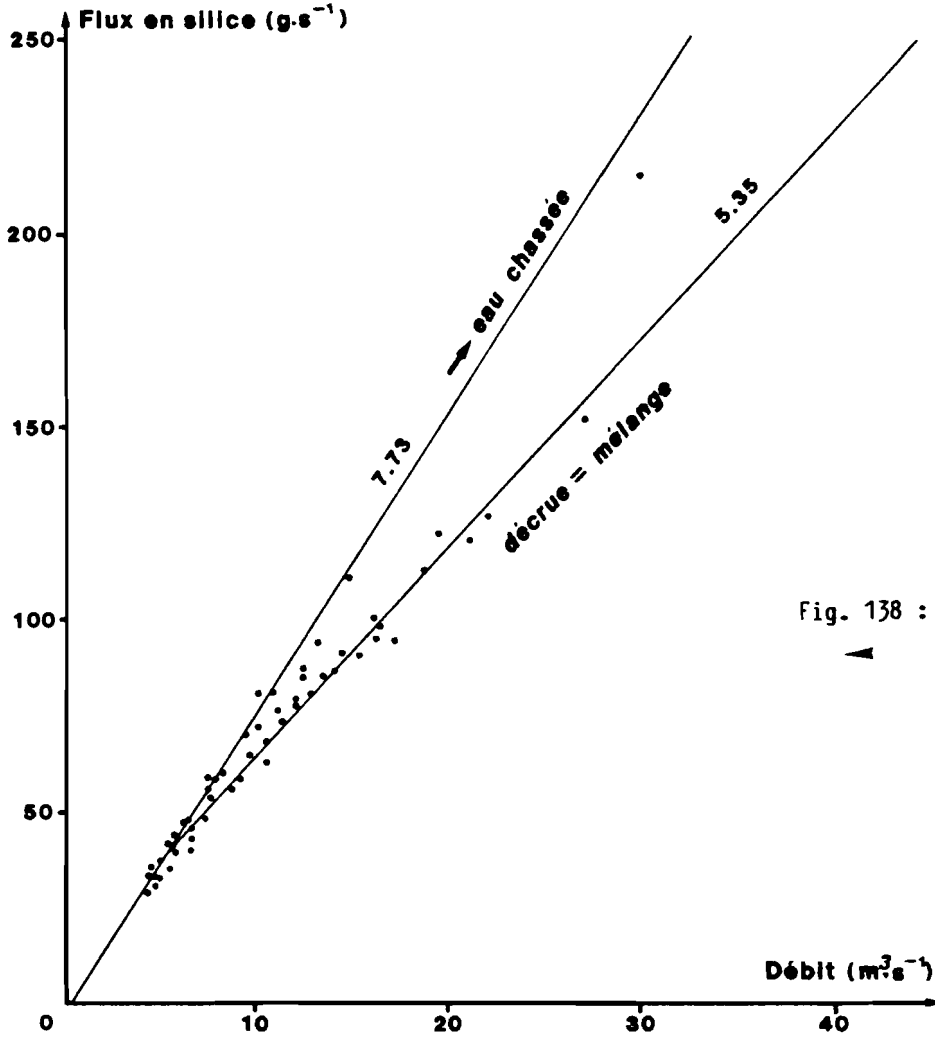


Fig. 138 : RELATION FLUX EN SILICE-DEBIT. DEBIT. FONTAINE DE VAUCLUSE, CYCLES 1981-1982

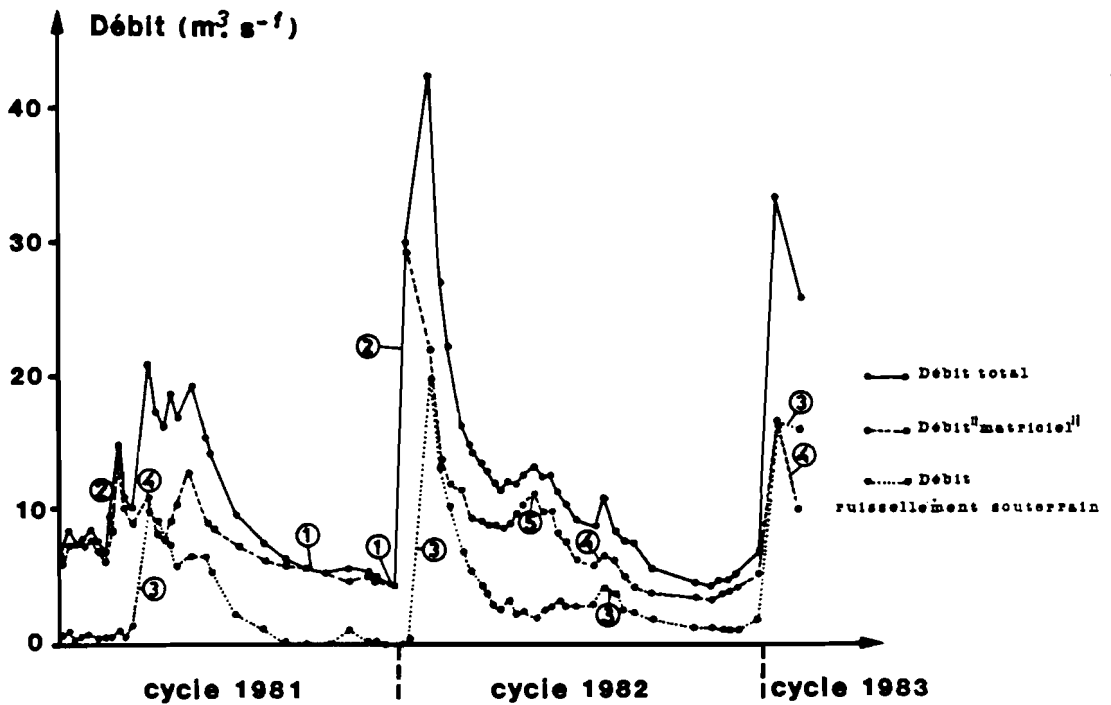


Fig. 139 : DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DE LA FONTAINE DE VAUCLUSE AVEC LA TENEUR EN SILICE - CYCLES 1981 et 1982

**DECOMPOSITION DES HYDROGRAMMES AU COURS D'UN
(OU DE PLUSIEURS) CYCLES HYDROLOGIQUES**

Pour les émergences où l'on dispose d'un enregistrement en continu du débit pendant un cycle hydrologique, où des analyses chimiques ont été répétées à un pas de temps représentatif des phénomènes hydrocinématiques (par exemple bimensuel ou mieux hebdomadaire sur des systèmes à basse fréquence), on peut se faire une idée sur les volumes des différentes composantes ayant transité à l'exutoire. Ces décompositions ont été tentées sur les données du Pont de Gys (lors d'un épisode de 11 semaines) et de la Fontaine de Vaucluse (au cours des cycles 1981 et 1982).

Les relations flux-débit montrent une dispersion plus grande que pour les crues isolées car à l'échelle du cycle (fig. 138), la teneur physico-chimique des composantes est susceptible de petites variations, en particulier la teneur de la composante 'matricielle' est fonction de l'histoire hydrocinématique du réservoir, et peut garder la mémoire de certains épisodes de recharge très marqués (voir III.3.5.C. ; IV.4.2.D.). Même la composante de ruissellement souterrain peut être influencée par le lessivage de la zone non saturée principalement lors des crues de début de cycle.

On peut cependant approcher les flux en transit en utilisant des teneurs moyennes.

VIII.1. FONTAINE DE VAUCLUSE, CYCLES 1981 ET 1982

L'hydrogramme de la Fontaine de Vaucluse (fig. 139) a été décomposé au cours des cycles 1981 et 1982 (99 semaines) avec la teneur en silice, avec une teneur de l'unité 'matricielle' égale à 7,73 mg.l⁻¹ (fig. 138) et celle du ruissellement souterrain égale à 3,47 mg.l⁻¹, conformément à la moyenne calculée du tableau 25.

intervalle de temps	ΔQ	ΔC	$\Delta \phi$	ΔQ_M	CRS	CRS moyen
19 - 20	2,18	0,32	12,1	1,1	3,36	
20 - 49	4,46	0,6	21,3	1,3	3,54	3,47
19 - 49	6,64	0,92	33,4	2,4	3,49	

Tabl. 25 - CONCENTRATION EN SILICE DU "RUISSÈLEMENT SOUTERRAIN"-FONTAINE DE VAUCLUSE - CYCLES 1981 et 1982

La décomposition de l'hydrogramme sur plusieurs cycles hydrologiques permet de retrouver les phénomènes suivants (fig. 139) :

. Lors des épisodes (1) rares en 1981 et absents en 1982, seule la composante "matricielle" est présente dans l'écoulement de l'émergence : il s'agit donc de tarissement sensu stricto.

. Après les périodes pluvieuses, l'infiltration chasse des drains de la zone noyée des eaux à composition matricielle. Selon l'état hydrocinématique du système, cet épisode peut précéder (2) ou être synchrone (4) du pic du débit de l'infiltration (3) ou même ne pas être lié à un tel pic (5). Ce dernier cas correspond à un stockage de l'infiltration au sein des milieux capacitifs (zone noyée et zone non saturée).

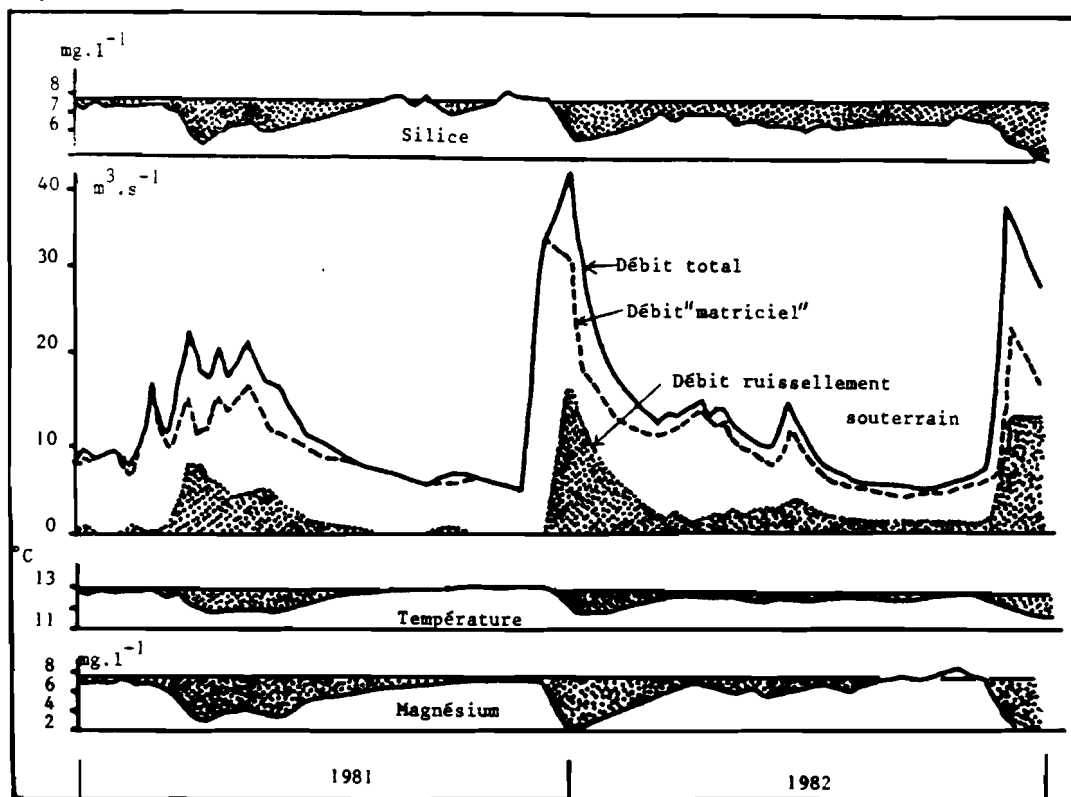


Fig. 140 : DECOMPOSITION D'HYDROGRAMME AVEC LA SILICE - COMPARAISON AVEC L'INFORMATION APPOREE PAR LE MAGNESIUM ET LA TEMPERATURE

	Cycle 81-82	Cycle 82-83	Total
Volume total écoulé en $10^6.m^3$	267	334	601
Volume "matriciel" écoulé en $10^6.m^3$	203	227	431
en %	76 %	68 %	72 %
Volume ruissellement souterrain			
en $10^6.m^3$	64	107	170
en %	24 %	32 %	28 %

Tabl. 26 - VOLUMES DELIVRES PAR LES DEUX COMPOSANTES DE L'ÉCOULEMENT-FONTAINE DE VAUCLUSE - CYCLES 1981 et 1982

La persistance à l'émergence du passage des eaux de ruissellement souterrain en 1982 vient du fait que, malgré les débits très bas d'automne, le système garde la mémoire chimique des précipitations printanières, réparties plus tardivement que celles de 1981.

Grâce à un grand développement de ses milieux épikarstiques et à l'épaisseur de sa zone non saturée, le système délivre longtemps après les épisodes pluvieux, un débit d'infiltration retardée.

Cette remarque, faite sur la décomposition à l'aide de la silice, a déjà été faite grâce à l'analyse des données (voir III.1.4.B. et D.) ; la figure 140 résume l'impact de cette infiltration sur la température et la teneur en magnésium : ces traceurs confirment ce que la silice permet de mettre en évidence. Les hydrogrammes B sont ceux de la figure 139, simplifiés. Ils ont été obtenus en utilisant les variations de la silice (courbe A). Les courbes C et D (température et teneur en magnésium) attestent la réalité d'une dilution par les eaux du ruissellement souterrain, en particulier pendant la totalité du cycle 1982.

L'examen des volumes d'eau fournis par les deux composantes (tableau 26) révèle, pour les 2 années (très déficitaires au point de vue pluviométrique : 915,1 mm en 1981 et 790,6 mm en 1982 pour une moyenne 1971-1980 de 1129,9 mm à la station de St-Christol-Météo) une nette prépondérance (76 % et 68 %) de l'écoulement en provenance des milieux capacitifs noyés.

VIII.2. PONT DE GYS - CYCLE 1981

L'hydrogramme de la source du Pont de Gys (fig. 141,142) a été décomposé à l'aide de prélèvements hebdomadaires pendant 11 semaines en 1981.

Les teneurs en HCO_3^- de la matrice (172 mg.l^{-1}) et celle calculée du ruissellement souterrain (140 mg.l^{-1} ; voir VI.4.2.) ont permis de reconstituer le comportement des deux composantes au cours de l'épisode.

Le tableau 27 montre la prédominance de la composante "ruissellement souterrain" (54 %) en accord avec la connaissance hydrocinématique que l'on a de ce système (voir III.1.2.C.).

	en m ³	en %
: Volume total écoulé	748 000	
: Volume "matriciel" écoulé	342 000	46
: Volume de ruissellement souterrain écoulé	406 000	54

Tabl. 27 - VOLUMES DELIVRES PAR LES DEUX COMPOSANTES DE L'ECOULEMENT-PONT DE GYS-1981

A l'échelle hebdomadaire (fig. 142), la première crue est marquée par un "effet piston" sur la zone noyée synchrone du premier pic de ruissellement souterrain, le deuxième pic de crue n'étant pratiquement composé que d'eau de ruissellement souterrain. Le tarissement est marqué par le retour à la seule participation de la composante "matricielle".

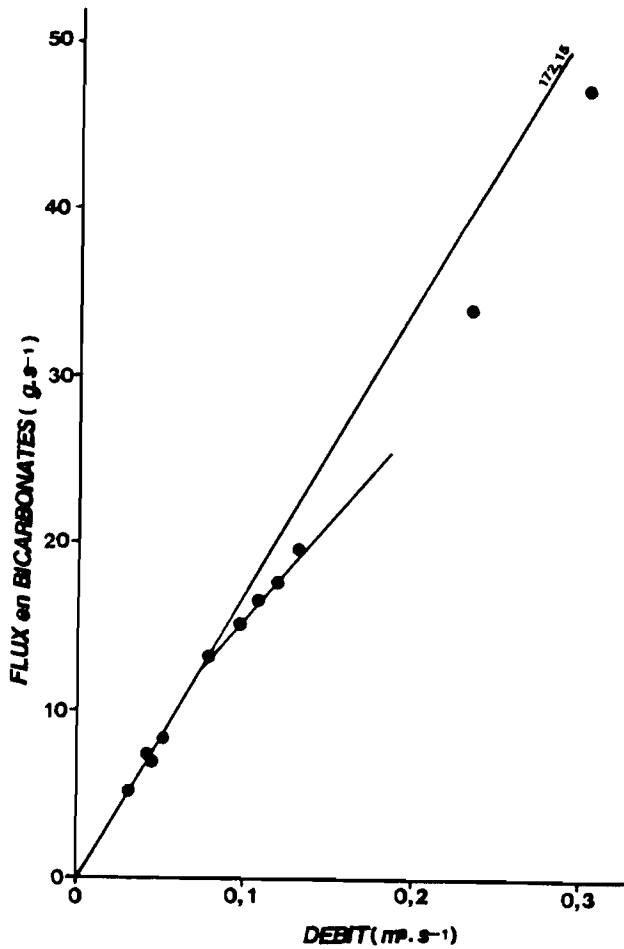


Fig. 141 : RELATION FLUX EN BICARBONATES-DEBIT. SOURCE DU PONT DE GYS 11 SEMAINES EN 1981

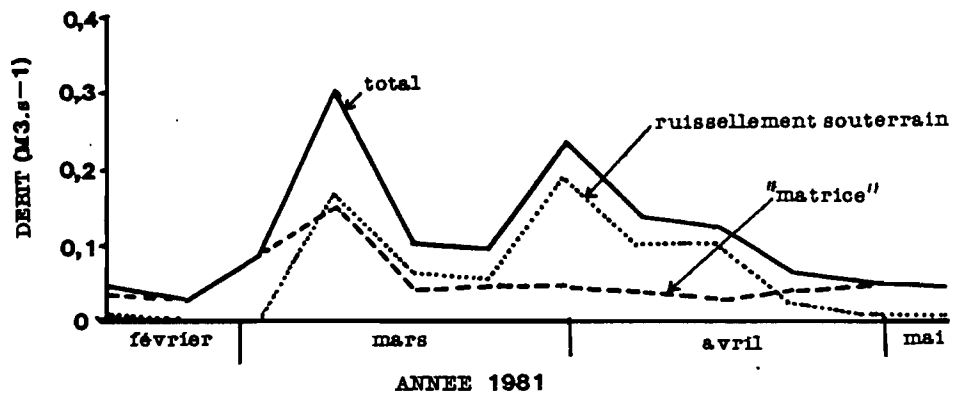


Fig. 142 : DECOMPOSITION DE L'HYDROGRAMME DU PONT DE GYS AVEC LES BICARBONATES - 11 SEMAINES (février - Mai 1981)

VIII.3. AREUSE

Les décompositions des hydrogrammes annuels de la source de l'Areuse (SCHOTTERER et MULLER, 1982) sont fondées sur les méthodes de calculs du temps moyen de résidence de l'eau dans un réservoir homogène : modèle exponentiel (ERIKSSON, 1962 ; HUBERT et al., 1970), modèle amortissement (KUSAKABE et al., 1970 ; OESCHGER et SIEGENTHALER, 1972), complétées par le suivi journalier des teneurs de l'émergence au cours de plusieurs cycles (plus de 2 ans).

Ces études montrent aux chercheurs suisses la part importante de l'eau de la réserve (60 à 75 %) dans l'écoulement de l'Areuse au cours de l'année hydrologique 1977-1978, cette part étant de 100 % quand le débit est inférieur à 10 m³.s⁻¹.

C H A P I T R E IX

COMPARAISON DES RESULTATS DES
DECOMPOSITIONS HYDRODYNAMIQUES
ET PHYSICO-CHIMIQUES

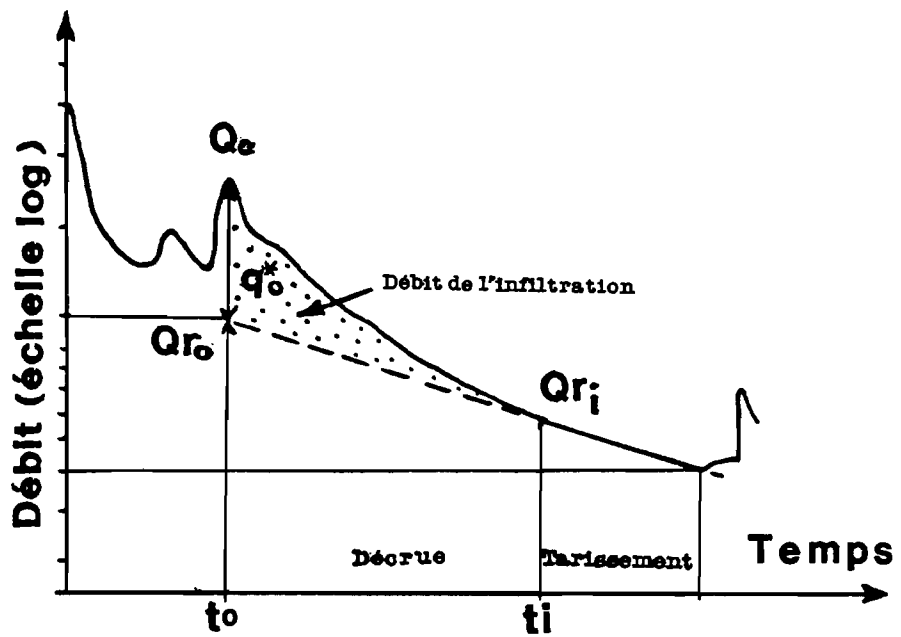


Fig. 143 : CONTRIBUTION DE L'INFILTRATION DETERMINEE PAR LA METHODE HYDRODYNAMIQUE .

DECOMPOSITION HYDRODYNAMIQUE ET DECOMPOSITION PHYSICO-CHIMIQUE

IX.1. DECOMPOSITIONS HYDRODYNAMIQUES

DROGUE (1969) a proposé d'ajuster la courbe de récession (décru + tarissement) à l'aide de l'équation d'une hyperbole et GALABOV (1972) propose une équation générale pour l'ensemble crue-décru-tarissement.

Les deux méthodes utiles pour prévoir la diminution du débit et la gestion de l'aquifère ne permettent pas de décomposer les hydrogrammes. En outre, la méthode GALABOV s'applique mal aux hydrogrammes à courte période, tels que ceux que j'ai étudiés.

MANGIN (1970,1975) déduit le débit de la réserve noyée sous le pic de crue en prolongeant sous la décroissance l'exponentielle de MAILLET (1905) du tarissement (fig. 143). Il déduit la contribution de l'infiltration (q^*) en soustrayant le débit estimé de la réserve noyée au débit mesuré de l'émergence, en accord avec la méthode de BARNES (1940).

La réserve noyée fournit un débit Q_{R0} sous le pic de crue, on peut déterminer un coefficient de tarissement α .

$$\alpha = \frac{\ln Q_{R0} - \ln Q_{R1}}{t_1 - t_0} \quad \alpha \text{ en } j^{-1} \text{ avec } Q_{R0}, Q_{R1} \text{ en } m^3 \cdot s^{-1}$$

$t_0 \text{ et } t_1 \text{ en } j$

A l'instant t , le débit de la réserve QR est égal à $Q_{R0} \cdot e^{-\alpha t}$

L'infiltration (q^*) peut être linéarisée par un changement de variable $Y = \frac{t_i - t}{q^*}$, t_i étant le temps maximal pendant lequel se manifeste l'infiltration (en jours), on reporte $-Y$ en fonction de t .

MANGIN déduit de l'étude de l'infiltration des paramètres descriptifs de la décroissance : le paramètre η' (en j^{-1}) est l'inverse du temps d'infiltration

$$\eta' = \frac{1}{t_i} \quad \text{il représente donc la brièveté de l'infiltration.}$$

Le coefficient
$$\varepsilon = \frac{q^*_0 - q^*}{q^* \cdot t} - \frac{\eta' \cdot q_0}{q^*}$$

représente l'hétérogénéité de l'infiltration. Il ne doit être calculé que dans le domaine linéaire de la relation $-Y = f(t)$. De plus, dans les cas étudiés ici, ce paramètre varie au cours d'une même décroissance, il est donc d'un emploi difficile.

Ces paramètres permettent de calculer le débit de la composante d'infiltration à tout instant.

$$q^* = q^*_0 \frac{1 - \eta' t}{1 + \varepsilon t} \quad , \text{ ou si l'on veut normer ce débit par souci de comparaison de différentes décroissances, } y = \frac{1 - \eta' t}{1 + \varepsilon t} .$$

Une valeur remarquable i de cette variable y est obtenue pour $t = 2$ jours, elle permet la comparaison des systèmes.

$$i = \frac{1 - 2 \cdot \eta'}{1 + 2 \cdot \epsilon}$$

Dans les exemples ici abordés (Verneau, Areuse, Pont de Gys, Vaucluse), j'ai préféré utiliser la courbe normée

$$q^i = f(t) \quad \text{où} \quad q^i = \frac{q^*}{q^*_0} = \frac{Q - Q_R}{Q_0 - Q_{R0}}$$

- q^i débit normé de l'infiltration
- q^* débit de l'infiltration
- q^*_0 débit de l'infiltration au pic de crue (temps 0)
- Q débit total au temps t
- Q_R débit de la réserve au temps t
- Q_0 débit total au pic de crue (temps 0)
- Q_{R0} débit de la réserve au pic de crue (temps 0)

Cette variable q^i prend comme la variable y des valeurs comprises entre 1 (au pic de crue) et 0 (au point t_i où s'annule l'infiltration).

Temps (j)	γ	q^i
0,000	1	1
0,083	0,42	0,97
0,167	0,26	0,87
0,250	0,18	0,64
0,333	0,14	0,51
0,417	0,11	0,37
0,667	0,06	0,17
1,000	0,04	0,11
1,66	0,01	0
Moyenne	0,25	0,52
Ecart-type	0,31	0,38

Tabl. 28 : CORRELATION ENTRE LA VARIABLE γ
ET LE DEBIT NORME DE L'INFILTRATION (q^i)

$$r = 0,890 \text{ (N.S.)}$$

L'infiltration de débit q^* calculé par la formule de MANGIN donne sur nos émergences un ajustement trop bref. En particulier, la linéarité de la relation $-Y = f(t)$ n'est pas bonne pour la fin de la décrue.

En outre, l'utilisation du coefficient i correspondant à un temps d'infiltration de 2 jours est difficile sur des systèmes (Pont de Gys, Verneau) où t_i est inférieur à 2 jours.

La relation $-Y = f(t)$ n'est plus linéaire pour $t = 2$ jours, et l'écart entre y (de MANGIN) et q^i calculés est grand (tab. 28).

La figure 144 montre la décroissance des débits normés de l'infiltration ($q^i = q^*/q^*_0$) et la décroissance de l'ajustement y de MANGIN pour les 25 premiers jours de 3 décrues de la Fontaine de Vaucluse.

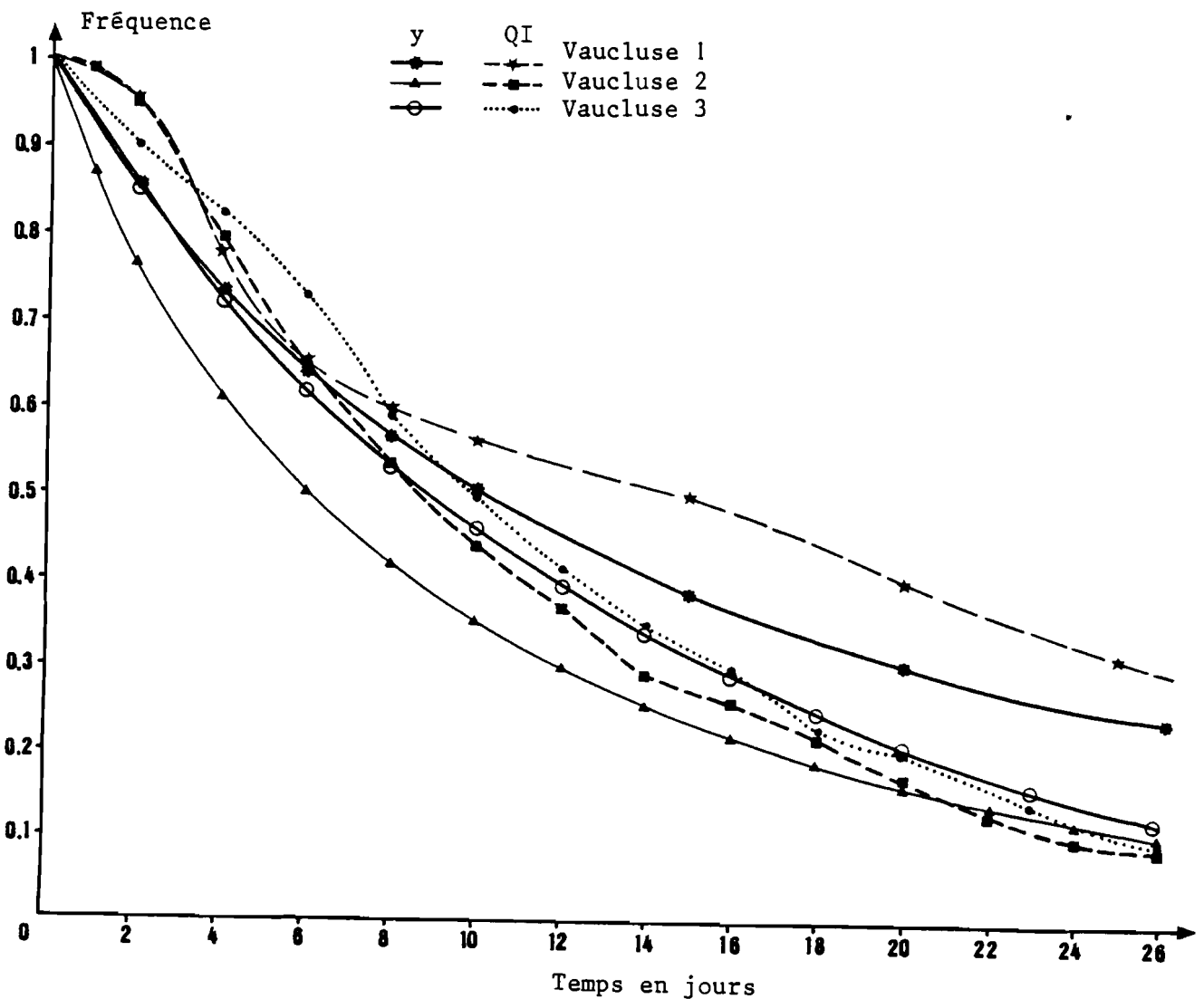


Fig. 144 : COMPARAISON DE 3 DECRUES DE L'INFILTRATION A LA FONTAINE DE VAUCLUSE : DEBIT NORME DE L'INFILTRATION ET FONCTION Y

Le tableau 29 donne les coefficients de corrélation linéaire pour $q^i = f(y)$.

	r	n	
VER	0,998	29	н н
ARE	0,888	6	0
PGY 1	0,971	10	н н
PGY 2	0,890	8	0
VCL 1	0,993	12	н н
VCL 2	0,994	14	н н
VCL 3	0,997	15	н н

Légende :
 0 non significatif
 н н hautement significatif

Tabl. 29 - CORRELATION ENTRE DECRUES OBSERVEES DE L'INFILTRATION (q^i) ET DECRUES SIMULEES PAR LA METHODE MANGIN (y)

SOURCE EPISODE	METHODE HYDRODYNAMIQUE									METHODE PHYSICO-CHIMIQUE		
	α	t_1	n'	$V_{d0} \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$V_{t0} \cdot 10^6 \text{ m}^3$	K	ϵ	i	$V_{m3} \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$V_{t3} \cdot 10^6 \text{ m}^3$	%	
VERNEAU CR nov 77	0,0669	1,73	0,579	0,72	19,9	0,036	9,350	-0,008	0,213	0,297	72	
AREUSE CR nov 77	0,0222	6,13	0,163	17,59	144,8	0,122	1,387	0,179	7,011	12,477	56	
PONT DE GYS CR jan 80	0,1936	1,37	0,733	0,057	2,5	0,023	0,686	-0,198	0,031	0,035	89	
PONT DE GYS CR fév 80	0,1920	2,38	0,420	0,085		0,034	15,36	0,005	0,086	0,124	69	
VAUCLUSE CY 1981 (CR mai-juil)	0,0060	78	0,013	163,9	643,3	0,254	0,073	0,852	203	267	76	
VAUCLUSE CY 1982 (CR jan-fév)	0,0080	46	0,022	217,0		0,337	0,122	0,769	227	334	68	
VAUCLUSE CY 1982 (CR juin-juil)	0,0049	37	0,027	128,1		0,199	0,059	0,846				

Tabl. 30 - COMPARAISON DES DECOMPOSITIONS HYDRODYNAMIQUES ET LES DECOMPOSITIONS PHYSICO-CHIMIQUES

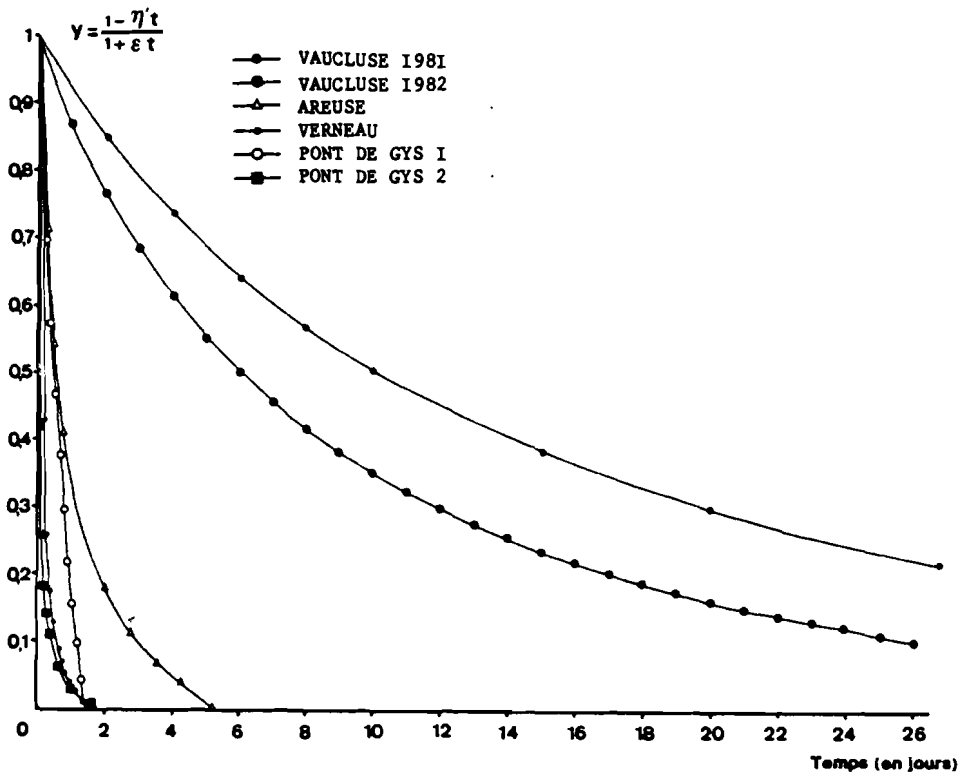


Fig. 145 : COURBES DE DECUE DE L'INFILTRATION : FONCTION Y SUR 4 SYSTEMES KARSTIQUES

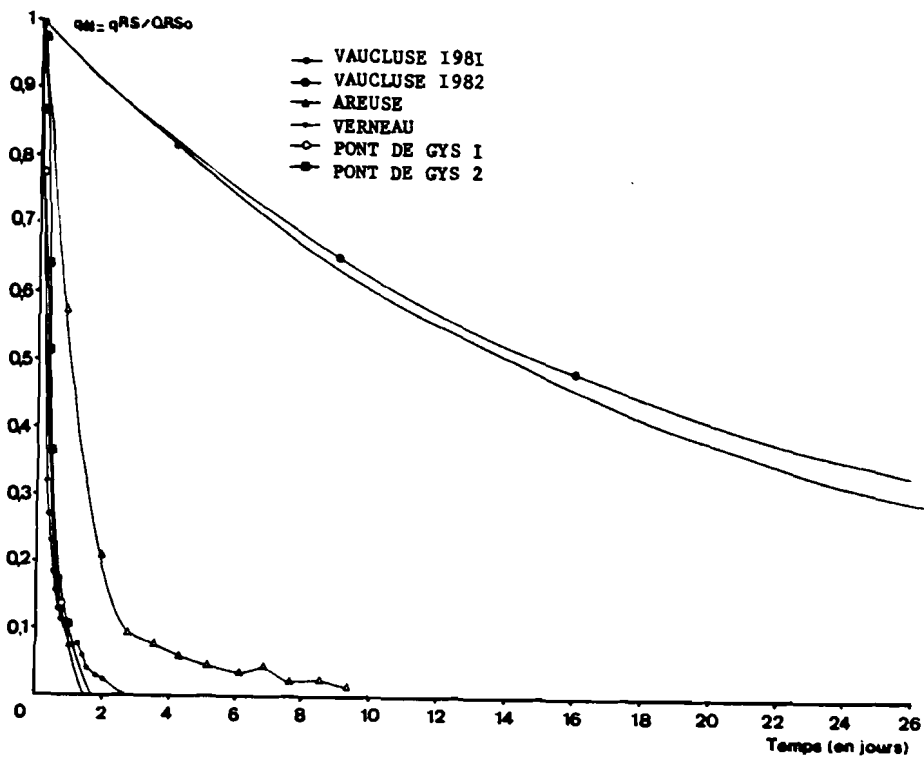


Fig. 146 : COURBES DE DECUE DE L'INFILTRATION, METHODE PHYSICO-CHEMIE SUR 4 SYSTEMES KARSTIQUES

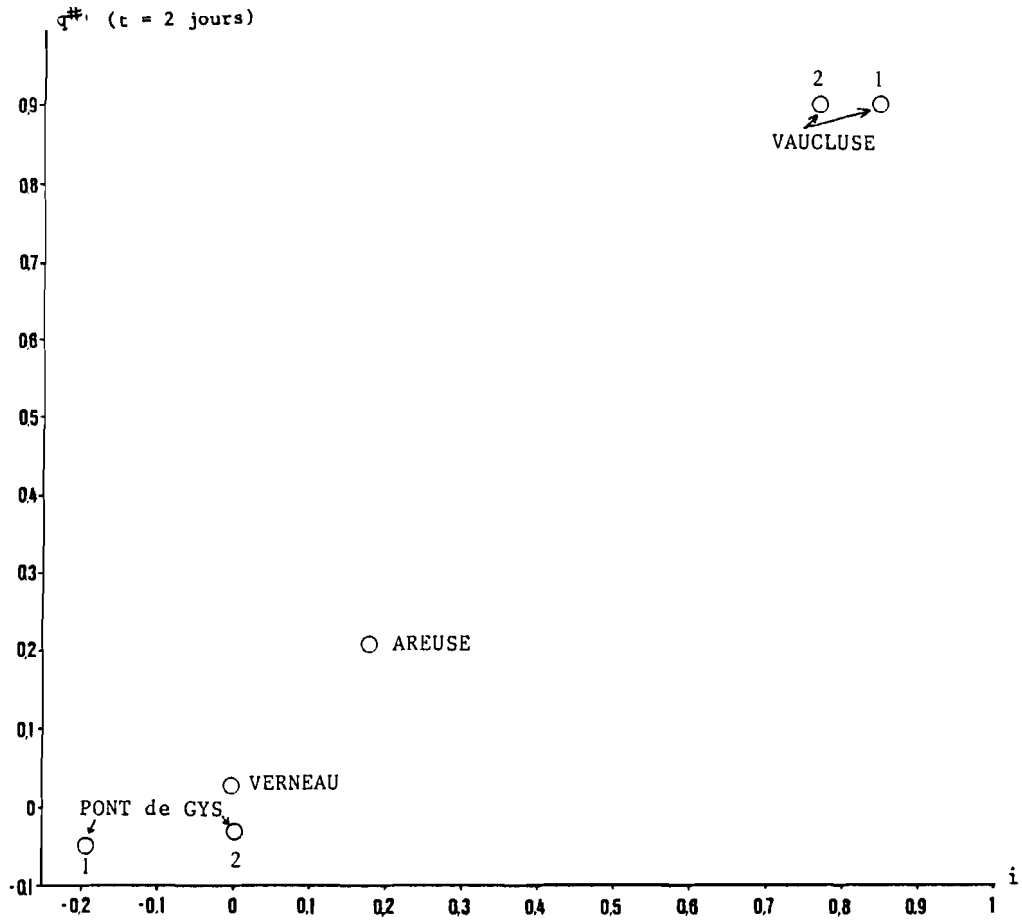


Fig. 147 : COMPARAISON DU DEBIT DE L'INFILTRATION POUR $t = 2$ JOURS (METHODE PHYSICO-CHIMIQUE) ET DU PARAMETRE i DE MANGIN SUR 4 SYSTEMES KARSTIQUES

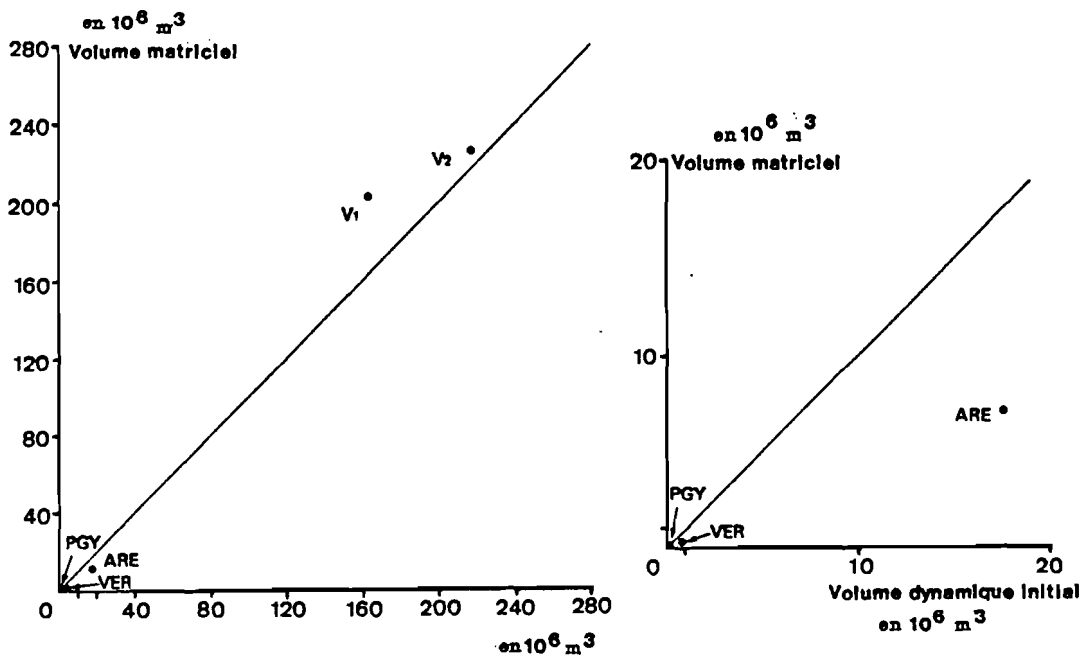


Fig. 148 : COMPARAISON DES VOLUMES DYNAMIQUES INITIAUX (METHODE MANGIN) ET DES VOLUMES MATRICIELS ECOULES (METHODE PHYSICO-CHIMIQUE)

IX.2. COMPARAISON DES DECOMPOSITIONS HYDRODYNAMIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES

Afin de comparer les résultats des décompositions hydrodynamiques avec ceux des décompositions physico-chimiques, le débit de la décrue "chimique" simulée de la composante "ruissellement souterrain" a été normé.

Le paramètre $q \neq = Q_{RS}/Q_{RSO}$ représente donc, - à l'instar des paramètres y et q^i pour la décomposition hydrodynamique -, la part du débit du ruissellement souterrain maximum (pic de crue) écoulé pendant le temps de la décrue.

La figure 145 et le tableau 30 permettent de comparer l'allure des décrues étudiées avec le paramètre y , et la figure 146 fait apparaître les mêmes événements décomposés par la méthode physico-chimique.

On notera dans les deux cas les décrues à longue période de la Fontaine de Vaucluse.

La méthode hydrochimique rapproche mieux les 2 décrues de l'émergence.

La décrue de l'Areuse occupe une position intermédiaire par les 2 méthodes, et on notera la similitude de comportement des sources du Verneau et du Pont de Gys dans les deux cas.

La figure 147, bien que représentant trop peu de systèmes, montre que le paramètre i et la valeur de $q \neq$ correspondant à $t = 2$ jours croissent de manière concomitante : la décomposition physico-chimique permet la comparaison des décrues, comme la méthode hydrodynamique.

Quant au comportement de la réserve, il existe une relation non linéaire croissante entre le "volume dynamique initial" ($V_{d0} = Q_{R0} \times 86\,400/\alpha$) et le "volume matriciel" obtenu par intégration de l'hydrogramme reconstitué de l'unité matricielle (fig. 148).

Rappelons à ce propos que le "volume dynamique" de la réserve n'est que l'excédent passé à l'exutoire du volume réellement en mouvement dans le réservoir, au cours de l'épisode.

L'eau peut être en mouvement sans qu'elle participe au débit de l'exutoire, elle peut prendre la place de l'eau qui, elle, participe à ce débit de l'exutoire. Le volume "dynamique" V_{d0} n'est donc qu'une partie du volume dynamique réel. Seules des méthodes capables de mémoriser le marquage des différents milieux peuvent permettre de quantifier le phénomène, par exemple les traceurs isotopiques comme le tritium ou le carbone 14 qui autorisent le calcul des volumes réellement impliqués dans l'écoulement global du réservoir.

En revanche, aucune méthode physico-chimique ni hydrodynamique appliquée à l'exutoire ne peut permettre l'accès au volume total du réservoir.

L'accès au volume total du réservoir ne peut s'envisager à l'heure actuelle que par des méthodes directes de la géométrie de l'aquifère (porosité intergranulaire et fracturation mesurées dans les forages, géophysique sur le système pour en préciser l'extension ...), et les méthodes indirectes (hydrodynamique et physico-chimique) utilisables in situ, c'est-à-dire dans les forages.

Dans l'aquifère dont le volume total de l'eau est le produit porosité efficace x volume total du réservoir, une fraction de ce volume total peut encore être abritée de la circulation, par exemple au coeur des blocs capacitifs à très faible transmissivité.

C H A P I T R E X

L I M I T E S , P E R S P E C T I V E S E T I N T E R E T

D E L A

M E T H O D E P H Y S I C O - C H I M I Q U E

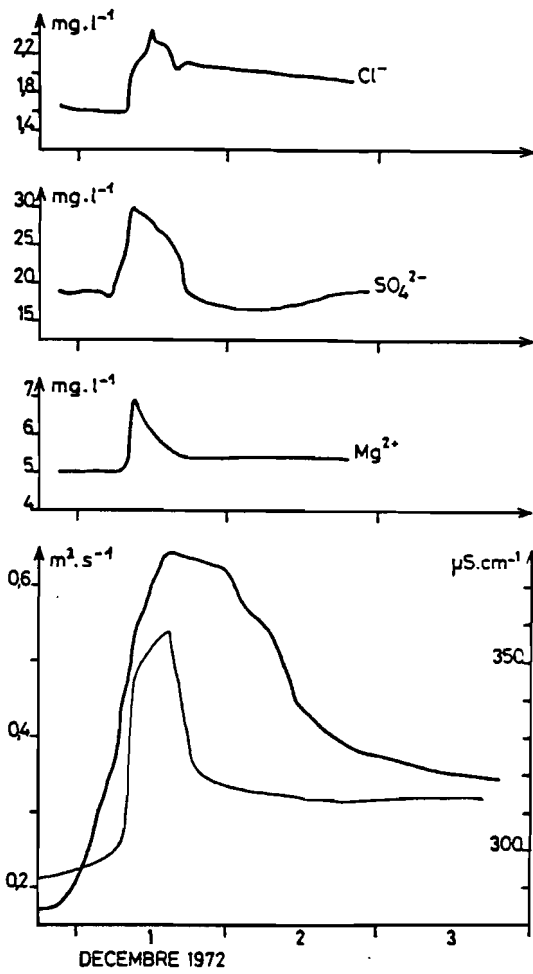
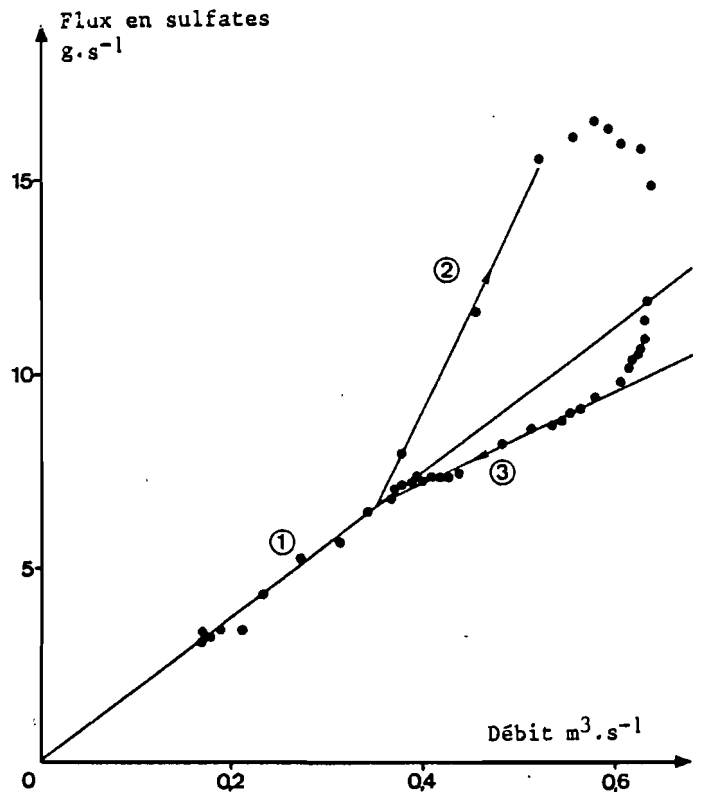


Fig. 149 : EVOLUTION DU CHIMISME LORS D'UNE
CRUE SIMPLE DE DEBUT DE CYCLE,
AU BAGET (BAKALOWICZ 1979)

Fig. 150 : RELATION FLUX EN SULFATES-DEBIT.
SOURCE DU BAGET, CRUE DE DECEMBRE 1972



LIMITES, INTERET ET PERSPECTIVES DE LA METHODE DE DECOMPOSITION PHYSICO - CHIMIQUE

X.1. LIMITES DE LA METHODE

Les résultats obtenus sur des systèmes divers démontrent l'intérêt de cette méthode pour la compréhension du comportement hydrocinématique des aquifères karstiques pendant les crues.

Cependant, plusieurs situations peuvent gêner les décompositions ; des recommandations s'imposent.

X.1.1. Cas d'une réserve ou d'une infiltration hétérogène

Le comportement de la chimie de l'eau des émergences peut ne pas suggérer un mélange simple de deux composantes : les systèmes où les crues mobilisent des eaux en provenance d'une réserve hétérogène ou d'une infiltration hétérogène montrent des variations chimiques comprenant par exemple un pic positif de teneur suivi d'une dilution : il y a évolution de la teneur des composantes au cours de la crue (concentrée au début, diluée à la fin).

Ainsi, les sources du Baget et du Lez montrent-elles toutes deux des augmentations de teneur au cours des crues.

A. La crue de décembre 1972 au Baget (d'après BAKALOWICZ 1979)

Elle montre une augmentation significative de la conductivité, des chlorures, sulfates et magnésium (fig. 149). La relation flux en sulfates-débit (fig. 150) a au départ (1) une allure linéaire (effet piston sur la zone noyée), puis un segment à pente plus forte (plus sulfaté) que celui de la zone noyée (2) traduit un accroissement de teneur.

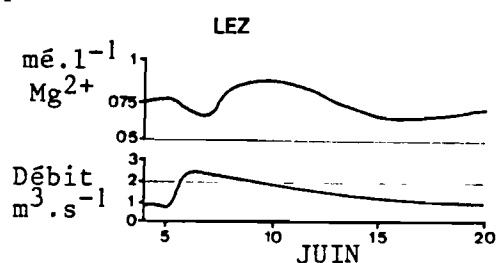
Au pic de crue, les points décrivent un arc de cercle et la décrue s'aligne sur un segment de droite (3) à pente plus faible que celle du segment initial.

L'hétérogénéité hydrochimique de ce système fait donc exclure la possibilité d'une décomposition.

B. La source du Lez (MARJOLET et SALADO, 1976)

La crue de juin montre une diminution de la teneur en magnésium (fig. 151) sous le pic de crue suivie d'une augmentation pendant la décrue.

Fig. 151 : EVOLUTION DE LA TENEUR
EN MAGNESIUM - SOURCE DU
LEZ, CRUE DE JUIN 1973
(MARJOLET et SALADO, 1975)



La relation flux-débit confuse, ne permet pas de décomposer l'hydrogramme. Malgré un bel alignement des points de la décrue (fig. 152) le segment de la zone noyée est trop mal caractérisé.

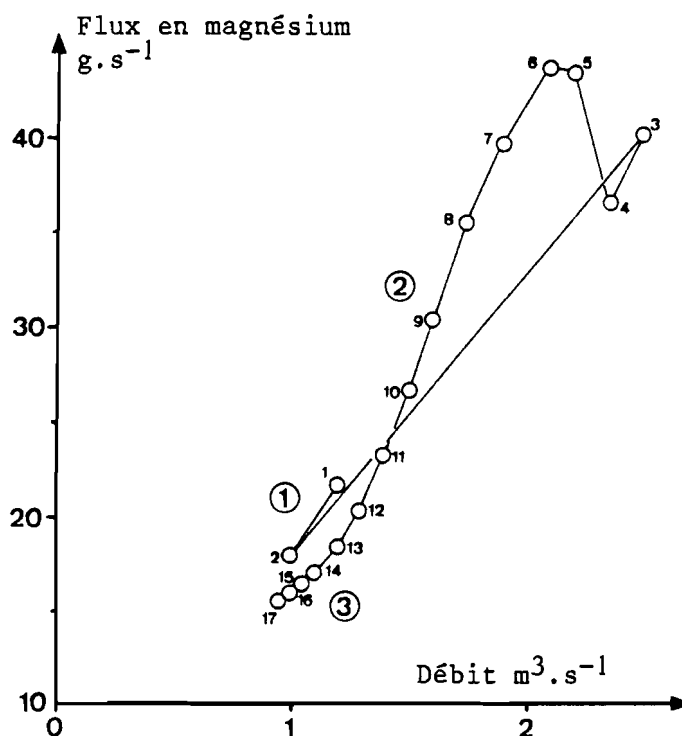


Fig. 152 : RELATION FLUX EN MAGNESIUM-DEBIT. SOURCE DU LEZ, CRUE DE JUIN 1973

X.1.2. Choix des marqueurs

Les éléments utilisés pour décomposer l'hydrogramme ont une grande importance: ils doivent être acquis naturellement dans le système (internes) et doivent être présents dans sa totalité.

Le mélange des deux composantes ne doit pas induire d'interaction chimique, et les éléments à origine ubiquiste (naturelle + polluante) sont à proscrire.

La détermination des éléments à utiliser devra se faire cas par cas, en fonction de la lithologie de la structure et du climat régnant sur le système, après une analyse fine des données autorisant l'identification de la provenance des traceurs dans le système.

Les éléments retenus devront montrer des variations de grande amplitude devant l'incertitude analytique, et de période adaptée au pas de temps des prélèvements. La conductivité, le magnésium, le calcium, les bicarbonates, les sulfates, la silice ont satisfait aux contraintes précédentes sur l'un ou l'autre des systèmes étudiés.

L'utilisation de paramètres extérieurs au système (oxygène 18, tritium) n'est pas aisée : ce sont les mêmes précipitations qui rechargent les réservoirs permanents (blocs noyés) et les réservoirs temporaires (sol, épikarst, blocs non saturés), il sera donc difficile d'observer un contraste significatif dans les teneurs de ces deux milieux.

X.1.3. Choix du pas de temps

Le pas de temps à retenir est fonction du système, mais aussi du soluté choisi pour la décomposition : la manipulation ne peut s'effectuer que sur des systèmes dont on connaît pro-parte l'amplitude et la période des perturbations physico-chimiques.

Les décompositions présentées ont été opérées sur des données acquises dans un autre but : les pas de temps en particulier ne se sont pas toujours révélés adaptés à l'utilisation des données pour la décomposition : cette finalité demande des manipulations de terrain prévues dans cette optique : en particulier les données isotopiques du Baget ou du Lison n'ont pas pu être exploitées par notre méthode car les prélèvements ont été opérés sur des critères de transfert (débit) et non de transit (chimie).

X.1.4. Méthode approximative ne prenant en compte que deux composantes

Comme les décompositions hydrodynamiques auxquelles cette méthode doit être impérativement couplée, la décomposition physico-chimique est une méthode approximative qui réduit à deux le nombre de composantes de l'écoulement souterrain.

Cependant, dans certains systèmes à courtes distances horizontales et grandes dénivelées (le Pont de Gys par exemple) deux lois flux-débit caractérisent le ruissellement souterrain au cours de certaines crues, rappelant que l'infiltration rapide et l'infiltration lente ont une signature chimique différente.

X.1.5. Méthode pas totalement indépendante d'hypothèses hydrodynamiques

Le calcul de la teneur de la composante du ruissellement souterrain se fait en fin de décrue, en utilisant la loi de Maillet. La fin du phénomène d'infiltration est repéré sur la récession grâce au passage à une loi exponentielle en tarissement. Ce point coïncide en général bien avec la stabilisation des indicateurs chimiques. En outre, le débit de l'unité matricielle est estimé en fin de décrue grâce au prolongement de la droite de tarissement sous la fin de décrue, pour le calcul de la teneur du ruissellement souterrain. La méthode physico-chimique dépend donc en partie des hypothèses hydrodynamiques.

X.2. INTERET ET PERSPECTIVES DE LA METHODE PHYSICO-CHIMIQUE

La décomposition chimique de l'hydrogramme de crue d'une source karstique nous fournit en première approximation deux hydrogrammes, l'hydrogramme des eaux à caractère matriciel en provenance du réservoir de la zone noyée et l'hydrogramme du ruissellement souterrain moins minéralisé en éléments internes hérités du calcaire.

La méthode sera grandement améliorée si l'on peut avoir accès au ruissellement souterrain avant son entrée dans la zone noyée d'où l'intérêt de l'étude de sources temporaires ne se manifestant qu'en période de hautes eaux (différentes toutefois des trop-pleins des exutoires) et l'importance également des études qui se développent depuis quelques années sur l'aquifère épikarstique (bassins expérimentaux de Corconne (Université de Montpellier), de Saugras , de Moulis (CNRS) ...

La crue des eaux à caractère matriciel se produit en tout début de crue et confirme l'existence d'un transfert de pression entre l'impluvium et l'émergence par l'intermédiaire des eaux de ruissellement souterrain qui chassent le contenu des drains de la zone noyée. Le volume des ces drains peut être estimé et des renseignements sur la karstification de la zone noyée ainsi obtenus.

Le passage de la teneur de cette composante a des valeurs plus faibles qu'avant la crue (sous le pic de l'hydrogramme de ruissellement souterrain) montre le rôle de l'infiltration dans la recharge de la matrice.

En ce qui concerne l'hydrogramme de ruissellement souterrain, il conviendra de définir par une étude statistique des crues un hydrogramme unitaire correspondant à une pluie efficace-type de quantité et durée bien définies. Les temps de concentration du ruissellement souterrain seront alors accessibles et des renseignements sur le développement et le degré d'organisation du réseau karstique de la zone d'infiltration pourront en être déduits.

La fin de la manifestation à l'exutoire des eaux du ruissellement souterrain permet de fixer très précisément le début du tarissement sur l'hydrogramme total.

Sur les relations flux-débit, le segment passant par l'origine (flux nul à débit nul) permet d'identifier l'aquifère principal, celui qui assure le tarissement. Cependant, même si la chimie est très perspicace, il conviendra d'être prudent, comme dans les décompositions hydrodynamiques, afin de ne pas attribuer systématiquement à la zone noyée le lieu de stockage permanent du système.

Pour ce qui est du ruissellement souterrain, le rôle de l'aquifère épikarstique apparaît prépondérant au travers des nombreux exemples traités puisque le ruissellement souterrain ne semble constitué que d'infiltration retardée à composition chimique sensiblement constante.

Bien que cette méthode de décomposition soit encore approximative, elle est indispensable pour apprécier la vulnérabilité d'un système karstique au niveau de l'exutoire comme au niveau de ses réserves. En effet, les pollutions sont directement introduites dans le réseau de drainage de la zone d'infiltration sous la forme d'effluents urbains ou industriels, de pollutions agricoles plus diffuses ou même de déchets solides précipités dans des gouffres transformés en dépôts d'ordures. Ces éléments externes et polluants se manifesteront donc principalement en crue avec la composante du ruissellement souterrain. C'est pourquoi le temps de passage des entrées et leur importance dans le débit de crue à l'exutoire, donc leur dilution, sont des données qu'il faut pouvoir simuler en fonction du signal entrée. On pourra ainsi prévoir les atteintes de la source par une pollution accidentelle grave en fonction des conditions météorologiques. La méthode chimique permettant de vérifier à partir de la teneur en éléments internes au système karstique si les conditions de tarissement sont atteintes, il devient possible de suivre l'évolution interannuelle des teneurs de la réserve en éléments externes comme par exemple les nitrates ou les chlorures. Les modifications apportées à la qualité des réserves par la recharge annuelle peuvent aussi être mises en évidence.

T R O I S I E M E P A R T I E

P R O S P E C T I O N H Y D R O G E O L O G I Q U E D E S

P R O V I N C E S K A R S T I Q U E S P A R L E S

I N S T A N T A N E S P H Y S I C O - C H I M I Q U E S

E T I S O T O P I Q U E S

C H A P I T R E X I

I N T R O D U C T I O N

I N T R O D U C T I O N

Le suivi de la chimie de l'eau des émergences nous a permis de reconstituer le fonctionnement hydrocinématique du système karstique (première partie) et d'estimer la contribution des diverses composantes grâce à la décomposition des hydrogrammes et à leur intégration (deuxième partie).

Cependant, si les résultats du suivi peuvent servir à la compréhension générale du phénomène karstique, la multiplication de suivis ne saurait être envisagée à l'échelle d'une vaste province hydrogéologique comprenant de nombreux systèmes, à cause de la lourdeur du potentiel analytique à mettre en oeuvre.

De plus, l'importance de l'histoire hydrocinématique des réservoirs (ou mémoire de l'aquifère aux événements hydroclimatologiques antérieurs) requiert la simultanéité des suivis.

L'étude des variations physico-chimiques à des pas de temps emboîtés nous a révélé des comportements stéréotypés :

- certains systèmes, fissurés et peu karstifiés, tels que le Groseau ou les Plagnes, ont une grande inertie et une mémoire déformée des phénomènes d'infiltration. La faiblesse de leurs milieux capacitifs noyés permet une évolution globale de la chimie de leurs eaux stockées, consécutivement à une période de recharge.

- les systèmes mieux karstifiés, tels que ceux de Vaucluse, du Pont de Gys, du Baget ou du Verneau, sont capables de transférer à l'émergence une partie de l'information "entrée", une autre partie de ce signal étant gardée "en mémoire" dans les milieux capacitifs permanents (zone noyée, milieux non karstiques) ou temporaires (épikarst, zone non saturée) du système. L'élimination de cette information par le milieu hiérarchisé se fait en un temps qui est fonction de l'importance relative des zones rechargées et des réserves totales du système, ainsi que de la bonne "irrigation" des zones de stockage par le réseau hiérarchisé.

Ainsi, le Verneau, système à la capacité de stockage très limitée et au réseau de drains très développé, revient rapidement (en quelques jours) à ses teneurs d'étiage (pour l'ensemble des traceurs) : à l'opposé, la Fontaine de Vaucluse - pour les éléments dont les variations ont une période longue, comme la température ou le magnésium -, met plusieurs mois à reprendre ses valeurs d'avant la crue.

Le détail journalier des variations physico-chimiques révèle que la Fontaine de Vaucluse en tarissement oscille alors de manière aléatoire et faible autour d'une valeur moyenne caractéristique de l'étiage, malgré la taille de l'impluvium et la puissance de l'aquifère noyé et de la zone non saturée.

On peut donc considérer l'étiage prolongé comme une période de stabilité de la physico-chimie de l'émergence et tenter la prospection d'une province hydrogéologique dans son ensemble abordée par des instantanés physico-chimiques et isotopiques.

Le Jura, domaine karstique bien connu grâce à de nombreux essais de traçage a été choisi pour mettre en oeuvre cette méthode.

Deux essais préalables sur des secteurs limités ont permis de tester :

- la suffisance du contraste d'oxygène 18 lié à la dénivelée topographique entre deux plateaux successifs (Plateau de Saône), avec comme application la mise en évidence de l'alimentation d'une source du premier plateau, la source du Maine, par un impluvium situé sur le deuxième plateau (BLAVOUX et al., 1976).

- la conformité de l'information isotopique aux acquis du traçage artificiel (Région de St Claude), en particulier la représentativité du traçage des pertes localisées par rapport à l'ensemble des impluviums (MUDRY et ROSENTHAL, 1977).

Sept campagnes générales, entre janvier 1977 et mars 1982 ont permis d'échantillonner plus de 30 sources karstiques.

Le choix des périodes d'échantillonnage a été opéré en fonction de la généralisation des phénomènes climatiques à l'ensemble de la chaîne.

Cependant, quelques campagnes ont eu lieu en période influencée, telle que la fonte des neiges généralisée.

Leur représentativité sera discutée.

Le champ des instantanés physico-chimiques a été ensuite restreint à des secteurs plus limités, comme le Plateau de Vesoul (Hte Saône) où le drainage karstique s'effectue par panneaux structuraux lithologiquement contrastés, afin de confronter le rôle de la lithologie à celui de l'hydrodynamique et de la structure.

Un essai a aussi été tenté dans le Sud-Est de la France (entre Montpellier et Toulon), sur une région variée au point de vue lithologique et structural, lors de l'étiage exceptionnel de la fin 1981.

Ces deux dernières tentatives étaient destinées à préciser les limites de cette méthode.

C H A P I T R E XII

P R O S P E C T I O N D E S K A R S T S
D E L A C H A I N E J U R A S S I E N N E

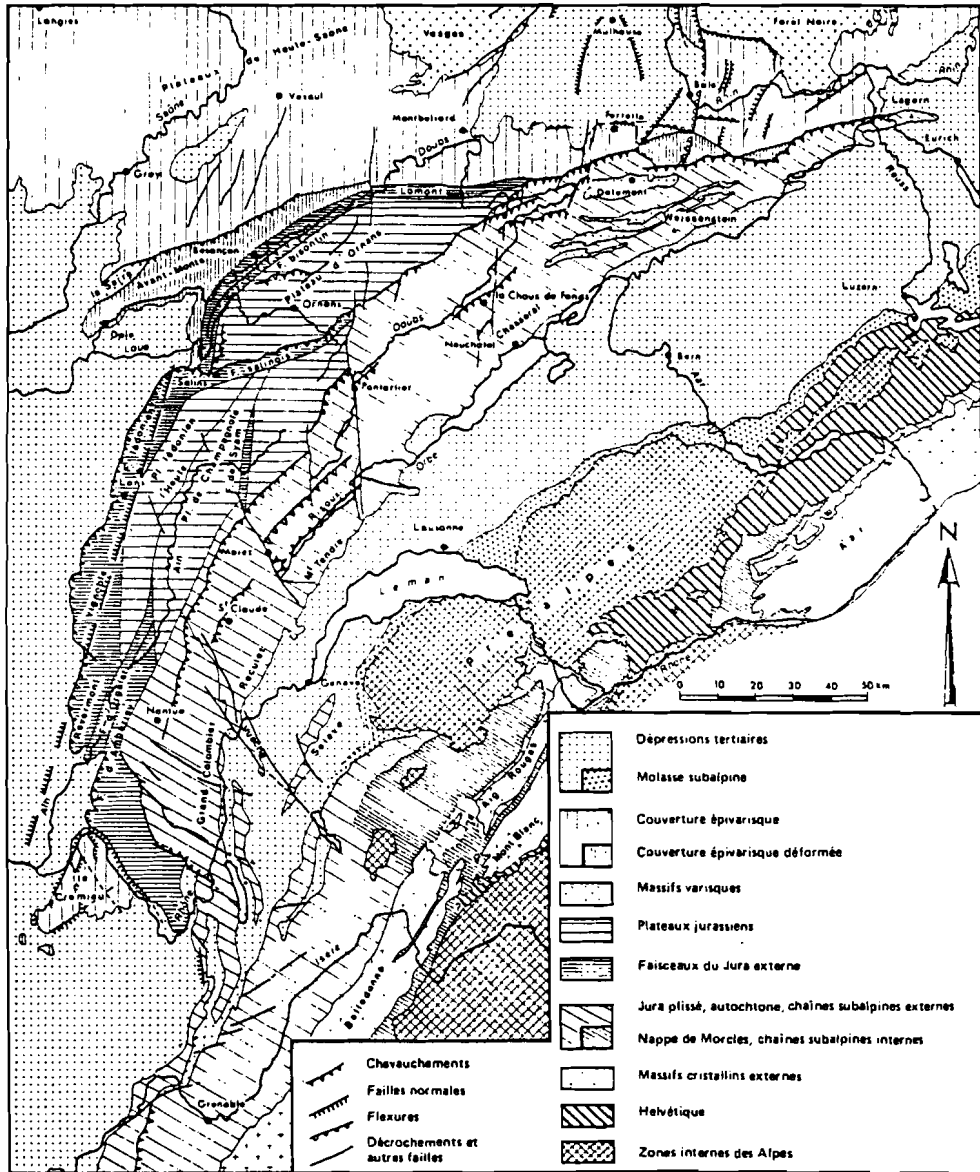


Fig. 153 : SCHEMA STRUCTURAL DU JURA (CHAUVE et al 1980)

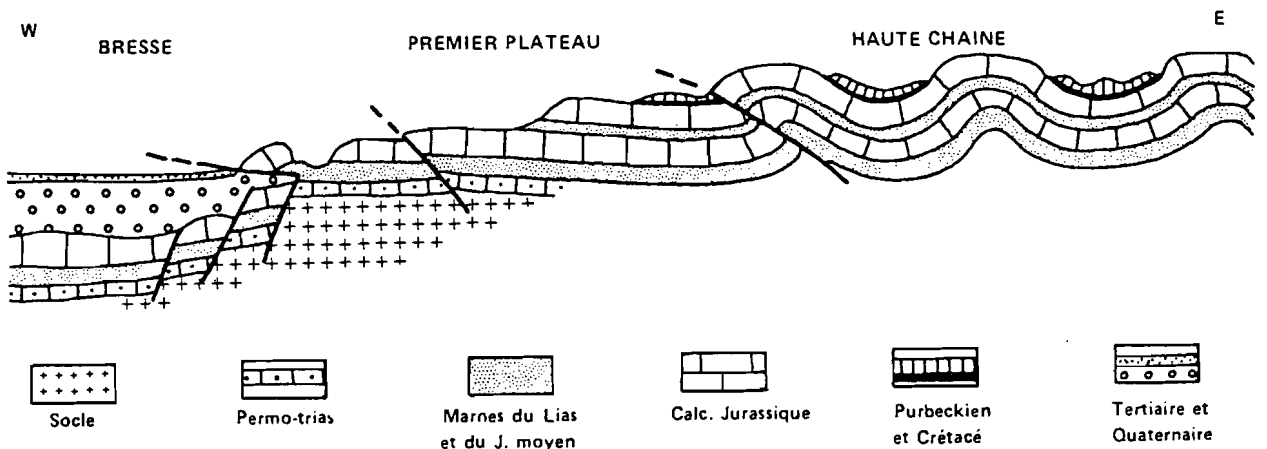


Fig. 154 : COUPE GEOLOGIQUE EST-OUEST DU JURA (CHAUVE et al 1979)

PROSPECTION DES KARSTS DE LA CHAÎNE JURASSIENNE

XII.1. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DE LA CHAÎNE DU JURA

XII.1.1. Géologie

La chaîne du Jura (fig. 153) est classiquement subdivisée en Jura externe et Jura interne, qui sont chacun l'expression géomorphologique et structurale d'un domaine paléogéographique. (CHAUVE et al., 1980 a et b).

Le Jura externe ou Jura des plateaux a des séries peu épaisses, constituées d'alternances de marnes et de calcaires. Le Jura externe est une alternance de "plateaux" horizontaux ou monoclinaux (s'étant seulement fracturés, décollés sur leur substratum liasico-triasique) et d'étroits faisceaux de plis et de failles directionnelles. Ces faisceaux sont des zones chevauchantes dont le recouvrement peut atteindre plusieurs kilomètres (chevauchement du faisceau lédonien sur le tertiaire bressan, fig. 154).

Le Jura interne ou Haute-Chaîne a des séries plus épaisses et plus monotones (Jurassique supérieur). Les faciès "argoviens" de l'Oxfordien permettent la disharmonie entre Dogger et Malm. Le Crétacé inférieur, plus varié, est souvent décollé sur les faciès incompetents du "Purbeckien". D'amples plis coiffés (fig. 154) sont souvent chevauchants sur leur marge occidentale (les Planches) ou orientale (Risoux). La Haute-Chaîne est tronçonnée par de grands accidents transversaux rayonnants, répliqués dans la couverture de fractures du socle anté-triasique préexistant aux phases plicatives (oligocène, pontienne). Ces accidents ont permis une évolution autonome de chacun des compartiments, le nombre et la géométrie des plis et des chevauchements étant différent de part et d'autre de l'accident. Dans chaque compartiment, des mouvements tectoniques à composante verticale, synchrones des mouvements tangentiels, ont déformé l'axe des plis dans des zones transversales à la structure, parfois sur le tracé même des accidents rayonnants.

La figure 155 résume les grands ensembles lithologiques de la chaîne jurassienne : on peut y apprécier l'importance des deux grandes masses calcaires du Dogger et du Malm qui contiennent les principaux aquifères karstiques.

XII.1.2. Connaissances hydrogéologiques sur les aquifères karstiques du Jura

Les émergences karstiques de la chaîne jurassienne, ancestralement sollicitées pour l'alimentation en eau potable ou industrielle et pour leur force motrice, ont fait l'objet d'études ponctuelles à la suite des travaux de Fournier.

A cette connaissance pragmatique des aquifères karstiques acquise essentiellement par les essais de traçage, se sont adjoints quelques travaux sectoriels à but plus spéculatif tels que ceux traitant par exemple des aquifères en relation avec le Risoux, ou les thèses de 3ème cycle orientées sur l'hydrogéologie du karst ; d'importants efforts ont été enfin consentis pour la prospection de nouvelles ressources dans le calcaire et les études d'implantation de forages ont fait appel à un faisceau de méthodes d'investigation : thermique, photointerprétation, microfracturation ... (CHAUVE et al., 1976).

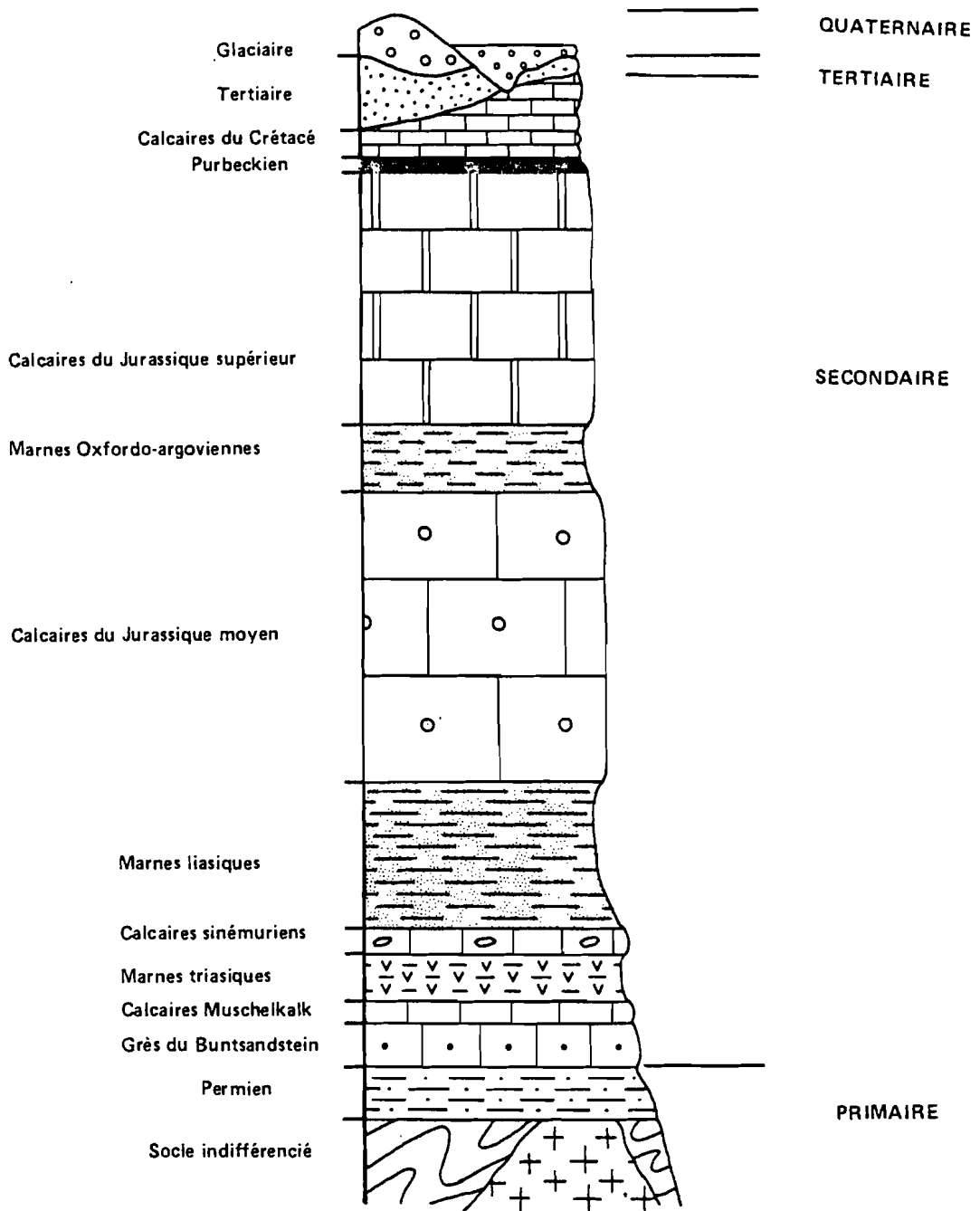


Fig. 155 : LES GRANDS ENSEMBLES LITHOLOGIQUES DE FRANCHE-COMTE (CHAUVE et al 1979)

Néanmoins, si le Jura est l'une des premières régions karstiques françaises pour la densité d'essais de traçages, la structure des magasins et leur géochimie sont mal connus. Nous utiliserons la description géochimique des séries tirées de PERSOZ et KUBLER in KIRALY (1973), relative à la lithostratigraphie du Jura neuchâtelois (tableau 31). Le Jura nous a cependant paru bien adapté pour tester la prospection par instantanés hydro-chimiques et isotopiques.

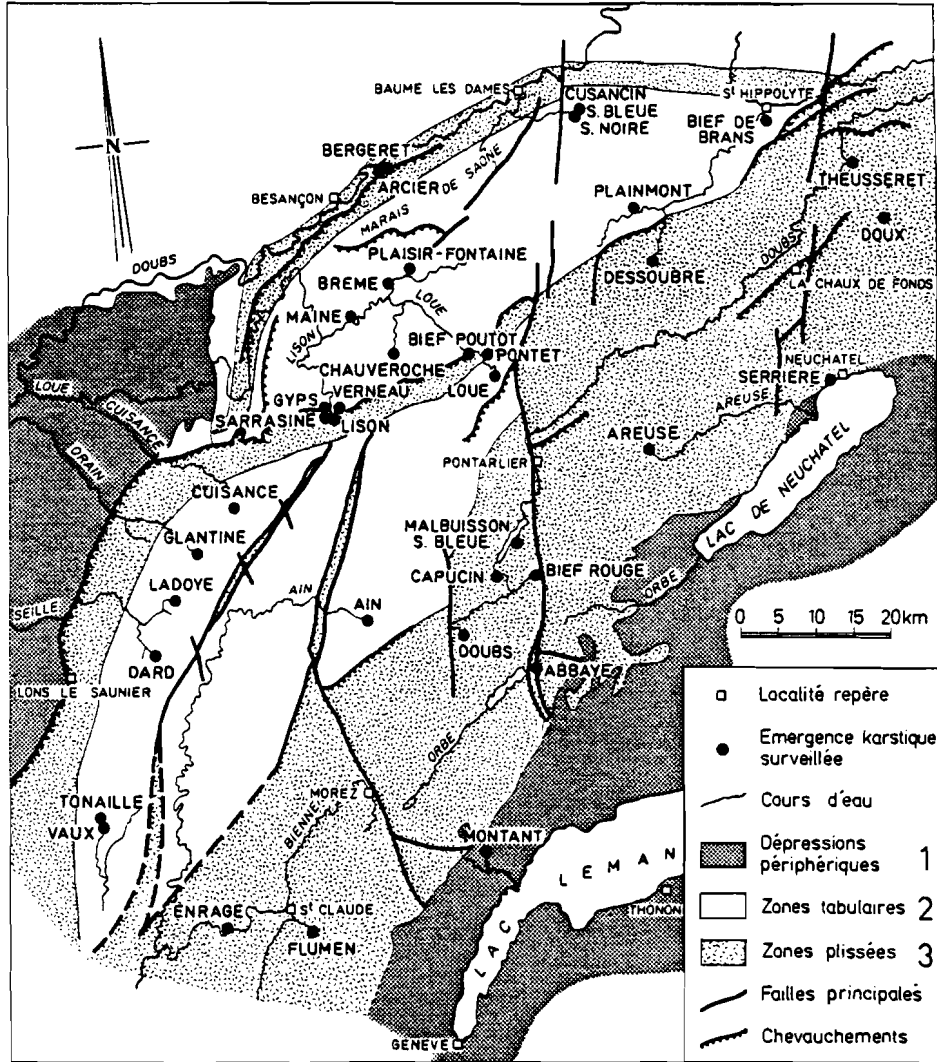


Fig. 156 : LOCALISATION DES EMERGENCES SURVEILLEES (BLAVOUX et al 1979)

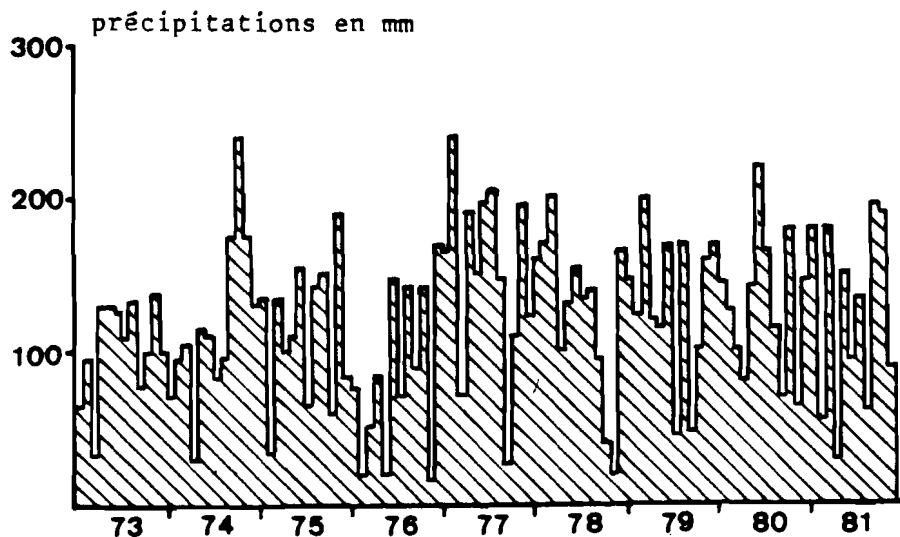


Fig. 157 : REPARTITION TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS, STATION DE PONTARLIER (ALTITUDE 842 m), 1973-1981

XII.2.2. Choix des périodes de prélèvements

La brièveté et l'hétérogénéité de la réponse de l'aquifère karstique à l'impulsion pluviométrique interdit la prospection instantanée lors des périodes influencées. La répartition temporelle très continue des pluies sur le Jura (fig. 157) limite à deux types de situation hydrologique l'emploi des instantanés : les étiages prolongés (rares) et les crues généralisées (également rares). Nous avons ainsi pu travailler dans trois contextes différents :

- crue générale de fonte des neiges sur l'ensemble de la chaîne (février 1977) ;
- étiage d'hiver, au cours duquel l'infiltration est bloquée par un gel généralisé (janvier 1977) ;
- étiages d'été ou d'automne, plus faciles à obtenir, que nous avons étudiés en septembre 1977 et octobre 1978.

XII.2.3. Choix des éléments à analyser

Les études de délimitation des impluviums karstiques du Jura fondées en 1974-1977 sur les essais de traçage artificiels, ont montré les limites de cette méthode qui ne fournit qu'une certitude de relation préférentielle (donc directe et rapide) entre un seul point de l'impluvium et l'émergence. La cartographie des systèmes devant permettre l'établissement de bilans nécessitait un traçage global de l'aquifère, incluant tous les milieux du système, depuis le sol, la zone non saturée, jusqu'aux milieux capacitifs et aux zones drainantes du karst noyé ; le traçage naturel, géochimique et isotopique répondait à cette préoccupation.

La première application sectorielle de cette méthode dans le Jura a été la discrimination des aquifères du marais de Saône et du bassin de Champlive, sur le premier plateau jurassien (plateau de Montrond-Ornans) au Sud et à l'Est de Besançon (BLAVOUX et al., 1976), grâce à l'oxygène 18. Avec cette technique, des résultats de traçages ont aussi été confirmés dans la région de Saint-Claude (Haut Jura) (MUDRY et ROSENTHAL, 1977).

Ces études localisées ayant montré des écarts significatifs dans les teneurs en oxygène 18 (malgré une faible gamme de dénivelées sur les impluviums karstiques), nous ont incité à envisager des opérations de plus grande envergure, intéressant toute la chaîne jurassienne où les altitudes des unités karstiques vont de 1600 à 350 mètres, ce qui laissait prévoir l'existence d'un gradient d'¹⁸O. Parallèlement à cette étude isotopique, il nous a paru intéressant, à la suite des travaux de SCHOELLER (1962), ANDRIEUX (1976), de mesurer la température de l'eau des émergences, qui peut être un marqueur caractéristique des circulations karstiques.

L'interprétation des teneurs en tritium, utilisée avec succès en hydrologie, dans le sol, les aquifères poreux ou dans d'autres régions karstiques (OLIVE, 1970 ; FONTES, 1976 ; BLAVOUX, 1978 ; EVIN et al., 1970) nous ont paru utiles à la discrimination de certains temps de séjour de l'eau, tant dans la zone noyée que dans les milieux servant d'interface avec les précipitations (sol, aquifère épikarstique). Le pH, qui permet un accès immédiat à la détermination de l'agressivité de l'eau vis-à-vis des carbonates, et la conductivité électrique, qui donne une idée pratique et directe de la minéralisation, donc de l'histoire hydrodynamique de l'eau des émergences, ont été mesurées sur le terrain, dans la lignée des travaux de BAKALOWICZ (1974, 1976, 1977, 1979).

La charge soluble de l'eau a fait l'objet de dosages d'ions majeurs (Na,K, Mg,Ca,Cl⁻,HCO₃⁻, SO₄²⁻, N/NO₃), de la silice, du strontium, des formes réduites de l'azote (nitrites, ammonium) et du phosphore. (1)

Ces éléments majeurs ont des origines diverses (MEYBECK, 1984). Dans le Jura, ils sont apportés aux systèmes par les précipitations (Na,K,Cl), les pratiques culturales (K,P,NO₃), d'autres proviennent d'une interaction eau-aquifères (HCO₃,Mg,Ca), certains sont apportés au karst par les déversements résiduaux (Na,K,Cl,NO₃...).

Le dosage de ces éléments permet de vérifier le rôle de la lithologie, de comprendre l'hydrocinématique et d'estimer l'atteinte anthropique du système.

(1) Les dosages effectués font appel aux méthodes rodées au Centre de R.G. de Thonon,dont l'utilisation en routine permet d'obtenir des résultats précis et reproductibles pour les gammes de teneurs rencontrées.

REGION	PERIODE	EFFECTIF	GRADIENT °C/100m	ORIGINE	r
JURA NEUCHATELOIS (d'après BURGER 1959)	vers 1900 (moyennes)	6	- 0,51	11,22	- 0,943
THONON (VIAL 1976)	-	3	- 1,09	13,96	- 0,996
SAVOIE	1973-80	4	- 0,59	12,48	
D. JURA	1959-73	10	- 0,57	11,36	- 0,935 *
D. JURA	1981	7	- 0,64	12,07	- 0,957
D. DOUBS	1978-81	24	- 0,66	12,03	- 0,933**
D. NIEVRE (d'après MARTINET 1982)	1975-81	11	- 0,59	10,94	- 0,975**
D. PUY de DOME	1980	27	- 0,55	12,36	- 0,963**
VAUCLUSE (PUIG inédit)	1976-80	12	- 0,52	13,95	- 0,951 *
MONTS de PARDAILHAN (GUYOT 1983)	1981	5	- 0,86	15,51	- 0,991 *

* significatif

** hautement significatif

NOTA : pour les petits effectifs <10, la signification du coefficient de corrélation est peu utilisable.

Tabl. 32 - GRADIENT THERMIQUE MOYEN ANNUEL DANS L'AIR

XII.3. GRADIENTS ALTIMETRIQUES ET LOCALISATION DES AIRES DE RECHARGE

Les études préliminaires (Plateau de Saône, Haut Jura) ayant attesté que l'on pouvait utiliser, à une échelle restreinte dans le Jura, l'information apportée par l'oxygène 18 pour généraliser l'acquis des essais de traçage, la prospection de l'ensemble de la chaîne a été entreprise.

Le traçage par l'oxygène 18 étant thermodépendant, il importait d'étudier simultanément la température de l'air dans le Jura et de comparer ces deux informations à la température de l'eau des émergences.

XII.3.1. Température de l'air

Depuis longtemps, les auteurs de travaux climatologiques sur les régions montagneuses ont remarqué une décroissance linéaire de la température avec l'altitude du lieu.

Dans le Jura suisse, BURGER (1959) cite des valeurs pour ce gradient thermique :

- . -0,51 à -0,55°C par 100 m (MAURER 1908)
- . -0,51° par 100 m (LUGEON, 1928 ; SANDOZ, 1949)
- . -0,52° par 100 m (MEZGER, 1916)
- . -0,55° par 100 m (UTTINGER, 1933).

On remarquera la faible variabilité de ce paramètre.

Le tableau 32 rassemble quelques valeurs du gradient thermique annuel moyen pour quelques régions.

On remarquera que ces gradients thermiques dans l'air sont légèrement plus forts que ceux trouvés en Suisse, on peut donc retenir pour le Jura une valeur voisine et légèrement supérieure à -0,60°C par 100 mètres de dénivelée.

Le cas des Monts de Pardailhan, situés à la fois sous régime océanique et méditerranéen est à considérer à part, ainsi que celui de la région de Thonon, où, outre le faible nombre de points, la proximité du lac Léman tempère le climat à basse altitude.

SOURCE	CODE	ALTITUDE		1977			1978	1979	1980	1982	MOYENNE	MAXIMUM
		EMER.	IMPL.	1	2	3	4	6	8	9		
ABBAYE	ABB	1050	1150	6,1	-	5,1	6,1	-	6,3	5,2	5,8	6,3
AIN	AIN	700	910	-	7,3	(9,4)	7,8	7,6	8,1	-	8,0	9,4
BERGERET	ARB	266	400	-	9,1	10,0	9,8	9,8	10,5	8,3	9,6	10,5
ARCIER	ARC	275	400	8,3	9,1	10,5	8,7	9,4	10,5	8,0	9,2	10,5
AREUSE	ARE	793	1100	7,4	-	7,8	7,8	-	7,6	-	(7,7)	7,8
BIEF de BRANS	BRA	400	770	9,5	9,1	9,5	(7,5)	9,6	9,8	9,1	9,3	9,8
PUITS de la BREME	BRE	330	560	9,5	-	-	-	9,1	-	(6,2)	-	9,1
CAPUCIN	CAP	865	925	7,3	7,0	7,4	7,4	-	7,5	(8,5)	7,5	8,5
CHAUVEROCHE	CHA	400	660	7,5	-	-	-	9,6	10,4	8,6	(9,0)	10,4
SOURCE BLEUE C.	CUB	310	600	9,8	8,9	10,5	10,3	10,2	10,5	9,2	9,9	10,5
CUISANCE	CUI	378	570	-	8,5	9,4	9,3	9,3	9,5	9,1	9,2	9,5
SOURCE NOIRE C.	CUN	325	600	-	9,1	9,8	9,9	9,7	9,5	9,0	9,5	9,9
DARD	DAR	400	600	-	9,8	10,1	10,2	9,9	10,1	9,6	9,9	10,2
DESSOUBRE	DES	598	770	8,5	8,5	8,8	9,1	8,8	9,0	8,5	8,7	9,1
DOUBS	DOU	945	1150	6,0	5,8	6,2	6,2	-	6,2	5,6	6,0	6,2
DOUX	DOX	776	1150	8,0	-	8,1	7,2	-	8,0	-	(7,8)	8,1
ENRAGE	ENR	410	870	-	7,3	(7,5)	9,0	8,3	9,6	7,6	8,2	9,6
FLUMEN	FLU	926	1160	-	7,0	7,0	7,0	6,9	7,1	-	7,0	7,1
GLANTINE	GLA	420	560	-	9,0	9,7	10,1	-	10,5	9,4	9,7	10,5
GYPS	GYP	390	590	9,5	-	9,5	-	9,2	9,8	-	(9,5)	9,8
LADOYE (Seille)	LAD	390	580	-	9,5	9,6	9,8	-	9,7	9,4	9,6	9,8
LISON	LIS	382	650	8,0	-	8,8	-	8,6	9,6	8,1	8,6	9,6
LOUE	LOU	535	820	8,5	-	-	9,0	8,6	10,6	(0,1)	9,0	10,6
SOURCE BLEUE M.	MAB	900	950	7,0	7,5	7,6	7,1	-	7,9	6,4	7,3	7,9
MAINE	MAI	306	560	9,0	-	10,0	9,0	9,6	10,7	9,1	9,6	10,7
MONTANT	MON	585	1000	(4,6)	-	(6,4)	(6,6)	-	(7,3)	-	(6,2)	7,3
PLAINMONT	PLA	570	770	-	8,8	-	5,9	9,7	-	8,9	(8,1)	9,7
PLAISIR-PNE	PLF	395	550	9,0	-	10,0	(9,8)	9,0	10,2	9,2	9,5	10,2
PONTET	PON	408	790	8,3	-	9,5	(7,0)	8,7	10,1	8,1	8,6	10,1
BIEF POUTOT	POU	370	650	9,5	-	10,0	8,8	9,5	9,6	9,2	9,3	10,0
BIEF ROUGE	ROU	953	1050	7,0	7,3	6,8	-	-	6,9	5,6	6,7	7,3
SARRASINE	SAR	399	640	8,0	-	10,0	-	8,5	9,6	7,4	8,7	10,0
SERRIERE	SER	475	1100	8,6	-	8,8	(3,2)	-	8,7	-	(7,3)	8,8
THEUSSERET	THE	507	1100	(6,3)	-	8,2	(4,7)	-	8,8	-	(7,0)	8,8
TONAILLE	TON	395	520	-	7,8	-	-	-	-	-	-	-
MIN de VAUX	VAU	384	520	-	8,8	10,6	9,4	9,1	10,7	9,0	9,6	10,7
VERNEAU	VER	430	670	8,8	-	10,0	-	9,2	11,0	-	(9,7)	11,0
MOYENNE				8,00	8,26	8,83	8,06	9,08	9,17	8,24	8,47	9,31
ECART-TYPE				1,31	1,06	1,44	1,77	0,75	1,38	1,34	1,21	1,29
FREQUENCE des MAXIMA				0,04	0,05	0,28	0,21	0,04	0,62	0,04	0,00	1,00

() valeurs inutilisées pour les calculs de gradient

Tabl. 33 - TEMPERATURE DE L'EAU DES EMERGENCES AU MOMENT DES PRELEVEMENTS

Le tableau 34 fait apparaître l'expression des gradients thermiques de l'eau des émergences avec ces deux altitudes, pour les sept campagnes de prélèvements, pour la moyenne des températures des campagnes et pour la température maximale observée sur les émergences.

ANNEE		1977			1978	1979	1980	1982	MOYENNE	MAXIMUM
CAMPAGNE		1	2	3	4	6	8	9		
EFFECTIF		23	20	29	23	24	33	24	26	36
\bar{t} °C		8,22	8,26	8,94	8,64	9,08	9,23	8,23	8,62	9,33
σt °C		1,08	1,06	1,41	1,30	0,75	1,37	1,30	1,20	1,29
ALTITUDES MOYENNE (m)	EMERGENCE	552	541	532	553	429	529	481	527	526
	IMPLUVIUM	793	734	769	763	670	775	705	738	775
ECART-TYPE ALTITUDES (m)	EMERGENCE	249	247	245	255	147	233	234	250	226
	IMPLUVIUM	231	234	251	255	167	238	204	225	234
GRADIENT °C/100m	ALTITUDE EMERGENCE	-0,36	-0,35	-0,54	-0,47	-0,39	-0,54	-0,48	-0,45	-0,50
	ALTITUDE IMPLUVIUM	-0,32	-0,37	-0,49	-0,44	-0,33	-0,49	-0,48	-0,49	-0,47
ORDONNEE A L'ORIGINE °C	ALTITUDE EMERGENCE	10,22	10,13	11,84	11,22	10,76	12,09	10,52	10,97	11,97
	ALTITUDE IMPLUVIUM	10,77	10,98	12,67	12,00	11,31	12,99	11,69	12,23	12,95
r	ALTITUDE EMERGENCE	-0,838**	-0,809**	-0,943**	-0,913**	-0,770**	-0,923**	-0,852**	-0,929**	-0,876**
	ALTITUDE EMERGENCE	-0,689	-0,820**	-0,862**	-0,865**	-0,741*	-0,847**	-0,736*	-0,914*	-0,846**

NON SIGNIFICATIF

* SIGNIFICATIF

** HAUTEMENT SIGNIFICATIF

Tabl. 34 - CORRELATIONS ET GRADIENTS TEMPERATURE DE L'EAU - ALTITUDE

On remarquera que toutes les relations température-altitude de l'émergence sont hautement significatives, les relations température-altitude de l'impluvium pouvant être non significatives, significatives ou hautement significatives. La relation est donc meilleure avec l'altitude de l'émergence.

Le meilleur coefficient de corrélation est observé lors de la campagne d'étiage 1977 (fig. 159). Le gradient (-0,54°C/100 m) se situe entre les valeurs du gradient moyen dans l'air pour la région (Jura suisse -0,51 à -0,55°/100 m, Dépt du Jura -0,57 à -0,64°/100 m), (voir tableau 32).

La corrélation est meilleure qu'avec la moyenne des températures des 7 campagnes (fig. 160) ainsi qu'avec la température maximale rencontrée au cours des sept campagnes (fig. 161).

La campagne de février 1977, effectuée en période de fonte de neige généralisée est le seul épisode pendant lequel la corrélation soit meilleure avec l'altitude de l'impluvium qu'avec celle de l'émergence. Ce résultat démontre qu'au cours de cette période, les émergences jurassiennes restituent des eaux en déséquilibre thermique avec l'encaissant, ayant gardé la marque des températures d'infiltration sur l'impluvium. La chimie des eaux de cette campagne confirme cette remarque (voir p. 264).

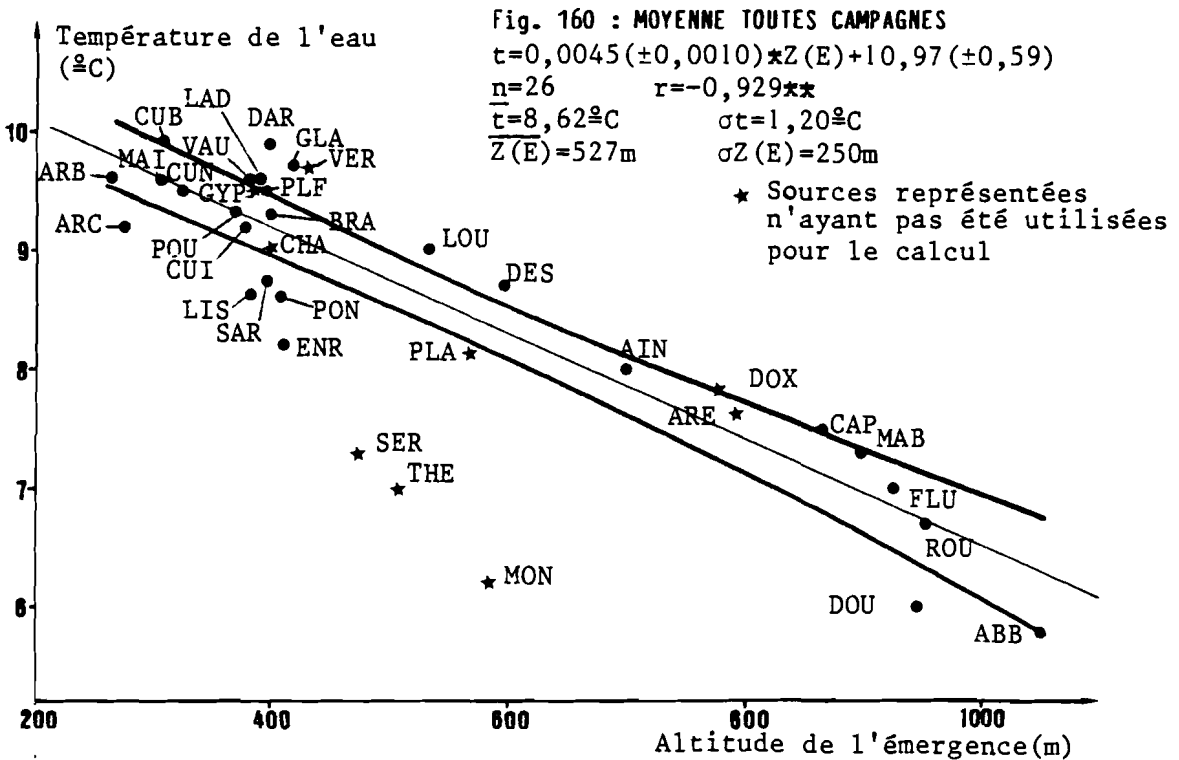
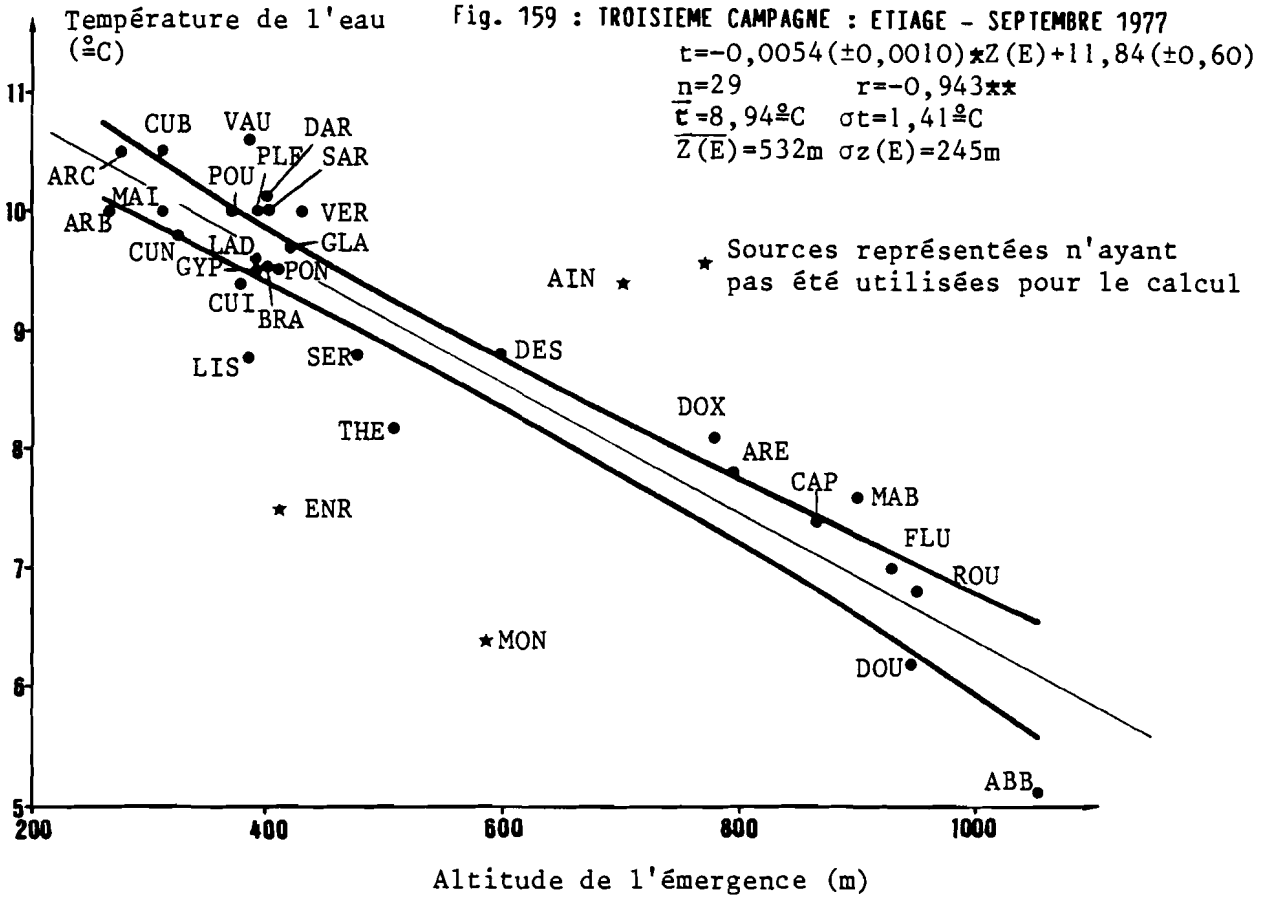


Fig. 159-161 : GRADIENTS THERMIQUES : TEMPERATURE DE L'EAU DES EMERGENCES EN FONCTION DE L'ALTITUDE DE LA SOURCE

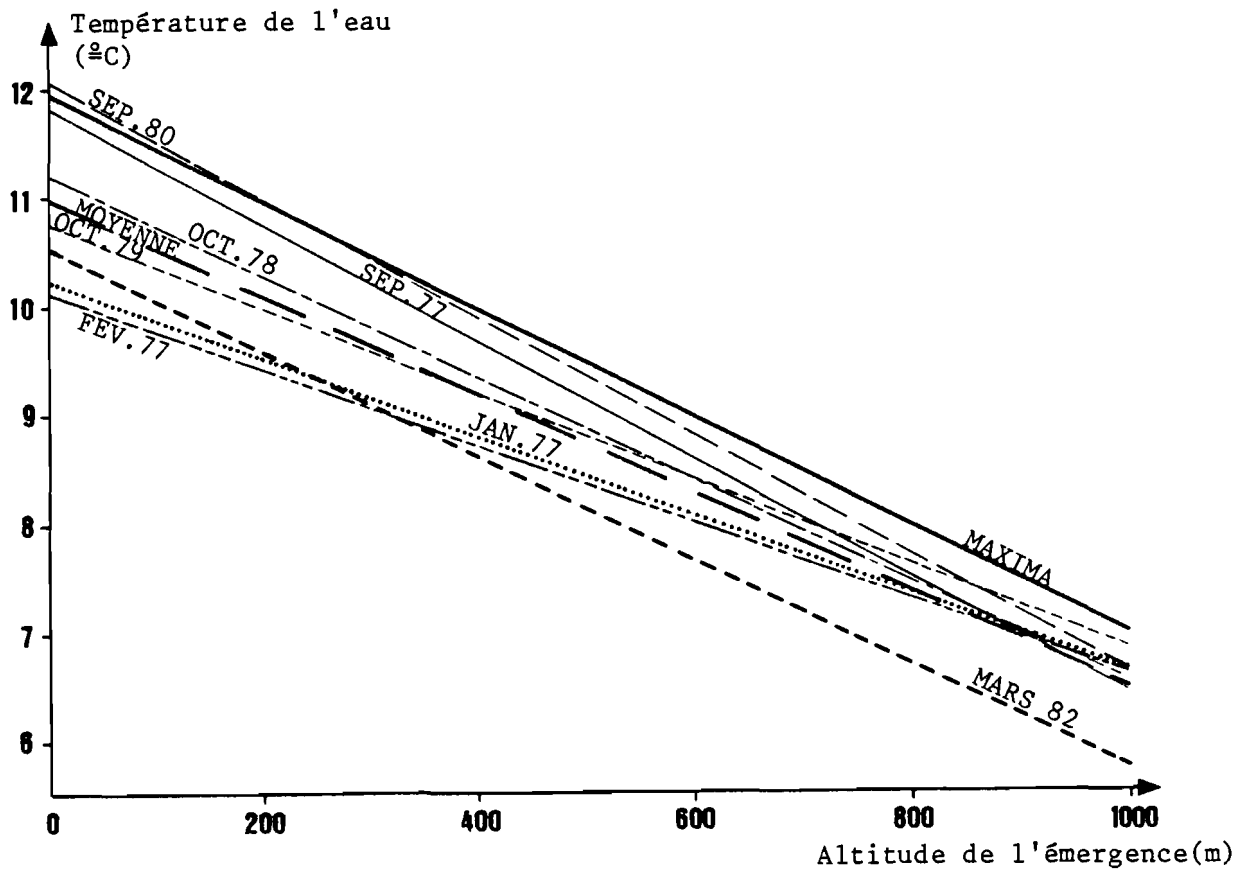
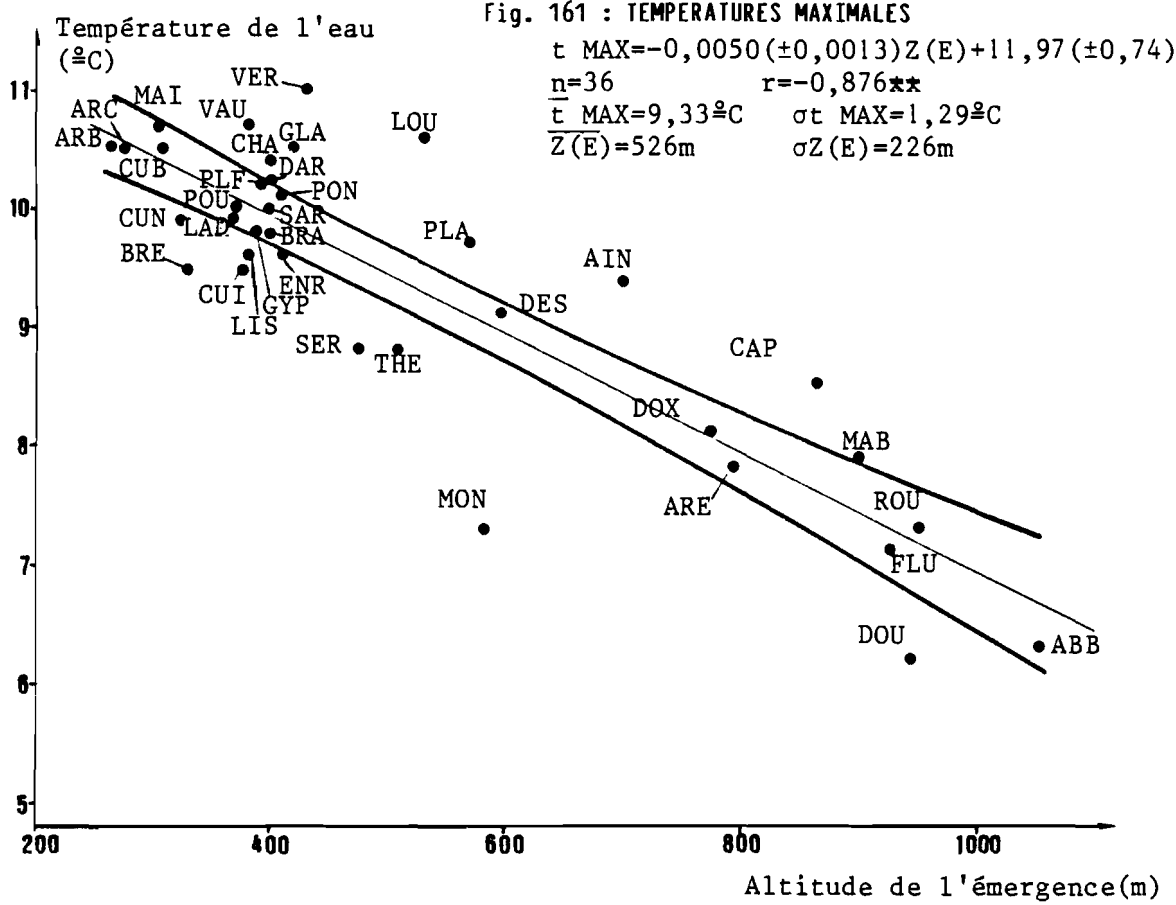


Fig. 162 : GRADIENTS THERMIQUES : 7 CAMPAGNES, MOYENNE ET MAXIMA

C. Représentativité des campagnes instantanées

La comparaison des gradients mis en évidence (fig. 162) révèle un faisceau de droites, qui, à l'exception de la campagne de mars 1982 et des maxima, convergent au niveau de l'altitude 1 000 m : la température des eaux des secteurs élevés est assez constante d'une campagne à l'autre.

L'analyse simultanée des étiages les plus complets (où les mesures sur les mêmes sources sont les plus nombreuses) : septembre 1977, octobre 1978, septembre 1980, avec la température moyenne et la température maximale de ces 3 campagnes, l'altitude de l'émergence et celle de son impluvium a été tentée.

La matrice des coefficients de corrélation (tabl. 35) révèle que seules les campagnes de 1977 et 1980 ainsi que les valeurs maximales sont corrélées de manière significative.

Altitude émergence	1						
Altitude impluvium	+ 0,77 *	1					
Septembre 1977	- 0,80**	- 0,76**	1				
Octobre 1978	- 0,53Δ	- 0,61Δ	+ 0,59Δ	1			
Septembre 1980	- 0,87**	- 0,82**	+ 0,91**	+ 0,62Δ	1		
Moyenne des 3 campagnes	- 0,24Δ	- 0,28Δ	+ 0,37Δ	+ 0,44Δ	+ 0,35Δ	1	
Maximum des 3 campagnes	- 0,86**	- 0,81**	+ 0,94**	+ 0,63Δ	+ 0,98**	+ 0,34Δ	1
	Altitude émergence	Altitude impluvium	Septembre 1977	Octobre 1978	Septembre 1980	Moyenne des 3 campagnes	Maximum des 3 campagnes

n = 24
Δ < 0,695
0,695 < * < 0,760
0,760 < **

Δ non significatif * significatif ** hautement significatif

Tabl. 35 - ETIAGES LES PLUS COMPLETS : MATRICE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION LINEAIRE

La campagne de 1978 et la moyenne des 3 campagnes (influencée par la campagne de 1978) ne sont pas bien corrélées, et la relation avec les altitudes n'est pas significative.

On remarquera que les coefficients de corrélation r sont plus élevés pour les relations température-altitude de l'émergence que pour les relations température-altitude de l'impluvium là où la corrélation est significative, et que c'est l'inverse pour les corrélations non significatives (moyenne et campagne 1978).

Cette matrice nous incite à être prudents dans l'interprétation de la température lors de campagnes instantanées, certaines campagnes ne montrant pas de relation significative.

Ainsi donc il convient de n'exploiter les campagnes instantanées que lorsqu'on peut en comparer plusieurs.

On peut comparer les gradients de température en fonction de l'altitude de l'émergence grâce au paramètre T que l'on confrontera aux valeurs critiques de la distribution de Student.

Ainsi, ayant déterminé les gradients $a(t_{(c)}, Z(E))$, $t_{(c)}$ étant la température de l'eau à la campagne C et Z (E) étant l'altitude de l'émergence, on peut les comparer deux à deux avec :

$$T = \frac{a(t_{(c)}, Z(E)) - a(t_{(c')}, Z(E))}{EA(t_{(c')}, Z(E))}$$

EA (t(C), Z(E)) étant l'écart-type sur le gradient a(t(c), Z(E)).

Le tableau 36 donne les valeurs de T pour les 7 campagnes, la moyenne et le maximum des températures des campagnes.

		GRADIENT EXPLIQUE							HS S NS			Moy.	Max.
		Janv. 77	Févr. 77	Sept. 77	Oct. 78	Oct. 79	Sept. 80	Mars 82					
GRADIENT EXPLICATIF	Janv. 77	0	-0,32**	3,54 Δ	2,00**	0,59**	3,46 Δ	2,18*	3	1	2	1,66**	2,71*
	Févr. 77	0,28**	0	3,36 Δ	2,02**	0,80**	3,29 Δ	2,18*	3	1	2	1,72**	2,64*
	Sept. 77	4,93 Δ	-5,37 Δ	0	-2,14*	-4,10 Δ	-0,11**	-1,88**	2	1	3	-2,61*	-1,15**
	Oct. 78	-2,28*	-2,64*	1,75**	0	-1,60**	1,66**	0,21**	4	2	0	-0,39**	0,80**
	Oct. 79	-0,44**	-0,68**	2,18*	1,05**	0	2,13*	1,18**	4	2	0	0,79**	1,57**
	Sept. 80	-4,41 Δ	-4,82 Δ	0,10**	-1,86**	-3,65 Δ	0	-1,63**	3	0	3	-2,29*	-0,96**
	Mars 82	-1,81**	-2,08*	1,12**	-0,15**	-1,32**	1,06**	0	5	1	0	-0,43**	0,43**
	HS	3	2	3	5	4	3	4	48				
	S	1	2	1	1	0	1	2		16			
	NS	2	2	2	0	2	2	0			20		
MOY.	-2,35*	-2,80*	2,65*	0,48**	-1,51**	2,54*	0,74**				0	1,48**	
MAX.	-2,95 Δ	-3,30 Δ	0,90**	-0,77**	-2,30*	0,82**	-0,57**				-1,14**	0	

** < T 5%

T 5% < * < T 1%

T 1% < Δ

Tabl. 36 - VALEUR DE T POUR LA COMPARAISON DES GRADIENTS THERMIQUES DES DIFFERENTES CAMPAGNES

Remarques :

- les effectifs analysés au cours de ces 9 situations étant inégaux, c'est la valeur la plus restrictive qui a été choisie comme valeur critique de la distribution de Student soit DL = 35, pour le seuil de 5%, T = 2,03 , pour le seuil de 1%, T = 2,72.

- l'explication du gradient de la campagne C' par celui de la campagne C n'est pas équivalente à celle du gradient de la campagne C par celui de la campagne C', à cause du mode de calcul de T faisant intervenir dans le premier cas l'écart-type sur le gradient C (EA(t(c), Z(E))), dans le deuxième cas l'écart-type sur le gradient C' (EA(t(c'), Z(E))) la matrice des valeurs de T n'est donc pas symétrique et pour chaque couple de gradients, il faut consulter deux cases.

L'examen de cette matrice révèle que la plupart des gradients d'une campagne sont explicables par ceux des autres (64 relations au moins significatives contre 20 non significatives). Les campagnes d'étiage se représentent

bien mutuellement, celles d'hiver aussi, mais les gradients d'hiver représentent mal ceux d'été (et réciproquement). La moyenne des campagnes représente bien chacune des campagnes (et réciproquement), en revanche, les maxima représentent mieux les campagnes d'étiage que celles d'hiver (et réciproquement).

De cette comparaison des gradients, il apparaît que dans le Jura la température des émergences à l'étiage est un marqueur représentatif du phénomène de tarissement.

De plus, la superposition d'une composante d'infiltration (campagnes de janvier et février 1977) modifie le gradient en amenant aux émergences des eaux en déséquilibre thermique avec le réservoir.

La bonne représentativité du gradient de janvier par celui de février (et inversement) montre que même quand le gel bloque l'infiltration en surface (janvier), l'étiage apparent inclut l'écoulement d'eaux d'infiltration en mouvement dans les systèmes, sans que le débit paraisse avoir de fortes valeurs.

D. Les émergences particulières

L'examen de la distribution des émergences autour des gradients calculés, sur les figures 159, 160 et 161, révèle le comportement systématique des émergences.

Ainsi, les sources des plateaux externes ont-elles toujours les températures les plus élevées, les sources du Haut-Jura les moins élevées.

Cependant, certaines sources sont systématiquement éloignées de la relation générale : la source de Montant, sortant à une altitude de 600 m au pied du dernier relief oriental du Jura, restitue une eau dont l'équilibre thermique n'est pas réalisé avec l'encaissant, à cause de la localisation en altitude de ses réserves noyées, dans le synclinal de Vuarne (altitude 1 400 m, voir fig. 163 et 164).

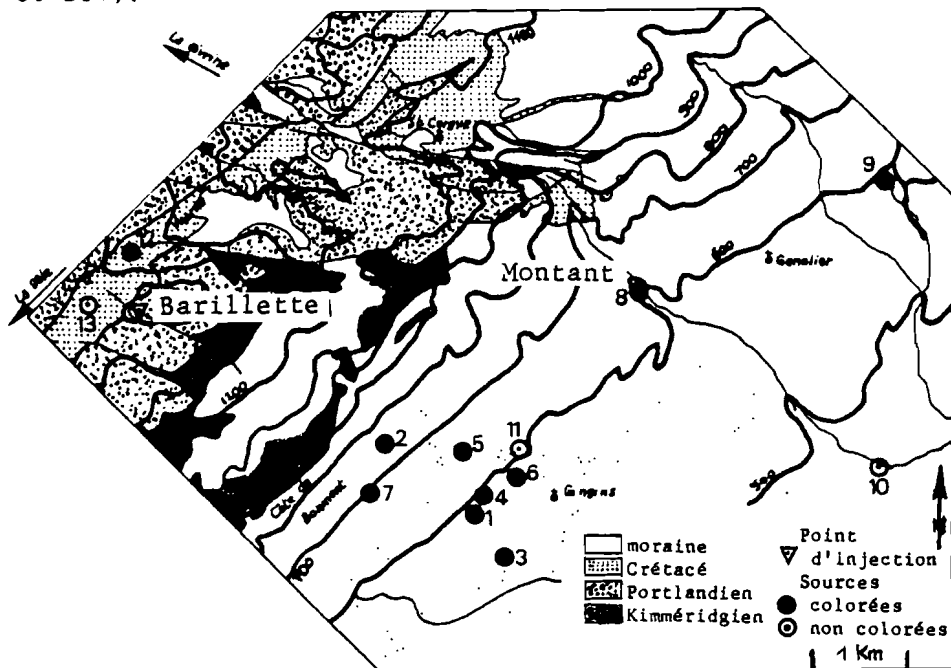


Fig. 163 : GEOLOGIE DU VERSANT SE DE LA DOLE (AUBERT et al 1970)

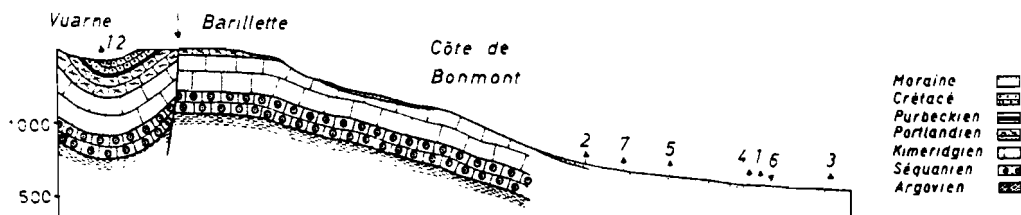


Fig. 164 : COUPE GEOLOGIQUE BARILLETTE - PLAINE SUISSE (AUBERT et al 1970)

Un essai de traçage pratiqué à la Barillette (AUBERT et al., 1970) a été détecté en partie à la source de Montant. En crue comme en tarissement, cette émergence draine des eaux à transit final rapide entre les réserves et la source, qui n'ont pas le temps d'équilibrer leur température avec celle de l'encaissant à 600 m. Les circulations rapides réserve-émergence peuvent donc préserver en partie le marquage froid des eaux pour de telles émergences de pied de relief. La source de l'Enragé, émergence du synclinorium de Grandvaux (pertes du lac de l'Abbaye), sort des calcaires du Jurassique supérieur à une altitude d'au moins 400 m plus basse que les réservoirs karstiques du Crétacé. De fait, cette émergence a souvent une marque thermique plus froide que ne le laisse prévoir son altitude.

Cette préservation (partielle) du caractère thermique du réservoir n'est pas spécifique aux systèmes karstiques, elle a été observée dans les aquifères volcaniques de la chaîne des Puys (Puy de Dôme) : les circulations fissurales des coulées trachyandésitiques de Volvic gardent, malgré la basse altitude des émergences, la marque thermique du lieu de stockage initial de l'eau, dans les cônes scoriacés situés en altitude (BARBAUD, 1983).

La galerie de Volvic capte une eau dont la température avoisine en permanence 8,7°C, alors que la température moyenne interannuelle de l'air à la station est d'environ 10,6°C.

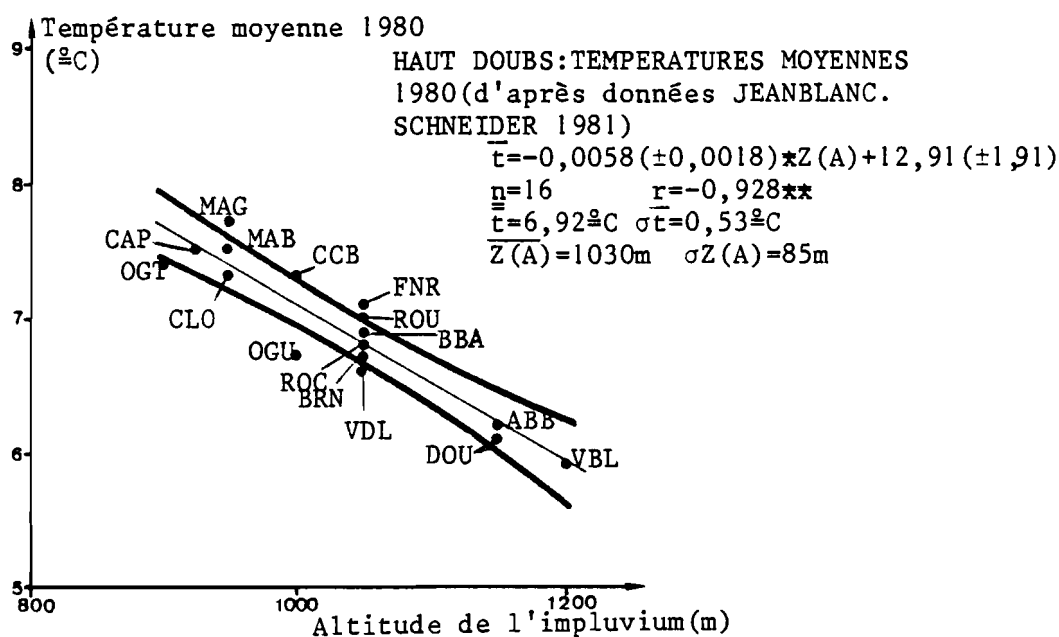


Fig. 165 : GRADIENT THERMIQUE MOYEN HAUT-DOUBS

Dans les systèmes karstiques, comme dans les systèmes volcaniques, un transit final rapide peut donc préserver en partie le traçage thermique de la réserve, on peut ainsi observer à l'émergence un régime permanent au point de vue hydrodynamique, non en équilibre thermique avec la matrice.

L'étude des gradients a été tentée dans le Haut-Doubs, une région restreinte à des conditions hydrogéologiques moins variées que l'ensemble du Jura (JEANBLANC et SCHNEIDER, 1981).

Dans le Haut-Doubs, comme dans l'ensemble du Jura, la corrélation température-altitude de l'impluvium est meilleure que la corrélation température-altitude de l'émergence sur les températures moyennes (fig. 165).

Pour chaque campagne (tabl. 37), on remarque que toutes les relations sont non significatives (gradients) mais que parfois la corrélation est meilleure avec l'altitude de l'émergence, parfois avec celle de l'impluvium.

Altitude Emergence	1						
Altitude impluvium	0,687	1					
Oct. 78	-0,843	-0,679	1				
Juil. 79	-0,752	-0,702	0,947 *	1			
Oct. 79	-0,526	-0,622	0,546	0,545	1		
Sep. 80	-0,718	-0,520	0,944 *	0,955 **	0,516	1	
Mars 82	-0,505	-0,669	0,640	0,643	0,209	0,581	1
Altitude Emergence Z(E)	Altitude impluvium Z(A)		Oct. 78	Juil. 79	Oct. 79	Sep. 80	Mars 82

* significatif ** hautement significatif

Tabl. 37 - HAUT-DOUBS - CORRELATION TEMPERATURE DE L'EAU - ALTITUDES (9 SOURCES, 5 CAMPAGNES)

La corrélation entre les températures d'octobre 1978, juillet 1979, septembre 1980 est significative, ce qui veut dire que les anomalies de gradient sont reproductibles d'une campagne à l'autre, alors que les gradients ne le sont pas.

Cette étude corrobore celle à l'échelle du Jura, certains systèmes ayant un comportement particulier au cours de tous les épisodes, dû vraisemblablement aux modalités du transit dans le système.

Le cas des trop-pleins des émergences pérennes est également intéressant : lors du prélèvement de la crue de fonte des neiges de février 1977, la source de Vaux (altitude 384 m) débite une eau à 8,75°C, sur le gradient de la campagne, alors que son trop-plein la Tonaille (altitude 395 m) écoule une eau à 7,75°C.

Les deux sources écoulent les eaux du bassin fermé d'Orgelet (AUBERT, 1972), l'émergence pérenne est issue du Dogger et le griffon temporaire du Malm. En revanche, la Sarrasine, trop-plein du Lison, n'a été observée que deux fois avec une température significativement différente de celle du Lison (septembre 1977, mars 1982), mais les températures n'ont pas été mesurées en crue.

E. Amplitude de la variation thermique de l'eau des émergences

L'écart entre la valeur la plus forte et la valeur la plus faible de la température de l'eau des émergences observées au cours des 7 campagnes instantanées est reporté sur la figure 166. On met ainsi en évidence les systèmes amortissant bien la thermique de l'entrée et ceux qui véhiculent rapidement les variations de température de l'impluvium vers l'émergence, ou éventuellement dont les réserves peuvent subir l'influence thermique climatique.

En fait, les systèmes étudiés ont tous des réserves peu accessibles aux cycles thermiques saisonniers : les zones noyées des aquifères étudiés sont situées à plusieurs centaines de mètres sous des séries calcaires.

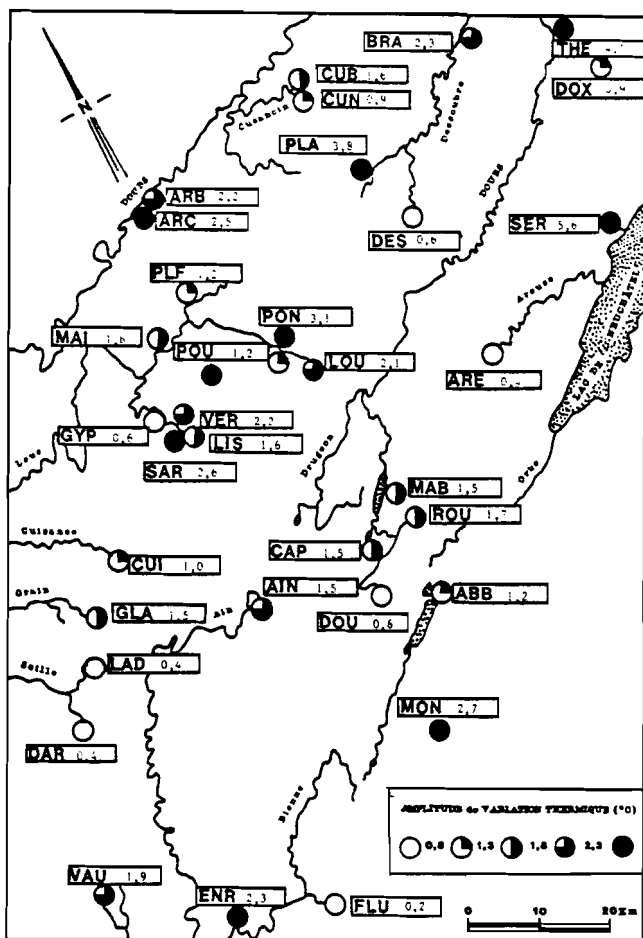


Fig. 166 : AMPLITUDE DE LA VARIATION THERMIQUE OBSERVEE AU COURS DES 7 CAMPAGNES (VALEUR MAXI - VALEUR MINI)

pour la signification des codes, voir tableau 33, page 196

La variabilité de la température des émergences traduit donc essentiellement, dans le Jura, l'importance des drains dans les systèmes : parmi les systèmes à grande variation, on retrouve les grands réseaux spéléologiques de Franche-Comté, en particulier ceux qui sont pénétrables à la fois par l'amont et l'aval : Verneau, Enragé, Chauveroches, on retrouve également les systèmes connus par les essais de traçage et l'hydrocinématique.

Ainsi, la Sarrasine, trop-plein du système du Lison (TISSOT et TRESSE, 1978) varie plus que ce dernier.

D'une manière générale, les systèmes dont les circulations (reconnues par essais de traçage) convergent vers l'émergence (Vaux, Lison, Verneau, Loue, Arcier) ont une grande amplitude de variation thermique, alors que ceux où les circulations divergent, diffusent de l'amont vers l'aval (Cuisance, Glantine, Ladoye, Dard) en ont une faible.

Les systèmes à infiltration diffuse, sans écoulement superficiel connu (Doubs, Abbaye, Areuse, Plaisir-Fontaine, Gyps) ont également une faible amplitude de variation, malgré leurs dénivelées impluvium-émergence parfois importantes (Doubs, Abbaye, Areuse).

La variabilité thermique traduit donc la facilité de drainage (dimension et continuité des drains) de l'épikarst à l'émergence.

F. Conclusion

A l'échelle de la chaîne karstique du Jura, la température de l'eau est une fonction linéaire de l'altitude des émergences.

Le gradient, en régime permanent (tarissement), est compris entre $-0,36$ et $-0,54^{\circ}\text{C}$ par 100 m de dénivelée (valeurs encadrant le gradient thermique de l'air dans le même secteur).

Certains points, en particulier les sources de pied de relief, peuvent écouler des eaux dont le stockage se situait à une altitude supérieure à celle de l'émergence : il s'agit donc d'un régime thermique "stable" dans son déséquilibre (régime transitoire stable).

En régime transitoire (crues), les trop-pleins peuvent privilégier l'observation des eaux d'infiltration par rapport aux émergences pérennes.

L'apport des eaux d'infiltration, lors des crues, sur les exutoires pérennes se traduit par une perturbation plus ou moins visible de la température, en fonction du degré d'organisation du réseau de drains du système.

XII.3.3. Teneur en oxygène 18 de l'eau des émergences

L'oxygène 18 est un isotope stable thermodépendant, c'est-à-dire que son abondance relative est fonction de la température de condensation des gouttelettes dans un nuage. Il s'ensuit donc un traçage spatial (avec la latitude et avec l'altitude) et temporel (avec la saison et en fonction des paléoclimats) des eaux. A l'échelle du Jura seuls les paramètres altitude et saison peuvent être mis en évidence.

Malgré les faibles dénivelées topographiques relevées dans le Jura, l'oxygène 18 a permis de localiser les aires de recharge des aquifères karstiques (voir XII.3.3.C.).

A. Distribution des teneurs au cours des campagnes d'instantanés

Le tableau 38 et les histogrammes de la figure 167 montrent la répartition des teneurs des diverses sources au cours des 4 campagnes d'instantanés.

Les valeurs mesurées vont de $-13,5$ à $-9 \delta\%$ au cours des 4 épisodes.

Les campagnes d'étiage (septembre 1977 et octobre 1978) sont globalement moins négatives que les campagnes d'hiver 1977 ; la campagne de crue de fonte de neige est la plus négative, celle de janvier 1977 est intermédiaire.

L'étalement des valeurs pour chaque campagne (écart-type sur le tableau) est minimal en étiage d'été, maximal en crue de fonte de neige et intermédiaire en basses eaux d'hiver.

SOURCES	CODE	ALTITUDE		1977				MOYENNE
		EMERG.	DPL.	JANV 1	FEV 2	SEPT 3	OCTO 4	
ABBAYE.....	ABB	1050	1150	-11,82	-13,2	-11,14	-10,99	-11,78
ALN.....	ALN	700	910	.	-10,8	-9,99	-9,53	-10,11
MERCELET.....	ARB	266	400	.	-9,7	-9,23	-9,11	-9,35
ARCIER.....	ARC	275	400	-9,86	-10,1	-9,03	-9,24	-9,56
AREUSE.....	ARE	795	1100	-11,36	-12,0	-10,74	-10,68	-11,20
SIEF DE BRANS.....	BRA	400	770	-10,44	-11,4	-10,33	-10,28	-10,62
PUITS DE LA BRENE.....	BRE	330	560	-10,42	-11,0	.	.	.
CAPUCIN.....	CAP	865	925	-10,68	-11,7	-10,22	-10,45	-10,76
CHAUVEROCHE.....	CRA	400	660	-10,15	-10,8	.	-9,26	-10,07
CUISARCIN E.....	CUR	310	600	-10,3	-10,8	-9,64	-9,36	-10,03
CUISARCIN.....	CUI	378	570	-10,45	-10,7	-9,82	-9,83	-10,20
CUISARCIN N.....	CUN	325	600	.	-10,7	-9,70	-9,66	-10,02
DARD.....	DAR	400	600	-10,24	-10,9	-9,70	-9,39	-10,06
DESSOURNE.....	DES	598	770	-10,82	-11,0	-9,95	-9,92	-10,42
DOUBS.....	DOU	945	1150	-11,22	-13,4	-10,46	-10,27	-11,34
DOUX.....	DOX	776	1150	-12,13	-12,2	-11,07	-10,69	-11,52
ENRAGE.....	ENR	410	870	-11,79	-11,7	-9,80	-9,14	-10,61
FLORIN.....	FLD	926	1160	-12,12	-12,3	-9,83	-10,02	-11,07
GLANTIME.....	GLA	420	560	-10,57	-10,7	-9,83	-9,70	-10,22
GYS.....	GYP	390	390	-9,93	-11,0	-10,09	-9,83	-10,21
LADOTE (SEILLE).....	LAD	390	580	.	-10,3	-9,87	-9,58	-9,92
LISON.....	LIS	382	650	-10,62	-11,1	-9,46	-9,63	-10,20
LORE.....	LOU	535	820	-10,10	-12,7	-9,89	-10,00	-10,67
SOURCE BLEUE N.....	MAB	900	950	-10,91	-12,0	-10,76	-10,72	-11,10
MAIRE.....	MAI	306	560	-10,25	-10,6	-9,90	-9,73	-10,17
MONTAIG.....	NLM	585	1000	-10,27	-12,8	-10,57	-10,79	-11,11
PLADIMONT.....	PLA	570	770	.	-11,3	.	-9,72	.
PLAISIR-FR.....	PLP	395	550	-9,91	-10,2	-9,64	-9,43	-9,85
PONTET.....	POB	408	790	-10,43	-11,6	-9,60	-9,83	-10,37
SEIN POUTOT.....	POU	370	650	-10,3	-11,2	-10,20	-9,70	-10,35
SEIN BOUC.....	ROU	953	1050	-11,51	-11,7	-10,79	.	-11,33
SARRASIN.....	SAR	399	640	-10,34	-11,5	-9,63	-9,43	-10,23
SERRAIN.....	SER	475	1100	-10,43	-11,9	-10,93	-10,99	-11,06
THOUSSENY.....	THE	507	1100	-11,44	-11,2	-10,62	-10,56	-10,96
TOMAILLE.....	TOM	395	520	.	-10,7	.	.	.
NIN DE VAUX.....	VAU	384	520	-10,08	-10,5	-9,30	-9,39	-9,82
VERMAG.....	VER	430	670	-10,24	-10,9	-9,83	-9,83	-10,20
			MOYENNE	-10,64	-11,30	-10,05	-9,91	-10,50
			SCARY-TYPE	0,64	0,86	0,53	0,54	0,58

Tabl. 38 - TENEUR EN OXYGENE 18
 DES SOURCES JURASSIENNES

Ces observations démontrent que la recharge de la matrice capacitive du système, responsable de la qualité isotopique des écoulements d'étiage, ne s'opère pas uniquement à partir des eaux très appauvries de l'hiver.

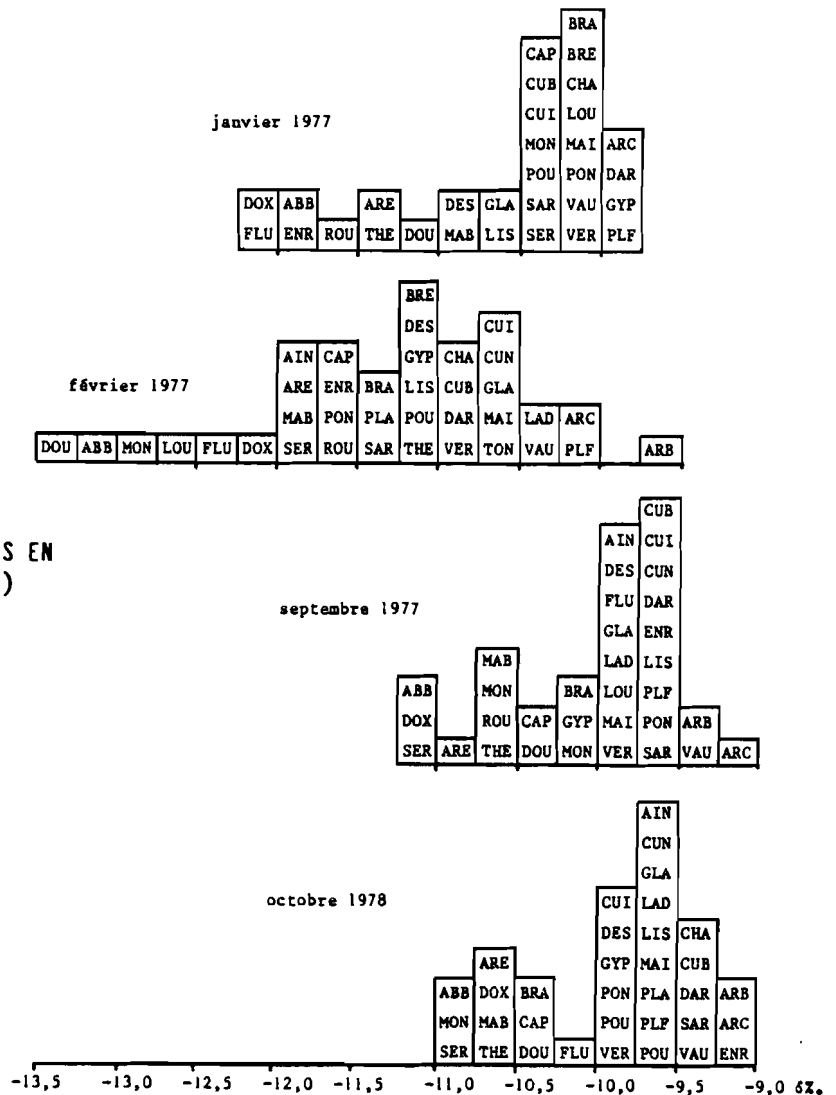


Fig. 167 : HISTOGRAMMES DES TENEURS EN OXYGENE 18 (4 CAMPAGNES)

pour la signification des codes, voir tableau 38

De plus, la mobilité systématique des points échantillonnés vers des valeurs plus négatives en crue de fonte de neige atteste que l'ensemble du Jura est affecté par le transit des eaux d'infiltration des impluviums vers les émergences, qu'aucun système ne filtre totalement l'information isotopique de l'entrée.

La position intermédiaire de la campagne de basses eaux d'hiver entre les tarissements *sensu stricto* et la crue montre que l'ensemble des émergences jurassiennes garde la mémoire d'épisodes de recharge plus négatifs (plus froids) que la recharge moyenne de la matrice (marque des eaux d'étiage).

La température nous ayant démontré que ces eaux étaient en déséquilibre thermique avec le réservoir, nous pouvons confirmer avec l'oxygène 18 la permanence d'un transit d'eau d'infiltration dans le système, malgré le gel qui bloque l'infiltration en surface.

La position des émergences au sein des campagnes (fig. 167) oppose les sources à valeur peu négative du δ (par exemple la source d'Arcier) qui varie peu d'une campagne à l'autre (même en crue de fonte de neige), aux sources à δ très négatif (par exemple la source du Doubs) variant de 3% environ.

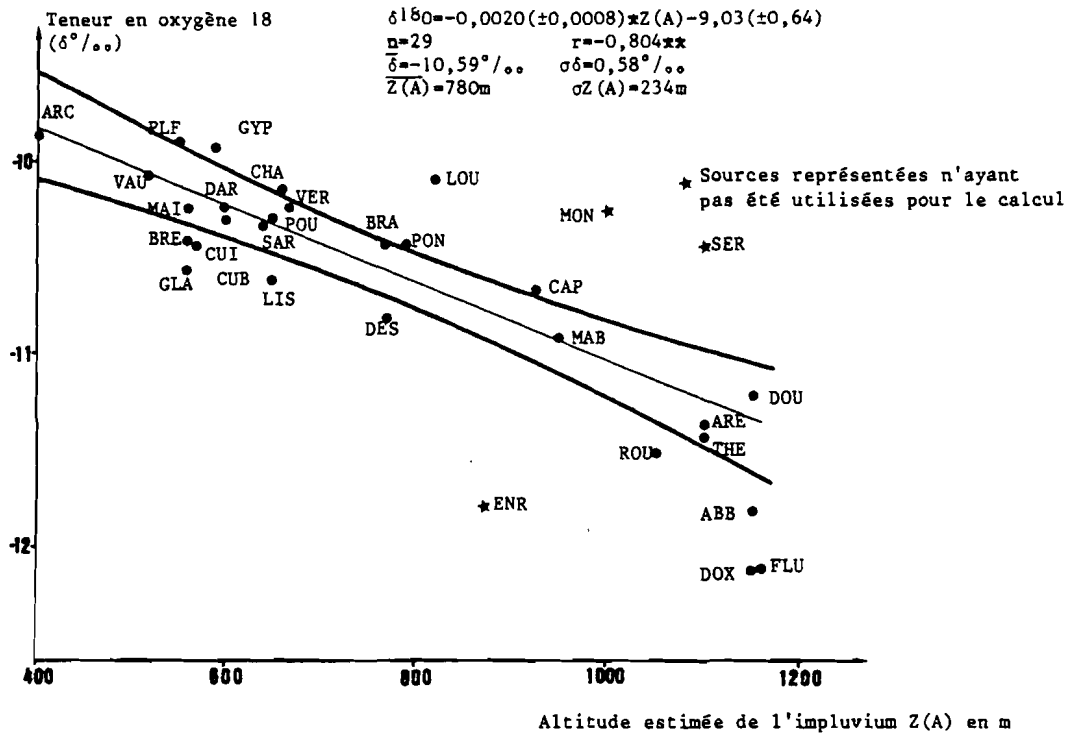


Fig. 168 : PREMIERE CAMPAGNE : ETIAGE - JANVIER 1977

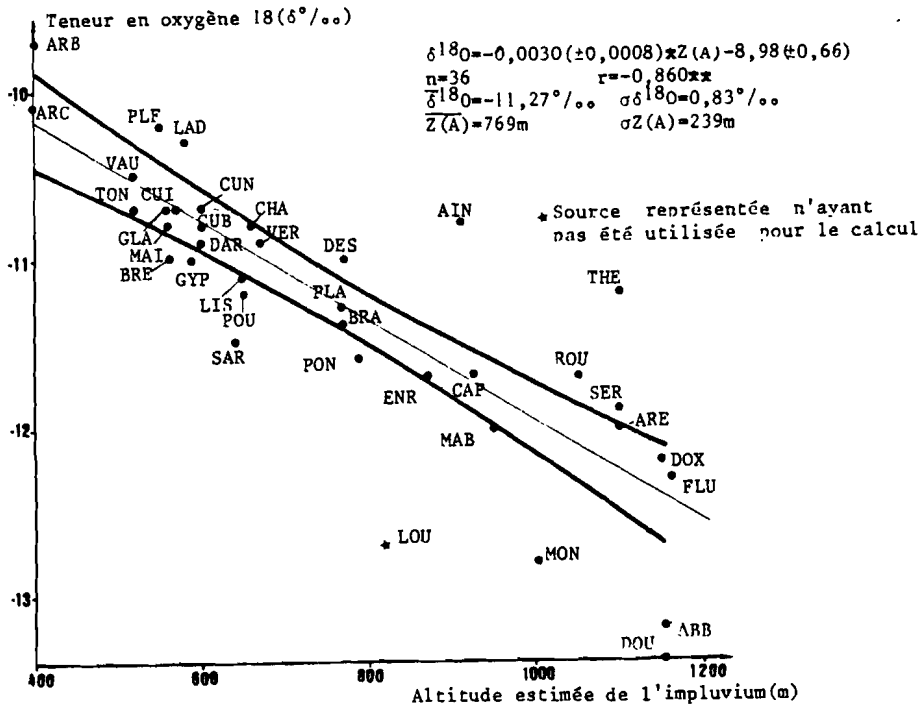


Fig. 169 : DEUXIEME CAMPAGNE : CRUE DE FONTE DE NEIGE - FEVRIER 1977

Fig. 168 -169 : GRADIENTS D'OXYGENE 18 AVEC L'ALITUDE MOYENNE ESTIMEE DES IMPLUVIUMS

Cette différence est due au rôle tampon des réserves qui, dans le cas des systèmes des plateaux amortissent l'amplitude du signal d'entrée, alors que dans les aquifères à fort gradient de la Haute-Chaine, ils filtrent mal l'information-entrée. Le filtrage des pics négatifs de l'entrée est donc le fait d'un double processus : faiblesse du réseau de drainage et importance du pouvoir tampon des réserves.

B. Comparaison des gradients

Le tableau 39 (corrélations sur les effectifs totaux des campagnes) et les deux premières colonnes du tableau 40 (corrélations sur les individus communs aux quatre campagnes), ainsi que les figures 168 à 172 montrent les relations existant entre le δ oxygène 18 et les altitudes de l'émergence et de l'impluvium.

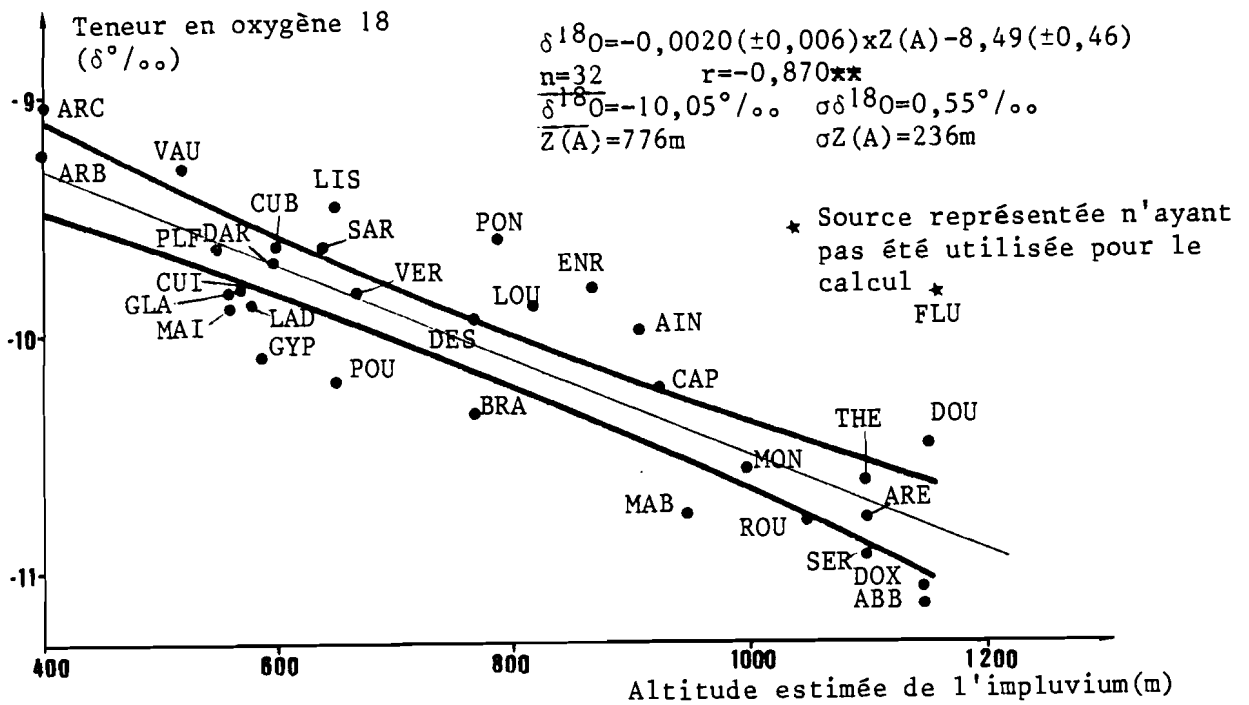
ANNEE		1977			1978	MOYENNE
CAMPAGNE		JANVIER 1	FEVRIER 2	SEPTEMBRE 3	OCTOBRE 4	
EFFECTIF n		29	36	32	34	34
$\bar{\delta}$ ‰		-10,59	-11,27	-10,05	-9,91	-10,48
$\sigma\delta$ ‰		0,58	0,83	0,55	0,54	0,59
ALTITUDES MOYENNES m	EMERGENCE	535	522	523	520	531
	IMPLUVIUM	780	769	776	776	784
ECART-TYPE ALTITUDES m	EMERGENCE	235	227	225	217	230
	IMPLUVIUM	234	239	236	235	239
GRADIENT δ ‰/100m	EMERGENCE	-0,20	-0,28	-0,19	-0,17	-0,21
	IMPLUVIUM	-0,20	-0,30	-0,20	-0,18	-0,23
ORDONNEE A L'ORIGINE δ ‰	EMERGENCE	-9,51	-9,80	-9,08	-9,01	-9,36
	IMPLUVIUM	-9,03	-8,98	-8,49	-8,51	-8,69
r	EMERGENCE	-0,815***	-0,771***	-0,760***	-0,687***	-0,832***
	IMPLUVIUM	-0,804***	-0,860***	-0,870***	-0,776***	-0,934***

*** HAUTEMENT SIGNIFICATIF

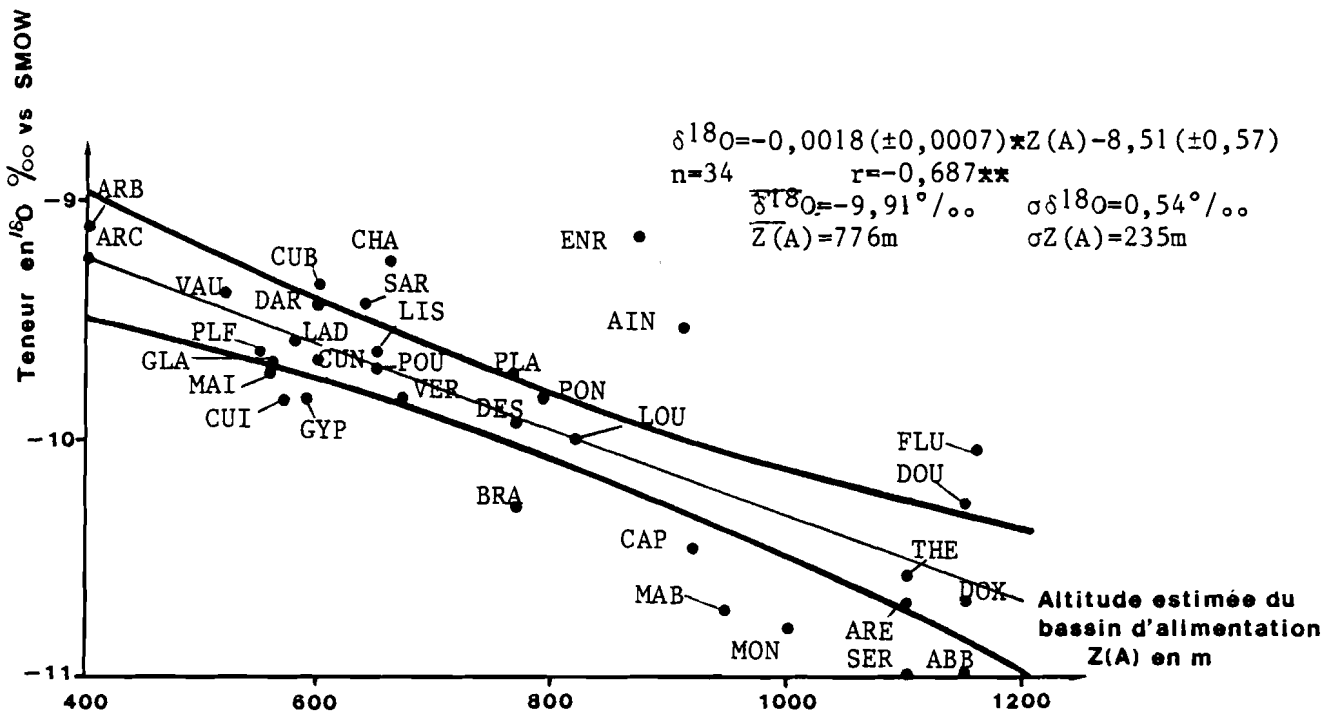
Tabl. 39 - CORRELATIONS OXYGENE 18 - ALTITUDES - EFFECTIFS TOTAUX QUATRE CAMPAGNES

Sur les effectifs totaux, toutes sont hautement significatives, et à l'exception de la campagne de janvier, toutes sont meilleures avec l'altitude estimée de l'impluvium qu'avec l'altitude de l'émergence.

Sur les individus communs aux quatre campagnes et sur la moyenne des valeurs,



▲ Fig. 170 : TROISIEME CAMPAGNE : ETIAGE - SEPTEMBRE 1977



▲ Fig. 171 : QUATRIEME CAMPAGNE : ETIAGE - OCTOBRE 1978

Fig. 170-172 : GRADIENTS D'OXYGENE 18 AVEC L'ALTITUDE MOYENNE ESTIMEE DES IMPLUVIUMS

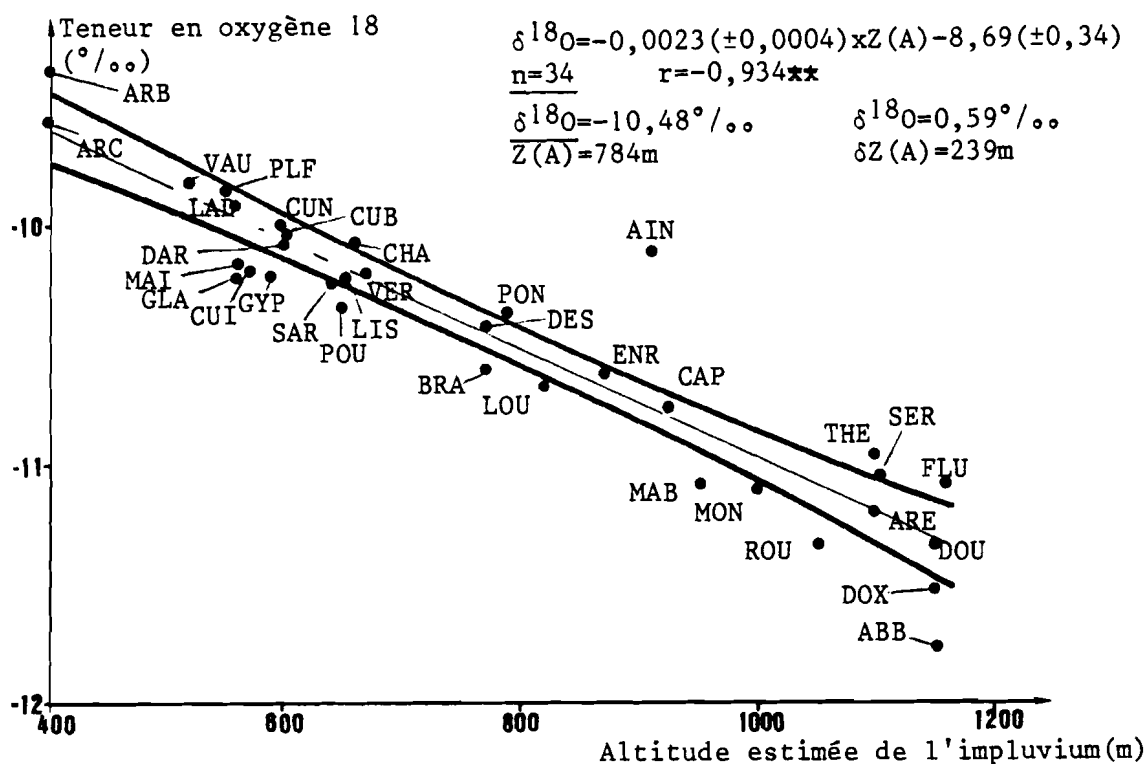


Fig. 172 : MOYENNE 4 CAMPAGNES

toutes les relations sont aussi hautement significatives et les valeurs absolues des coefficients de corrélation sont plus élevées pour les relations avec l'altitude de l'impluvium que celles en fonction de l'altitude de l'émergence, ce qui peut être un guide à la détermination des aires de recharge des systèmes peu connus (voir XII.3.3.C.).

En effet, le rapport isotopique de l'oxygène 18 de l'eau de l'exutoire est directement hérité de celui de la pluie efficace sur le bassin d'alimentation, qui, de par la thermodépendance est lui-même fonction de l'altitude moyenne du bassin hydrogéologique.

Sur le tableau 39, les altitudes moyennes et écarts-types sur les altitudes sont destinés à faire apparaître la représentativité des différentes campagnes, les effectifs n'étant pas égaux : malgré le nombre différent d'individus, les moyennes sont voisines et les écarts-types très voisins, les campagnes échantillonnant donc les mêmes zones orographiques.

Les gradients observés sont faibles et très voisins pour les campagnes d'été et la moyenne (-0,18 à -0,216 ‰. par 100 m de dénivelée), le gradient de fonte de neige est maximal (-0,30 ‰./100 m). Ces gradients sont comparables à ceux des pluies dans les régions voisines (tabl. 40).

Les ordonnées à l'origine, représentant le $\delta^{18}O$ ramené au niveau de la mer sont assez voisines en été et en moyenne (-8,49 et -8,69‰.). En hiver, cette valeur est proche de -9 ‰.

La teneur des eaux de l'été est essentiellement celle de la zone noyée, alors que celle des eaux de la crue est issue d'un mélange imparfait entre ces eaux de réserve et des eaux d'infiltration directe ou retardée.

Pays	Région - Massif	Différence d'altitude	Gradient ($\delta/100$ m)	Durée de l'étude	Référence - Auteur
FRANCE	Préalpes du Chablais	930 - 385 = 545	0,32	X 1965 + XII 1968	BLAVOUX B. (1977)
		800 - 385 = 415	0,27	VI 1969 + X 1970	
	Massif du Mont-Blanc	3900 - 2200 = 1700	0,50 \pm 0,12 ^x *	chute de neige	MOSER et al. (1970)
	Pyrénées centrales	1400 - 845 = 595	0,30 ^x	1970-1971	BLAVOUX et al. (1973) EBERENTZ (1975) PUYOO (1976)
1250 - 650 = 600		0,29	été 1974		
900 - 500 = 400		0,18	XII 1973 + XI 1974		
SUISSE	ALPES - Vallée de l'Aar	1070 - 600 = 470	0,37	1967-1968	SIEGENTHALER et al. (1970)
	JURA - Mont-Soleil	1183 - 692 = 491	0,20	1967-1968	
ITALIE	versant Thyrrhénien	1450 - mer = 1450	0,34	XI 1971 + X 1972	ZUPPI, LETOLLE,
	LATIUM		0,28		
	versant Adriatique				

Tabl. 40 - GRADIENT D'OXYGENE 18 DANS QUELQUES REGIONS (BLAVOUX 1978)

La zone noyée, grâce à sa matrice capacitive, est un réservoir rechargé par diverses marques isotopiques, à l'échelle pluriannuelle. Sa teneur est donc statistiquement une teneur moyenne, et par conséquent les gradients mesurés à l'étiage sont des gradients moyens.

En revanche, les gradients mesurés en crue incluent pro-parte des teneurs isotopiques provenant de la pluie ayant engendré la crue, les gradients mesurés en crue sont donc influencés par les variations saisonnières des teneurs des averses (également par leurs variations aléatoires).

Cependant, le fait que les crues mobilisent aussi pro-parte les eaux stockées dans le système, amortit les variations des gradients saisonniers.

Sur la figure 173, on note que l'écartement maximal des gradients se situe en altitude.

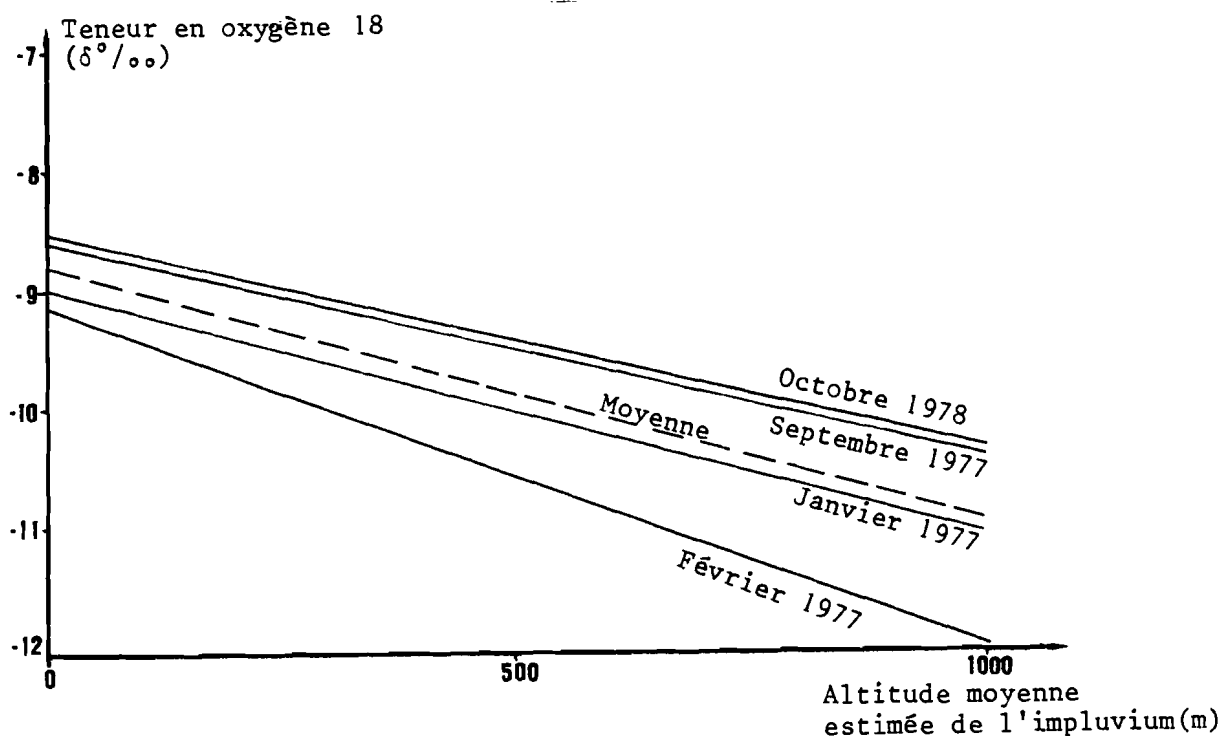


Fig. 173 : GRADIENTS D'OXYGENE 18, 28 SOURCES COMMUNES AUX 4 CAMPAGNES + MOYENNE

A l'effet climatique se superpose, dans la province hydrogéologique jurassienne, la différence de comportement hydrocinématique des aquifères : les aquifères de la Haute-Chaine plissée présentent des réserves géométriquement restreintes par le rayon de courbure des structures plissées et des drains plus développés, grâce aux gradients structuraux plus accusés. Ces systèmes filtrent mal l'information-entrée plus négative l'hiver.

Les aquifères des plateaux externes, grâce aux structures à grand rayon de courbure et parfois à la moins bonne organisation de leurs réseau de drainage (importance des diffluences) tamponnent les impulsions négatives d'hiver.

De ce fait, les ordonnées à l'origine des relations oxygène 18 - altitude des impluviums sont très voisines pour toutes les campagnes.

La position relative de l'ensemble des campagnes (fig. 173) rappelle que les épisodes d'été sont moins négatifs que ceux d'hiver.

La position du gradient de janvier peut être interprétée soit comme une restitution d'eaux d'infiltration en mouvement dans le système (alors que le gel bloquait toute nouvelle entrée en surface), soit comme la mémoire d'infiltration d'eau négative en hiver, ayant rechargé le pourtour accessible des blocs capacitifs.

La campagne de janvier restitue donc soit de l'infiltration retardée, soit de l'eau de réserve marquée par les précédents épisodes de recharge.

C. Identification des bassins d'alimentation à l'aide de l'oxygène 18

L'examen des relations teneur en oxygène 18-altitude de l'impluvium (fig. 168 à 172) autorise la distinction entre des ensembles hydrogéologiques jusqu' alors confondus (BLAVOUX et al., 1979 ; MUDRY, 1981).

Ainsi, sur toutes les représentations graphiques, la source du Maine (MAI) a une teneur significativement plus basse que la source d'Arcier (ARC), ce qui confirme la participation importante à son écoulement d'eaux précipitées sur le 2ème plateau jurassien.

Cette observation répétée confirme la réalité d'une circulation d'eau entre le bassin fermé des Seignes de Passonfontaine et la source du Maine (NUFFER, 1968).

Le puits de la Brème (BRE), émergence temporaire fonctionnant en perte à l'étiage, est un regard sur les circulations reliant les plateaux à la source du Maine. Lorsqu'il est émissif, il exhale une eau systématiquement plus négative que celle de l'émergence pérenne.

La Tonaille (TON), trop-plein du système de Vaux (VAU) montre le même comportement que le puits de la Brème, et le trop-plein de la Sarrasine (SAR) a une teneur significativement plus basse que l'émergence pérenne du Lison (LIS).

Malheureusement, ces trop-pleins ont été prélevés peu de fois car ils ne fonctionnent qu'en hautes eaux.

Ces trois exemples démontrent l'existence d'un "effet trop-plein" : les trop-pleins évacuent une plus grande proportion d'eau d'infiltration que les émergences pérennes plus marquées par la participation à l'écoulement des réserves noyées. L'oxygène 18 confirme les résultats de la température.

La comparaison des teneurs du Lison et de la Sarrasine montre, malgré la liaison hydrodynamique entre les deux émergences, que la Sarrasine peut n'être le trop-plein que de l'un des sous-systèmes qui émergent au Lison : les plongées spéléologiques ont mis en évidence plusieurs galeries aboutissant à la vasque du Lison.

Ce résultat confirme les conclusions de TISSOT et TRESSE (1978). Il est intéressant de constater que, sur la moyenne des 4 campagnes (fig. 172), le Lison et la Sarrasine sont très voisins, ce qui montre que la moyenne des valeurs du trop-plein se rapproche de la valeur moyenne des réserves, c'est-à-dire que le réservoir noyé intègre les variations des différentes recharges par mélange.

A l'opposé des systèmes à contexte voisin et à réponses différentes, d'autres montrent des similitudes de teneurs traduisant des altitudes de recharge voisines et également un comportement hydrocinématique identique : c'est le cas des émergences de la Cuisance et de la Glantine (CUI et GLA) ou des sources Bleue et Noire du Cusancin (CUB et CUN).

Une attention toute particulière doit être portée aux systèmes éloignés de la relation générale, certains présentant systématiquement cette anomalie.

La source du Flumen (FLU) montre, en étiage d'automne (1977 et 1978) une teneur moins négative que ne le laisse prévoir le gradient général, due à la prédominance de son alimentation par l'infiltration à l'aval de tourbières enrichissant l'eau en oxygène 18 par évaporation.

La source de l'Enragé (ENR) présente le même phénomène (fig. 170-171). Elle est alimentée non seulement par des tourbières mais encore par l'émissaire du lac de l'Abbaye.

Les phénomènes d'évaporation sur les eaux de surface ou les eaux de tourbières peuvent donc marquer le contenu en isotope stable de l'eau des émergences karstiques, à condition que les réserves noyées soient suffisamment restreintes et que le réseau de drainage soit suffisamment organisé. Des analyses de deutérium permettraient de confirmer ce phénomène.

La source de l'Ain montre une teneur trop élevée pour son impluvium, sans qu'il soit possible de corriger en baisse l'évaluation de l'altitude de son impluvium (le plateau situé à l'Est de l'émergence a une altitude monotone voisine de 1 000 m). Les dépôts fluvioglaciers qui empâtent son impluvium, renferment une nappe superficielle qui peut subir une évaporation. Le comportement du système binaire de la Loue (LOU), normal au cours des étiages, est influencé par la fonte des neiges sur son haut bassin (Haut Doubs), ce qui confirme les données hydrogéologiques.

Les teneurs en oxygène 18 des systèmes karstiques jurassiens sont donc bien en accord avec l'altitude moyenne présumée de leur impluvium, sauf pour les aquifères à réseau de drainage bien développé, fortement influencés par les conditions de leur infiltration.

La mémoire de ces conditions d'infiltration requiert donc l'existence de réserves limitées et d'un réseau de drains bien développé.

Ainsi, l'existence d'un apport massif par un réseau de surface ou d'interfaces particulières avec l'atmosphère, susceptibles de faciliter l'évaporation (surfaces d'eau libre, tourbières, milieux poreux à aquifère superficiel) permettent d'observer des comportements originaux.

D. Représentativité des échantillons et des campagnes

a. Corrélation des teneurs des campagnes

28 échantillons sont communs aux 4 campagnes.

La matrice des coefficients de corrélation (tabl. 41) entre les teneurs en oxygène 18 des 4 campagnes et de la moyenne montre la mauvaise représentativité de la campagne de janvier 1977 dans laquelle persiste une trop forte mémoire des épisodes d'infiltration froide d'hiver.

ALTITUDE EMERGENCE	1							
ALTITUDE IMPLUVIUM	0,84 **	1						
JAN 77	-0,70 *	-0,77 **	1					
FEV 77	-0,78 **	-0,84 **	0,57 Δ	1				
SEP 77	-0,66 *	-0,82 **	0,55 Δ	0,67 *	1			
OCT 78	-0,70 *	-0,83 **	0,43 Δ	0,68 *	0,91 **	1		
MOYENNE	-0,85 **	-0,96 **	0,76 *	0,89 **	0,89 **	0,86 **	1	
	ALTITUDE EMERGENCE	ALTITUDE IMPLUVIUM	JAN 77	FEV 77	SEP 77	OCT 78	MOYENNE	

n = 28, DL = 27

** : HAUTEMENT SIGNIFICATIF

* SIGNIFICATIF

Δ NON SIGNIFICATIF

Tabl. 41 - INDIVIDUS COMMUNS AUX QUATRE CAMPAGNES : COEFFICIENTS DE CORRELATION LINEAIRE

En revanche, la crue de fonte de neige et les deux tarissements sont bien corrélés. La moyenne des valeurs d'oxygène 18 des 4 campagnes est corrélée de manière hautement significative avec les campagnes de février, septembre 1977 et d'octobre 1978, alors que la campagne de basses eaux d'hiver n'a qu'un coefficient significatif.

Si l'on considère que la moyenne des teneurs est une approche statistique de la recharge du système, on doit constater que les campagnes de février et septembre 1977 et celle d'octobre 1978 se représentent bien deux à deux, et qu'à fortiori les deux campagnes d'étiage automnal 1977 et 1978 sont représentatives d'un phénomène spatial. Ce sont d'ailleurs ces deux épisodes qui ont le plus fort coefficient de corrélation (0,91).

La corrélation entre les 52 individus communs de ces 2 campagnes est représentée sur la fig. 174. Cette répartition a deux conséquences :

- la bonne corrélation atteste que les deux campagnes échantillonnent bien le même phénomène spatio-temporel ; le traçage est caractéristique de la zone capacitive des systèmes.

- l'existence d'une ordonnée à l'origine (faible cependant) et d'une pente différente de 1 démontre encore l'importance de la mémoire des systèmes aux phénomènes hydropluviométriques antérieurs : la qualité isotopique des réserves aux deux étiages n'est pas totalement identique.

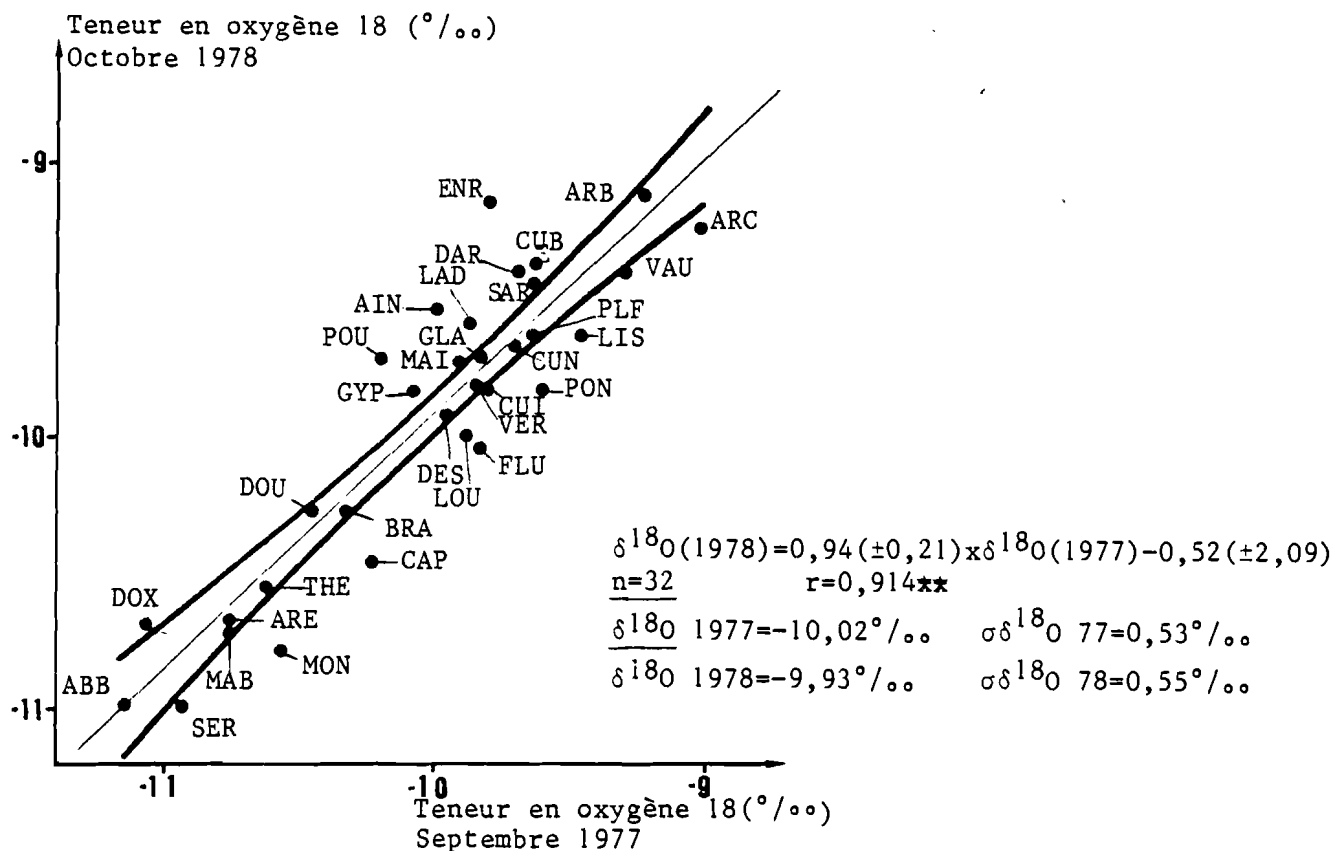


Fig. 174 : CORRELATION ENTRE LES TENEURS EN OXYGENE 18 DES CAMPAGNES D'OCTOBRE 1978 et SEPTEMBRE 1977

	GRADIENT				EXPLICATIF			MOYENNE
	JAN 77	FEV 77	SEP 77	OCT 78	HS	S	NS	
JANVIER 77	0	-2,20 *	1,15 **	0,80 **	2	1	0	-0,57 **
FEVRIER 77	2,45 *	0	4,51 Δ	4,15 Δ	0	1	2	6,27 Δ
SEPT. 77	-0,83 **	-2,95 Δ	0	-0,34 **	2	0	1	-2,90 Δ
OCT. 78	-0,59 **	-2,73 *	0,35 **	0	2	1	0	-2,20 *
HS	2	0	2	2	12			
S	1	2	0	0		6		
NS	0	1	1	1			6	
MOYENNE	0,20 **	-2,02 **	1,43 **	1,08 **				0

n = 28 DL = 26 ** < 2,06 2,06 < * < 2,78 2,78 < Δ

Tabl. 42 - VALEURS DE T POUR LA COMPARAISON DES GRADIENTS D'OXYGENE 18 DES DIFFERENTES CAMPAGNES

b. Représentativité des gradients

Le tableau 42 compare les gradients altimétriques des 4 campagnes, ainsi que celui de la moyenne des valeurs.

Globalement, les trois quarts des relations entre les pentes sont significatives ou hautement significatives (paramètre inférieur au seuil 1% de la distribution de Student), les gradients les plus semblables sont ceux de janvier 1977, de septembre 1977 et d'octobre 1978.

Les gradients de janvier et de février sont significativement semblables.

Le gradient de la moyenne est bien expliqué par ceux des 4 campagnes mais il les explique mal.

c. Conclusion

La corrélation des teneurs dans les différents épisodes montre que la teneur en oxygène 18 d'une campagne d'étiage non influencé (tarissement) est représentative d'une autre.

Les étiages dûs au gel ne peuvent pas être considérés comme des tarissements s.s, ils mobilisent des eaux d'infiltration présentes dans le système bien que le gel bloque toute nouvelle entrée en surface.

La comparaison des gradients montre la bonne représentativité, lors des périodes non influencées d'une campagne par rapport à l'autre, ainsi que la mémoire des épisodes antérieurs. On peut donc considérer l'échantillon de tarissement comme représentatif d'une teneur statistique de la réserve.

E. Amplitude des variations de la teneur en oxygène 18 entre la crue de février et les étiages automnaux

Les teneurs en oxygène 18 lors de la crue de fonte des neiges en février sont sans exception plus faibles que celles des étiages (tabl.38).

La neige surtout et les précipitations de la saison froide en général étant très pauvres en isotopes lourds, cela indique une participation rapide des neiges et pluies hivernales à l'écoulement de février, à la manière d'un ruissellement pour les eaux de surface.

La variabilité de la teneur en oxygène 18 traduit deux phénomènes :

- comme dans le cas de la Loue précédemment évoqué, ce paramètre mesure l'homogénéité de l'infiltration : la variabilité sera d'autant plus faible que les retards à l'infiltration seront semblables sur tout l'impluvium (formations superficielles, gel, épikarst ...).

- la part des mélanges des différentes marques isotopiques au cours des événements hydrométéorologiques : plus le volume des réserves accessibles à la recharge sera grand ("volume dynamique"), plus l'amplitude de la variation du taux d'oxygène 18 sera restreinte. Ce phénomène a été observé sur les systèmes ariégeois : l'amplitude de variation du Baget (1,9 %) révèle une réserve dynamique plus importante que celle d'Aliou (3 % de variation) - (BAKALOWICZ et al., 1974).

La figure 175 représente cette variation (exprimée en %) entre les étiages automnaux et la crue de fonte de neige.

Il convient d'être prudent dans l'interprétation d'une telle figure, car, si l'on peut considérer l'échantillon d'étiage comme représentatif du phénomène (voir plus loin), l'extrême variabilité des teneurs de crue (EBERENTZ, 1975 ; TISSOT et TRESSE, 1978) à l'échelle horaire rend précaire la notion de simultanéité des prélèvements en crue.

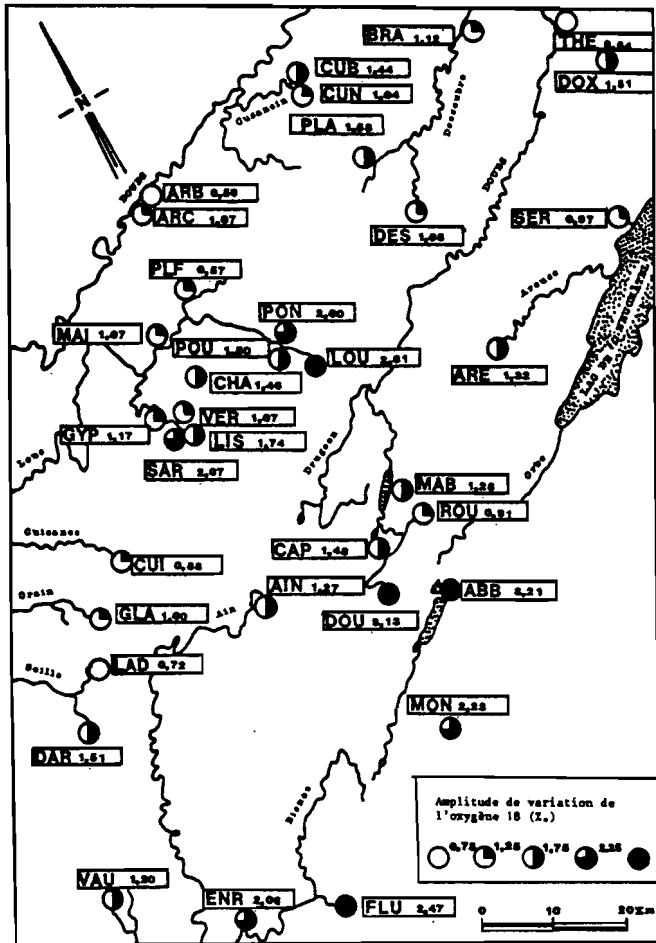


Fig. 175 : VARIABILITE DES TENEURS EN OXYGENE 18 ENTRE CRUE DE FONTE DE NEIGE ET ETIAGES

pour la signification des codes, voir tableau 38, page 208

Cependant, l'écart mesuré oppose les aquifères de la Haute-Chaîne, filtrant mal l'information isotopique de la pluie (réserves faibles, gradients hydrauliques forts, drains transmissifs) aux systèmes de la bordure externe des plateaux, régulant bien les signaux isotopiques de l'entrée grâce à un faible gradient hydraulique permettant un mélange important avec une réserve noyée (ou non saturée).

F. Conclusion

Les marqueurs thermiques (température-oxygène 18) acquis avant l'entrée de l'eau dans le système, évoluent en fonction du régime d'écoulement à l'intérieur du système : leurs modifications traduisent donc l'hydrocinématique.

Lors des crues, les eaux marquées thermiquement et isotopiquement contribuent d'une part à la recharge des blocs peu transmissifs (l'eau se mélange avec celle des milieux les plus accessibles), d'autre part à l'écoulement de l'émergence

(l'eau chasse, puis se mélange à l'eau à marquage "réserve" qui était dans les drains).

Plus le milieu comporte de réserves accessibles, plus l'impulsion sera atténuée, plus le réseau de drains est développé, moins la température de l'eau infiltrée sera modifiée.

En tarissement, l'émergence restitue le mélange (en oxygène 18) d'eaux de la réserve thermiquement équilibrées avec l'encaissant.

On peut donc distinguer les systèmes dont les réserves sont situées sous l'altitude de l'émergence et ceux qui drainent des réserves situées à une altitude plus grande (Montant, Theusseret, Enragé, Lison, Pontet ...), sans que l'on puisse préjuger du milieu de stockage.

XII.4. TENEURS EN TRITIUM

XII.4.1. Introduction

Les mesures en Tritium ont été faites (tab. 43) par comptage de scintillations en phase liquide, soit en comptage direct, soit après que les échantillons aient été enrichis par électrolyse.

Les teneurs sont exprimées en Unités-Tritium ($1 \text{ UT} = 1.10^{-18}$), elles sont suivies de l'erreur expérimentale totale (préparation et comptage) inférieure à 10 % dans le cas d'un enrichissement, de l'ordre de 15 % dans le cas d'un comptage direct.

On sait que les teneurs naturelles en Tritium des précipitations qui étaient comprises entre 5 et 20 UT avant 1953 (FONTES, 1976) ont considérablement augmenté dès 1954, et que plusieurs pics ont été observés à la suite d'explosions thermonucléaires en 1958-1959, et surtout en 1963, les teneurs mensuelles ayant atteint leur maximum entre 5 000 et 10 000 UT.

Dès 1963, le signal-pluie a été étudié sur la rive sud du lac Léman, à la station de Thonon les Bains distante d'une trentaine de kilomètres seulement de la bordure orientale de la Haute Chaîne jurassienne.

Les teneurs pondérées annuelles en Tritium des précipitations à cette station qui, étant située sous un climat comparable, servira de référence, sont données dans le tableau 44 et sur la figure 176.

Les teneurs pondérées annuelles très élevées en 1963 (près de 3 000 UT), ont décliné rapidement jusqu'en 1967 (231 UT) et varient peu jusqu'en 1976 autour de 150 UT. Les teneurs de 1977 sont sensiblement plus basses, elles atteignent 74 UT.

Les mesures de Tritium ont été effectuées sur l'ensemble des échantillons des campagnes de janvier 1977 (basses eaux d'hiver), février 1977 (crue de fonte de neige), septembre 1977 et octobre 1978 (étiages), ainsi que sur une dizaine de points sélectionnés des campagnes de juillet et décembre 1979 et de septembre 1980, pour suivre l'évolution de leur teneur à plus long terme, afin de préciser leur comportement hydrocinématique.

CODE	EMERGENCE	1977			1978	1979		1980
		JANVIER	FEVRIER	SEPTEMBRE	OCTOBRE	JUILLET	OCTOBRE	SEPTEMBRE
GLA	GLANTINE	242±16	196±13	282±20	179±12			84±1
DOX	DOUX	176±27	139±22	182±28	165±11			
THE	THEUSSERET	193±29	161±26	182±28	150±10			
ARB	BERGERET		140±22	137±19	138±10			
ARC	ARCIER	165±12	145±10	214±16	134± 9		105±2	85±1
CHA	CHAUVEROCHE	193±29	130±21		131± 7	115±3		
CUN	CUSANCIN (NOIRE)		150±25	136±21	129± 9			
PLF	PLAISIR-FONTAINE	144±23	135±21	143±22	128± 7	102±3		
LAD	LADOYE sur SEILLE		210±30	217±32	127± 9			
DES	DESSOUBRE	147±11	104± 8	173±13	127± 9			
BRA	BIEF de BRANS.	135±22	133±21	158±23	126± 7			
CUB	CUSANCIN (BLEUE)	182±13	130± 9	211±15	123± 7		107±2	80±1
CUI	CUISANCE (PLANCHES)	196±30	158±25	188±28	122± 8			
MAI	MAINE	152±11	108±17	138±22	108± 8	91±2		
BRE	PUITS DE LA BREME	150±24	115± 8					
ARE	AREUSE	130±10	89± 7	155±12	107± 8		59±1	56±1
GYP	GYP	161±12	105± 8	160±12	107± 7			
DAR	DARD	143±11	118± 9	161±12	106± 7			
SER	SERRIERE	154±11	114± 8	143±11	106± 7			
LOU	LOUE	145±11	84± 6	170±13	105± 8	86±2	71±9	62±1
MAB	MALBUISSON (BLEUE)	120±19	72±12	123±20	104± 7	79±2	73±9	65±9
PON	PONTET	149±24	106±17	138±22	100± 6	92±2	83±9	94±9
PLA	PLAINMONT		94±15		100± 7			
VAU	VAUX (CHATAGNA)	97± 7	97± 7	132±10	100± 7			
TON	TONAILLE		107±17					
SAR	SARRASINE	143±11	97± 7	168±13	97± 7			
VER	VERNEAU	173±10	129± 9	171±13	93± 6	81±2		
FLU	FLUMEN	98± 8	56± 5	168±13	92± 7			
ENR	ENRAGE	94±15	39± 6	108±18	89± 6			
LIS	LISON	145±11	91± 7	170±13	78± 5		75±1	76±1
POU	BIEF POUTOT	152±24	115±18	126±20	78± 5	75±2		
DOU	DOUBS	108± 8	68± 5	155±12	74± 6	61±2	62±9	53±1
AIN	AIN		33± 5	85±14	74± 5			
ABB	ABBAYE-LYONNE	95±16	31± 5	125±20	69± 5	61±2	55±9	51±1
MON	MONTANT	102± 8	54± 5	132±10	66± 5			
CAP	CAPUCINS	70±12	52± 9	88±14	62± 5	59±2	55±9	54±9
VAL	VALLORBE (TUNNEL)				61± 4	74±2		76±9
ROU	BIEF ROUGE	103±17	84±14	89±15				
	Effectif n	30	35	33	35	12	11	12
	moyenne \bar{UT}	143,6	109,6	155,4	107,3	81,3	69,1	69,7
	écart-type σ_{UT}	38,0	44,0	40,3	28,4	17,1	18,8	14,6

154±11 : comptage après enrichissement par électrolyse 89±15: comptage direct

Tabl. 43 - TENEURS EN TRITIUM DES SOURCES JURASSIENNES

ANNEES	TENEUR UT	ANNEES	TENEUR UT	ANNEES	TENEUR UT	ANNEES	TENEUR UT	ANNEES	TENEUR UT
1963	2907	1967	213	1971	228	1975	171	1979	59
1964	1496	1968	217	1972	144	1976	117	1980	33
1965	595	1969	206	1973	126	1977	74	1981	39
1966	247	1970	189	1974	113	1978	86		

Tabl. 44 - TENEUR EN TRITIUM DE LA PLUIE A THONON LES BAINS (TENEUR PONDEREE ANNUELLE)

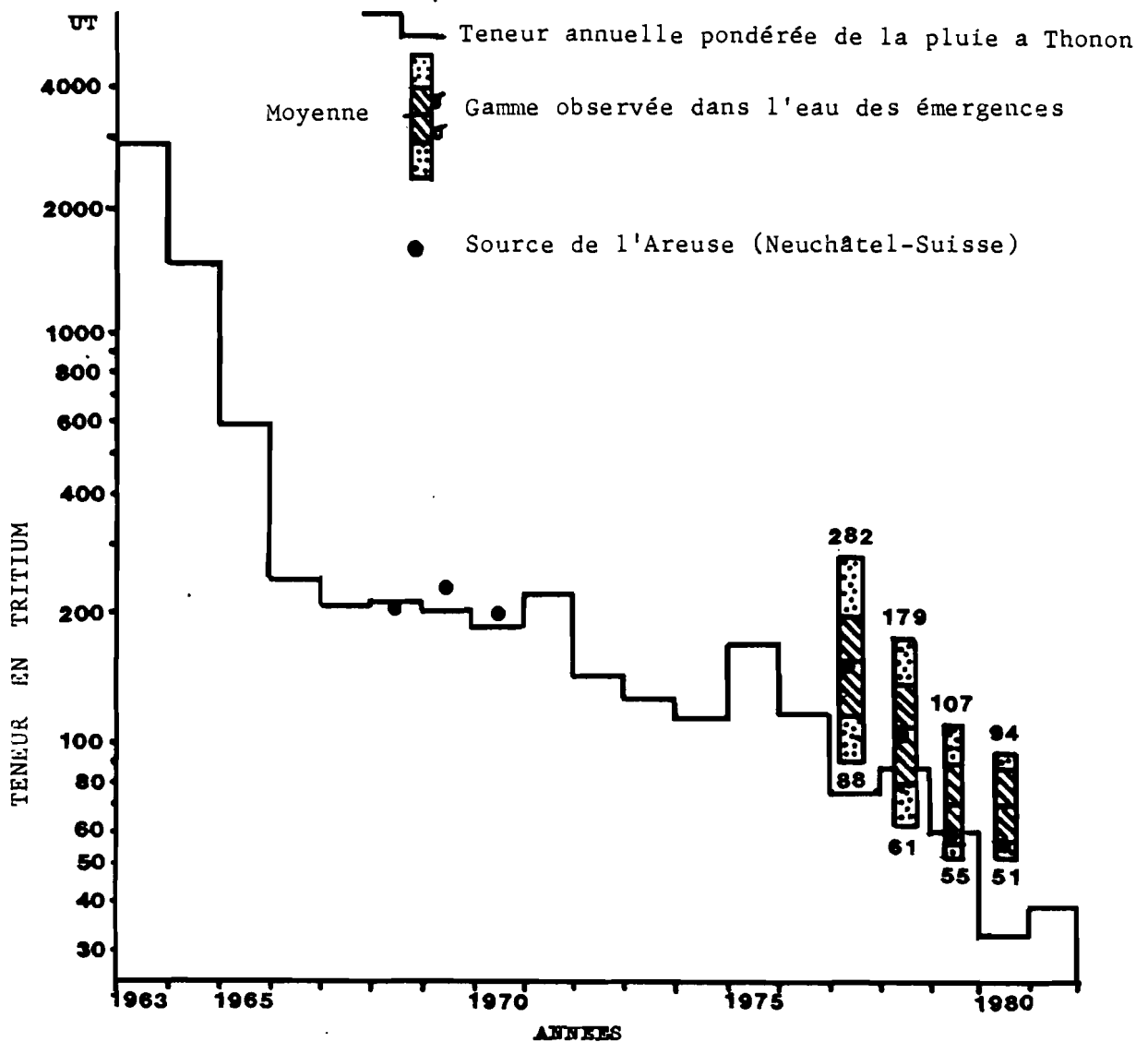


Fig. 176 : TENEURS PONDEREES ANNUELLES DE LA PLUIE A THONON ET VALEURS MESUREES AUX EMERGENCES (BLAVOUX et al 1982)

XII.4.2. Signification hydrogéologique des teneurs au cours des campagnes de 1977 et 1978

L'ensemble des points de prélèvements montre des teneurs très différentes pour chaque campagne avec une plage de variation de l'ordre de 200 UT (fig. 176 et 179).

Au cours des quatre campagnes, une opposition nette et répétitive s'observe entre les sources chargées en tritium : Glantine, source Bleue du Cusancin, Chauveroches, Cuisance, etc. ... et les sources pauvres en tritium : Capucin, Enragé, Flumen, Abbaye, Vaux, etc.

On remarquera que la majorité des sources riches en tritium appartiennent aux zones topographiquement les plus basses du Jura, c'est-à-dire au Jura des plateaux, et que le plus grand nombre de sources pauvres en tritium se situent dans le Haut Jura.

Il convient de noter que les fortes teneurs en tritium relevées sur les émergences de la Doux (DOU) et du Theusseret (THE) dans le Jura suisse, bien qu'elles se situent en zone plissée, pourraient être imputées en partie à des émissions de tritium dans l'atmosphère par les industries horlogères de la Chaux de Fonds, signalées dans le rapport de la commission fédérale de surveillance de la radioactivité pour 1976.

Dans le Jura le relief est conforme à la structure, les plateaux du Jura externe étant des zones structurellement tabulaires et le Haut Jura étant une zone plissée dont les fortes dénivelées correspondent à des isohypses serrées des cartes structurales. Ces isohypses serrées restreignent géométriquement les possibilités structurales de pièges hydrogéologiques, les ondulations à grand rayon de courbure des plateaux ont pu faire formuler (plateau de Lons-le-Saunier) l'hypothèse de vastes réservoirs (COLLIN et al., 1965 ; DREYFUSS et al., 1967). Alors que les forts gradients piézométriques (liés aux fortes dénivelées structurales) de la Haute Chaîne amènent rapidement de l'eau récente (de l'année, de la saison ou de l'averse) à l'exutoire, les aquifères à faible gradient piézométrique des plateaux sont le siège de mélanges imparfaits d'eaux à temps de transit différent dont certaines marquées à plus de 200 UT à la sortie ont séjourné en moyenne plusieurs années (MUDRY, 1981).

Toutefois les mélanges s'effectuent déjà au cours de l'infiltration dans le sol, puis au niveau de la zone non saturée, et l'indice de temps de séjour importants ne doit pas automatiquement être imputé à des réserves importantes au niveau d'un karst noyé (BLAVOUX et al., 1979).

Ainsi certaines teneurs peuvent provenir d'un retard à l'amont du karst (zone non saturée et sol) : les fortes teneurs généralement relevées sur l'émergence du Verneau ne sont pas attribuables à un long séjour de l'eau en zone noyée (dont l'existence est niée par l'hydrodynamique ; TISSOT et TRESSE, 1978), mais semblent liées à la circulation dans les marnes liasiques altérées très abondantes sur l'impluvium, le marquage élevé étant d'ailleurs acquis dans l'écoulement superficiel à l'amont du karst.

XII.4.3. Interprétation des résultats de la campagne d'étiage 1978

Cette campagne a été choisie pour différencier les classes d'eau en raison du grand nombre d'échantillons analysés (35), tous mesurés après enrichissement par électrolyse, - donc de façon homogène -, et en raison de l'importance de l'étiage automnal (tableau 45).

Campagne		Etat	Débits de référence en m ³ .s ⁻¹						
N°	Date	Hydrologique	Cuisance	Loue	Bléfonds	Verneau	Arcier	Sarrazine	Doubs
1	J-77	basses eaux hiver	4,4	4,8	1,72	0,55	0,60	0,015	-
2	II-77	crue hiver	16,9	27,8	4,27	1,01	0,48	5,20	-
3	IX-77	étiage	0,9	4,2	0,29	0,05	0,26	0,015	-
4	X-78	étiage	0,57	3,8	0,11	0,03	0,12	0,016	-
6	XII-79	basses eaux hiver	0,25	2,4	0,18	0,03		0,016	6,10
8	X-80	étiage		8		0,049			0,169
9	III-82	basses eaux printemps	1,52		0,92	0,51			1,24

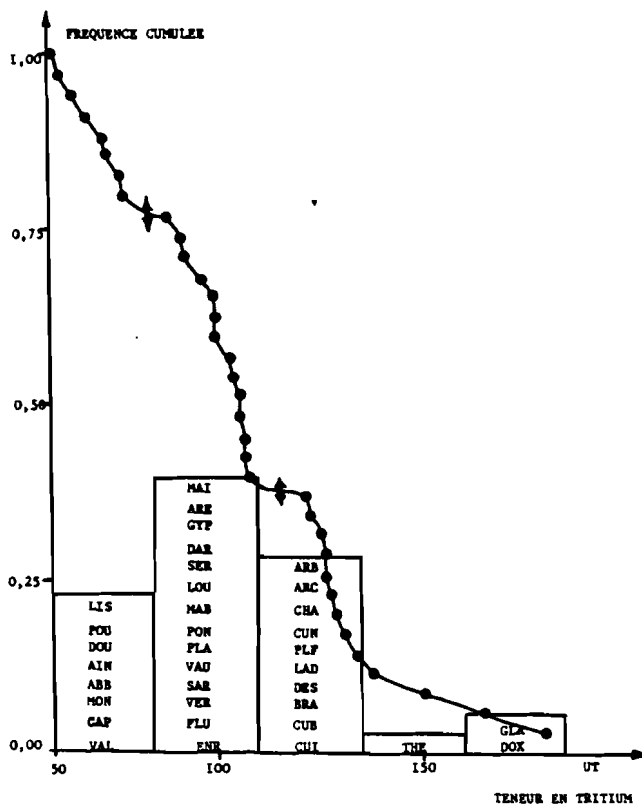
Tabl. 45 - DEBITS DE REFERENCE DE QUELQUES SOURCES JURASSIENNES

A. Classement des sources d'après leur teneur en tritium

La moyenne des teneurs des 35 sources échantillonnées en octobre 1978 s'élève à 107 UT. La courbe des fréquences cumulées par ordre décroissant a été tracée sur la figure 177. Elle permet de justifier les limites des classes choisies pour tracer l'histogramme : classe I de 60 à 85 UT, classe II de 85 à 110, classe III de 110 à 135, classe IV de 135 à 160, classe V au-delà de 160 UT. On remarquera que 50 % des sources ont des teneurs inférieures à 106 UT (MOY = 107) et qu'une moitié de la population présente des teneurs comprises entre 90 et 127 UT ce qui indique une distribution symétrique centrée sur la moyenne.

Fig. 177 : DISTRIBUTION DES TENEURS EN TRITIUM - ETIAGE D'OCTOBRE 1978 (BLAVOUX et al 1982)

pour la signification des codes, voir tableau 42, page 222



B. Localisation des familles d'eau

L'instantané d'octobre 1978 (fig. 178) montre que la teneur en tritium d'une source est directement liée à sa situation géographique et structurale. Les teneurs fortes en tritium correspondent aux sources situées en bordure externe du Jura, en aval du premier plateau. La source Glantine (GLA) de la reculée de Vaux sur Poligny, qui présente la concentration la plus forte, est bien dans cette situation, les sources du Theusseret (THE) et de la Doux (DOU), avec de fortes concentrations et une appartenance au Jura plissé, faisant néanmoins exception. Les teneurs les plus faibles en tritium sont celles des sources situées dans la zone plissée de la Haute Chaîne et particulièrement sur les hauts bassins du Doubs, de l'Ain et de l'Orbe. Le groupe intermédiaire moyen est composé de sources appartenant à la fois aux zones tabulaires du second plateau et aux zones plissées nord et sud.

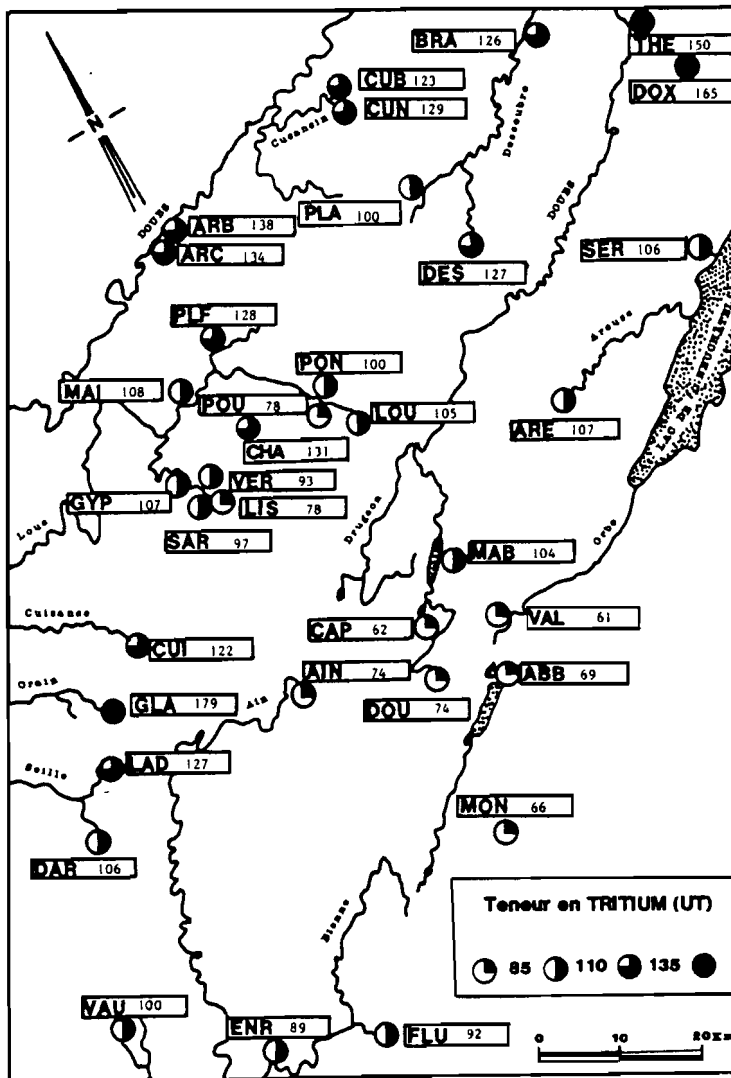


Fig. 178 : ETIAGE 1978 : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES TENEURS EN TRITIUM (BLAVOUX et al 1982)

pour la signification des codes, voir tableau 43, page 222

C. Comparaison des teneurs en ^3H avec celles de la pluie

Si en 1978, les teneurs les plus faibles des sources de la Haute Chaîne sont très voisines de celles des pluies de l'année (fig. 176), on remarquera toutefois que la teneur moyenne de tous les prélèvements (106 UT) est supérieure à celle des pluies de l'année (86 UT) ou de l'année précédente (74 UT). Quant aux teneurs les plus fortes des sources, supérieures à 105 UT, elles ne peuvent

s'expliquer que par la participation à l'écoulement de l'étiage 1978, d'eaux précipitées en 1975 et plus vraisemblablement avant 1972 (voir tableau 44 et fig. 176). La gamme des teneurs mesurées en 1978 sur les sources indique donc des âges très différents pour les réserves de la matrice capacitive des systèmes karstiques qui vont de l'année à une dizaine d'années.

Cependant, une incertitude subsiste pour les eaux des sources les plus pauvres en tritium qui peuvent être de l'année ou résulter d'un mélange d'eaux antérieures aux essais nucléaires avec des eaux plus récentes. L'évolution, jusqu'en 1980 des teneurs en tritium des sources en étiage comparée avec celle du signal pluie d'entrée, va nous permettre de lever cette ambiguïté et de préciser le temps de renouvellement des différentes réserves.

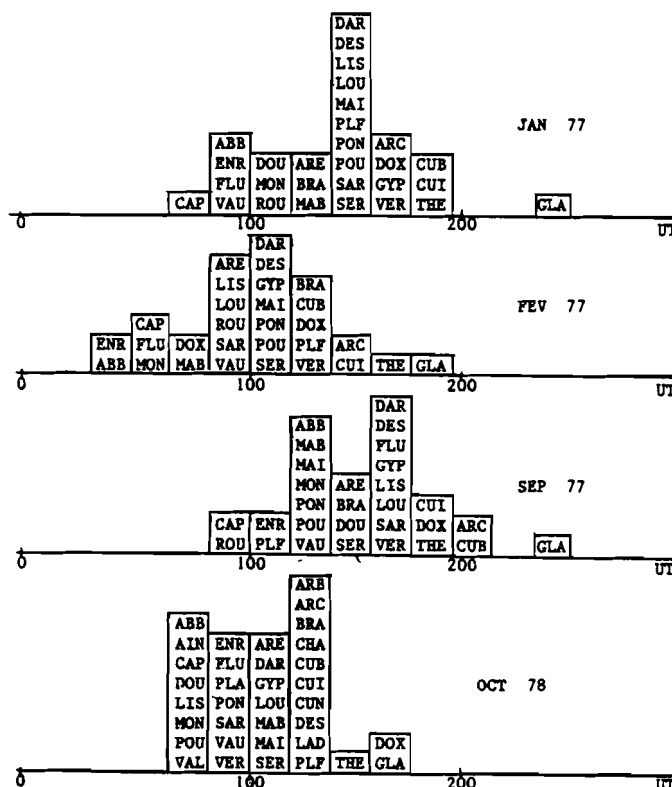
XII.4.4. Variation de la teneur en tritium entre crue et étiages

A. A l'échelle de la campagne

Le coefficient de variation (le rapport de l'écart-type à la moyenne des valeurs) du tritium de chaque campagne (tab. 43) est voisin et faible pour les étiages (0,259 à 0,265) alors qu'il est grand en crue (0,401).

La crue de fonte de neige (fig. 179) a des valeurs absolues de tritium significativement plus basses (109,6 pour la moyenne) et plus étalées ($\sigma = 44$) que les valeurs de basses eaux qui l'encadrent (143,6 et 155,5 UT, $\sigma = 38$ et 40 UT).

Fig. 179 : HISTOGRAMME DES TENEURS EN TRITIUM DES SOURCES JURASSIENNES (1977-1978) (BLAVOUX et al 1982, COMPLETE)



pour la signification des codes, voir tableau 43, page 222

Sachant que la teneur des neiges de l'hiver 1976-1977 était beaucoup plus faible que celle des étiages des sources (Station de Thonon : décembre 1976 : 32 UT, janvier 1977 : 46 UT) la baisse des teneurs de la campagne de février indique la participation rapide de l'eau de fonte de neige à l'écoulement.

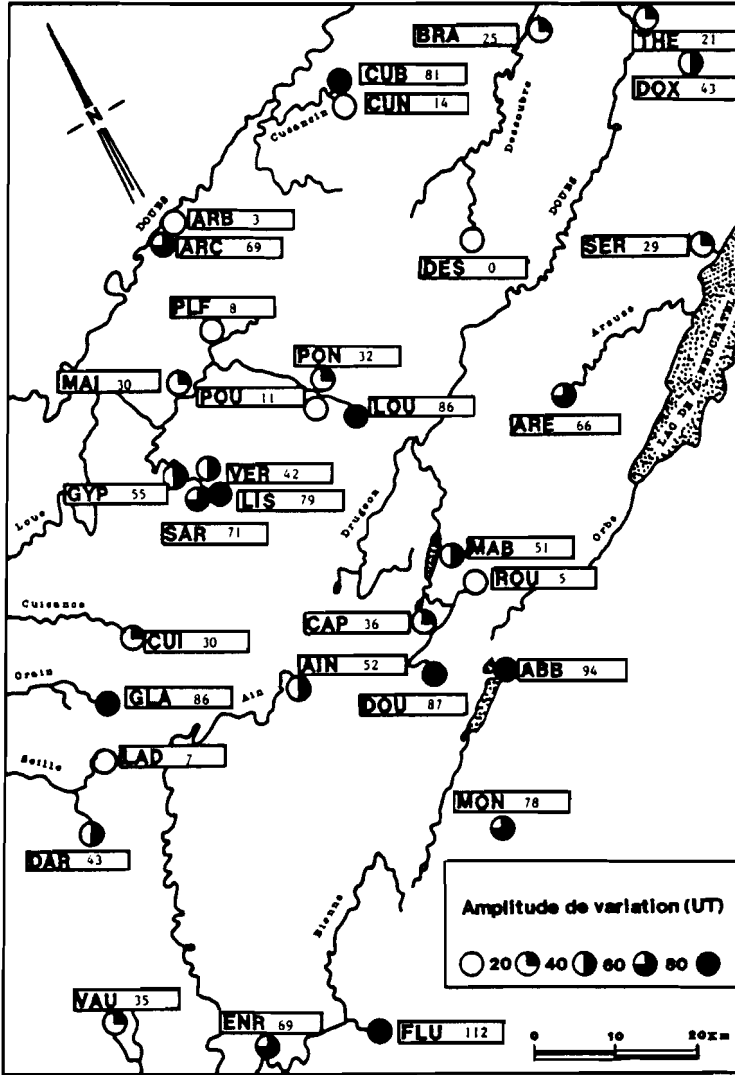


Fig. 180 : VARIABILITE DES TENEURS EN TRITIUM ENTRE CRUE DE FONTE DE NEIGE ET ETIAGE

pour la signification des codes, voir tableau 43, page 222

Tabl. 46 - TRITIUM : CORRELATIONS INTER-CAMPAGNES - 28 INDIVIDUS COMMUNS

COEFFICIENT DE CORRELATION LINEAIRE

JAN 77	1				
FEV 77	0,869 **	1			
SEP 77	0,820 **	0,728 *	1		
OCT 78	0,779 **	0,831 **	0,741 *	1	
MOYENNE	0,947 **	0,936 **	0,895 **	0,899 **	1
JAN 77	FEV 77	SEP 77	OCT 78	MOYENNE	

Δ NON SIGNIFICATIF * SIGNIFICATIF ** HAUTEMENT SIGNIFICATIF

JAN 77	1				
FEV 77	0,822 **	1			
SEP 77	0,748 *	0,709 *	1		
OCT 78	0,691 Δ	0,848 **	0,653 Δ	1	
MOYENNE	0,881 **	0,914 **	0,829 **	0,886 **	1
JAN 77	FEV 77	SEP 77	OCT 78	MOYENNE	

Δ NON SIGNIFICATIF * SIGNIFICATIF ** HAUTEMENT SIGNIFICATIF

Tabl. 47 - TRITIUM : CORRELATION INTER-CAMPAGNES

- 28 INDIVIDUS COMMUNS

COEFFICIENT DE CORRELATION

DE RANG DE SPEARMAN

Cependant, même au cours de cette campagne de février, un très faible nombre d'émergences (Enragé, Ain, Abbaye) ont des valeurs voisines de celle de la neige de cet hiver 1976-1977. La plupart des autres systèmes écoulent alors des eaux des réserves mélangées avec des eaux de fonte.

Au cours des 4 campagnes, (fig.176) les émergences débitent des eaux nettement plus tritiées que les pluies moyennes pondérées de l'année (74 UT en 1977, 86 UT en 1978) ce qui atteste la participation prépondérante en étiage comme en crue, d'eaux précipitées plusieurs années auparavant.

Les maxima des campagnes (fig. 176 et 179) ne peuvent s'expliquer que par la participation à l'écoulement d'eaux précipitées vers les années 1965-1975, bien que certaines pluies peu importantes en hauteur aient eu des teneurs très importantes en Tritium (voir plus loin).

En revanche, les minima des campagnes ont des valeurs voisines de celles de la pluie pondérée de l'année : les différents systèmes karstiques du Jura restituent des eaux à temps de séjour hétérogène.

A l'échelle des campagnes, les émergences jurassiennes restituent donc des gammes de teneurs comprises entre la valeur de la pluie de l'année et celle de pluies d'années antérieures, attestant le rôle du drainage de réserves pluri-annuelles dans les réservoirs.

La crue mobilise un mélange d'eau de réserve et d'eau fraîche de fonte de neige.

B. A l'échelle des systèmes

Pour chaque source, la variation entre la teneur de crue de fonte de neige et celle d'étiage a été représentée (fig. 180). Une similitude peut être notée avec la variation de l'oxygène 18 (fig. 175) : comme pour l'oxygène 18, on remarque une localisation des fortes variations (plus de 80 UT) dans les zones plissées du Haut Jura, tandis que les amplitudes les plus faibles sont observées dans les zones de plateau.

Toutefois, les mêmes réserves que pour l'oxygène 18 peuvent être formulées, parce que la représentativité d'une situation de crue par un seul échantillon est discutable.

XII.4..5. Représentativité des campagnes et des émergences

La représentativité des campagnes a été testée par deux approches :

- régressions linéaires entre les teneurs en tritium des émergences au cours de campagnes différentes.

- corrélations de rang de Spearman (voir annexe 3) : les émergences ont été classées par teneur décroissante en tritium ; les rangs sont corrélés d'une campagne à l'autre.

Les tableaux 46 et 47 donnent les coefficients de corrélation (linéaire et de rang de Spearman) pour les 28 individus communs aux 4 campagnes (janvier 77, février 77, septembre 77, octobre 78) et la moyenne des 4 valeurs.

Toutes les corrélations linéaires sont au moins significatives, les coefficients les plus bas étant observés pour les relations février-septembre 1977 et septembre 1977 - octobre 1978.

Les rangs sont, en revanche, moins bien corrélés, ainsi le classement d'octobre 1978 ne représente pas bien ceux de janvier 1977 et de septembre 1977. Toutefois, chacune des campagnes représente bien la moyenne.

Le tableau 48 donne les coefficients de corrélation de rang de Spearman pour les individus communs à deux campagnes successives. Il faut remarquer que seul le couple de campagnes septembre 1977 - octobre 1978 ne se représente pas bien mutuellement.

	JAN 1977 FEV 1977	FEV 1977 SEP 1977	SEP 1977 OCT 1978	OCT 1978 JUI 1979	JUI 1979 OCT 1979	OCT 1979 SEP 1980
n communs	30	33	32	12	6	10
r_s	0,824 **	0,869 **	0,597 Δ	0,906 *	0,971 *	0,909 *

Δ NON SIGNIFICATIF * SIGNIFICATIF ** HAUTEMENT SIGNIFICATIF

Tabl. 48 - TRITIUM : CORRELATION INTER-CAMPAGNES : INDIVIDUS COMMUNS A DEUX CAMPAGNES SUCCESSIVES - COEFFICIENT DE CORRELATION DE RANG DE SPEARMAN

Cette étude démontre d'une part que les campagnes représentent généralement bien la distribution géographique du tritium, d'autre part qu'il est dangereux de ne raisonner que sur une campagne.

La corrélation linéaire entre les deux campagnes d'étiage (sep. 77, oct. 78) est meilleure sur les individus ayant subi un comptage après enrichissement par électrolyse ($n = 16$, $r = 0,84$) que sur le mélange d'individus avec comptage direct et avec électrolyse ($n = 32$, $r = 0,69$), ce qui montre l'importance de la barre d'erreur dans la représentativité.

XII.4.6. Evolution des teneurs d'étiage en tritium de 1977 à 1980 (d'après BLAVOUX et al., 1982)

A. Evolution générale

Les gammes des teneurs rencontrées aux émergences à chaque campagne d'étiage sont comparées, sur la figure 176, avec les teneurs pondérées annuelles des précipitations à Thonon. Une forte décroissance de toutes les concentrations en tritium des sources entre 1977 et 1980 accompagne la décroissance des teneurs des pluies. Les teneurs les plus basses sont toujours très voisines de celles des pluies. L'intervalle de variation très grand en 1977 va en diminuant très sensiblement, si bien que les concentrations les plus fortes se rapprochent des valeurs de la pluie en 1980.

B. Choix d'un modèle de fonctionnement

Pour simuler le signal de sortie de la zone capacitive calcaire, en fonction du signal-pluie d'entrée, nous utiliserons le modèle exponentiel ou de bon mélange proposé par ERIKSSON (1962) et repris par HUBERT et al. (1970). Ce modèle mathématique simple suppose un réservoir homogène dans lequel se mélan-

gent des recharges annuelles constantes en volume. La validité du modèle est vérifiée par la concordance des teneurs effectivement mesurées avec celles calculées des sorties.

$$S_n = \sum_{p=0}^{p=\infty} \alpha (1-\alpha)^p \cdot \lambda^p \cdot E_{n-p}$$

- avec : S_n = teneur en tritium de l'exutoire pour l'année n.
- α = coefficient de recharge.
- λ = 0,95 facteur de décroissance du tritium pour 1 an.
- E = teneur en tritium de la recharge annuelle (moyenne pondérée).
- p = ordre de chacune des recharges antérieures à l'année n.

Le choix d'un modèle de bon mélange dans un aquifère homogène appliqué à un réservoir karstique connu pour son hétérogénéité peut surprendre, mais se justifie ainsi : nous étudions en étiage le seul débit de la matrice calcaire capacitive drainée par le réseau karstique. Lors des périodes de hautes eaux, il est connu (BURGER, 1979) que l'alimentation de cette matrice est essentiellement assurée par ce même réseau de drains. Ainsi, la bonne "irrigation" des blocs capacitifs permet, en première approximation, une recharge générale à l'échelle du réservoir, d'autant plus que le système est bien karstifié.

La réponse de ce réservoir à l'étiage, - à condition toutefois que l'état hydrocinématique des systèmes soit comparable -, sera la somme des hétérogénéités isotopiques locales des différents blocs capacitifs qui, à l'échelle du système, pourra être statistiquement considérée comme celle d'un ensemble homogène.

C. Application aux sources karstiques du Jura

Les teneurs en Tritium des sorties des années 1977 à 1980 ont été calculées à partir du signal d'entrée pluie brute à Thonon, pour des temps de renouvellement allant de 1 à 500 ans (tableau 49).

T	1	1,66	2,5	5	10	25	50	100	200	500
α ans ⁻¹	1	0,66	0,4	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,005	0,002
Sorties UT 1977	74	92	103	138	170	133	85	49	27	13
1978	86	86	93	122	154	125	81	47	26	12
1979	59	68	76	104	137	116	77	45	25	12
1980	33	45	57	86	121	107	72	42	24	11

Tabl. 49 - MODELE EXPONENTIEL : TENEUR EN TRITIUM A LA SORTIE (PERIODE 1977 - 1980) POUR DES TEMPS DE RENOUVELLEMENT DE 1 à 500 ANS (BLAVOUX et al 1982)

Le temps de renouvellement (T) d'un réservoir supposé homogène et de volume (V) constant est par définition égal à $\frac{V}{Q}$ (Q étant la recharge moyenne annuelle). C'est l'inverse du coefficient de recharge α ($\frac{Q}{V}$). On remarquera que pour $\alpha = 1$, les teneurs des sorties sont celles des pluies de l'année, et sont équivalentes à celles obtenues par un modèle "piston".

L'examen du tableau 49 montre que pour simuler les fortes décroissances des teneurs mesurées de 1977 à 1980 aux émergences karstiques, il faut faire appel à un modèle présentant un temps de renouvellement inférieur ou égal à 10 ans.

la figure 181 compare l'évolution des concentrations de deux groupes de sources représentant les classes extrêmes définies lors de la campagne 1978, avec les valeurs de sortie du modèle fonctionnant avec des coefficients de recharge allant de 1 à 0,1. On constate tout d'abord que le classement de 1978 reste valable pour toute la période 1977 à 1980. L'opposition entre les aquifères karstiques présentant des faibles concentrations avec des temps de renouvellement de 1 à 2 ans ($\alpha = 1$ à 0,4), tels que les Capucins, l'Abbaye et le Doubs, et les aquifères présentant les fortes concentrations avec des temps de renouvellement de 5 à 10 ans ($\alpha = 0,2$ à 0,1) tels que le Cusancin, Arcier ou la Glantine, persiste lors de toutes les campagnes. Cette distinction confirme les hypothèses formulées sur l'hydrocinématique des systèmes jurassiens à partir des données structurales. Ainsi, les émergences de la Haute-Chaîne, dont les aquifères présentent de fortes dénivelées structurales, donc un fort gradient hydraulique, ont des réserves qui se renouvellent en 1 ou 2 ans, alors que les émergences des aquifères des plateaux, dont le substratum est à pente douce et le gradient hydraulique plus faible, ont des réserves qui se renouvellent en 5-10 ans.

Les valeurs que nous possédions pour la source de l'Areuse en 1968-1970 (BURGER et al., 1971) s'accordent bien avec celles de la période récente (fig. 176) pour donner un temps de renouvellement compris entre 1 et 2 ans et demi.

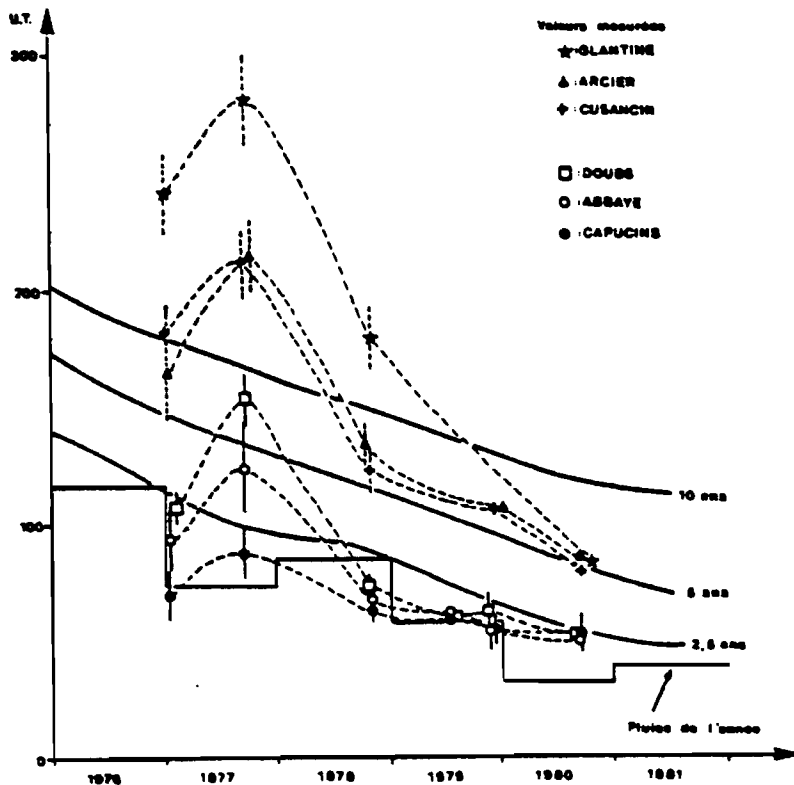


Fig. 181 : MODELE EXPONENTIEL : TENEURS EN TRITIUM SIMULEES AUX EXUTOIRES DES SYSTEMES KARSTIQUES AVEC DES TEMPS DE RENOUVELLEMENT DE 1, 2,5, 5 et 10 ANS (BLAVOUX et al 1982)

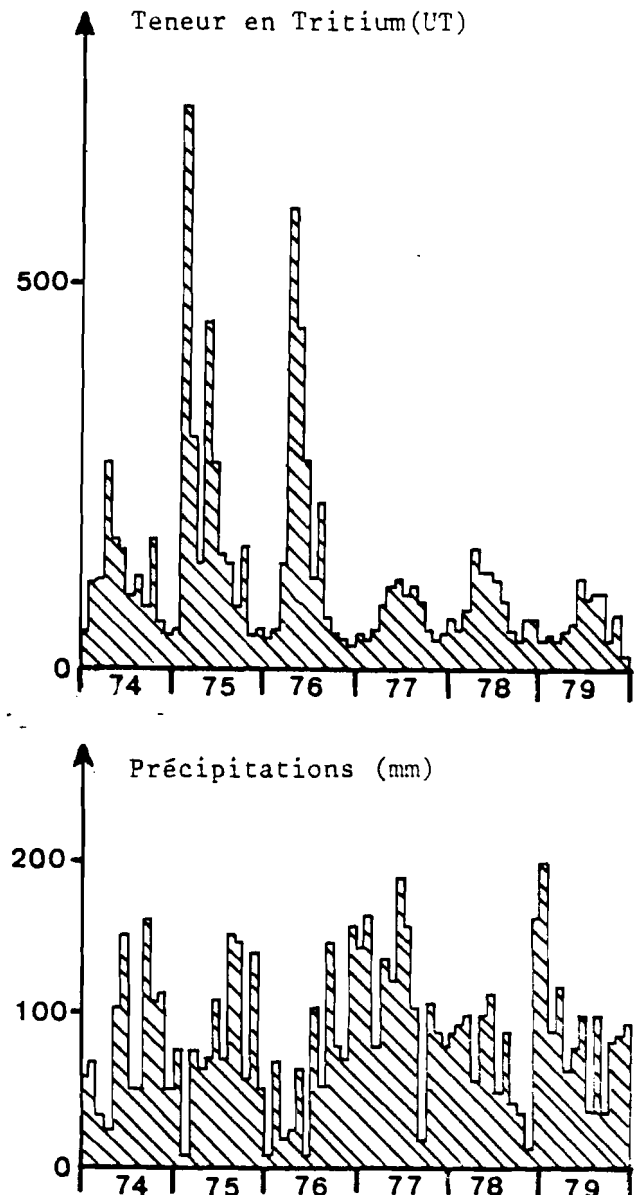
D. Critique du modèle

Le modèle choisi, s'il s'applique assez bien aux années 1978-1979-1980 ne permet pas de simuler correctement les valeurs d'étiage 1977, surtout celles de septembre. Plusieurs raisons peuvent être invoquées :

- le modèle suppose un état d'équilibre avec une recharge annuelle et un réservoir de volume constant. Ce fait, très discutable pour des régions à pluviométrie discontinue (climat méditerranéen ou semi-aride) semble présenter moins d'inconvénients dans le Jura où les précipitations sont régulières (fig. 182). Cependant, il faut noter que les basses eaux de 1977 interviennent après la sécheresse de 1976. La recharge ayant été déficitaire, on peut penser que l'écoulement de la matrice capacitive a mobilisé des eaux plus anciennes, moins accessibles en année normale. Le réservoir serait donc hétérogène.

- On remarquera de plus (fig. 182) que les précipitations du printemps et de l'été 1976, qui représentent une faible lame d'eau, étaient très riches en tritium (plus de 500 UT en avril). Ces précipitations, grâce à une piézométrie basse dans les réservoirs, ont pu participer à la recharge et contribuer aussi à augmenter les teneurs restituées lors des étiages 1977.

Fig. 182 : PRÉCIPITATIONS ET TENEURS EN TRITIUM A THONON LES BAINS (1974-1979)



- le modèle utilise comme concentration de la pluie, les valeurs pondérées annuelles, or (fig. 182) le signal-pluie mensuel présente une variation saisonnière avec un pic de printemps et des basses valeurs d'automne-hiver. L'évapotranspiration prélevant davantage sur les pluies à forte concentration, le signal-infiltration résultant a une teneur légèrement appauvrie par rapport à la pluie pondérée annuelle. La comparaison des valeurs d'écoulement du lysimètre de Thonon avec celles de la pluie le démontrent (BLAVOUX, 1978). Cette prise en compte des valeurs vraies de l'infiltration ne changerait pas fondamentalement les teneurs simulées si ce n'est en augmentant légèrement les temps de renouvellement.

XII.4.7. Classification des aquifères karstiques à partir de critères isotopiques et physiques

. La confrontation entre les résultats obtenus par le modèle exponentiel et les distributions géographiques des teneurs et aux ensembles structuraux de la chaîne jurassienne fait considérer la teneur en tritium à l'étiage comme une intéressante indication du temps de séjour moyen de l'eau dans l'aquifère, on ne peut toutefois pas préjuger du lieu d'acquisition de ce temps de séjour (zone noyée, aquifère épikarstique, milieux poreux sus-jacents ...).

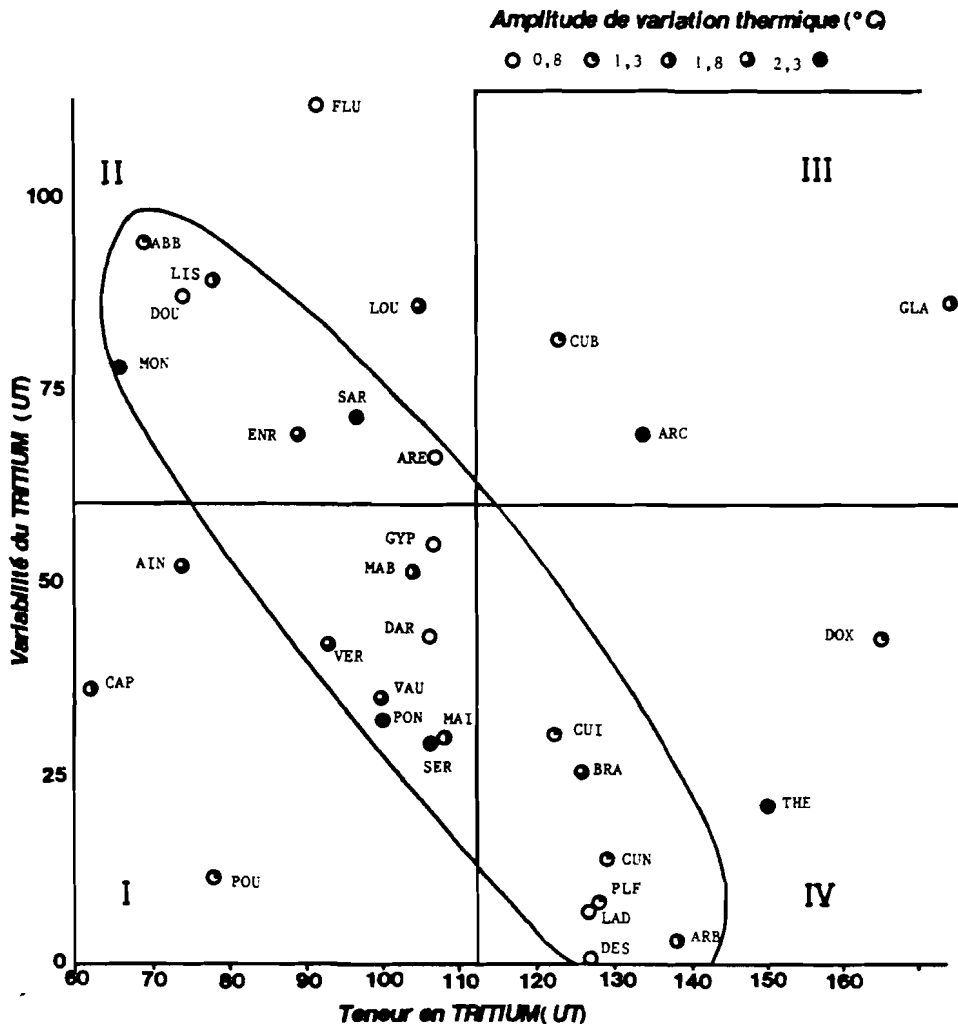


Fig. 183 : CLASSIFICATION DES AQUIFERES KARSTIQUES JURASSIENS A L'AIDE DE LA TENEUR EN TRITIUM A L'ETIAGE DE LA VARIABILITE DES TENEURS EN TRITIUM ET DE L'AMPLITUDE DE VARIATION THERMIQUE

. La variabilité des teneurs en tritium (comme d'ailleurs de celles en oxygène 18) entre crue et étiage nous renseigne (comme les régressions inter-campagnes l'ont montré), dans le seuls cas pour lesquels l'échantillon de crue peut être considéré comme représentatif, sur la facilité qu'a le système de faire transiter une information de l'impluvium à l'émergence. On doit noter que la fonte des neiges généralisée sur le Jura en février 1977 est une condition favorable, difficilement reproductible à l'échelle d'une chaîne montagneuse. Cet épisode a permis sur le Jura l'observation d'une restitution importante d'eau d'infiltration. La variabilité des paramètres isotopiques représente donc la capacité de drainage des aquifères karstiques.

. Toutefois, cette donnée ne préjuge pas du retard apporté à l'infiltration par les milieux peu transmissifs de surface (sol, marnes de couverture, épikarst). On peut alors faire appel à la variabilité thermique de l'émergence qui, pour les aquifères à grande amplitude de variation isotopique, opposera les systèmes à infiltration rapide qui font transiter la perturbation thermique avec un minimum d'échanges eau-encaissant, aux systèmes incluant des milieux peu transmissifs en surface, qui facilitent les échanges thermiques avec l'eau et tamponnent la variabilité lors de l'infiltration.

La figure 183 tente de classer les émergences à l'aide de 3 critères :

- Teneur en tritium en octobre 1978 (abscisses) ;
- Variabilité maximale des teneurs en tritium (ordonnées) ;
- Variabilité maximale de la température (figurés).

Le graphique a été découpé en 4 quadrants

Le quadrant I comporte des systèmes à temps de séjour bref (tritium faible), et répercutant mal les variations saisonnières du signal-pluie.

Ces systèmes montrent donc des possibilités limitées de drainage.

On remarquera que le système du Verneau apparaît dans cette famille caractérisée par un mauvais drainage, alors que le réseau spéléologique pénétrable atteint 23 km de longueur : cette classification intègre l'écoulement dans les marnes liasiques de l'impluvium et tient également compte de l'histoire de l'eau depuis la pluie jusqu'à l'émergence. La plupart des systèmes de cette famille (gyps-GYP, source Bleue de Malbuisson-MAB, Capucins-CAP, Maine-MAI, Bief Poutot-POU) ne sont pas connus comme des karsts pénétrables par les spéléologues.

Le quadrant II renferme des sources qui, peu chargées en tritium, ont des réserves limitées, et qui répercutent bien les variations du signal-pluie, qui sont donc les émergences de systèmes bien drainés. En revanche, la réaction de ces systèmes est très disparate vis-à-vis de la température : certains, tels Montant (MON) répercutent bien les variations thermiques de l'entrée, d'autres les amortissent : le Doubs (DOU), l'Areuse (ARE), le Flumen (FLU), l'Abbaye (ABB) et le Lison (LIS). Pour les émergences du Doubs, du Flumen et du Lison, l'existence de trop-pleins (Cul du Bief, grottes des Moulins et Sarra-sine - SAR) explique la faible variation thermique des émergences pérennes.

La source de l'Abbaye, en revanche, comporte beaucoup plus de terrains poreux (moraines) de couverture.

Il faut remarquer que c'est dans ce groupe II que l'on trouve les réseaux spéléologiques et les drains de grand diamètre (Loue (LOU), Lison (LIS), Sarra-sine (SAR), Enragé- ENR) avec les plus grosses émergences.

Le quadrant III est le domaine des systèmes à teneur élevée en tritium (réserves importantes) mais capables d'un amortissement modéré des impulsions (drainage développé).

L'influence du ruissellement de surface sur la variabilité thermique oppose la source d'Arcier (ARC) (drainant le marais de Saône) aux émergences de la Glantine (GLA) et Cusancin Bleue (CUB), comportant peu d'eaux de surface.

Le quadrant IV, si l'on excepte les émergences de la Doux (DOX) et du Theuseret (THE) qui semblent restituer un tritium d'origine industrielle, renferme les émergences assez tritiées (réserves importantes) mais dont les variations sont tamponnées par la faiblesse du réseau de drainage.

Toutes présentent de fait une faible variabilité thermique.

La plupart de ces émergences jurassiennes se situent entre le groupe bien drainé et aux réserves limitées et le groupe mal drainé et aux réserves importantes, l'importance du drainage concentré (convergence des écoulements souterrains traduit par une forte karstification) étant liée aux forts gradients hydrauliques engendrés par l'espacement réduit des isohypses du substratum.

Ainsi, le Jura plissé, avec de faibles réserves (pièges limités) et avec un drainage concentré induit par la structure apparaît au pôle II. Les systèmes du premier plateau apparaissent au pôle IV, grâce à la taille de leurs réserves et à la faiblesse de leur drainage concentré (difffluence), deux paramètres également induits par une structure à grand rayon de courbure.

Ce type de classification n'est pas sans analogie avec celle proposée par MANGIN (1975) fondée sur l'hydrodynamique.

La teneur en tritium est une fonction homologue du coefficient k qui est le rapport du volume d'origine "matricielle" au volume total moyen transitant dans le système.

Ce coefficient traduit la part de l'écoulement tamponné (avec mélange) dans l'écoulement total. La variabilité du tritium est l'homologue du coefficient i de MANGIN, qui traduit la rapidité de la décrue, c'est-à-dire les potentialités de drainage de l'aquifère karstique (facilité à faire transiter une impulsion de l'amont vers l'aval).

Comme la classification de MANGIN, le diagramme de variation $T-\Delta T$ est totalement aveugle sur le lieu de stockage et de mélange des recharges successives ("réserve"). Ainsi, ce lieu peut être la matrice noyée (sources du premier plateau) d'un aquifère épikarstique ou bien encore des milieux poreux : marnes (Verneau), terrasses fluvioglaciales (Ain), qui tous peuvent tamponner les impulsions isotopiques et restituer pendant longtemps une eau assurant le "tarissement".

En ce qui concerne cette réserve, cette méthode ne se contente pas d'un bilan (entrée-sortie) mais fait bien intervenir le volume dynamique de la réserve : en effet, l'importance des milieux où s'opère le mélange est prise en compte dans la variation isotopique. Cependant, on ne sait en aucun cas si cette réserve est située dans le karst noyé.

XII.4.8. Conclusion

La distribution des teneurs en tritium au cours des campagnes instantanées oppose les sources à teneur faible aux sources à teneur plus élevée que les pluies récentes.

Le modèle exponentiel permet de lever l'indétermination sur les teneurs faibles : il ne s'agit pas d'eaux précipitées avant les essais thermonucléaires atmosphériques, mais d'eaux à temps de renouvellement très bref dont la teneur suit celle des pluies actuelles.

Même si le modèle requiert une série d'hypothèses, il fournit un ordre de grandeur du temps de renouvellement de la globalité du système : il intègre toutes les recharges, tous les mélanges et toutes les restitutions, tant en zone noyée que dans l'aquifère épikarstique, le sol ou les milieux poreux de surface. C'est pour l'instant le seul moyen d'accès à la grandeur statistique "temps de renouvellement" qui correspond à un temps moyen de séjour dans l'aquifère.

En revanche, ce paramètre incluant tous les milieux traversés, il paraît hâtif de considérer un temps de renouvellement élevé comme un indice de réserves importantes exploitables.

Les temps de séjour longs pouvant être acquis hors du karst, les raisonnements sur les systèmes doivent être étayés par plusieurs séries de mesures, afin de s'affranchir de la mémoire de certains épisodes isotopiquement très contrastés : le modèle exponentiel repose sur des mesures répétées offrant cette garantie.

XII.5. EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES

Toutes les eaux karstiques du Jura prélevées au cours des 7 campagnes générales sont du type bicarbonaté calcique, avec une très forte prédominance de ces deux ions.

De fait, les séries constituant l'encaissant des aquifères contiennent de 31 à 52 % d'oxyde CaO en moyenne, et de 1 à 38 % de résidu insoluble (voir tabl. 31).

Les ions bicarbonates et calcium ont donc une importance prépondérante dans la minéralisation totale, et leur teneur est liée de manière hautement significative avec la conductivité de l'eau.

XII.5.1. Les diagrammes de Tillmans

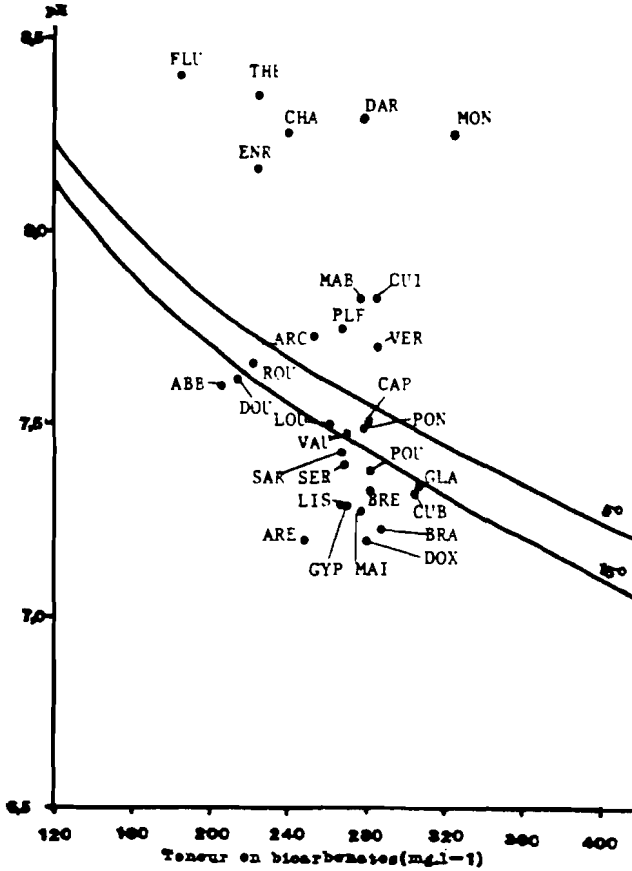
Cette représentation graphique utilise le pH en ordonnées et la teneur en bicarbonates (ou le TAC) en abscisses.

La saturation de l'eau est donnée à des isothermes différentes (ici 5 et 15°C).

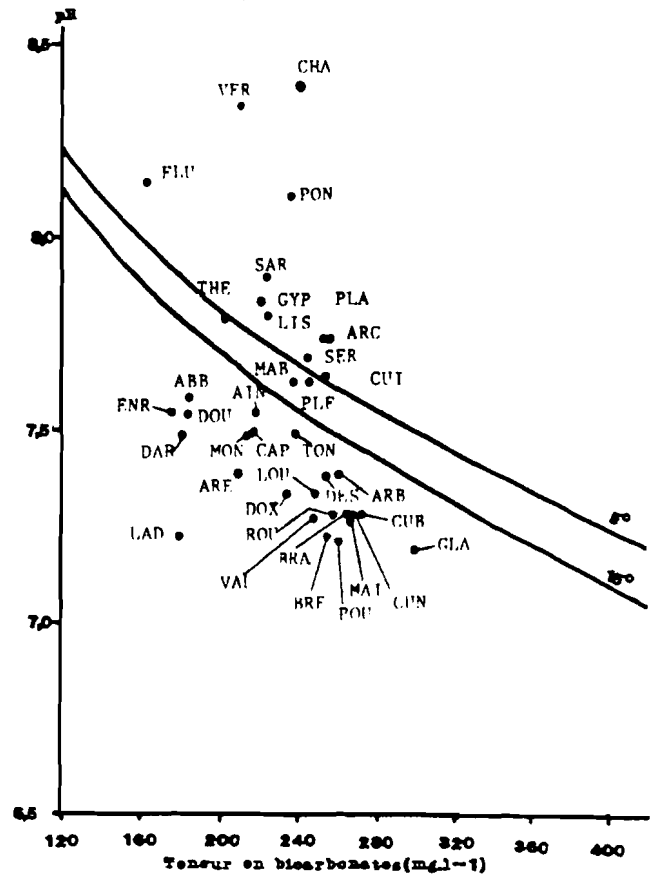
Cette courbe limite donc un domaine (en bas) où l'eau est sous-saturée, donc agressive, d'une plage (en haut) où l'eau est sursaturée donc potentiellement incrustante.

Les figures 184 à 187 situent les sources jurassiennes par rapport aux courbes d'équilibre, pour les campagnes de janvier, février, septembre 1977 et d'octobre 1978.

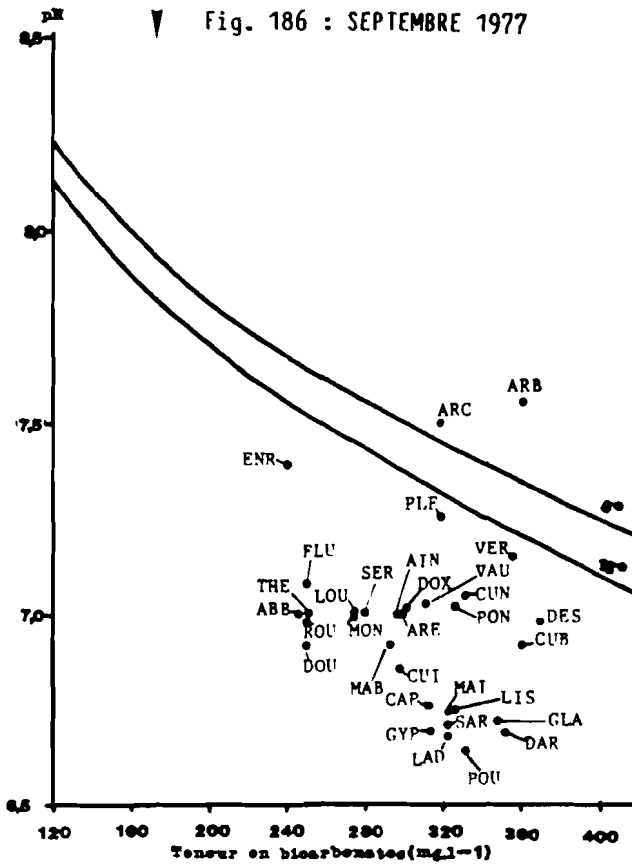
▼ Fig. 184 : JANVIER 1977



▼ Fig. 185 : FEVRIER 1977



▼ Fig. 186 : SEPTEMBRE 1977



▼ Fig. 187 : OCTOBRE 1978

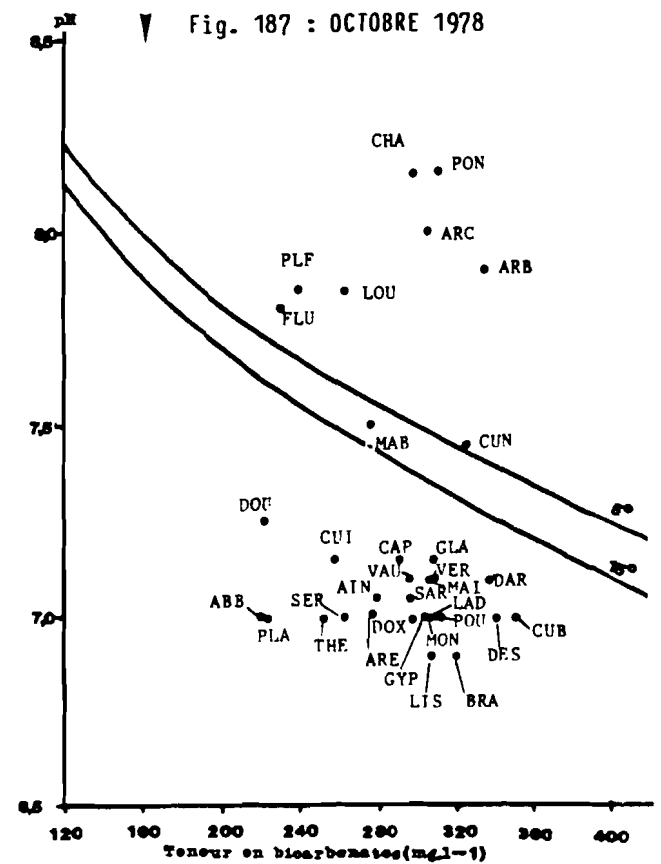


Fig. 184 à 187 : DIAGRAMME DE TILLMANS

Dans les quatre états hydrocinématiques, on remarque un nombre important d'eaux sous-saturées, comme le notait ROQUES (1963) pour les sources du Jura.

Cependant, c'est au cours des campagnes d'hiver (janvier et février) que l'on observe le plus grand nombre d'eaux sursaturées, les eaux les plus sous-saturées étant observées lors des étiages automnaux.

Ceci est dû au fait que pendant les campagnes d'hiver, on note une augmentation de pH et, corrélativement, une dilution modérée des bicarbonates ne permettant pas de maintenir la source dans le domaine sous-saturé. L'augmentation du pH provient du passage à l'exutoire des eaux de ruissellement issues de la fonte des neiges. Ces eaux ont une pCO_2 à l'équilibre avec l'atmosphère et non avec le sol, ce qui explique leur pH élevé.

La figure 188 représente l'évolution des diverses sources des basses eaux d'hiver (1) à la crue de fonte de neiges (2) puis au tarissement d'automne (3)

On y notera dans tous les cas une diminution des teneurs en bicarbonates entre basses eaux et crue, puis une augmentation entre crue et tarissement.

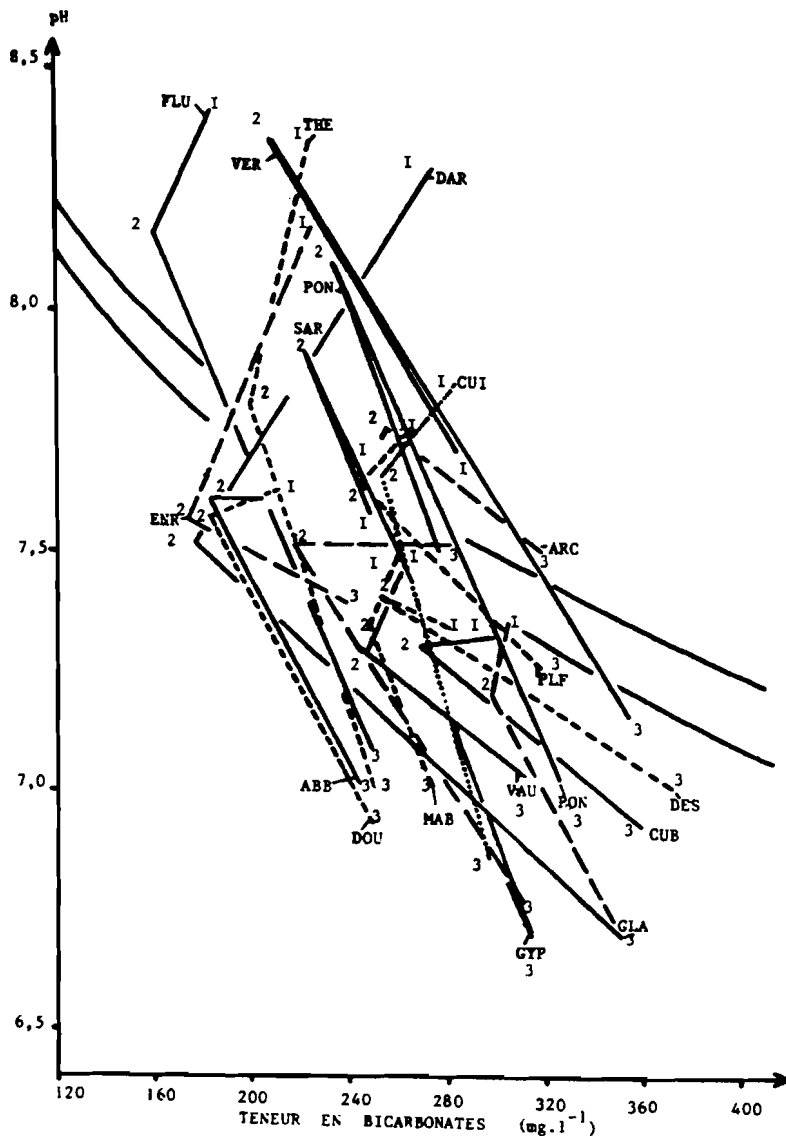


Fig. 188 : EVOLUTION DE LA POSITION DES EMERGENCES SUR LE DIAGRAMME DE TILLMANS

Les sources peuvent ensuite être séparées en deux groupes , l'un où le pH ne cesse de décroître entre les basses eaux d'hiver et le tarissement, c'est le cas des sources de l'Abbaye (ABB), du Doubs (DOU) , du Flumen (FLU), de l'Enragé (ENR), de Malbuisson-Bleue (MAB), du Theusseret (THE), dans le Haut Jura, du Dard (DAR), de la Cuisance (CUI), de la Loue (LOU), de la Glantine (GLA), du Cusancin (CUB), de Plaisir-Fontaine (PLF), de Vaux (VAU) sur les Plateaux.

A l'opposé, les autres émergences : le Verneau (VER), la Sarrasine (SAR), le Gyps (GYP), le Pontet (PON), le Bief de Brans (BRA), le Dessoubre (DES) montrent une augmentation du pH avec la crue de fonte de neige, puis une diminution en étiage.

CODE	SOURCE	1977			1978
		JANVIER	FEVRIER	SEPTEMBRE	OCTOBRE
ABB	ABBAYE	- 0,03	- 0,12	- 0,52	- 0,57
AIN	AIN	-	- 0,06	- 0,30	- 0,32
ARB	BERGERET	-	+ 0,02	+ 0,42	+ 0,71
ARC	ARCIER	+ 0,33	+ 0,37	- 0,28	+ 0,72
ARE	AREUSE	- 0,26	- 0,19	- 0,33	- 0,38
BRA	BIEF de BRAND	- 0,08	- 0,09	- 0,30	- 0,36
BRE	PUITS de la BREME	+ 0,07	- 0,17	-	-
CAP	CAPUCIN	+ 1,19	- 0,07	+ 0,57	+ 0,22
CHA	CHAUVEROCHE	+ 0,77	+ 0,95	-	+ 0,84
CUB	SOURCE BLEUE C.	+ 0,07	- 0,10	- 0,21	- 0,15
CUI	CUISANCE	+ 0,50	+ 0,23	- 0,43	- 0,24
CUN	SOURCE NOIRE C.	-	- 0,06	- 0,16	+ 0,24
DAR	DARD	+ 0,96	- 0,14	- 0,46	- 0,08
DES	DESSOUBRE	- 0,01	- 0,02	- 0,14	- 0,19
DOU	DOUBS	+ 0,02	- 0,17	- 0,57	- 0,31
DOX	DOUX	- 0,15	- 0,15	- 0,32	- 0,33
ENR	ENRAGE	+ 0,59	- 0,19	- 0,12	- 1,1
FLU	FLUMEN	+ 0,71	+ 0,34	- 0,39	+ 0,29
GLA	GLANTINE	+ 0,69	- 0,90	- 0,44	- 0,09
GYP	GYPS	- 0,06	+ 0,33	- 0,55	- 0,26
LAD	LADOYE (seille)	-	- 0,43	- 0,55	- 0,25
LIS	LISON	- 0,09	+ 0,30	- 0,48	- 0,35
LOU	LOUE	+ 0,10	- 0,10	- 0,37	+ 0,44
MAB	SOURCE BLEUE M.	+ 0,41	+ 0,15	- 0,42	+ 0,12
MAI	MAINE	- 0,06	- 0,12	- 0,47	- 0,17
MON	MONTANT	+ 1,01	- 0,08	- 0,42	- 0,34
PLA	PLAINMONT	-	+ 0,34	-	- 0,55
PLF	PLAISIR-FNE	+ 0,36	+ 0,22	+ 0,03	+ 0,41
PON	PONTET	+ 0,15	+ 0,62	- 0,17	+ 0,87
POU	BIEF POUTOT	+ 0,08	- 0,19	+ 0,58	- 0,26
ROU	BIEF ROUGE	+ 0,10	- 0,11	- 0,51	-
SAR	SARRASINE	+ 0,05	+ 0,50	- 0,52	- 0,23
SER	SERRIERE	0,00	+ 0,24	- 0,37	- 0,50
THE	THEUSSERET	+ 0,85	+ 0,22	- 0,43	- 0,46
TON	TONAILLE	-	+ 0,03	-	-
VAU	MIN de VAUX	+ 0,11	- 0,14	- 0,22	- 0,19
VER	VERNEAU	+ 0,36	+ 0,73	- 0,02	- 0,17
	MOYENNE	+ 0,28	+ 0,06	- 0,24	- 0,12
	ECART-TYPE	0,39	0,34	0,35	0,41

◀ Tabl. 50 - SOURCES KARSTIQUES
DU JURA : VALEURS DU ΔpH

Ce groupe ne comprend que des émergences des plateaux.

Les fortes valeurs de pH relevées lors de la crue de fonte des neiges est en accord avec les observations effectuées pendant le suivi des crues du système du Baget (BAKALOWICZ, 1979) ou des systèmes savoyards (LEPILLER, 1980).

XII.5.2. Le ΔpH

Le diagramme de Tillmans ne relie le pH qu'aux bicarbonates, c'est pourquoi il a été utilisé un paramètre décrivant mieux l'ensemble du système thermodynamique que les seuls bicarbonates : le ΔpH , écart entre le pH mesuré et le pH d'équilibre de la solution est calculé à partir des teneurs en bicarbonates, en sulfates, en calcium et en magnésium (ROQUES, 1972 ; BAKALOWICZ, 1979, 1980, 1982), il tient aussi compte de l'ion commun calcium (aux bicarbonates et aux sulfates).

Les valeurs positives révèlent une sursaturation, les valeurs négatives une sous-saturation.

Le tableau 50 confirme les diagrammes de Tillmans : les eaux des étiages automnaux de 1977 et 1978 montrent une tendance plus marquée à la sous-saturation que les eaux d'hiver.

Ainsi, pour la composition chimique des eaux d'étiage sous-saturées, les potentialités de dissolution sont importantes, même si les volumes en transit sont faibles.

Cependant, un certain nombre de sources des plateaux (Cusancin, Arcier, Plaisir-Fontaine, Maine, Verneau, Pontet) sont à l'équilibre ou sursaturées à l'étiage.

XII.5.3. La pression partielle de CO_2 ou pCO_2 (BAKALOWICZ, 1979, 1980, 1982)

Ce paramètre représente la pression partielle de CO_2 d'une phase gazeuse fictive associée à la solution.

Les études menées sur la principale source de CO_2 , le sol, ont montré que ce gaz provenait de deux processus complémentaires, la respiration des racines et l'activité microbiologique.

Le gaz carbonique est toujours produit dans l'eau du sol et non dans sa phase gazeuse, il devient donc un précieux traceur de l'infiltration pour l'hydrogéologue.

Le rythme de production d'anhydride carbonique est fonction de l'activité de la biosphère : le flux de CO_2 , quasi nul de novembre à janvier, est maximal en avril, mai, juin (BACHELIER, 1968).

Dans les systèmes karstiques du Jura, la distribution des valeurs de la pCO_2 entre les campagnes d'hiver et d'automne montre bien des minima l'hiver, et des valeurs élevées au cours des tarissements (tableau 51).

L'écoulement d'étiage incluant essentiellement le drainage des réserves de la matrice, on doit admettre que la recharge de ces réserves s'est effectuée avec une infiltration plus riche en CO_2 que les eaux d'hiver, par exemple lors des crues de printemps.

De plus, comme nous l'avons déjà mis en évidence avec d'autres traceurs,

les émergences en basses eaux d'hiver (tabl. 51) ne restituent pas des eaux à marque caractéristique de l'étiage.

L'existence d'une restitution d'infiltration à marquage hivernal atteste la contribution d'eaux très récentes, pauvres en CO₂, à l'écoulement d'étiage d'hiver.

Les traceurs de l'équilibre calco-carbonique font donc apparaître à l'échelle du Jura des potentialités agressives pour de nombreuses eaux de source, même en tarissement.

De plus, la pCO₂ confirme la restitution d'eaux d'infiltration au cours des basses eaux d'hiver.

CODE	SOURCE	1977			1978
		JANVIER	FEVRIER	SEPTEMBRE	OCTOBRE
ABB	ABBAYE	0,41	0,37	1,91	1,76
AIN	AIN	-	0,48	2,33	1,99
ARB	BERGERET	-	0,08	0,82	0,34
ARC	ARCIER	0,38	0,36	0,82	0,25
ARE	AREUSE	1,24	0,66	2,36	2,21
BRA	BIEF de BRANS	1,36	1,07	3,40	3,19
BRE	PUITS de la BREME	0,95	1,18	-	-
CAP	CAPUCIN	0,63	0,53	4,29	1,63
CHA	CHAUVEROCHE	0,11	0,08	-	0,17
CUB	SOURCE BLEUE C.	1,18	1,09	3,51	2,84
CUI	CUISANCE	0,34	0,46	3,31	1,49
CUN	SOURCE NOIRE C.	-	1,04	2,39	0,94
DAR	DARD	0,11	0,46	5,82	2,17
DES	DESSOUBRE	1,05	0,82	2,96	2,74
DOU	DOUBS	0,41	0,40	2,37	0,99
DOX	DOUX	1,40	0,84	2,38	2,36
ENR	ENRAGE	0,12	0,39	0,78	0,64
FLU	FLUMEN	0,06	0,09	1,64	0,29
GLA	GLANTINE	1,12	1,51	5,34	1,77
GYP	GYP	1,12	0,25	5,05	2,47
LAD	LADOYE (seille)	-	0,84	5,44	2,51
LIS	LISON	1,10	0,28	4,64	3,13
LOU	LCUE	0,67	0,89	2,22	0,17
MAB	SOURCE BLEUE M.	0,32	0,44	2,79	0,70
MAI	MAINE	1,17	1,08	4,65	1,97
MON	MONTANT	0,14	0,54	2,16	2,40
PLA	PLAINMONT	-	0,36	-	1,75
PLF	PLAISIR-FNE	0,36	0,46	1,45	0,28
PON	PONTET	0,72	0,75	2,34	0,17
POU	BIEF POUTOT	0,91	1,19	6,01	2,49
ROU	BIEF ROUGE	0,38	1,02	2,07	-
SAR	SARRASINE	0,80	0,18	5,18	2,14
SER	SERRIERE	0,86	0,39	2,24	2,01
THE	THEUSSERET	0,08	0,26	1,96	2,01
TON	TONAILLE	-	0,59	-	-
VAU	MIN de VAUX	0,71	1,02	2,38	1,90
VER	VERNEAU	0,46	0,08	2,02	1,98
	MOYENNE	0,67	0,61	3,00	1,64
	ECART-TYPE	0,42	0,37	1,51	0,93

← Tabl. 51 - SOURCES KARSTIQUES

DU JURA : VALEURS DE LA pCO₂

pCO₂ EN 10⁻² ATM.

XII.6. AGRESSIVITE DES EAUX VIS-A-VIS DE LA PHASE SILICATEE

Hormis le cas de l'apport anthropique des alcalins étudiés ci-après, le sodium et le potassium sont liés à la phase silicatée argileuse de l'aquifère karstique (PERSOZ et KUBLER in KIRALY, 1973).

On peut donc situer les prélèvements instantanés du Jura dans les diagrammes d'équilibre dans les systèmes Na_2O resp $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ (resp. = respectivement) établis pour 25°C et 1 atmosphère (FETH et al., 1964).

On observe (fig. 189 et 190) sur ces diagrammes représentant $\text{pH-p}[\text{Na}]$ resp $\text{pH-p}[\text{K}]$ en ordonnées, $\text{p}[\text{H}_4\text{SiO}_4]$ en abscisses, que la quasi-totalité des points figurés appartiennent au domaine de stabilité de la kaolinite, pour des $\text{p}[\text{H}_4\text{SiO}_4]$ supérieurs à 3,75 (en-dessous de la valeur de la saturation en quartz).

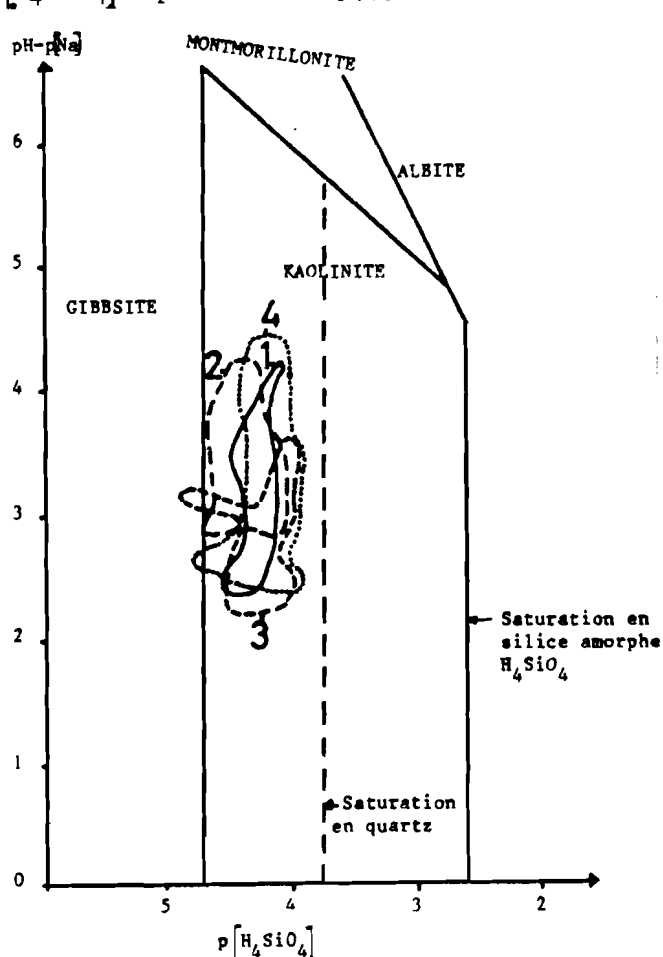


Fig. 189 : DIAGRAMME D'EQUILIBRE DANS LE SYSTEME $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$

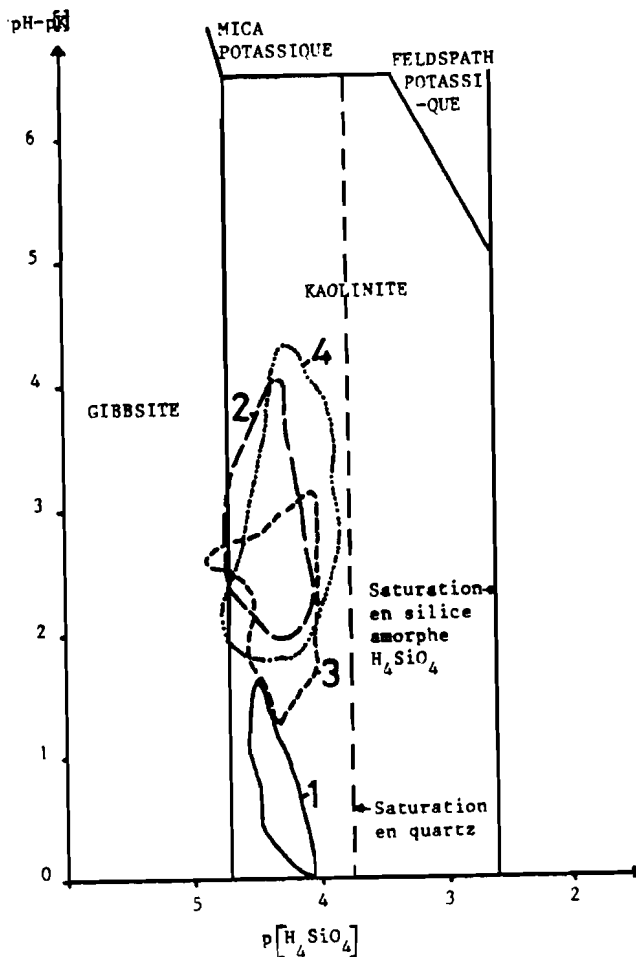


Fig. 190 : DIAGRAMME D'EQUILIBRE DANS LE SYSTEME $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$

Comme les séries géologiques du Jura renferment dans leur phase argileuse, de 16 à 59 % d'Illite (mica K) et de 0 à 69 % de Montmorillonite (PERSOZ et KUBLER in KIRALY, 1973 ; MISEREZ, 1973), ces minéraux ont tendance à s'altérer en kaolinite.

On doit cependant noter que dans ces diagrammes, le pH responsable de l'ordonnée des points n'est pas généré par les équilibres de la phase silicatée, mais bien par les équilibres calco-carboniques, les teneurs en bicarbonates et calcium étant nettement prédominantes dans le contenu ionique des eaux.

La position des points dans les diagrammes alcalino-silicatés n'est donc qu'une conséquence des équilibres calco-carboniques.

Le diagramme $\text{pH-p[Na]} = f(\text{p[H}_4\text{SiO}_4])$ situe les différentes campagnes en des endroits voisins, le diagramme $\text{pH-p[K]} = f(\text{p[H}_4\text{SiO}_4])$ sépare mieux les nuages de points.

On retrouve le comportement saisonnier du potassium (voir p. 50), plus abondant en début de cycle (campagne n°1), qu'en tarissement.

◀ Tabl. 52 - CHLORURES

Jan 77	1							
Fev 77	0,797 π π	1						
Sep 77	0,831 π π	0,890 π π	1					
Oct 78	0,889 π π	0,828 π π	0,881 π π	1				
Déc 79	0,731 π	0,654	0,639	0,729	1			
Sep 80	0,384	0,468	0,547	0,454	0,203	1		
Mars 82	-0,476	-0,451	-0,334	-0,404	-0,366	-0,201	1	
Moyenne	0,836 π π	0,849 π π	0,863 π π	0,881 π π	0,736 π	0,568	-0,233	1
	Jan 77	Fev 77	Sep 77	Oct 78	Déc 79	Sep 80	Mars 82	Moyenne

π π : HAUTEMENT SIGNIFICATIF

π : SIGNIFICATIF

◀ Tabl. 53 - AZOTE NITRIQUE

Jan 77	1							
Fev 77	0,842 π π	1						
Sep 77	0,799 π π	0,927 π π	1					
Oct 78	0,856 π π	0,868 π π	0,925 π π	1				
Déc 79	0,792 π	0,826 π π	0,737 π	0,833 π π	1			
Sep 80	0,793 π	0,768 π	0,793 π	0,756 π	0,631	1		
Mars 82	0,637	0,705	0,747 π	0,734 π	0,684	0,725	1	
Moyenne	0,897 π π	0,921 π π	0,934 π π	0,952 π π	0,860 π π	0,862 π π	0,819 π π	1
	Jan 77	Fev 77	Sep 77	Oct 78	Déc 79	Sep 80	Mars 82	Moyenne

π π : HAUTEMENT SIGNIFICATIF

π : SIGNIFICATIF

Tabl. 52-53 : CORRELATIONS DE RANG DE SPEARMAN

XII.7. LES TRACEURS DE L'ACTIVITE ANTHROPIQUE

Les analyses multidimensionnelles (voir p.257) ont montré que les chlorures, les nitrates, le sodium et le potassium étaient, à l'échelle de la province hydrogéologique jurassienne, - comme la plupart des systèmes étudiés dans ce travail (voir p. 52) -, des éléments externes aux systèmes karstiques.

Les roches du Dogger, du Malm et du Crétacé inférieur renferment de 80 à 500 ppb de Na_2O , de 180 à 1 900 ppb de K_2O (PERSOZ et KUBLER in KIRALY, 1973). A part quelques cas discutés ci-après, les précipitations en sont peu chargées (le littoral est à plus de 500 km du Jura, il y a peu d'industries génératrices de fumées), si bien que l'essentiel des teneurs en ces quatre éléments est dû à l'activité humaine.

La répétition d'instantanés sur les sources jurassiennes permet de comparer l'évolution de leur teneur.

Les résultats des analyses figurent dans l'annexe 6. Les prélèvements de 1977 et 1978 ont été analysés au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon, les prélèvements de 1979, 1980, 1982 au Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée de Besançon.

Les méthodes d'analyse étant différentes, il est difficile de comparer les valeurs absolues des teneurs d'une même source entre ces deux périodes.

En revanche, il est possible d'étudier la distribution des teneurs sur une même campagne.

Pour suivre les variations de teneur d'une campagne à l'autre, il est fait appel aux classes de concentrations et aux rangs des teneurs, pour introduire des valeurs relatives.

XII.7.1. Reproductibilité intercampagnes des phénomènes

Afin de comparer les sept campagnes de prélèvements instantanés (janvier, février, septembre 1977, octobre 1978, décembre 1979, septembre 1980, mars 1982), 21 émergences échantillonnées au cours de toutes les campagnes ont été sélectionnées :

Le classement des émergences lors des campagnes a été opéré par teneurs croissantes, et des corrélations de rang de Spearman ont été tentées entre campagnes.

Les tableaux 52 à 55 donnent les valeurs de ces coefficients pour les 4 éléments.

On remarque que pour K^+ et NO_3^- , la moyenne des 7 campagnes et chacune des campagnes sont corrélées de manière hautement significative, pour Na^+ aussi, sauf lors de la campagne de septembre 1980 et que pour Cl^- seules les 4 premières campagnes sont bien corrélées avec la moyenne.

Dans 25 cas sur 28 (89 %), le rang de chacune des campagnes est représentatif du rang de la moyenne des observations.

Le tableau 56 synthétise les résultats présentés dans les matrices de corrélation de Spearman pour chacun des éléments et chacune des campagnes.

On y remarque que le sodium (71 %), le potassium (86 %) et l'azote nitrique (76 %) ont un classement de teneurs représentatif d'un phénomène général.

Ce sont les campagnes de janvier, février, septembre 1977, octobre 1978

et décembre 1979 qui ont les classements les plus représentatifs (63 à 83 % de corrélations de rang au moins significatives).

Si l'on excepte les chlorures, toutes les campagnes montrent un classement significatif, sauf celle de septembre 1980 (72 à 94 % de corrélations significatives).

Un instantané est donc reproductible, mais, afin de mieux avérer l'interprétation, plusieurs sont souhaitables.

Jan 77	1								
Fev 77	0,811 **	1							
Sep 77	0,862 **	0,806 **	1						
Oct 78	0,823 **	0,734 *	0,906 **	1					
Déc 79	0,881 **	0,760 *	0,960 **	0,915 **	1				
Sep 80	0,501	0,545	0,627	0,478	0,594	1			
Mars 82	0,878 **	0,792 *	0,875 **	0,824 **	0,917 **	0,620	1		
Moyenne	0,913 **	0,860 **	0,970 **	0,906 **	0,958 **	0,705	0,920 **	1	
	Jan 77	Fev 77	Sep 77	Oct 78	Déc 79	Sep 80	Mars 82	Moyenne	

◀ Tabl. 54 - SODIUM

Jan 77	1								
Fev 77	0,852 **	1							
Sep 77	0,784 *	0,946 **	1						
Oct 78	0,725	0,838 **	0,839 **	1					
Déc 79	0,760 *	0,853 **	0,764 *	0,870 **	1				
Sep 80	0,612	0,748 *	0,772 *	0,740 *	0,633	1			
Mars 82	0,731 *	0,889 **	0,916 **	0,897 **	0,731 *	0,844 **	1		
Moyenne	0,820 **	0,951 **	0,931 **	0,943 **	0,903 **	0,828 **	0,935 **	1	
	Jan 77	Fev 77	Sep 77	Oct 78	Déc 79	Sep 80	Mars 82	Moyenne	

◀ Tabl. 55 - POTASSIUM

** : HAUTEMENT SIGNIFICATIF * : SIGNIFICATIF

Tabl. 54-55 : CORRELATIONS DE RANG DE SPEARMAN

		jan. 77	fév. 77	sep. 77	oct. 78	déc. 79	sep. 80	mar. 82	Σ	z	
Na	HS	5	2	5	4	4	0	4	24	30	71
	S	0	3	0	1	1	0	1	6		
K	HS	1	5	3	4	2	1	4	20	36	86
	S	3	1	3	1	3	3	2	16		
Cl	HS	3	3	3	3	0	0	0	12	14	33
	S	1	0	0	0	1	0	0	2		
N	HS	3	4	3	4	2	0	0	16	32	76
	S	2	1	3	2	2	4	2	16		
Σ	HS	12	14	14	15	8	1	8	72	112	67
	S	6	5	6	4	7	7	5	40		
Total	avec Cl	18	19	20	19	15	8	13	112		
	sans Cl	14	16	17	16	14	8	13	98		
z	avec Cl	75	79	83	79	63	33	54	67		
	sans Cl	78	89	94	89	78	44	72	78		

Le 5 dans la colonne jan. 77 et dans la ligne Na - HS signifie que, pour le traceur sodium, le rang des prélèvements de la campagne de janvier 1977, est corrélé de manière hautement significative avec le rang des prélèvements de 5 autres campagnes.

Tabl. 56 - NOMBRE DE CORRELATIONS DE RANG DE SPEARMAN HAUTEMENT SIGNIFICATIVES ET SIGNIFICATIVES PAR CAMPAGNE ET PAR ELEMENT

XII.7.2. Interprétation des résultats de la campagne d'étiage 1978

Cette campagne étant l'une des plus représentatives du classement des émergences a été retenue pour une étude de détail, en raison du nombre important de sources prélevées (47).

A. Teneurs en chlorures

La moyenne des teneurs des 47 sources échantillonnées s'élève à $4,4 \text{ mg.l}^{-1}$.

La courbe des fréquences cumulées des concentrations, par ordre décroissant, est tracée sur la figure 191.

Elle permet de justifier les limites des classes choisies pour tracer l'histogramme.

On remarquera que 50 % des sources ont des teneurs inférieures à $3,8 \text{ mg.l}^{-1}$ et qu'une moitié de la population a des teneurs comprises entre $2,5$ et $5,1 \text{ mg.l}^{-1}$.

La valeur de la moyenne, plus élevée que celle de la médiane, indique une distribution dissymétrique avec un étalement vers les fortes concentrations qui suggère des apports anthropiques à certains systèmes karstiques.

Les sources les plus pauvres se situent dans la Haute-Chaîne et sur le deuxième plateau, dans des régions essentiellement forestières à faible densité de population.

L'intervalle 1 à 3 mg.l⁻¹ de Cl⁻ semble représenter la teneur naturelle des eaux des terrains calcaires sous climat jurassien.

A part la source Bergeret (ARB), aucune émergence du premier plateau n'appartient à ce groupe.

Le groupe des fortes concentrations comprend essentiellement les sources du premier plateau à densité de population plus élevée et à élevage plus développé. Dans ce groupe apparaissent cependant les sources de Fontaine-Ronde et de Montant, qui sont vraisemblablement contaminées par le salage hivernal des routes. En effet, Fontaine-Ronde est située en bordure immédiate de la route Lausanne-Pontarlier, et les relations entre le col de la Givraine-St Cergues, autre axe routier important, et la source de Montant ont été montrées par traçage (AUBERT et al., 1970).

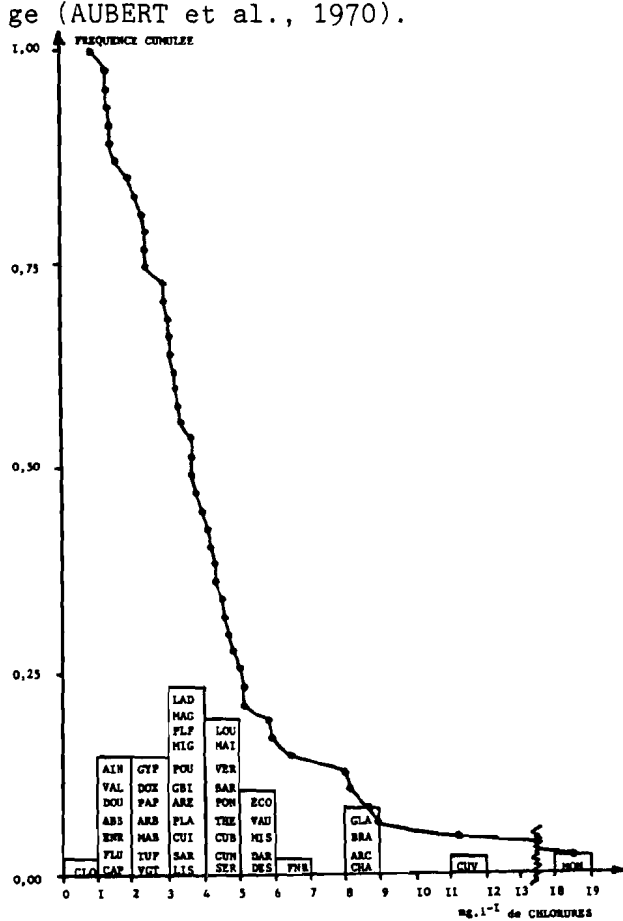


Fig. 191 : DISTRIBUTION DES TENEURS EN CHLORURES - OCTOBRE 1978 (CHAUVE et al 1982)

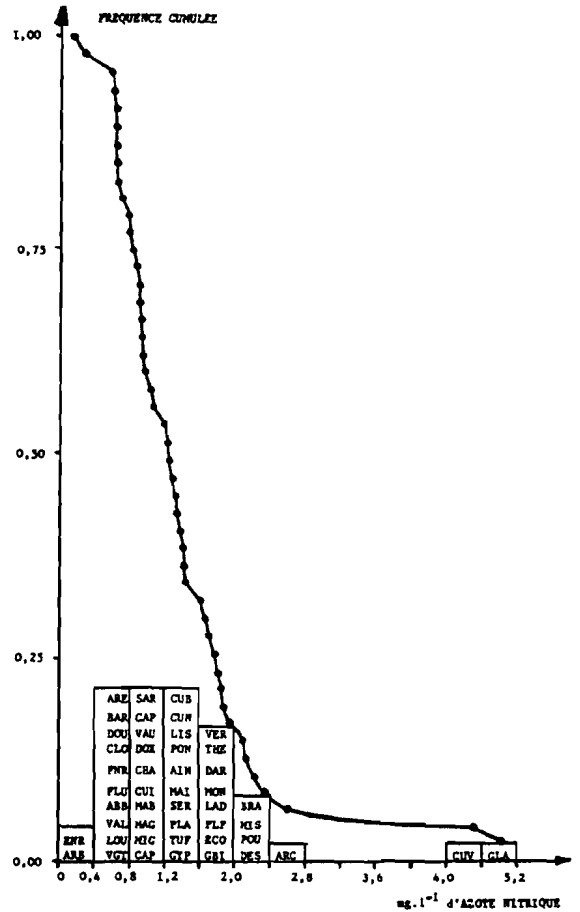


Fig. 192 : DISTRIBUTION DES TENEURS EN NITRATES - OCTOBRE 1978 (CHAUVE et al 1982)

B. Teneurs en nitrates

La moyenne des teneurs observées s'élève à 1,4 mg.l⁻¹ d'azote nitrique, la médiane à 1,24 mg.l⁻¹ et une moitié de la population a une teneur comprise entre 0,8 et 1,8 mg.l⁻¹. Comme pour les chlorures, l'histogramme des concentrations (fig. 192) fait apparaître une dissymétrie avec un étalement vers les fortes valeurs.

Les sources présentant une teneur inférieure à $0,8 \text{ mg.l}^{-1}$ de N sont situées dans tous les contextes. En revanche, les sources riches en nitrates appartiennent toutes au Jura des plateaux. Cette localisation fait penser à un apport agricole ou humain. L'existence de corrélations (tabl. 57) significatives entre la teneur en azote et la silice dissoute, la teneur en azote et le potassium nous permet de préciser que la source de cet azote est le sol, soit de manière naturelle, soit plutôt à la suite d'épandages.

Cl	—					
N	NS	—				
Na	0,61**	NS	—			
K	0,61**	0,77**	0,54*	—		
SiO ₂	NS	0,58*	NS	NS	—	
SO ₄	NS	NS	0,60**	NS	NS	—
	Cl	N	Na	K	SiO ₂	SO ₄

NS non significatif *significatif **hautement significatif

Tabl. 57 - CORRELATIONS ENTRE LES TENEURS DE QUELQUES IONS - OCTOBRE 1978, 47 SOURCES

C. Teneurs en potassium

La moyenne des teneurs ($1,77 \text{ mg.l}^{-1}$ de K^+) est toujours supérieure à la médiane ($1,45 \text{ mg.l}^{-1}$), alors qu'une moitié des sources a des teneurs comprises entre $0,60$ et $2,10 \text{ mg.l}^{-1}$.

Les sources à faible teneur ($< 0,5 \text{ mg.l}^{-1}$) constituent un groupe homogène qui paraît représenter la teneur naturelle des systèmes carbonatés jurassiens. Une corrélation significative du potassium avec les nitrates montre son origine pédologique.

Il est toutefois difficile de distinguer le rôle régulateur de la phase silicatée sur les alcalins (MISEREZ, 1973) des facteurs d'ordre biologique.

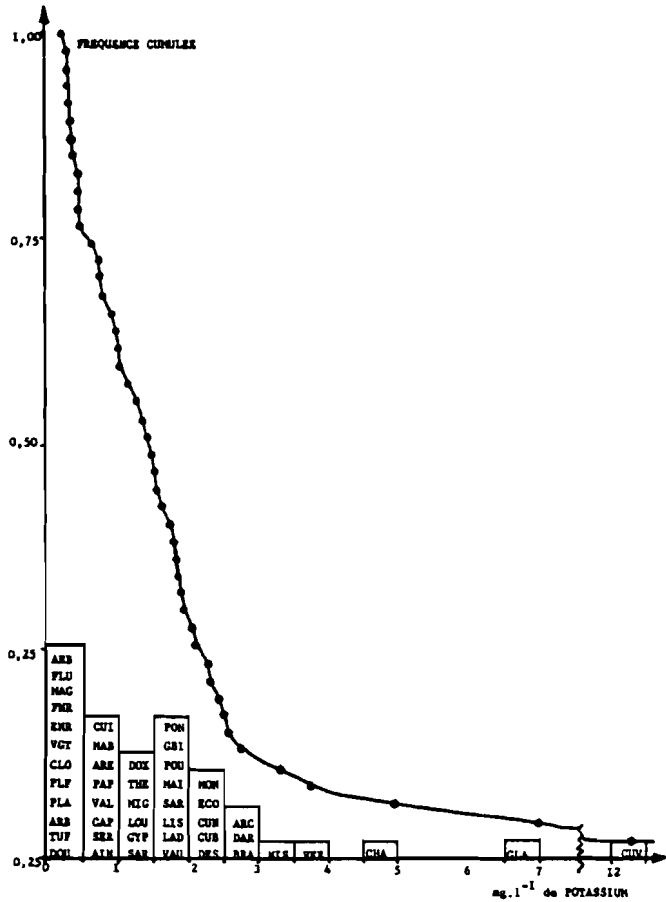
Pour les sources à forte teneur ($> 2 \text{ mg.l}^{-1}$), qui appartiennent toutes au premier plateau, l'origine anthropique du potassium est toutefois certaine.

D. Teneurs en sodium

La moyenne des teneurs ($2,40 \text{ mg.l}^{-1}$) est plus élevée que la médiane ($1,9 \text{ mg.l}^{-1}$) avec étalement des fortes valeurs. Une moitié des sources a des concentrations comprises entre $1,15$ et $2,75 \text{ mg.l}^{-1}$.

La distribution est très proche de celle des chlorures (fig. 194), à l'exception de l'exhaure du tunnel de Vallorbe, chargée en sodium ($10,3 \text{ mg.l}^{-1}$) ainsi qu'en sulfates ($37,5 \text{ mg.l}^{-1}$).

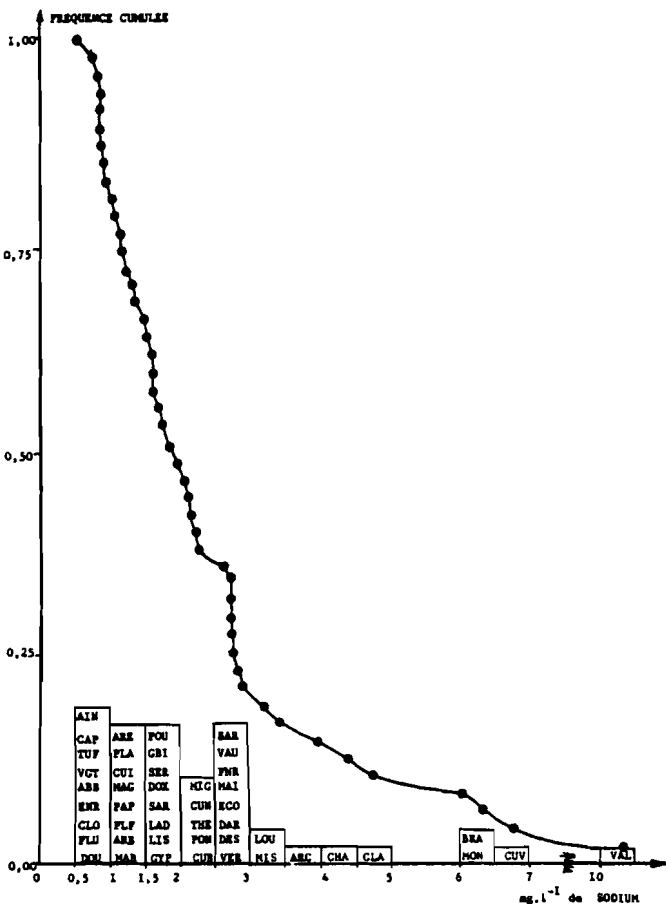
Cette minéralisation anormale pour le Jura, bien que faible, est sans doute acquise par les eaux de drainage lors de leur circulation finale dans le tunnel par lessivage des enduits des voûtes.



◀ Fig. 193 : DISTRIBUION DES TENEURS EN EN POTASSIUM - (CHAUVE et al 1982)

	Na	K	Cl	N	Somme
ABB	5	3	5	5	18
AIN	9	13	8	28	58
ARB	11	12	13	1	37
ARC	41	42	43	45	171
ARE	17	18	20	11	66
BAR	38	21	32	11	102
BRA	45	41	44	44	174
CAP	8	14	2	13	37
CHA	42	45	42	18	147
CLO	3	5	1	9	18
CUB	26	38	29	32	125
CUI	15	20	17	17	69
CUN	29	36	28	31	124
CUV	46	47	46	46	185
DAR	33	37	37	38	145
DES	32	35	36	41	144
DOU	1	1	6	10	18
DOX	22	26	15	19	82
ECO	33	39	39	34	145
ENR	4	8	4	2	18
FLU	2	11	3	7	23
FNR	36	9	41	7	93
GBI	24	33	21	33	111
GLA	43	46	45	47	181
GYP	18	22	14	23	77
LAD	20	28	26	35	109
LIS	19	29	16	30	94
LOU	40	23	35	3	101
MAB	10	19	10	16	55
MAG	14	10	24	15	63
MAI	33	31	34	27	125
MIG	30	24	25	14	93
MIS	39	43	38	43	163
MON	44	40	47	37	128
PAP	13	17	17	21	68
PLA	16	4	19	25	64
PLF	12	5	23	36	76
PON	27	34	31	29	121
POU	25	32	22	42	121
SAR	20	30	18	22	90
SER	23	14	27	26	90
THE	28	25	30	39	122
TUF	6	2	10	24	42
VAL	47	16	7	5	75
VGT	6	7	9	3	25
VAU	37	27	39	20	123
VER	31	44	33	40	148

À Tabl. 58 - RANG DES SOURCES POUR QUATRE ELEMENTS - OCTOBRE 1978



◀ Fig. 194 : DISTRIBUION DES TENEURS EN SODIUM - OCTOBRE 1978 (CHAUVE et al 1982)

XII.7.3. Définition d'un indice de contamination

A partir des teneurs en K, Na, Cl et N/NO₃, on peut tenter de définir un indice de contamination.

Une manière de procéder est de discrétiser les distributions des éléments des figures 191 à 194 en entrant les teneurs dans des classes, et en faisant la somme des indices de classes (CHAUVE et al., 1982).

Cette méthode présente l'inconvénient de faire ressortir les points à teneur extrême en un élément.

On peut aussi faire la somme des rangs des émergences pour chacun des éléments. Les valeurs absolues des teneurs extrêmes sont alors moins prises en compte (tabl. 58).

Compte-tenu des corrélations (tabl. 57) existant entre chlorures et sodium d'une part, nitrates et potassium d'autre part, il aurait peut-être été possible de se limiter à l'utilisation des deux seuls anions.

Cependant, l'adjonction du sodium et du potassium modifie le classement de certaines sources (voir plus loin).

La plupart des réservoirs sont généralement affectés de façon homogène par les quatre éléments extérieurs au karst.

Parmi les exceptions, on observe les sources de Fontaine-Ronde, Baume-Archée, Loue et Montant marquées en chlorures de sodium par le salage des routes, la source de la Glantine, marquée en nitrate de potassium, ce qui suggère une pollution agricole, et l'exhaure du tunnel de Vallorbe déjà citée.

Le report cartographique de cet indice de contamination (somme des rangs des émergences pour les 4 éléments, fig. 195) fait apparaître, comme pour les quatre éléments examinés séparément, l'opposition entre le Jura des plateaux (forts indices) et le Haut Jura (faibles indices).

On remarquera que la liaison hydrodynamique entre émergences prime sur leur proximité géographique.

Ainsi, la source Bergeret (ARB) émergence d'un système karstique dont l'impluvium forestier est situé sur le faisceau bisontin a un faible indice comparé à la source d'Arcier (ARC) émergence du premier plateau.

La source de Plaisir-Fontaine (PLF) est indépendante du système complexe du premier plateau (Arcier, Maine-MAI, Ecoutot-ECO, Moulin des Isles-MIS), tant par son atteinte anthropique que par son hydrodynamisme.

Dans le Haut Doubs, les émergences de l'unité du Risoux (Vallorbe-VAL, Fontaine-Ronde-FNR et grande source de Malbuisson-MAG) ont un indice plus élevé que les émergences des systèmes des anticlinaux locaux (Doubs-DOU, Capucins-CAP, Clouterie-CLO, Source Bleue-MAB) à impluvium forestier, presque totalement dépourvu de réseau routier.

Il faut noter que certaines sources captées pour l'alimentation en eau potable sont encore peu atteintes par les traceurs de l'activité humaine, ainsi la source du Doubs alimentant Mouthe (2 000 habitants), la source de la Papeterie, Champagnole et syndicat du Centre-Est (20 000 habitants), la

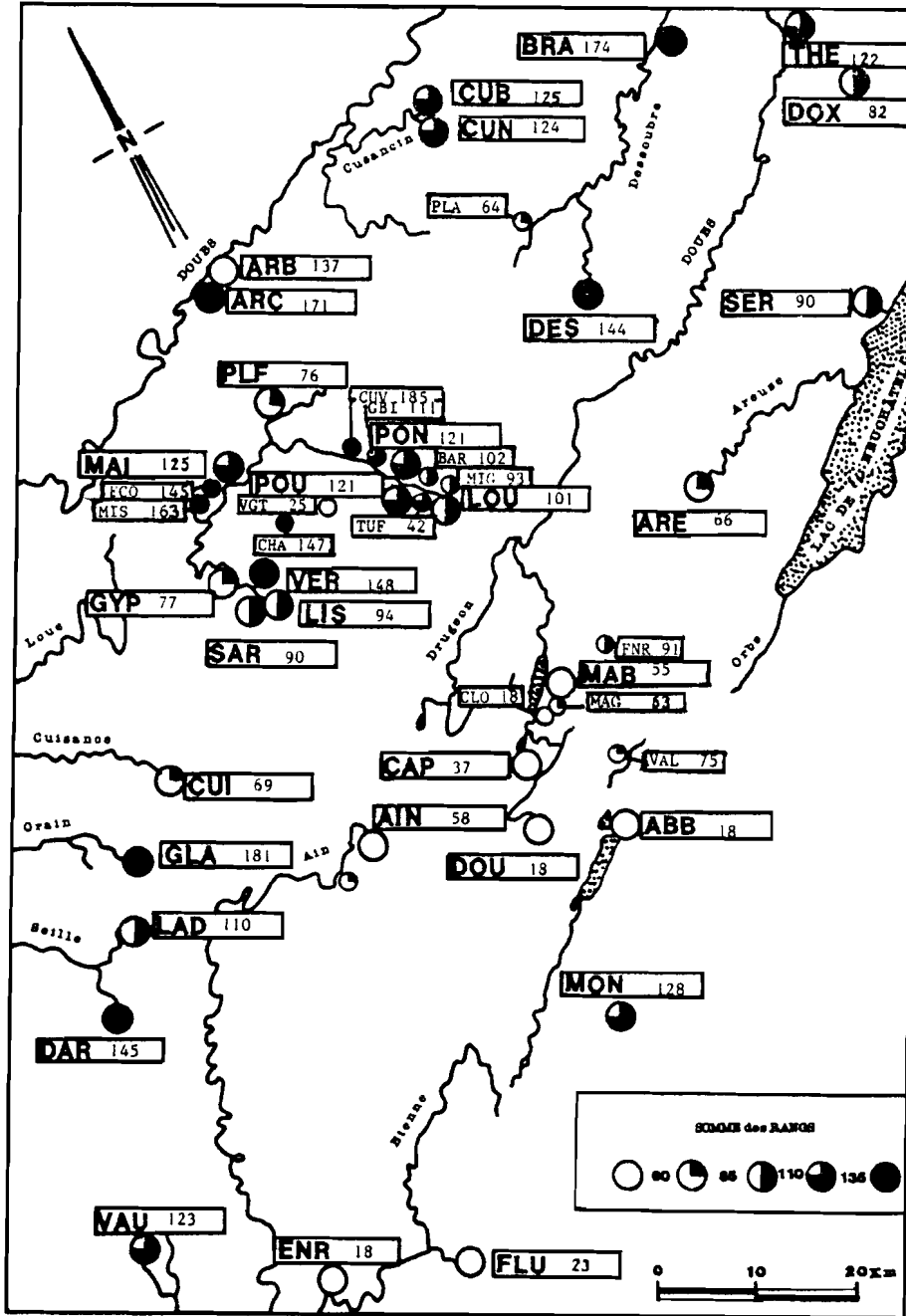


Fig. 195 : CARTE DES INDICES DE CONTAMINATION DES SOURCES DU JURA

Cuisance la ville d'Arbois (4 000 habitants), la source de la Tuffière le syndicat de la Haute Loue (35 000 habitants).

Certaines émergences telles Arcier (alimentant 20 000 habitants de Besançon) ou Vaux (alimentant 3 500 habitants à Orgelet) figurent parmi les plus mal classées, sans toutefois que pour l'instant les teneurs excèdent les normes de potabilité.

Ceci montre que, malgré le faible débit, une partie de l'écoulement provient d'un ruissellement souterrain provoqué par le déneigement.

On doit donc considérer que les basses eaux d'hiver ne sont pas totalement représentatives de l'état des réserves.

En revanche, la fonte généralisée de la couverture neigeuse, responsable de la crue de février 1977, provoque une dilution générale des teneurs et un regroupement.

Pour les deux campagnes d'étiage d'automne (1977c et 1978), le classement des sources en fonction de leur teneur en chlorures est très comparable.

Ces observations confirment les analyses multivariées dans lesquelles les nuages de points des campagnes de basses eaux d'hiver occupent une position intermédiaire entre ceux des étiages automnaux et ceux des crues de fonte de neige (MUDRY et al., 1979).

B. Variations des teneurs en nitrates

La figure 197 rassemble les histogrammes des teneurs en nitrates des 29 sources.

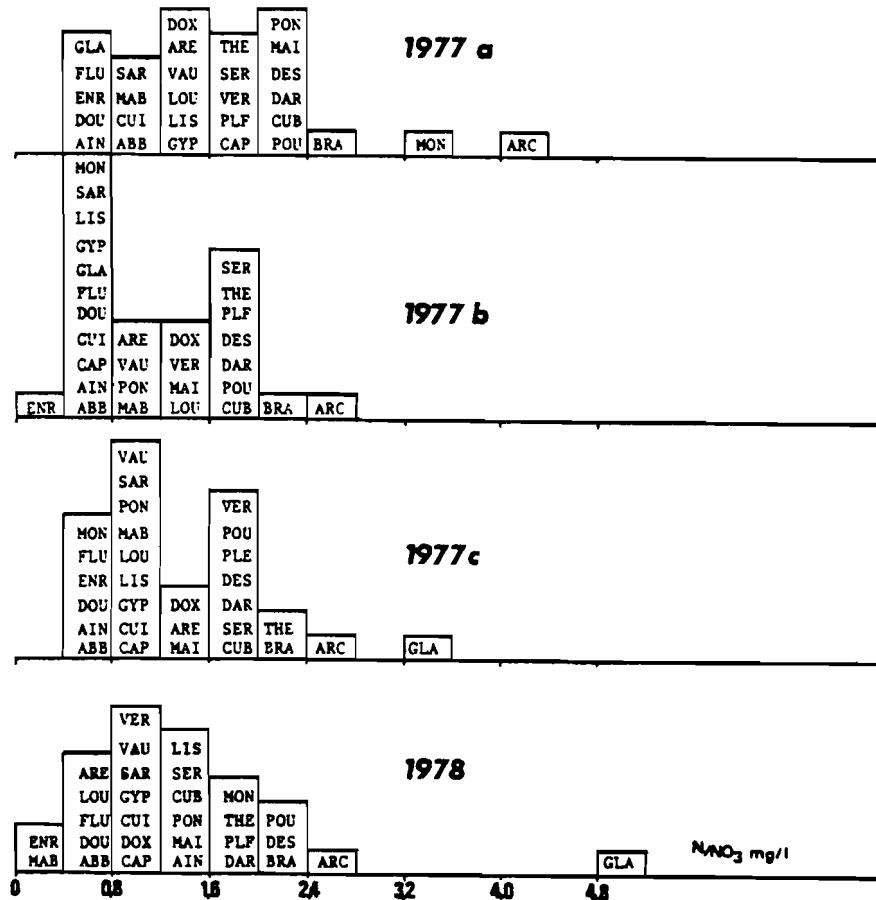


Fig. 197 : HISTOGRAMMES DES TENEURS EN NITRATES (1977-82)

Le classement des émergences varie très peu et l'étalement des valeurs est à peu près constant d'une campagne à l'autre, qu'elle soit effectuée en basses eaux d'hiver, en crue de fonte de neige ou en étiage.

Contrairement aux chlorures sujets à variations hivernales du fait du salage du réseau routier, les nitrates ne sont pas perturbés par le déneigement. Leur teneur est le reflet d'un état permanent d'atteinte des réserves par l'activité humaine.

C. Indices de contamination

La comparaison des 28 sources communes à la campagne 4 (octobre 1978) et aux campagnes d'étiage de 1977 (1 : janvier ; 3 : septembre) démontre la représentativité du rang des émergences en octobre 1978 par rapport au rang de la somme des indices (rangs pour 4 éléments) des 3 campagnes (tabl. 57).

Le coefficient de corrélation de rang de Spearman est hautement significatif (0,941).

La somme des 3 campagnes montre la même répartition géographique que l'effectif de 47 sur la seule campagne de 1978.

Une campagne d'étiage (surtout en automne) est donc représentative du degré de contamination des réserves des systèmes par les éléments d'origine anthropique.

XII.7.5. Conclusion

Le prélèvement des émergences karstiques majeures de la chaîne jurassienne a permis, grâce au rang des émergences sur les teneurs en éléments à origine anthropique, de dresser un "état de santé" relatif des réserves des systèmes.

Les teneurs observées montrent, malgré une bonne qualité permettant de considérer toutes les eaux prélevées comme chimiquement potables, une atteinte sélective des aquifères karstiques par les éléments extérieurs aux systèmes.

Ces teneurs ne permettent pas de préjuger du comportement des émergences en crue, ni de la qualité bactériologique de ces eaux.

Le calcul d'un indice de contamination moyen par grand secteur structural permet de quantifier l'atteinte des grandes unités :

. Indice de contamination moyen (étiage 1978) :

- premier plateau	: 114,9
- deuxième plateau	: 98,1
- Haute Chafne, versant suisse	: 83,0
- Haute Chafne, versant français	: 41,6

Ces valeurs opposent les zones forestières et peu peuplées du versant français de la Haute Chafne, dont l'indice moyen inférieur à 50, peut être considéré comme caractéristique d'un régime naturel, aux régions d'élevage à population plus dense du versant suisse du Jura et surtout des plateaux.

Ce classement des émergences permet de concevoir un plan de surveillance de la qualité des eaux des réserves du karst.

D'une part, la répétition d'instantanés d'étiage à l'échelle pluri-décennale permettra de suivre le comportement relatif des systèmes, sachant que certains (groupe 1 sur la figure 195) représentent un régime naturel dans le Jura. Ces critères ne sont pas directement transposables dans d'autres régions où par exemple les chlorures peuvent avoir une origine météorique.

Le suivi de certaines émergences sélectionnées dans les différents groupes permettra de détailler l'évolution en fonction des épisodes hydrométéorologiques, ce que les instantanés ne font pas apparaître.

XXI.8. ANALYSES MULTIDIMENSIONNELLES

XII.8.1. Introduction

A partir de cette approche analytique des données physico-chimiques des sources karstiques lors des instantanés, on peut tester le comportement global des aquifères jurassiens.

Le nombre de paramètres utilisés impose le recours aux analyses multidimensionnelles.

La comparaison du pouvoir discriminant des différentes méthodes a montré qu'il fallait proscrire les techniques utilisant les teneurs brutes (analyse factorielle des correspondances et analyse en composantes principales sur données brutes) dans des eaux presque exclusivement bicarbonatées calciques, le rôle des ions mineurs étant totalement occulté par ce faciès (MUDRY et al., 1979).

Les méthodes retenues sont donc l'analyse en composantes principales sur valeurs normées (ou centrées réduites) et l'analyse factorielle des correspondances sur valeurs classées.

La première méthode utilise des variables continues et ne permet pas une représentation simultanée des individus et des descripteurs (voir III.3), la seconde utilise des variables discrètes mais permet une projection coplanaire des individus et des descripteurs.

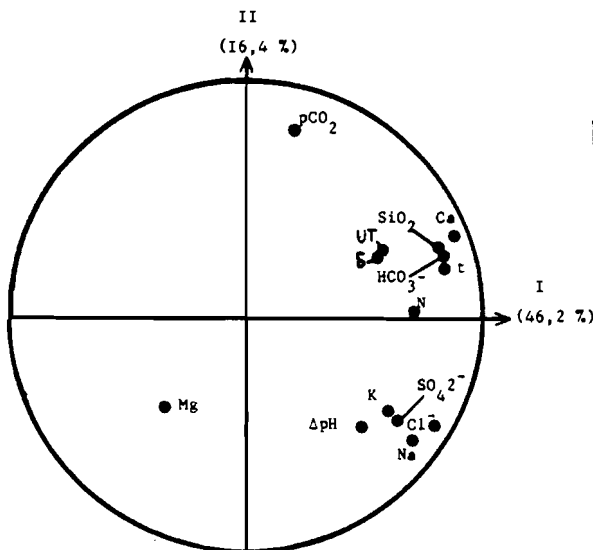


Fig. 198 : JURA - ETIAGE 1977, ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan IxII)

Dans les deux cas, la projection sur un espace bidimensionnel (ou plan) se fait avec perte d'information, car la représentation graphique de la totalité de la variance requiert un grand nombre d'axes factoriels.

C'est pourquoi il a été tenté une classification ascendante hiérarchique sur les données discrétisées d'une campagne instantanée.

Cette méthode n'utilise pas la projection sur des axes factoriels, mais la distance réelle (avec la métrique du Khi-deux) entre individus, entre descripteurs, entre individus et descripteurs au sein du nuage de points multidimensionnel (MUDRY, 1980).

La classification ascendante hiérarchique agglomère à un niveau bas les points les plus proches de l'espace (annexe 5).

Deux points agglomérés sont remplacés par leur barycentre affecté d'un poids 2.

Les points sont agglomérés à des niveaux de plus en plus élevés.

On atteint la fin du processus de classification lorsque tous les points sont inclus dans une super-classe.

On peut alors décider arbitrairement de placer des niveaux de coupure dans cette hiérarchie.

XII.8.2. Analyse en composantes principales de la campagne de septembre 1977

Cette campagne a été choisie en raison de la sévérité de l'étiage et du nombre de sources prélevées (33).

14 variables physico-chimiques ont été utilisées sur les 33 individus.

La figure 198 donne la signification du plan factoriel I x II.

L'axe I est un axe "minéralisation totale".

Seul le magnésium, traceur lithologique du Malm dolomitique, échappe à la polarisation de cet axe.

L'axe II, en revanche représente la localisation spatiale de l'acquisition de cette minéralisation.

Surtout corrélé avec la pCO_2 , il oppose dans une moindre mesure les marqueurs de l'aquifère (température, bicarbonates, calcium, silice, tritium, oxygène¹⁸) aux traceurs de l'infiltration (chlorures, sodium, sulfates et potassium), auxquels est associée la sursaturation (ΔpH).

Il est remarquable que la signification des axes factoriels pour un instantané d'étiage soit identique à celle des ACP portant sur des suivis diachrones d'aquifères (voir IV.3.1.).

Le diagramme des individus (fig. 199) oppose deux ensembles hydro structuraux : à gauche (valeurs négatives sur l'axe I) les émergences du Jura plissé ; à droite les émergences des plateaux.

On remarquera la situation de la source de la Loue, affiliée au groupe Haut Jura par son alimentation en provenance des pertes du Haut Doubs, et la position de l'Ain au sein du groupe du Haut Jura bien qu'elle émerge du second plateau.

Cependant, la lithologie du second plateau en bordure de la Haute Chaîne est semblable à celle de cette unité, avec en particulier les dolomies portlandiennes.

Le groupe du Haut Jura est en fait composé de deux entités, l'une incluant la plupart des émergences du versant français, pauvre en traceurs de l'infiltration et de l'aquifère, l'autre composée des émergences du versant suisse, surtout caractérisée par ses faibles pCO_2 équilibrantes.

Le groupe des plateaux montre également deux tendances, l'une où le fonctionnement "naturel" prédomine (pôle positif sur l'axe II), l'autre où les traceurs de l'activité humaine prévalent (abscisses négatives), associés à une sursaturation.

L'ACP d'une campagne d'étiage est donc un accès au comportement des réserves des différents aquifères, en opposant les réponses physico-chimiques et isotopiques des systèmes à un instant donné.

Cette approche fournit un résultat de même nature que l'ACP d'un suivi temporel sur une émergence car l'espace géographique (lors des instantanés) permet d'échantillonner les mêmes phénomènes hydrocinématiques (minéralisation totale fonction du temps de séjour, origine spatiale de la minéralisation) que le facteur temps (lors des suivis). Cette propriété est connue sous le nom d'ergodicité.

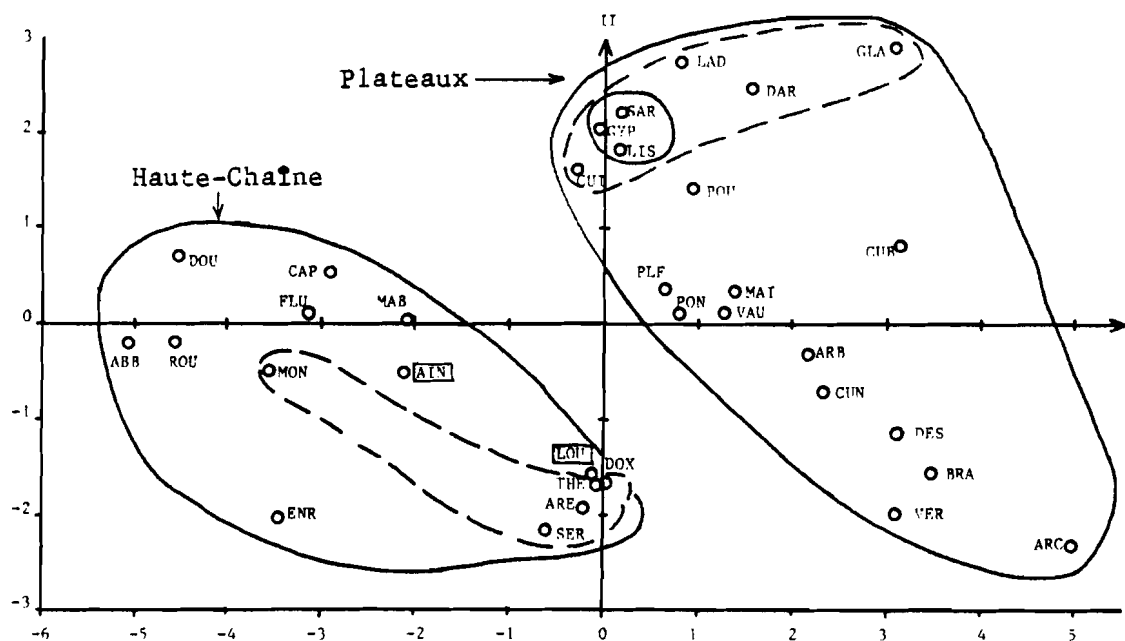


Fig. 199 : JURA - ETIAGE 1977, ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan I xII)

XII.8.3. Classification ascendante hiérarchique de la campagne d'étiage 1978

Cette campagne a été choisie en raison de l'effectif important (48 sources prélevées à l'étiage).

11 descripteurs (tritium, silice, sodium, potassium, magnésium, calcium, bicarbonates, chlorures, nitrates, sulfates, strontium) ont été utilisés.

Comme pour une analyse factorielle des correspondances, les valeurs numériques (ou teneurs) ont été discrétisées par classement.

Pour chaque descripteur, cinq classes de teneurs croissantes ont été déterminées (tabl. 59).

Les seuils ont été choisis pour que les effectifs des classes soient voisins.

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Na	0,04	0,07	0,10	0,13	
K	0,01	0,023	0,036	0,050	
Mg	0,24	0,32	0,40	0,48	
Sr	0,0023	0,0032	0,0041	0,0050	
Ca	3,8	4,3	4,7	5,2	
HCO ₃ ⁻	4,3	4,6	4,9	5,2	
Cl ⁻	0,05	0,08	0,11	0,14	
N/NO ₃ ⁻	0,055	0,085	0,115	0,145	
SO ₄ ²⁻	0,13	0,16	0,19	0,21	
Tritium	65	85	105	125	
SiO ₂	2,75	3,50	4,25	5,00	

Teneurs des ions et de la Silice en milliéquivalents par litre, teneurs en Tritium en Unités-Tritium

Tabl. 59 - SEUILS DE CLASSE UTILISES POUR LA DISCRETISATION PREALABLE A LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE

La classification utilise la variance absorbée par les 7 premiers facteurs, soit ici environ 50 % de l'information totale (contre 30 % pour le plan factoriel I x II d'une AFC classique sur les mêmes données).

La hiérarchie obtenue comporte 205 noeuds.

J'ai choisi arbitrairement 8 taxons différents correspondants aux noeuds 186, 193, 197, 181, 198, 195, 191 et 194.

La figure 200 donne la hiérarchie obtenue et le tableau 59 fournit les seuils de teneur utilisés comme critères de la hiérarchie.

Par exemple, le taxon du noeud 193 (2ème classe) est caractérisé par une teneur très faible en tous les éléments servant à sa définition :

0,04 meq en Na , 0,01 meq en K ...

Cette famille comporte les sources de l'Enragé, du Flumen, de l'Abbaye...

La figure 201 donne la répartition géographique des 8 taxons.

Le tireté matérialise la limite entre les superclasses 203 et 204, c'est-à-dire entre les deux plus grands ensembles distincts.

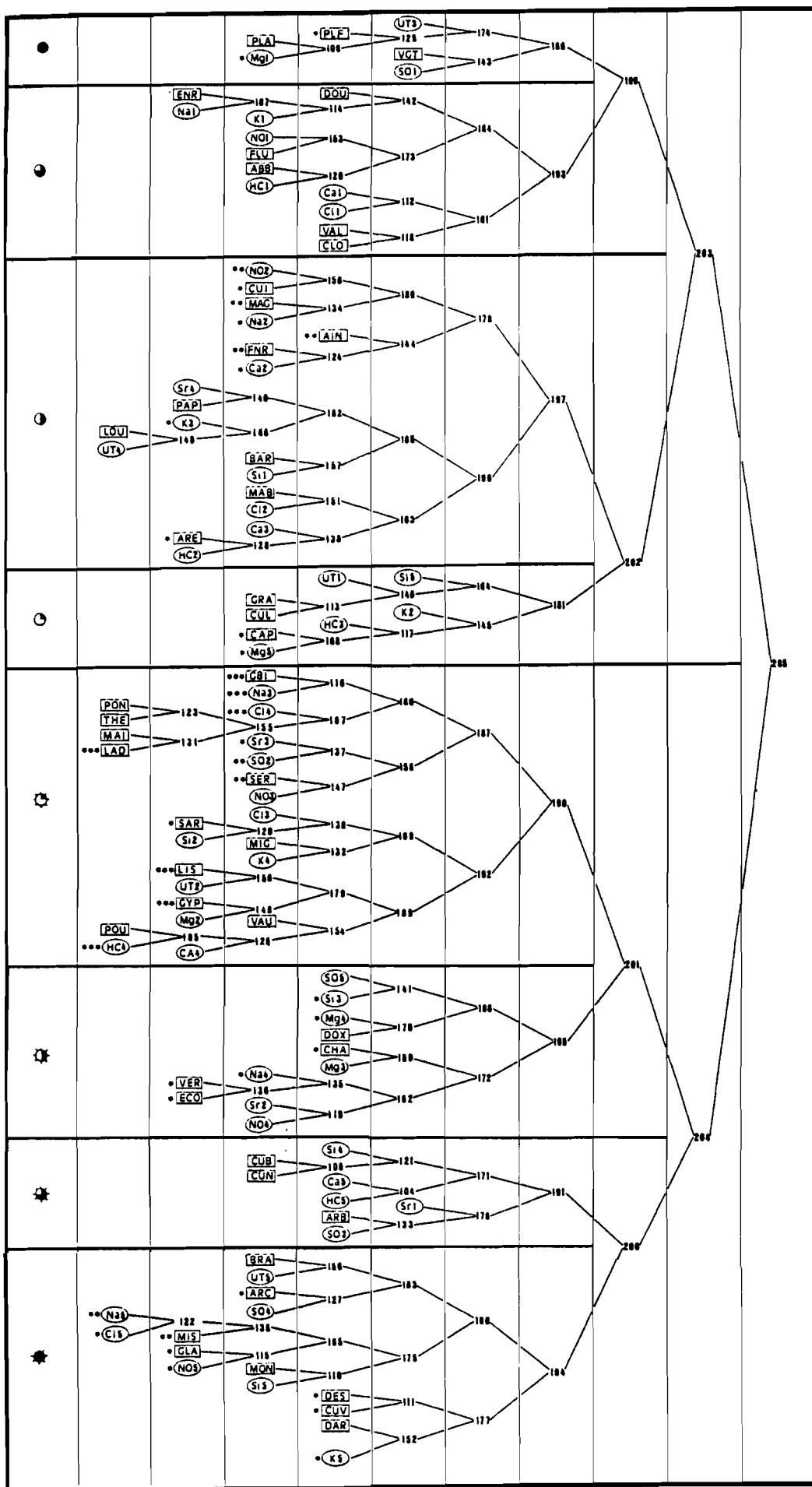


Fig. 200 : CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE DE LA CAMPAGNE DE L'ETIAGE 1978 (DESCRIPTEURS ET EMERGENCES)

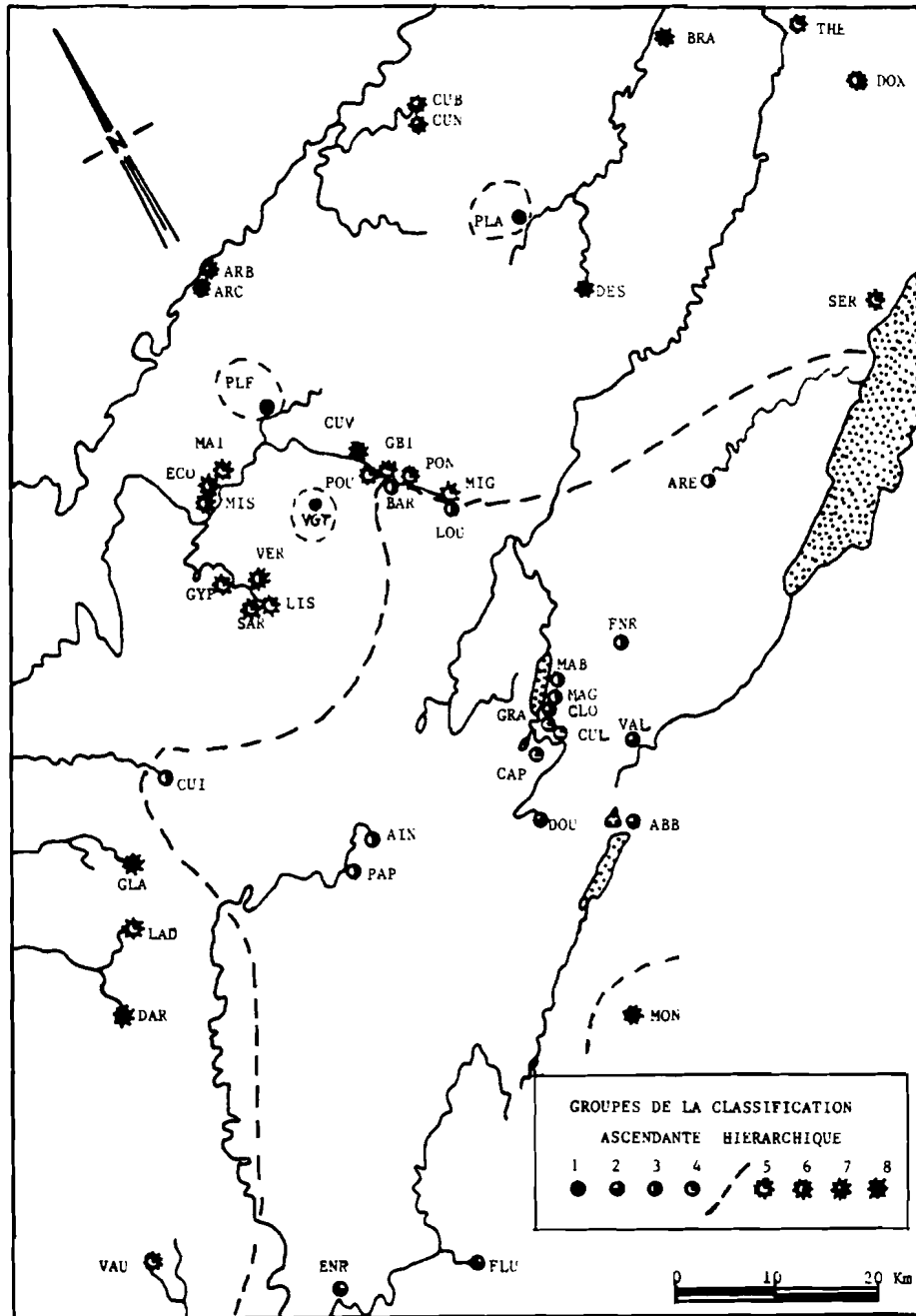


Fig. 201 : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES 8 TAXONS DE LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE DE L'ETIAGE 1978.

A l'exception de la famille 186, cette limite sépare les sources à affinités "plateaux", groupe auquel se rattachent la plupart des sources du versant suisse de la Haute Chaîne (qui comme nous l'avons vu à partir des marqueurs de l'activité humaine sont autant atteintes que les sources des plateaux - voir XII.7.5), des sources à affinité Haut Jura.

la présence de 3 sources des plateaux dans le groupe de la Haute Chaîne pourrait également s'expliquer par les teneurs en certains traceurs : cette famille est caractérisée par des teneurs minimales en magnésium et en sulfates, ces sources n'étant pas issues des contextes dolomitiques du Malm terminal, bien que moyennement chargées en tritium.

Certains systèmes révèlent l'influence de leur mode d'alimentation : ainsi la Loue est-elle rattachée au groupe Haute Chaîne : même en tarissement, l'émergence garde la mémoire du marquage de son haut bassin (pertes du Doubs) ; la source du Maine, émergence hybride du premier et second plateau (NUFFER, 1968) s'oppose aux émergences typiques du premier plateau (Arcier, Bief de Brans, Cul de Vaux, Moulin des Isles, Glantine, Dard).

Les contextes locaux sont bien respectés : les sources Bleue et Noire du Cusancin apparaissent dans le même groupe, il en est de même pour les émergences du plateau de Levier (Lison, Sarrasine, Gyps) et pour celles du plateau d'Amancey (Verneau, Chauveroché) ou de Champagnole (Ain, Papeterie).

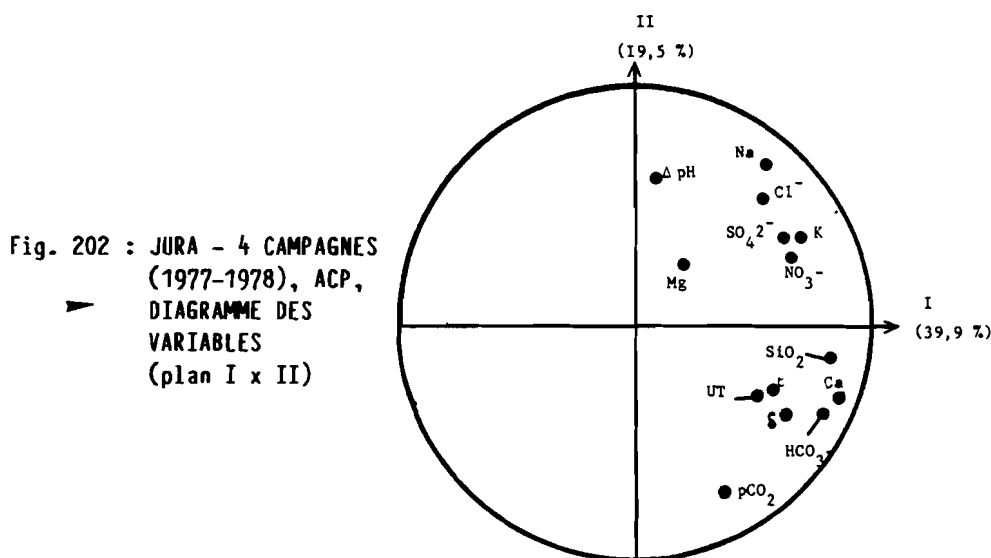
Les particularités structurales et karstogénétiques de ces contextes ont abouti à une évolution hydrocinématique comparable d'un système à l'autre.

En fait, le cas contraire est également observé : sources Arcier et Bergeret, du Maine, du Moulin des Isles et de l'Écoutot qui n'apparaissent pas dans la même famille malgré leur proximité géographique : ce sont les teneurs en éléments externes qui font cette différence : le groupe 194 en est chargé, alors que le groupe 191 est caractérisé par sa richesses en traceurs calco-carboniques.

Mieux que les analyses utilisant l'abscisse sur les axes factoriels (ACP, AFC, AD) la classification ascendante hiérarchique :

- ordonne la matrice d'entrée suivant un critère parfaitement défini par la chimie, qui utilise l'ensemble des descripteurs,
- met en évidence les affinités entre sources et éléments,
- définit un niveau de relation entre les individus.

Cependant, cette méthode donne, comme toutes les méthodes d'analyse multidimensionnelles, des résultats en fonction de la nature des données introduites : l'innocence du calcul n'est pas celle de l'opérateur.



XII.8.4. Evolution des émergences d'une campagne à l'autre

L'analyse séparée des campagnes met donc bien en évidence des caractéristiques originales des systèmes, mais, nous l'avons vu à propos des divers traceurs, la répétition d'instantanés à des périodes judicieusement choisies donne une vision évolutive des comportements des systèmes.

C'est pourquoi l'analyse en composantes principales a été tentée sur les individus (et les paramètres) communs à plusieurs campagnes, d'une part les 4 premières dont toutes les analyses sortent du même laboratoire (CRG Thonon), d'autre part les 7 campagnes générales dont les analyses émanent de deux laboratoires différents.

A. Analyse en composantes principales des 4 premières campagnes

Les 28 émergences communes aux 4 campagnes ont été étudiées simultanément à l'aide de 14 descripteurs : les 8 ions majeurs, la silice, la température, la pCO_2 , le ΔpH , le tritium et l'oxygène 18.

L'axe factoriel I (fig. 202) comporte à son extrémité positive la plupart des traceurs : c'est un indicateur de minéralisation et (en négatif) de dilution, l'axe factoriel II oppose (en négatif) les traceurs de la matrice du karst et du temps de séjour dans les réservoirs aux traceurs de la surface (en positif).

Il représente donc l'origine spatiale de la minéralisation.

Le plan factoriel I x II discrimine bien ces descripteurs, il représente 59,4 % de la variance totale.

La figure 203 schématise l'enveloppe des sous-nuages de points de chacune des campagnes.

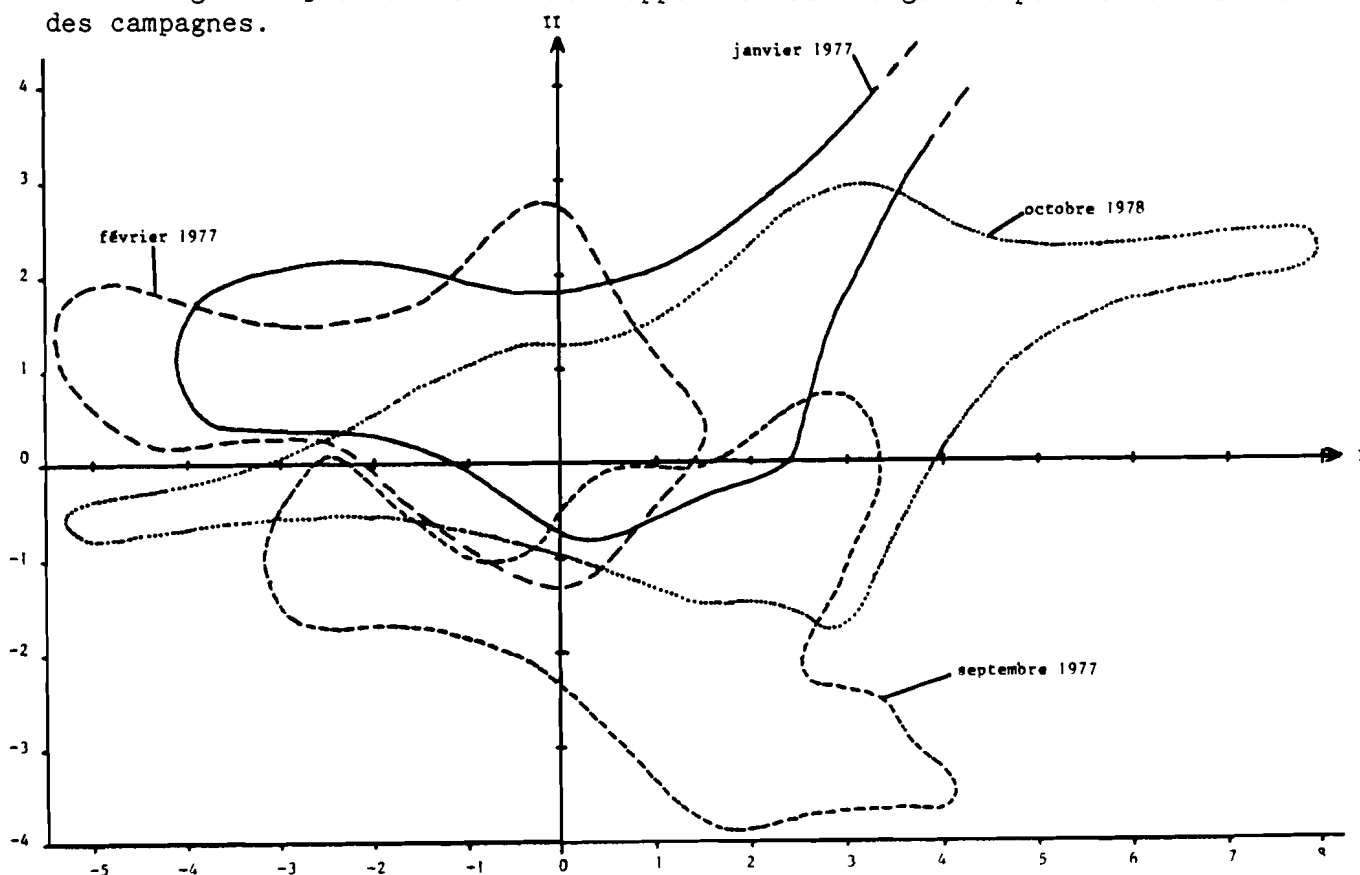


Fig. 203 : JURA - 4 CAMPAGNES (1977-1978), DIAGRAMME DES INDIVIDUS : ENVELOPPES DES 4 CAMPAGNES (plan I x II)

On remarquera que les nuages de points se chevauchent largement : l'examen de la figure 204, retraçant l'évolution de quelques sources d'une campagne à l'autre, explique ce chevauchement : les systèmes de la partie gauche (sources du Haut Jura) demeurent dans cette partie du diagramme factoriel, il en est de même pour celles de la partie droite (sources des plateaux).

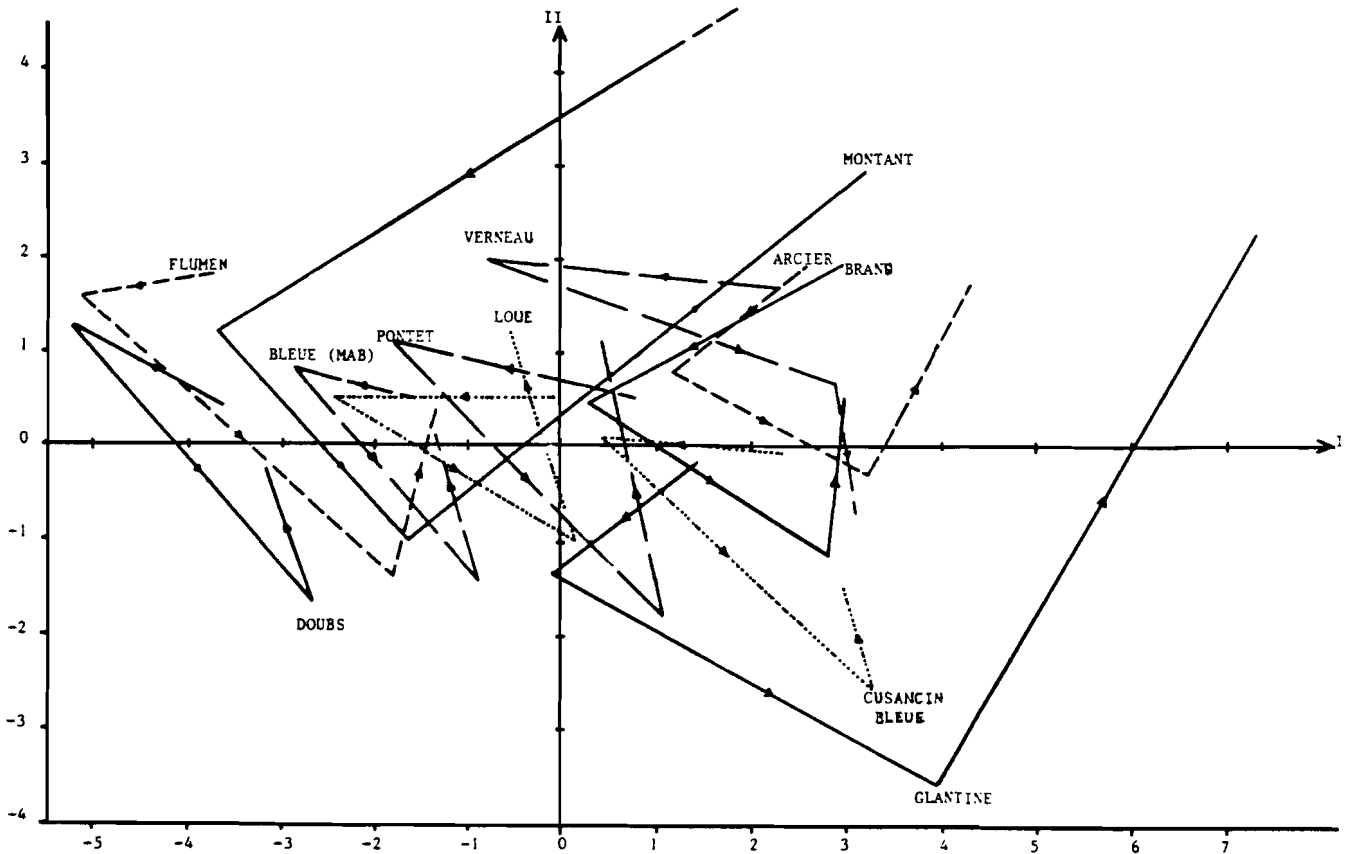


Fig. 204 : JURA - 4 CAMPAGNES (1977-1978), DIAGRAMME DES INDIVIDUS : TRAJETS AU COURS DES 4 CAMPAGNES (plan I x II)

Les sous-nuages des campagnes se chevauchent donc, car le mode de fonctionnement des systèmes et leur originalité propre prédominent sur le phénomène "campagne", en d'autres termes l'hydrocinématique intrinsèque aux systèmes prévaut sur les phénomènes climatiques régionaux.

On peut toutefois noter que globalement, la campagne 2 (crue de février) est la plus "diluée" et que les campagnes d'étiage (1,3,4) se discriminent sur le rôle des marqueurs de l'infiltration, la campagne 3 étant la plus marquée par le réservoir, la 1 (basses eaux d'hiver) la plus influencée par la surface et la 4 intermédiaire.

Ce diagramme fait donc ressortir la représentativité des campagnes par rapport à la chimie de la réserve, ainsi que la mémoire des campagnes vis-à-vis des épisodes antérieurs.

Elle synthétise donc les observations faites sur les traceurs pris isolément (voir XII.3.2.C., XII.3.3.D.a., XII.4.5., XII.7.1.).

L'évolution de la position des sources (fig. 204) différencie les systèmes de la partie gauche (Haute Chaîne) de ceux de la partie droite (plateaux).

Les émergences de la zone plissée ont des trajets qui prédominent le long de l'axe I, le trajet des émergences des plateaux a une composante importante

le long de l'axe II, ce qui signifie que les émergences du Haut Jura ont un fonctionnement hydrocinématique fondé sur une dilution des traceurs du réservoir par des eaux d'infiltration peu chargées en éléments anthropiques, puis par une élimination progressive de ces eaux, alors que les émergences des plateaux ont, en plus de ce fonctionnement "naturel", une composante anthropique importante surtout apparente lors des phases de restitution d'eau mémorisant une infiltration récente (janvier 1977, octobre 1978).

Ces observations corroborent l'étude de chaque traceur (voir XII.3.2.C. et XII.3.3.D.a.).

La répartition géographique du facteur I (fig. 205 à 208) ressemble à celle obtenue par MUDRY et al. (1979) avec un nombre plus faible de sources sur les 3 premières campagnes.

La figure 205 montre une zone négative centrée sur le Haut Jura Sud avec comme noyaux le Doubs, l'Abbaye et le Flumen, et une zone positive sur les plateaux, avec des maxima au Bief de Brans, à la source Bleue du Cusancin et à Arcier.

A noter les exceptions déjà évoquées par les autres méthodes (Plaisir-Fontaine, Montant).

La limite rattache les sources de la Loue (pertes du Doubs), du Lison et de la Sarrasine (pertes de Lemuy et Dournon) au groupe Haute Chaîne dont elles héritent du marquage.

La figure 206 fait apparaître l'"invasion" des valeurs négatives sur l'ensemble du Jura, à l'exception du premier plateau dans le Doubs (ARC - BRA - CUB) qui demeure le dernier bastion du groupe "plateau" : les réserves de ces systèmes diminuent l'influence de l'infiltration massive qui fait évoluer la chimie du reste de la région.

Les étiages en revanche (fig. 207 et 208) restreignent la zone négative à la partie méridionale de la Haute Chaîne, dont les réserves limitées ne parviennent pas à acquérir une marque d'eaux minéralisées par un séjour long.

Cette observation confirme les résultats apportés par les teneurs en tritium.

La 3ème campagne est d'ailleurs un étiage plus sévère, mobilisant moins d'eau d'infiltration que la 4ème (voir le groupe auquel se rattachent les sources de la Loue, de la Serrière, de l'Areuse et de Montant).

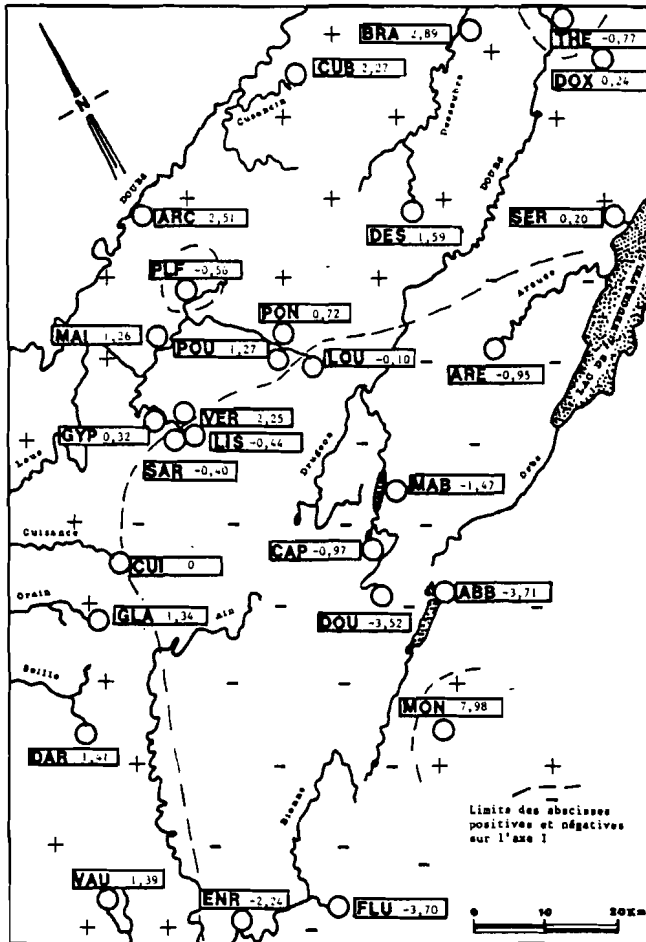
B. Analyse en composantes principales de toutes les campagnes générales

La distribution des variables de départ et la signification des axes factoriels I et II (fig. 209) est identique.

Les enveloppes des projections des 7 sous-nuages de points (fig. 210) montre que seule la campagne n°8 se démarque nettement des autres (abscisses très négatives sur l'axe 2), la dilution de la campagne 2 est bien marquée. Les campagnes 1, 4 et 6 se distinguent par des teneurs en éléments extérieurs aux systèmes élevées sur les émergences des plateaux (à droite).

Le grand allongement de tous les groupes, correspondant aux 7 campagnes parallèlement à l'axe factoriel 1, confirme que les caractéristiques hydrocinématiques propres à chacun des systèmes prédominent sur le phénomène hydroclimatique "campagne".

▼ Fig. 205 : ETIAGE JANVIER 1977



▼ Fig. 206 : CRUE DE FONTE DE NEIGE FEVRIER 1977

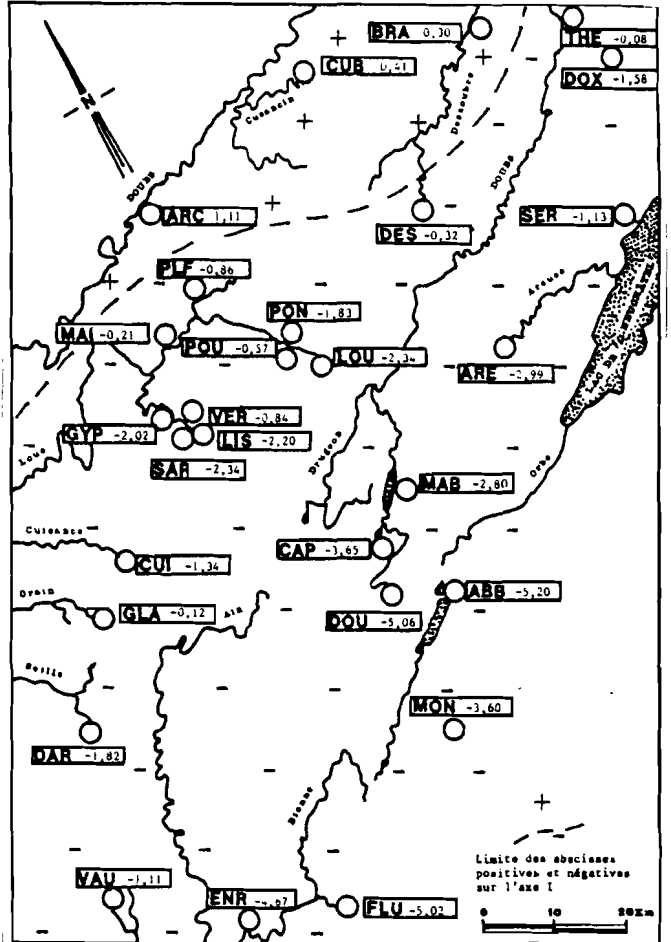


Fig. 207 : ETIAGE SEPTEMBRE 1977

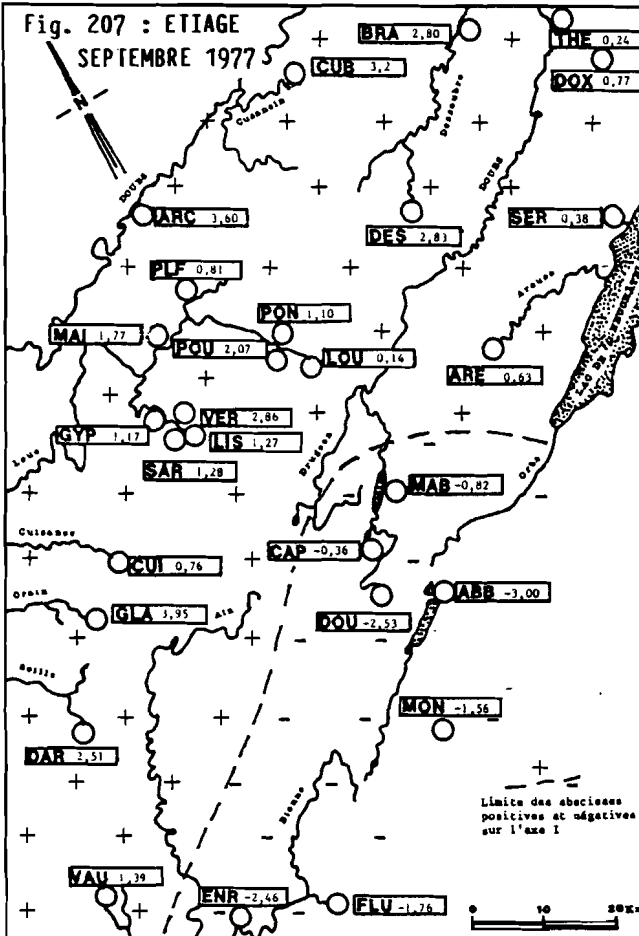


Fig. 208 : ETIAGE OCTOBRE 1978

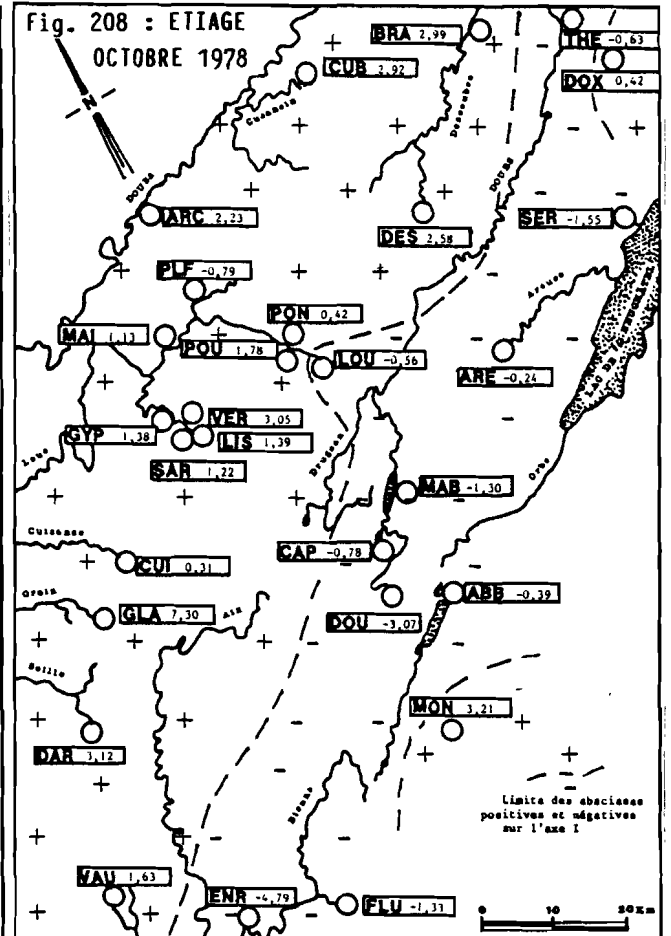


Fig. 205 à 208 : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES ABSCSSES DES EMERGENCES SUR L'AXE FACTORIEL I.

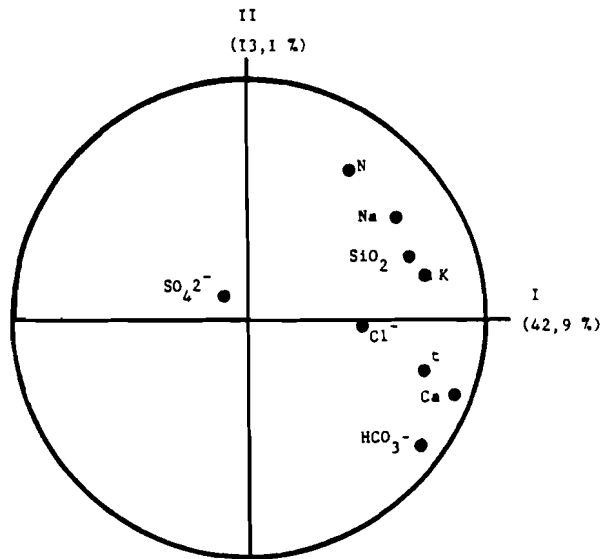


Fig. 209 : JURA - 7 CAMPAGNES (1977-1982), ACP, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan I x II)

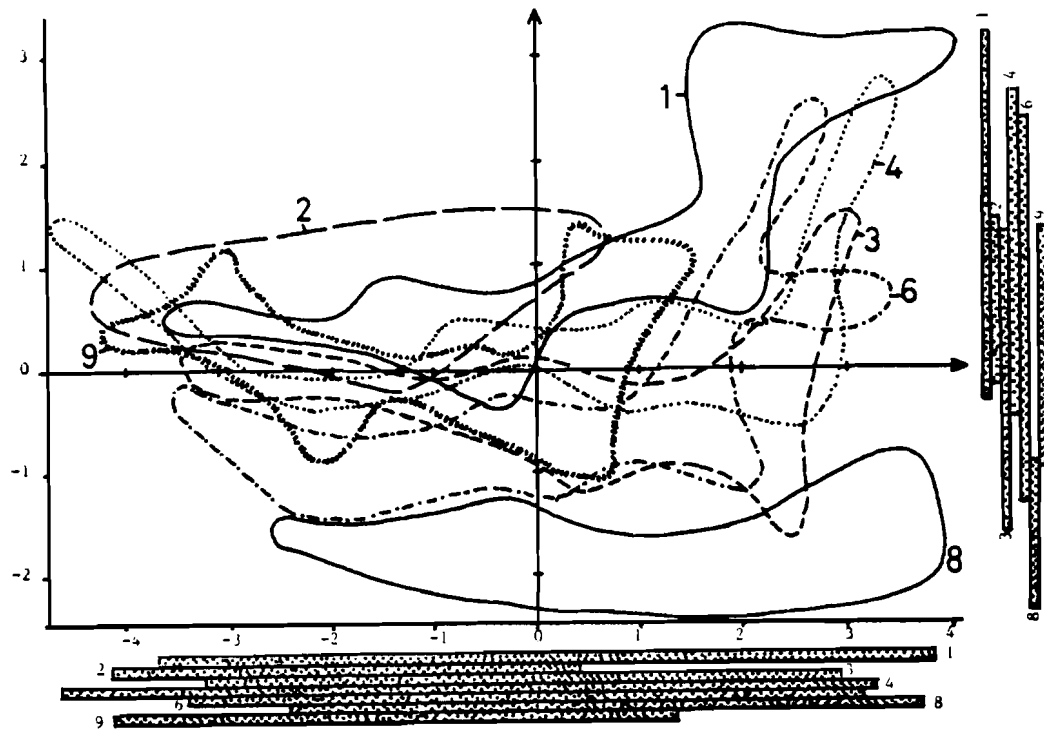


Fig. 210 : JURA - 7 CAMPAGNES (1977-1982), ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS : ENVELOPPES DES 7 CAMPAGNES (plan I x II)

Les "trajets" des émergences dans le plan I x II (fig. 211) permettent de généraliser l'observation faite sur les 4 premières campagnes (fig. 204) : les émergences des plateaux ont un fonctionnement fortement influencé par les éléments externes, celles de la Haute Chafne ont un régime plus lié aux dilutions des traceurs de la matrice.

On doit cependant relever que la source de Plaisir-Fontaine (PLF) a un comportement proche de celui des sources de la zone plissée, ce qui corrobore les résultats de la classification automatique de la 4^{ème} campagne (voir XII.8.3.).

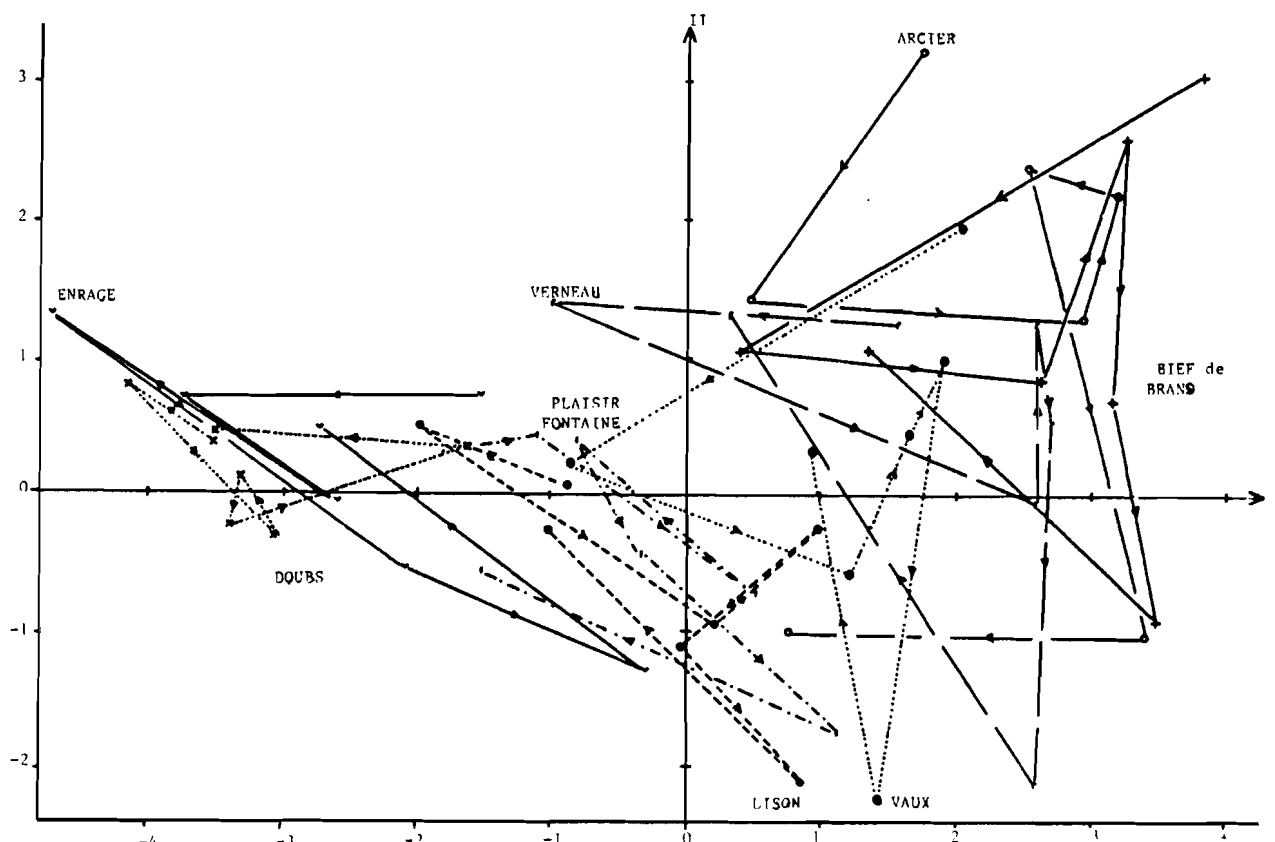


Fig. 211 : JURA - 7 CAMPAGNES (1977-1982), ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS : TRAJETS AU COURS DES 7 CAMPAGNES (plan I x II)

XII.8.5. Conclusion

Les analyses multidimensionnelles, par la vision globale des comportements qu'elles procurent, permettent la généralisation des acquis des études élément par élément et/ou campagne par campagne.

D'un point de vue méthodologique, elles mesurent l'adéquation des périodes de prélèvement et testent ainsi la représentativité hydroclimatique d'une campagne par rapport aux autres.

D'un point de vue hydrogéologique, elles autorisent la classification des systèmes jurassiens entre deux pôles, celui des aquifères karstiques de la zone plissée, aux réserves restreintes et aux possibilités de drainage limitées, soumis à un régime d'alimentation naturel, et celui des aquifères de plateau, aux réserves pluriannuelles, soumis à un régime où les paramètres anthropiques jouent un rôle important, la discrimination de ce groupe de systèmes se faisant d'ailleurs essentiellement sur le rôle de ces traceurs.

Dans ces aquifères de plateau, certains comportent des drains majeurs, attestés par les explorations spéléologiques (par exemple, le Verneau, le Lison, la Loue), d'autres présentent des phénomènes de diffluence et sont dépourvus de cavités pénétrables.

La distinction entre ces deux types de systèmes se fait mieux par des méthodes uni ou bi-variées que par une approche multidimensionnelle.

A la lumière de l'apport de ces types de prospection par instantanés bien adaptées à une chaîne karstique telle que le Jura, il a été tenté une prospection géographiquement plus limitée dans des contextes moins variés.

Deux secteurs ont ainsi été testés, le Haut Doubs et le Plateau de Vesoul.

XII.9. RESTRICTION GEOGRAPHIQUE DES CAMPAGNES

XII.9.1. Le Haut Doubs

La région comprise entre la haute vallée du Doubs et la vallée de Joux est toute entière incluse dans la Haute Chaîne du Jura.

Les sources étudiées émergent toutes à des altitudes comprises entre 800 et 1 000 mètres (fig. 212), elles sont toutes alimentées par les calcaires du Malm (fig. 213) formant l'ossature des anticlinaux.

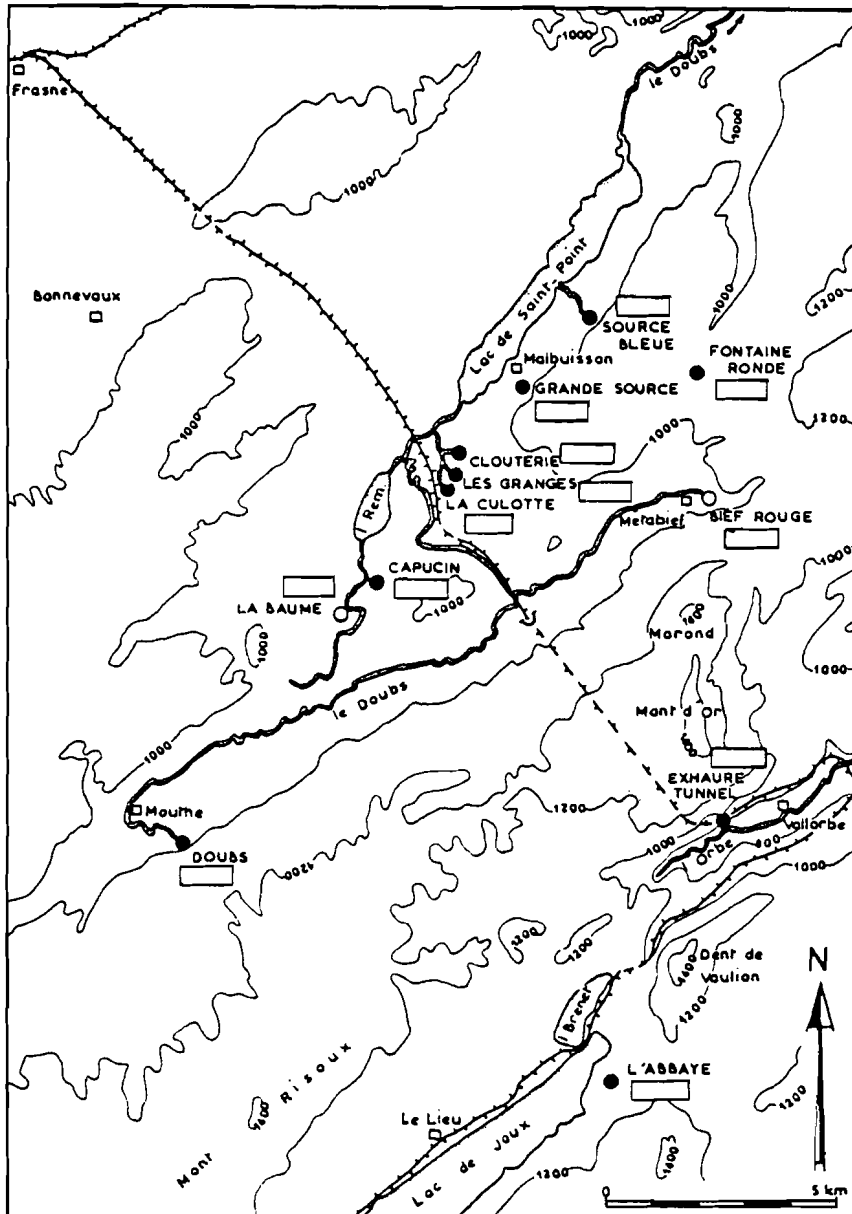


Fig. 212 : HAUT-DOUBS : LOCALISATION DES EMERGENCES SURVEILLEES (CHAUVE et MUORY 1980)

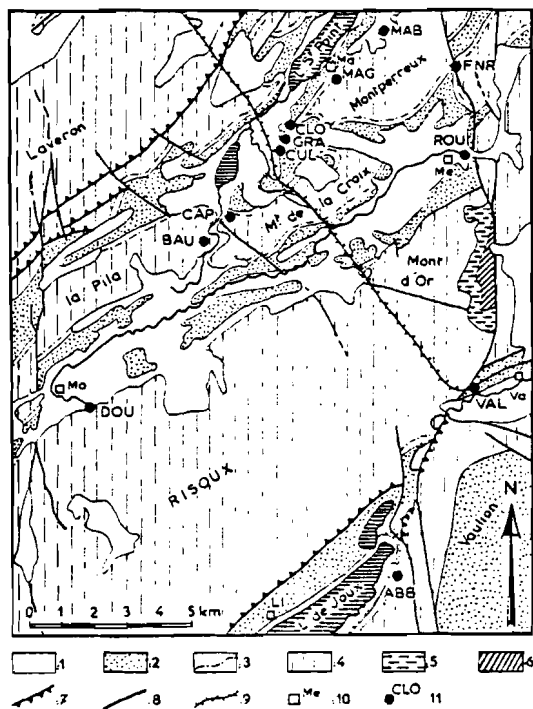


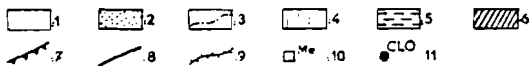
Fig. 213 : HAUT-DOUBS : CADRE GEOLOGIQUE
(CHAUVE et MUDRY 1980)

Source karstique intermittente
FNR la Fontaine Ronde

Sources karstiques temporaires
BAU la Baume
ROU le Bief Rouge à Métabief

Exhaure karstique pérenne
VAL Tunnel ferroviaire sous le Mont d'Or

Sources superficielles
CUL (temporaire) la Culotte aux Granges
GRA (pérenne) les Granges



- | | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Formations superficielles | 8. Faille |
| 2. Crétacé et Tertiaire | 9. Voie ferrée Paris-Lausanne |
| 3. Limite Crétacé - "Purbeckien" | 10. Ll = Le Lieu |
| 4. Malm calcaire | Ma = Malbuisson |
| 5. "Argovien" marneux | Me = Métabief |
| 6. Dogger | Mo = Mouthé |
| 7. Chevauchement | Va = Vallorbe |
| | 11. Emergence. |

La géochimie des systèmes est donc, à cette échelle, plus homogène qu'à l'échelle du Jura.

La situation structurale des sources est variée (fig. 213) :

- pied de l'anticlinal du Mont Tendre (Abbaye),
- pied de l'anticlinal du Risoux - Mont d'Or (Doubs, Bief Rouge, exhaure du tunnel de Vallorbe),
- pied de l'anticlinal du Mont de la Croix (Capucin, Clouterie),
- pied de l'anticlinal de Montperreux (Source Bleue, Grande Source de Malbuisson, Fontaine Ronde).

Deux sources sont en outre liées à un accident satellite de l'accident de Pontarlier, les sources de Fontaine Ronde et du Bief Rouge.

L'émergence de Fontaine Ronde est une source intermittente dont les oscillations ont été étudiées par de nombreux auteurs, dont MANGIN (1975), JEANBLANC et SCHNEIDER (1981).

Le percement du tunnel ferroviaire du Mont d'Or au début du XXe siècle a occasionné des perturbations dans le régime hydrologique des sources du Bief Rouge, de Fontaine Ronde et la Grande Source de Malbuisson (FOURNIER, 1917).

Le rôle de drain joué par l'accident de Pontarlier et ses satellites a été souligné (CHAUVE 1955, 1971).

Les premières mesures physico-chimiques sur les sources du Haut Doubs (CHAUVE et MUDRY, 1980) dégagent certains résultats :

- bien qu'issues de moraines formées des mêmes matériaux que les roches du substratum, les sources du glaciaire (les Granges et la Culotte) ont des teneurs nettement différenciées de celles des sources karstiques : température toujours plus élevée à l'étiage, influencée par celle de l'air au moment du prélèvement ; teneur en oxygène 18 plus élevée (moins négative) : les aquifères du glaciaire sont plus influencés par l'évapotranspiration ; fortes teneurs en Mg, Sr, SiO₂ et très faible teneur en tritium, attestant un temps de séjour très long dans les moraines.

- pour les sources karstiques, la variabilité des températures et des teneurs en oxygène 18 eu égard aux dénivelées échantillonnées dans le Haut Doubs, fait exclure la mise en évidence d'un gradient altimétrique. Pour ces paramètres, l'instantané synchrone ne permet pas de travailler comme dans le cas du Jura, où la variabilité de ces paramètres est estompée par la gamme d'altitudes échantillonnées.

- les similitudes de comportements de systèmes karstiques différents ont deux causes différentes :

. certaines sources (exhaure du tunnel, Bief Rouge, Fontaine Ronde et Grande Source) sont connues pour leur liaison hydrodynamique (identité au moins partielle d'impluvium) ;

. d'autres, dépourvues de relations hydrodynamiques, émergent dans un contexte similaire : soumises à un régime pluviométrique semblable, elles sont à une altitude voisine, leurs impluviums aussi. La karstification affecte les mêmes couches ayant subi une même histoire structurale : les gradients structuraux sont du même ordre (plis à même géométrie).

L'identité de comportement des sources du Doubs et de l'Abbaye, systématiquement notée lors des campagnes générales, se retrouve dans l'étude de la sous-province Haut Doubs.

Les sources du Capucin et de la Clouterie sont dans le même cas.

Ce résultat valide, à l'échelle d'une région restreinte, l'emploi des instantanés.

L'analyse en composantes principales de l'ensemble des données de 5 campagnes partielles effectuées dans le Haut Doubs montre (fig. 214 et 215) le parallélisme général des évolutions avec deux grandes familles de systèmes : l'Abbaye et le Doubs, peu minéralisés, s'opposent aux autres émergences.

La plage de minéralisation de chacune des campagnes est voisine, mais les campagnes se distinguent par leur abscisse sur l'axe 2 qui oppose les traceurs naturels (négatif) aux chlorures issus du salage des routes (Fontaine Ronde).

En effet, nous l'avons vu à propos des éléments à origine anthropique (XII.7.5.), les teneurs en nitrates sont, dans la Haute Chaîne, le reflet du fonctionnement naturel.

Les chlorures ne sont pas associés au sodium car le salage des routes utilise des mélanges chlorure de calcium - chlorure de sodium, d'autre part la teneur en chlorures n'est pas régulée par les échanges de bases avec les argiles, comme la teneur en sodium.

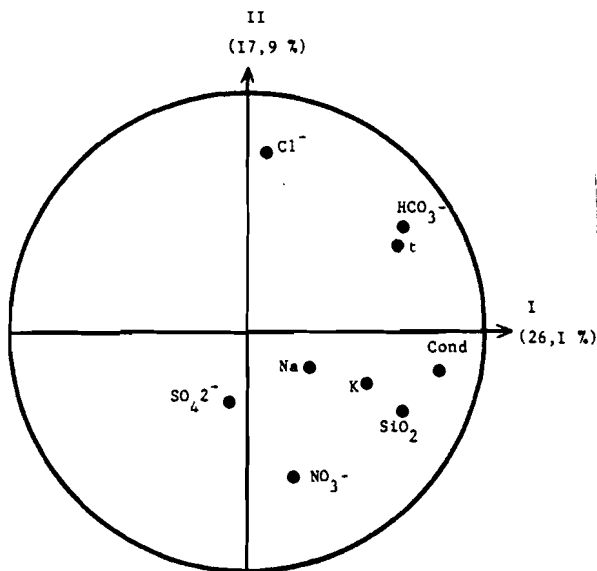
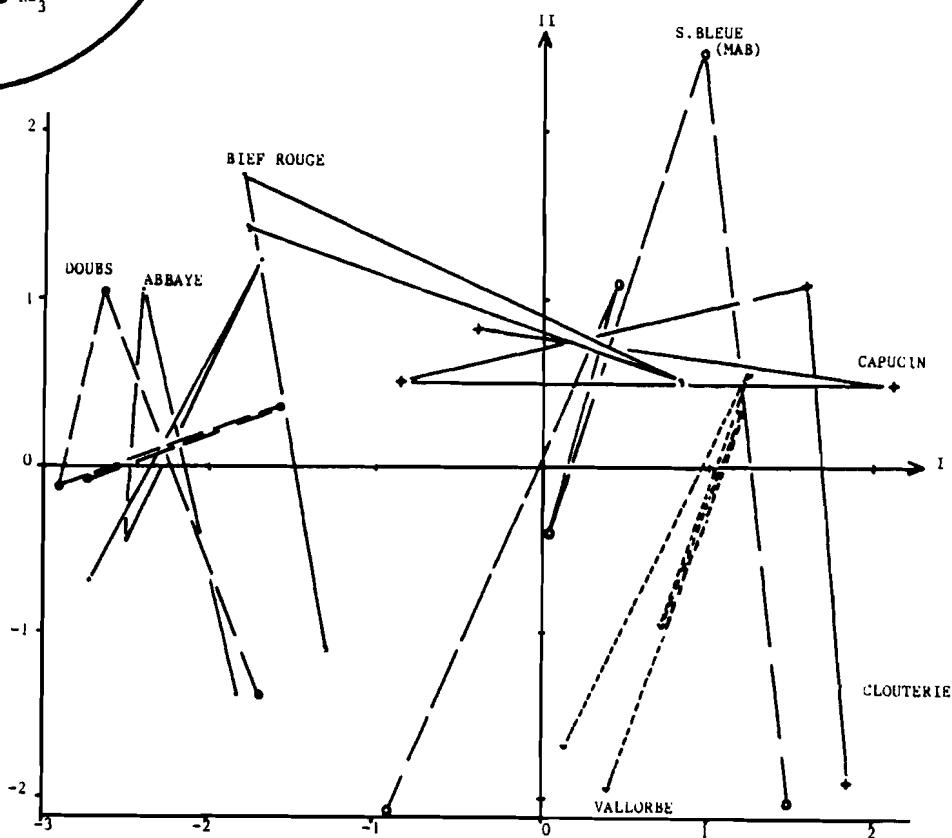


Fig. 214 : HAUT-DOUBS, 5 CAMPAGNES
ACP, DIAGRAMME DES
VARIABLES (plan IxII)

Fig. 215 : HAUT-DOUBS, 5 CAMPAGNES,
ACP, DIAGRAMME DES INDIVIDUS :
TRAJETS AU COURS DES 5 CAMPAGNES
(plan IxII)



On peut ainsi opposer la campagne d'octobre 1978, où prédomine la marque des nitrates, aux campagnes d'été de juillet 1979 et de septembre 1980, dont les eaux subissent encore l'influence du salage des routes de l'hiver précédent.

Les réserves des systèmes gardent donc la mémoire de l'épisode de printemps jusqu'à la fin de l'été suivant.

L'ACP des données de ce secteur de la Haute Chaîne confirme donc l'examen séparé des descripteurs.

Certaines méthodes d'étude des systèmes peuvent être utilisées pour un secteur restreint et structuralement homogène, cependant les marqueurs altimétriques (température, oxygène 18) s'appliquent mal au Haut Doubs, car la faiblesse des réserves des aquifères empêche la stabilisation d'une température caractéristique du tarissement et les aquifères sont soumis aux variations saisonnières.

XII.9.2. Le plateau de Vesoul

A. Présentation géographique et géologique

A l'opposé du Doubs, cette unité géographique est toute entière à structure tabulaire.

Les altitudes, peu contrastées, sont généralement comprises entre 300 et 400 m (fig. 216).

Les plateaux proprement dits sont limités au Nord par la dépression de Vesoul, à l'Est par la plaine effondrée de la Saône, au Sud par celle synclinale de l'Ognon.

La lithologie (fig. 217 et 218) comprend, de haut en bas :

- des alluvions récentes le long des cours d'eau (Ognon, dépression de Vesoul).

- des séries tertiaires, à perméabilité d'interstices, dans la plaine de la Saône.

- la série calcaire du Malm, dans la moitié sud du secteur. La base de ces calcaires est siliceuse (faciès argovien du Jura externe : calcaires siliceux à chailles). L'altération de ce faciès a donné naissance aux argiles à chailles, dont la teneur en carbonates est quasiment nulle. Cette formation résiduelle empâte certains affleurements dans la partie centrale du plateau.

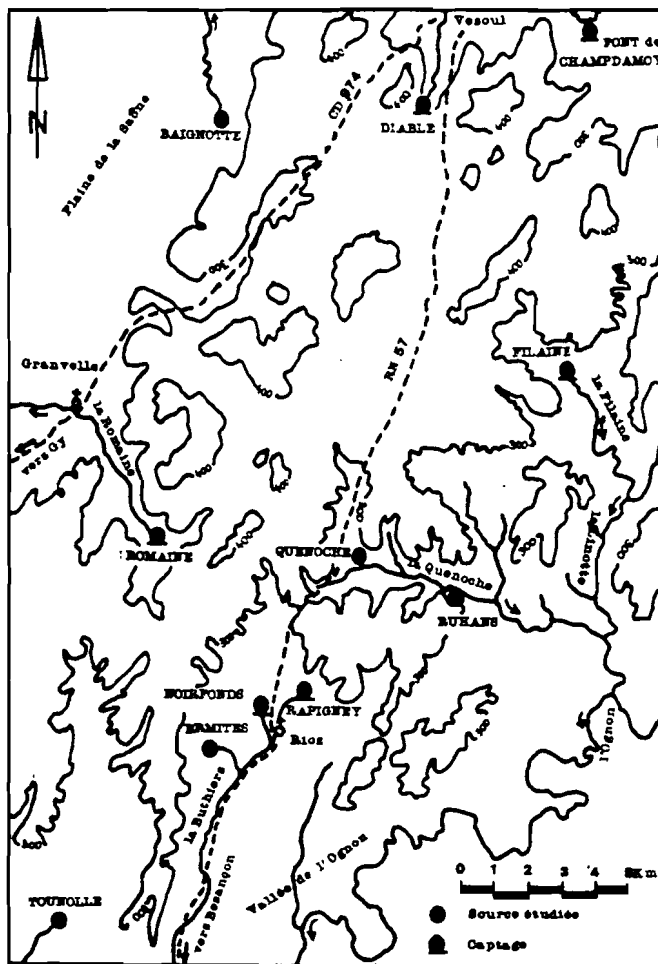


Fig. 216 : HAUTE-SAONE : LOCALISATION DES EMERGENCES SURVEILLEES

- la série du Malm repose sur les marnes oxfordiennes, peu perméables lorsqu'elles ne sont pas décalées par faille ou altérées.

- la série calcaire du Dogger, affleurant dans la moitié nord du plateau.

- cette série repose sur les marnes liasiques qui forment la base du talus de raccordement avec la dépression vésulienne.

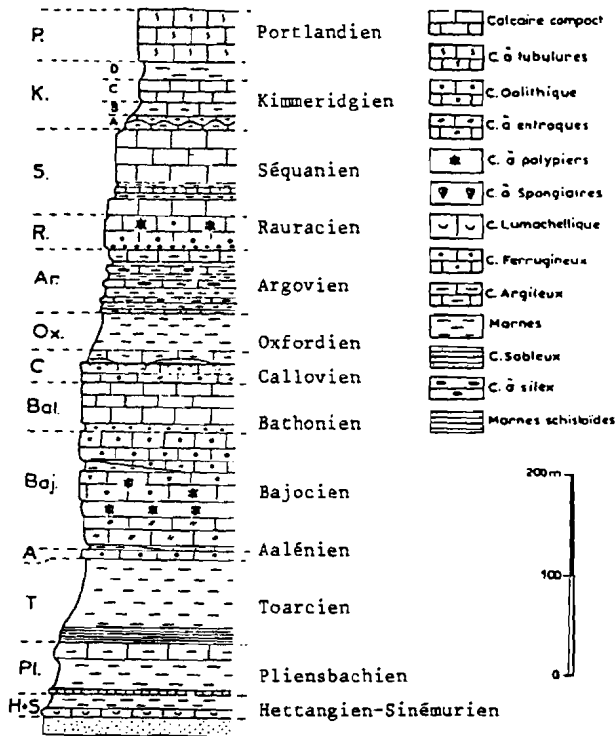


Fig. 217 : HAUTE-SAONE : LITHOSTRATIGRAPHIE (CONTINI 1972)

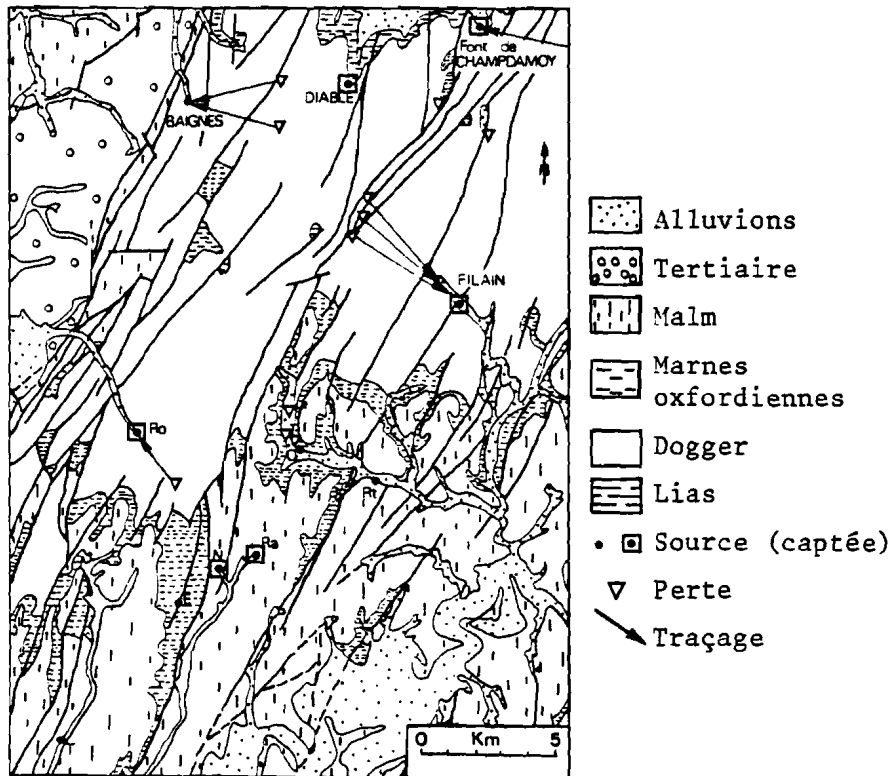


Fig. 218 : HAUTE SAONE : CADRE GEOLOGIQUE ET ESSAIS DE TRACAGE

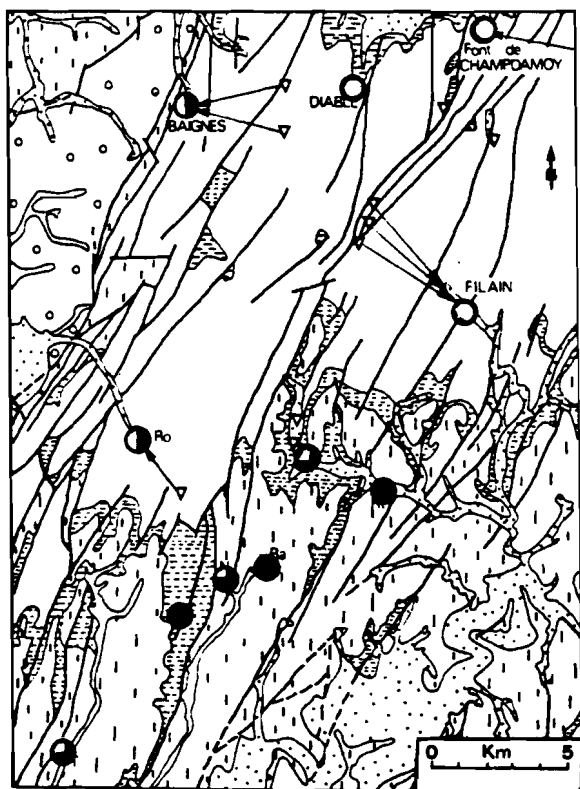
L'ensemble du plateau est découpé en bandes parallèles par un réseau de failles N30 qui isolent certains compartiments. Le pendage général des séries étant vers le Sud, certains compartiments peuvent constituer des unités de drainage karstique isolées.

Les 11 sources échantillonnées au cours de 6 campagnes instantanées émergent du Dogger (5), de l'Oxfordien (2) ou du Malm (4). L'étude par traçages artificiels, très fragmentaire (fig. 218), devrait être systématiquement reprise en raison des multiples possibilités inconnues de drainage sur ce plateau et des risques de pollution encourus par les sources captées. En effet, dans cette région où la quasi totalité de la pluie efficace s'infiltré dans les calcaires, les seules ressources locales sont les aquifères étudiés. Ainsi, l'agglomération de Vesoul est alimentée par la source du Diable et la Font de Champdamoy, Rioz par le Moulin de Rapigney et sa laiterie par Noirfonds ...

B. Instantanés

L'examen des teneurs ioniques révèle le grand rôle de cette organisation lithologique et structurale.

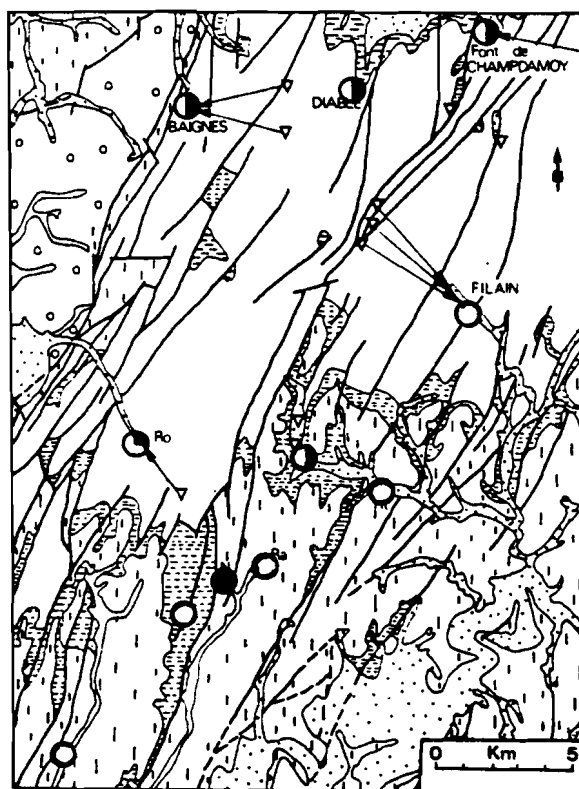
Ainsi, en septembre 1980, la répartition géographique des teneurs en silice révèle la différence entre la partie nord du plateau de Vesoul, dont les émergences sont issues du Dogger et la partie sud (fig. 219).



$\text{SiO}_2 \text{mg.l}^{-1}$

○ 7 ◐ 8 ◑ 9 ● 10 ●

Fig. 219 : HAUTE-SAONE :
REPARTITION GEOLOGIQUE
DES TENEURS EN SILICE-
SEPTEMBRE 1980



$\text{N/NO}_3 \text{mg.l}^{-1}$

○ 0,5 ◐ 1 ◑ 1,5 ● 2 ●

Fig. 220 : HAUTE-SAONE :
REPARTITION GEOLOGIQUE
DES TENEURS EN AZOTE
NITRIQUE - SEPTEMBRE 1980

La répartition des conductivités est inversée : les émergences issues des calcaires du Dogger sont beaucoup plus minéralisées que les autres venant des calcaires siliceux "argoviens" couverts d'argiles à chailles.

Les teneurs en nitrates sont minimales aux sources dont l'impluvium est couvert de forêts (Ruhans, Rappigny, Ermites), plus importantes aux émergences recueillant les eaux usées des villages du plateau (Baignes, Diable, Champdamoy, Filain, Quenoche) (fig. 220).

La variabilité des teneurs au cours d'une même campagne (tabl. 60) est beaucoup plus grande que pour les instantanés à l'échelle du Jura : les conductivités de la 10ème campagne, par exemple, vont de 103 à 426 $\mu\text{s.cm}^{-1}$, les teneurs en silice de la 6ème campagne de 3,9 à 15,7 mg.l^{-1} .

		5	6	7	8	9	10
Cond $\mu\text{s.cm}^{-1}$	Min	186	267	197	177	301	103
	Moy	384	373	391	410	519	257
	Max	468	462	457	602	743	426
	éc. type	77	74	77	125	173	73
SiO ₂ mg.l^{-1}	Min	5,75	3,90	1,80	5,60	6,50	7,90
	Moy	8,30	9,33	4,05	7,78	8,98	9,79
	Max	11,25	15,70	6,80	10,40	11,90	12,90
	éc. type	1,90	2,97	1,58	1,71	1,47	1,65

Tabl. 60 - VARIABILITE DES CONDUCTIVITES ET DES TENEURS EN SILICE AU COURS DES SIX CAMPAGNES INSTANTANEEES EN HAUTE-SAONE (1979-1982)

C. Analyse en composantes principales de l'échantillon de la 9ème campagne (mars 1980)

15 descripteurs ont été retenus sur 11 individus.

Le plan factoriel I x II, porteur de 65 % de la variance totale, montre (fig. 221) un axe I opposant la silice à l'ensemble des traceurs du réservoir carbonaté et de ses éléments externes.

L'axe I est donc un axe lithologique, mais il traduit également la différence d'occupation du sol des deux unités lithologiques : impluvium peu peuplé et couvert de forêts sur les calcaires siliceux, plus peuplés avec rejets résiduels sur les calcaires du Jurassique supérieur.

Les individus (fig. 222) sont bien séparés sur ce plan factoriel :

- milieux "argoviens" faiblement affectés par l'activité anthropique à gauche,
- émergences du calcaire qui se distinguent par leur contenu chimique à droite avec deux positions particulières : la Font de Champdamoy, bien minéralisée en traceurs du réservoir (proche de l'axe I), et la source de Noirfonds, riche en chlorure de potassium, et à $p\text{CO}_2$ élevée, alimentée par des zones cultivées.

D. Conclusion

Les systèmes du plateau de Vesoul montrent donc une empreinte de la lithologie dans la chimie des eaux des émergences qui prédomine sur le fonctionnement hydrocinématique propre des aquifères.

Le rôle des activités humaines est également très visible.

XII.9.3. Conclusions

Les instantanés sur des secteurs restreints ou monotones d'un point de vue structural et karstogénétique privilégient l'observation de l'impact de la lithologie, ainsi que de l'activité anthropique, sur la chimie des eaux.

La variabilité des paramètres en regard de la faible gamme des contextes étudiés fait souvent exclure la mise en évidence de gradients altimétriques, elle oblitère le rôle du fonctionnement hydrocinématique lorsqu'existe un contexte lithologique trop varié.

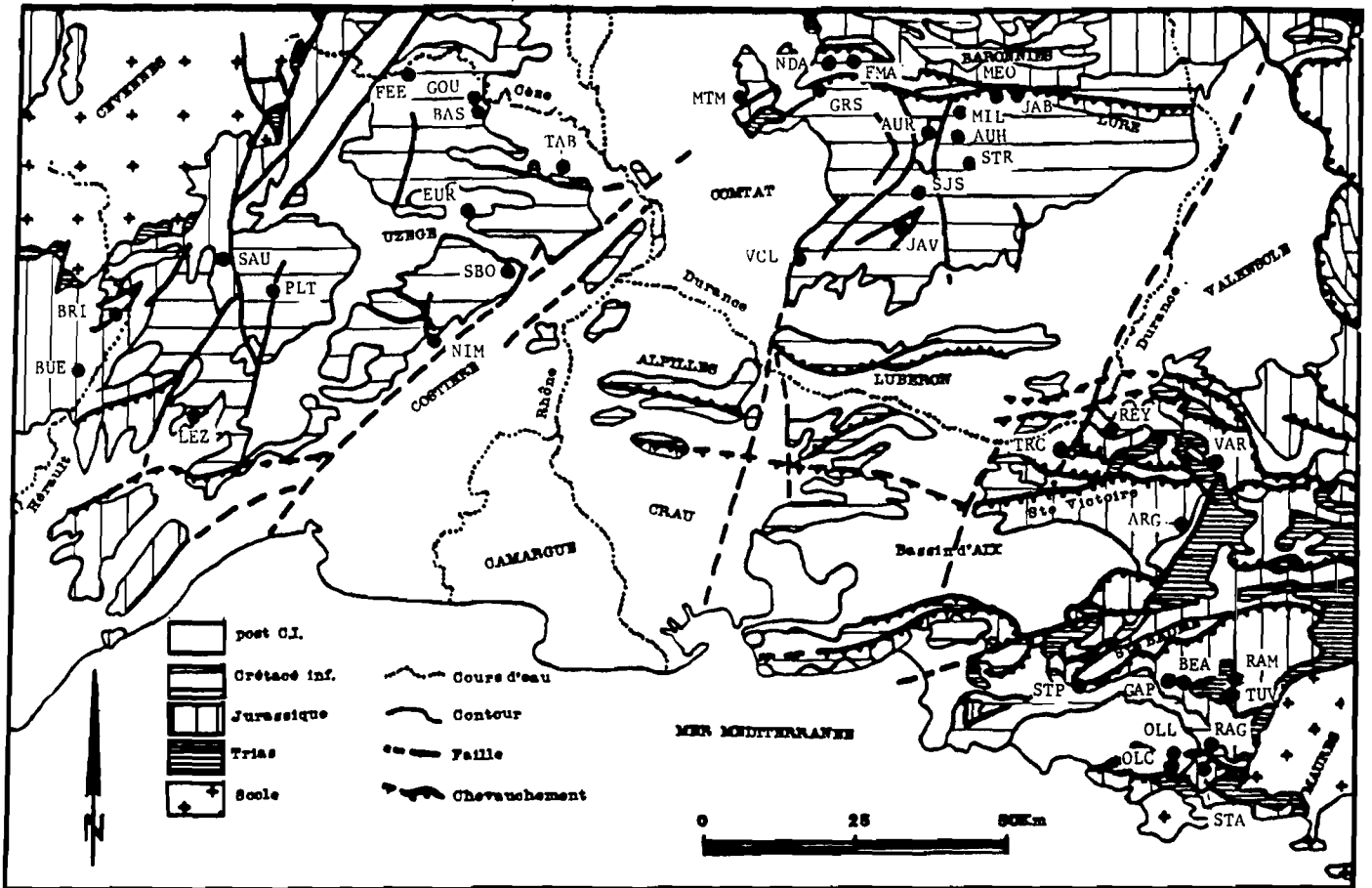
Les instantanés ne peuvent donc être utilisés que dans des secteurs où la lithologie n'est pas trop contrastée, mais où les autres paramètres ne sont pas trop monotones.

C H A P I T R E X I I I

P R O S P E C T I O N D E S K A R S T S

D U S U D - E S T

D E L A F R A N C E



CODE	SOURCE	Dep ^t	CODE	SOURCE	Dep ^t
ARG	Foux d'Argens	83	NIM	Fontaine de Nîmes	30
AUR	Aurel (Nesque)	84	OLC	Ololioules-chaude	83
BAS	Bastides (Goudargues)	30	OLL	Ololioules	83
BEA	Béauprés	83	PLT	Plantat (Quissac)	30
BRI	Brissac	34	RAG	Ragast de Dardennes	83
BUE	Buège	34	RAM	les Rampins	83
EUR	Fontaine d'Eure (Uzès)	30	REY	Font Reynaude (St Paul)	13
FEE	Fées (Tharax)	30	SAU	Sauve	30
FMA	Font de Marin	84	SBO	St Bonnet du Gard	30
GAP	Gapeau	83	SJS	St Jean de Sault	84
GRS	Groseau (Malaucène)	84	STA	St Antoine (Toulon)	83
GOU	Goudargues	30	STP	St Pons (Géménos)	13
JAB	Jabron (les Omergues)	04	STR	St Trinit	84
JAV	Javon (Lioux)	84	TAB	Tabion (St Paul les F.)	30
LEZ	Lez	34	TRC	Traconnade (Jouques)	13
MEO	Méouge (Séderon)	26	TUV	Tuves (les Rampins)	83
MIL	Millet (Ferrassières)	26	VAR	Varages	83
MTM	Montmirail (Vacqueyras)	84	VCL	Fontaine de Vaucluse	84
NDA	N.D. des Anges (Malauc)	84			

Fig. 223 : SUD-EST DE LA FRANCE : SITUATION GEOLOGIQUE DES EMERGENCES PRELEVEES EN DECEMBRE 1981

PROSPECTION DES KARSTS DU SUD - EST DE LA FRANCE

XIII.1. INTRODUCTION

Bien que les périodes exemptes de précipitations, (donc l'observation d'étiages très bas) soient très peu fréquentes sous le climat jurassien, les différences de fonctionnement hydrogéologique sont bien mises en évidence par les instantanés synchrones.

L'utilisation de cette méthode sous le climat méditerranéen, dont la saison sèche est bien mieux marquée, a été tentée.

C'est au plus fort de l'étiage très sévère de l'été et de l'automne 1981 qu'a été effectuée cette campagne, sur un secteur limité par les régions de Montélimar au Nord, Montpellier à l'Ouest, et Toulon à l'Est, en décembre 1981.

37 parmi les principales émergences karstiques de la région (la plupart répertoriées par LATY (1981) ont été prélevées du 2 au 8 décembre 1981 (fig. 223).

Comme nous l'avons mis en évidence lors des suivis (voir IV.4.2.D.) cette période peut ne pas correspondre à un tarissement s.s, mais à des basses eaux consécutives à une recharge par une crue d'automne (massif vauclusien).

XIII.2. GEOLOGIE DE LA REGION

Les séries carbonatées de la région étudiée appartiennent à trois domaines structuraux (fig. 223) :

- les garrigues de l'Hérault et du Gard, d'altitude inférieure à 300 m : les séries du Jurassique et du Crétacé affleurent largement entre les failles cévenoles du Fossé d'Alès au Nord-Ouest et un accident majeur, la faille de Nîmes au Sud-Est, les séparant de l'épandage pliocène de la Costière.

- le "bloc nord-provençal" (BERGERAT, 1985) comprenant l'arête anticlinale chevauchante (vers le Nord) Ventoux-Lure, et les plateaux de Vaucluse (voir II.7.2.B.), qui appartient à la Provence subalpine.

- la basse Provence occidentale, formée de chaînons Est-Ouest, crétacés ou jurassiques, à structure complexe, chevauchant vers le Nord. Ce secteur culmine au voisinage de 1 000 m (Ste Victoire, Ste Baume), il est baigné au Sud par la mer. Cet ensemble repose sur le Keuper évaporitique qui affleure dans le Var, plus à l'Est.

XIII.3. GRADIENTS CLIMATIQUES

L'étude des paramètres physico-chimiques liés au climat fait apparaître d'autres phénomènes que ceux mis en évidence dans le Jura.

Paramètre	N	Pente	Ordonnée à l' Origine	Corrélation
Précipitations (mm)	28	0,498	713,8	0,686 Δ
Températures (°C)	28	-0,00641	14,53	-0,993 * *
ETR Turc annuelle (mm)	28	-0,111	573,9	-0,843 * *
$100 \times \frac{\text{ETR Turc}}{P}$	28	-0,0286	75,659	-0,893 * *

* * HAUTEMENT SIGNIFICATIF

Δ NON SIGNIFICATIF

▲ Tabl. 61 - SUD-EST DE LA FRANCE : GRADIENTS CLIMATIQUES AVEC L'ALTITUDE

Température de l'eau (°C)

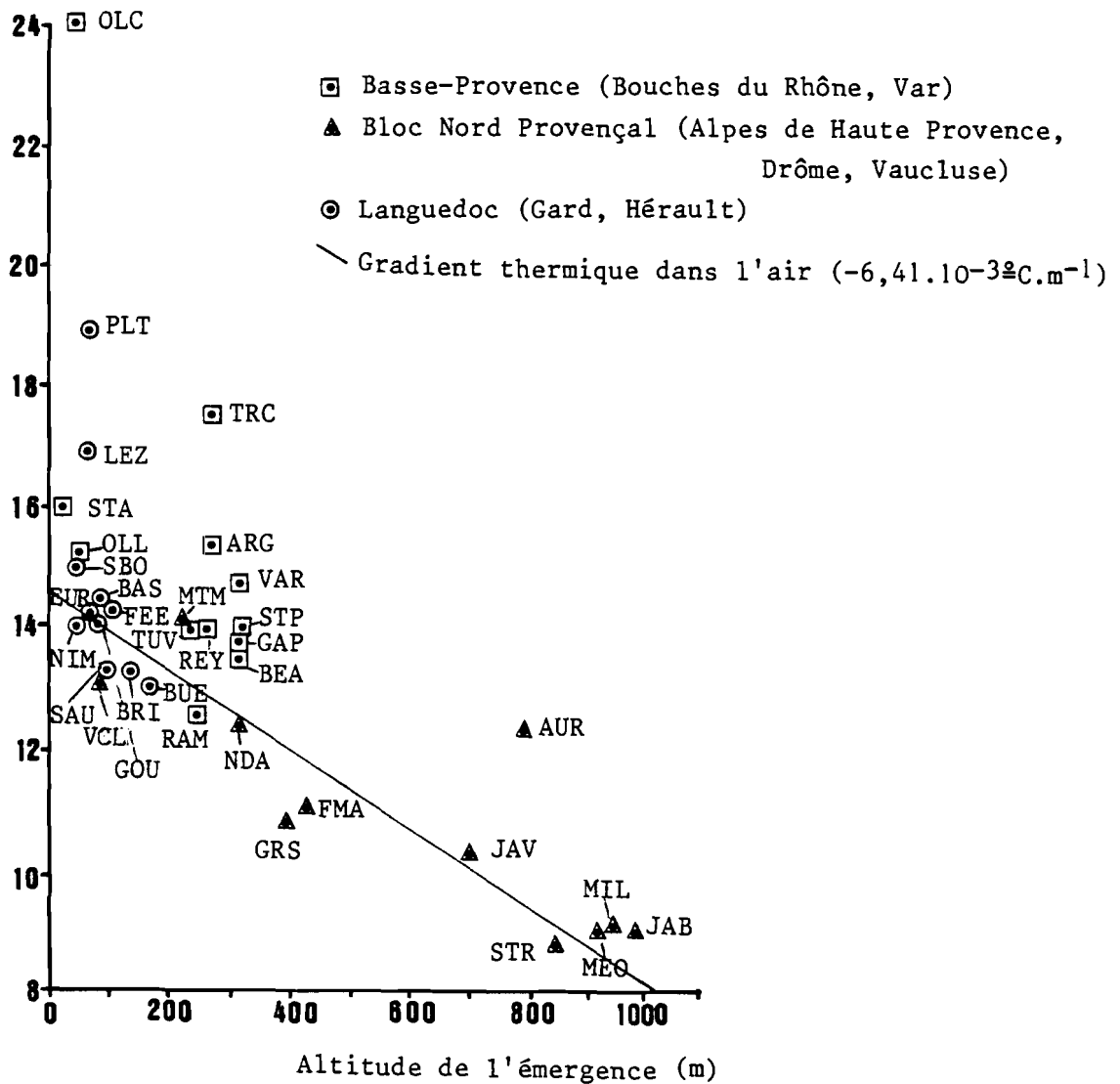


Fig. 224 : SUD-EST : TEMPERATURE DE L'EAU EN FONCTION DE L'ALTITUDE DES EMERGENCES - DECEMBRE 1981

XIII.3.1. Température de l'eau

La relation température de l'eau - altitude des émergences (fig. 224) montre, contrairement à ce que l'on observe dans le Jura, une dispersion très importante pour les basses altitudes.

Les trois domaines structuraux ont été distingués sur la figure et l'on remarque que seuls les points du bloc Nord Provençal s'ajustent bien sur le gradient thermique moyen de l'air, déterminé d'après la statistique de SANSON (1961) ($6,4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, voir tabl. 61) sur le Sud-Est de la France.

Seule la source d'Aurel (AUR), qui draine un aquifère très superficiel (voir IV.3.1.) échappe au gradient : elle est influencée par la température extérieure.

Les émergences de basse Provence et du Languedoc sont toutes situées à des altitudes inférieures à 400 m, certaines d'entre elles ont une température très nettement élevée par rapport au gradient moyen dans l'air, on est donc amené à invoquer des causes géologiques en plus des causes météoriques.

On peut ainsi formuler l'hypothèse que certaines circulations, grâce à une situation structurale favorable, peuvent emprunter des trajets plus profonds que ceux des karsts météoriques classiques.

En outre, l'absence d'ajustement significatif à un gradient (de type thermique de l'air) pour les émergences non anormales vient, comme dans le cas du Haut Doubs et de la Haute Saône, de l'insuffisance de la variété de contextes altitudinaux échantillonnés eu égard à la variabilité du paramètre température, en basse Provence et en Languedoc.

XIII.3.2. Teneur en chlorures

M. SCHOELLER (1963) a étudié les gradients de teneurs en chlorures des pluies en fonction de la distance à la côte qui est à l'origine des aérosols véhiculés par l'atmosphère.

Certains auteurs établissent des relations significatives entre teneur de la pluie et log de la distance à la côte.

Les prélèvements de cette campagne "Sud-Est" ne montrent aucune relation teneur de l'eau - distance à la côte. En revanche, les essais de corrélation entre teneur en chlorures et altitudes donnent des résultats exploitables (fig. 225).

Il existe deux catégories de sources karstiques sur le graphique :

- des émergences à teneur élevée et indépendante de l'altitude estimée de l'impluvium : ces sources sont en partie celles qui échappent au gradient thermique régional (voir fig. 224).

- des émergences dont la teneur montre une relation linéaire hautement significative ($r = - 0,796$) avec l'altitude de l'impluvium. La relation est meilleure avec l'altitude de l'impluvium qu'avec celle de l'émergence ($r = - 0,768$), ce qui atteste que les phénomènes induisant cette relation affectent l'entrée des systèmes.

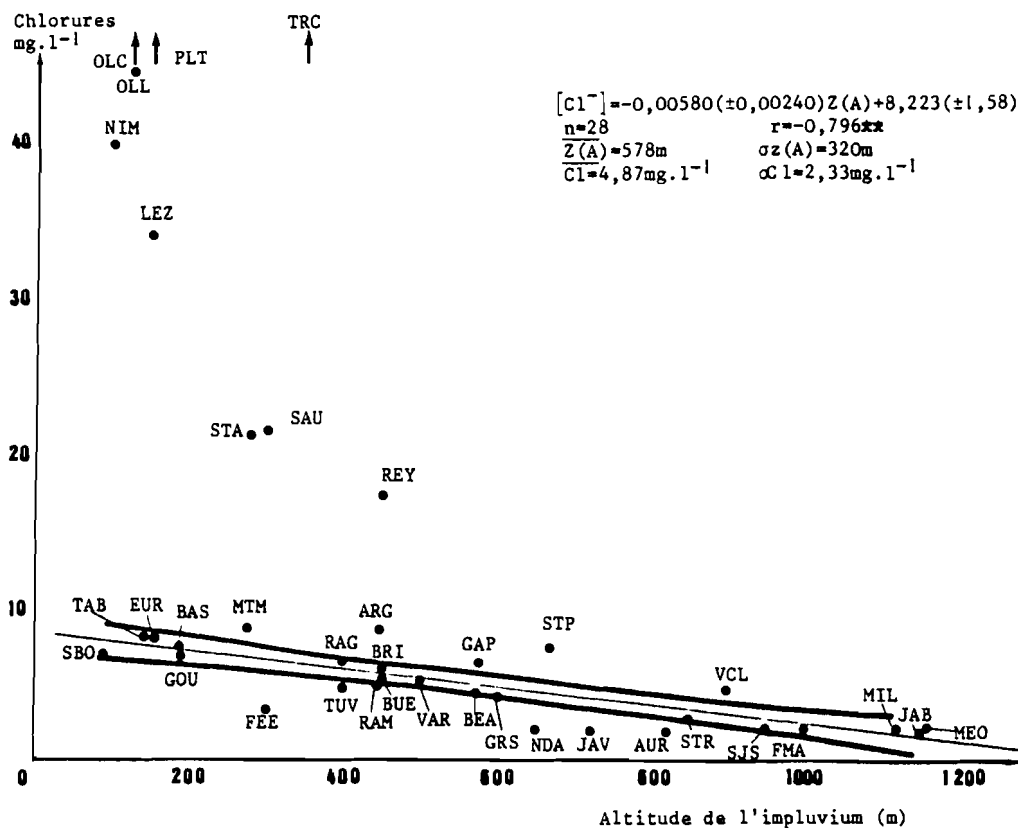


Fig. 225 : SUD-EST : RELATION TENEUR EN CHLORURES-ALTITUDE DES IMPLUVIUMS - DECEMBRE 1981

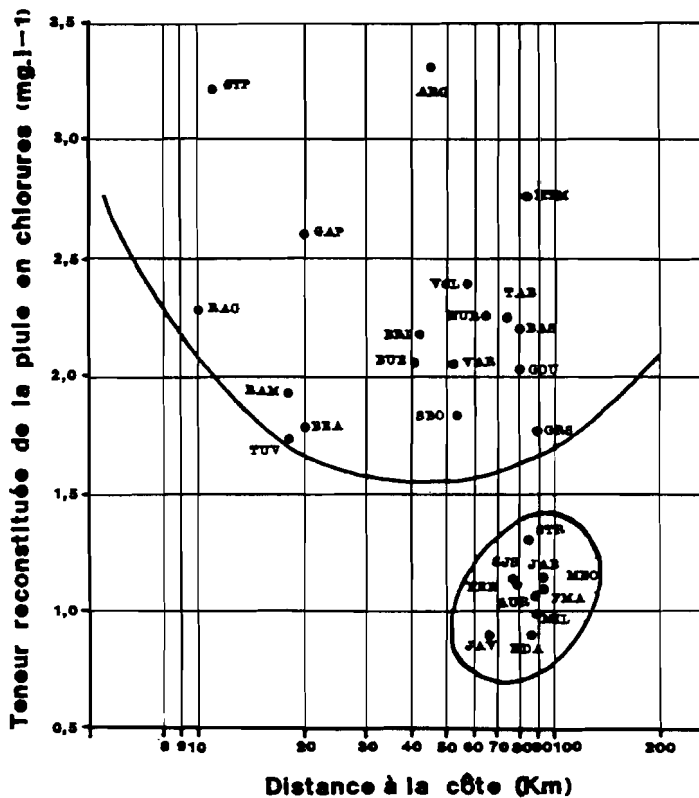


Fig. 226 : SUD-EST : RELATION TENEUR RECONSTITUEE DES PRECIPITATIONS EN CHLORURES - DISTANCE A LA COTE - DECEMBRE 1981

Dans le Jura, les teneurs élevées en chlorures étaient liées à l'activité humaine (salage des routes, égoûts, agriculture), on ne saurait imputer à cette cause les teneurs observées dans les sources du Sud Est, les impluviums des émergences étant souvent des zones montagneuses ou des garrigues très peu peuplées et incultes.

L'origine du gradient de teneurs avec l'altitude de l'impluvium peut être recherchée soit dans la teneur de la pluie elle-même au moment de sa chute, soit dans le devenir de cette pluie lorsqu'elle est stockée dans l'épikarst (évapotranspiration).

La teneur des pluies demanderait à être étudiée en fonction de l'altitude dans cette région.

Si la teneur originelle de la pluie ne montre pas de gradient altitudinal, l'évapotranspiration est le processus responsable du gradient.

A partir de 28 stations réparties sur (et autour de) la zone étudiée (d'après les normales de SANSON, 1961), quatre gradients ont été calculés vis-à-vis de l'altitude.

A cette échelle (tabl. 61) la relation précipitation altitude est non significative, les trois autres sont hautement significatives, la meilleure étant le gradient thermique de l'air.

L'ETR, calculée avec la formule annuelle de Turc (à partir des seules données disponibles : P et t) est moins bien liée à l'altitude que le coefficient d'évapotranspiration (rapport de l'ETR Turc à la hauteur de pluie).

Si l'on considère que le gradient est le fait de l'évapotranspiration et que les chlorures ne proviennent que des précipitations (pour les sources obéissant au gradient) on peut, connaissant l'altitude des impluviums reconstituer la teneur de la pluie avant évapotranspiration, en utilisant le paramètre $(1 - \frac{ETR}{p})$ comme un coefficient d'infiltration.

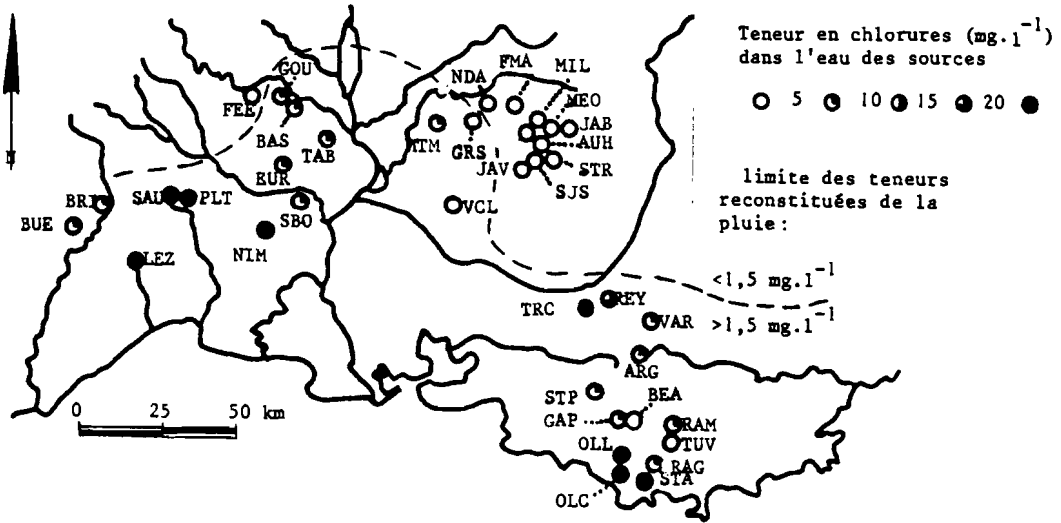
La figure 226 représente cette teneur reconstituée de la pluie en fonction de la distance à la côte, et l'on remarque l'absence de relation entre ces deux paramètres.

Cependant, la figure 226 fait apparaître deux groupes géographiques de teneurs : les teneurs reconstituées inférieures à $1,5 \text{ mg.l}^{-1}$ toutes situées (à l'exception de la source des Fées) sur le bloc nord-provençal, et les teneurs plus élevées réparties en basse Provence et dans le Languedoc, dans les régions plus proches de la mer et peu élevées (fig. 227).

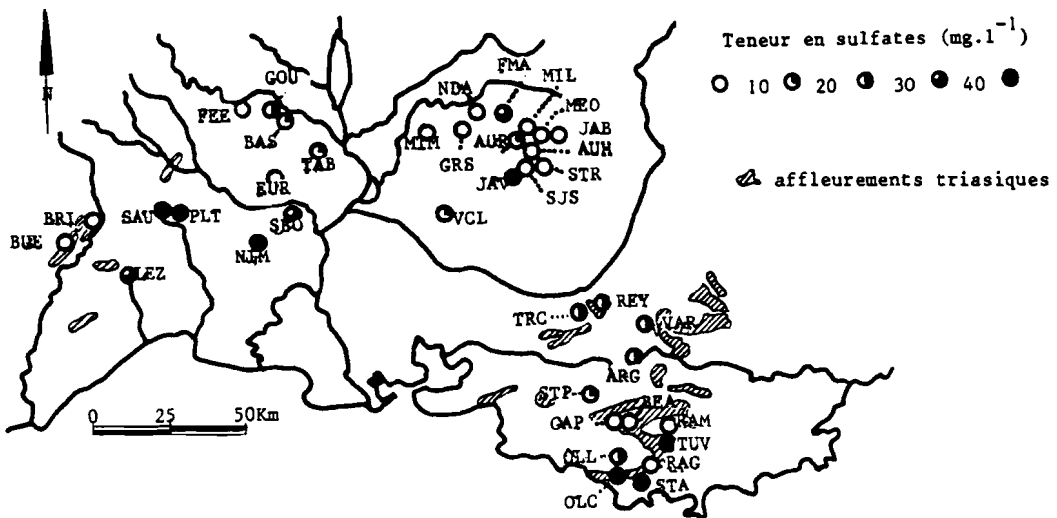
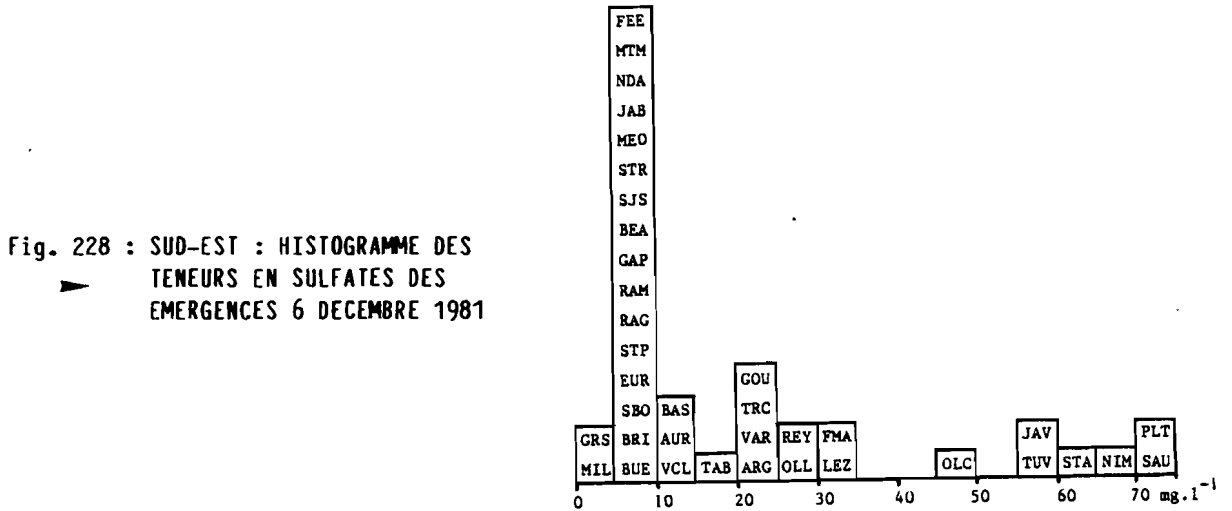
La suppression de l'effet de l'évapotranspiration fait donc apparaître grâce à la teneur en chlorures deux zones morphoclimatiques distinctes.

XIII.3.3. Conclusions

L'étude des gradients liés au climat dans les eaux des émergences karstiques du Sud-Est de la France fait apparaître deux types d'aquifères : les uns, où l'influence de la géologie prime (profondeur des circulations, relations avec le Trias), les autres, plus influencés par le fonctionnement climatique du secteur.



▲ Fig. 227 : SUD-EST : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES TENEURS RECONSTITUEES DES PRECIPITATIONS EN CHLORURES - DECEMBRE 1981



▲ Fig. 229 : SUD-EST : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES TENEURS EN SULFATES ET AFFLEUREMENTS TRIASIQUES - DECEMBRE 1981

La teneur en chlorures de ces émergences à l'étiage est liée aux températures moyennes annuelles grâce à l'évapotranspiration, ce qui démontre le rôle très important de l'aquifère épikarstique dans la modulation de la teneur des éléments météoriques, donc dans l'alimentation des milieux capacitifs noyés.

Dans les régions à seul apport météorique de chlorures, cet ion peut servir à la détermination de l'altitude moyenne d'alimentation des systèmes.

On peut ainsi réviser en hausse l'altitude des impluviums des systèmes du Groseau et de Notre Dame des Anges.

XIII.4. TRACEURS LITHOLOGIQUES

Ainsi que nous l'avons supposé à propos de la température et des chlorures, les facteurs géologiques peuvent jouer un grand rôle dans la signature chimique des différents systèmes du Sud-Est.

Nous allons examiner la liaison de certaines teneurs avec deux faciès régionaux, le Keuper à évaporites et le Jurassique dolomitique.

XIII.4.1. Teneur en sulfates et affleurements triasiques

L'examen des teneurs en chlorures en fonction de l'altitude avait révélé que certaines sources échappaient au gradient météorique, il s'agissait de systèmes du Languedoc (Sauve, Plantat, Fontaine de Nîmes, Lez) et de basse Provence (Ollioules, Traconnade, St Antoine, Font Reynaude, St Pons, Argens).

On retrouve (fig. 228) dans l'histogramme des sulfates la plupart de ces sources avec de fortes valeurs.

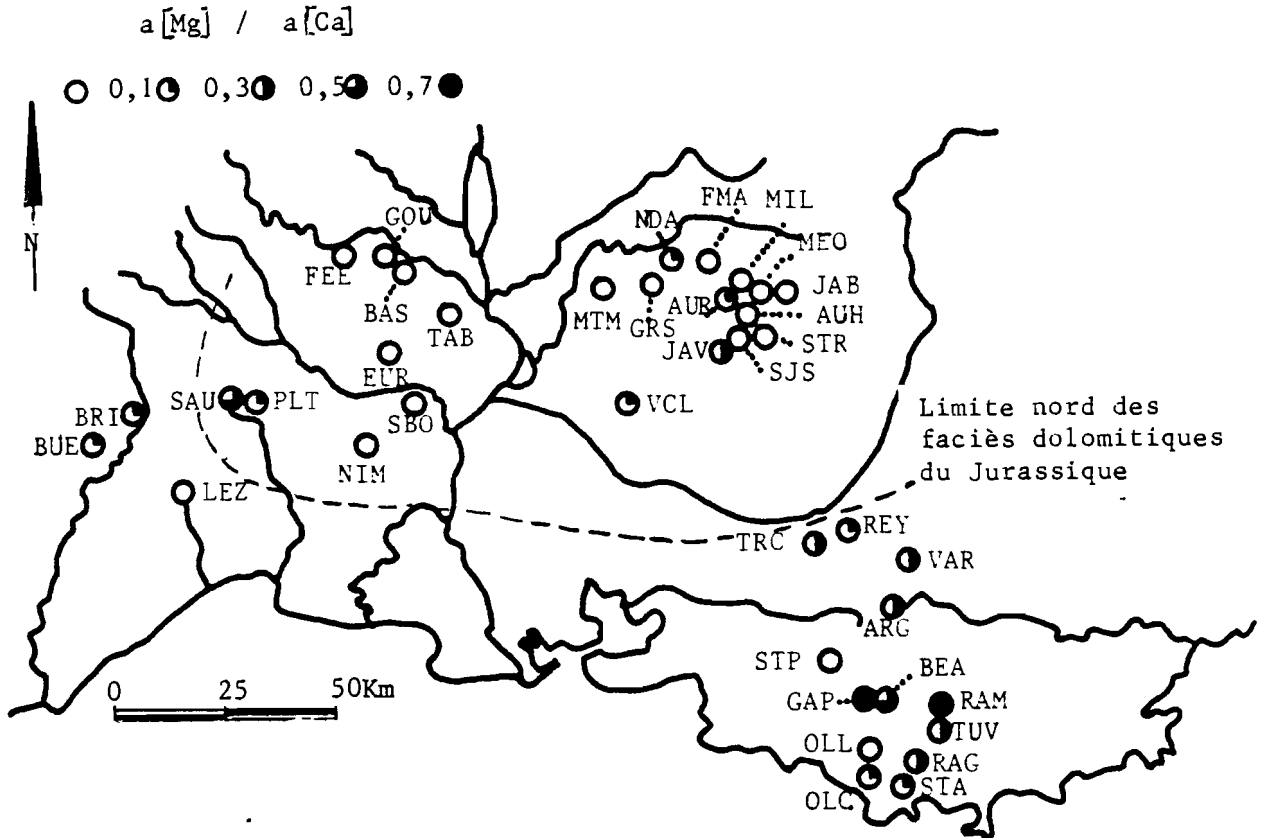
Au point de vue géologique (fig. 229), les sources chargées en sulfates peuvent drainer des ensembles calcaires flottant ou au moins décollés sur le Trias, par exemple dans la Ste Baume (St Pons, Tuves), le Mont Faron (Ollioules, St Antoine), la Ste Victoire (Argens), la chaîne Vautubière - Mont Major (Font-Reynaude, Traconnade, Varages).

Les sulfates de la résurgence du Vidourle à Sauve proviennent des affleurements triasiques et primaires du haut-bassin subaérien (DROGUE, 1963), c'est ce qui explique l'orthothermie de la source, malgré sa teneur élevée en chlorures.

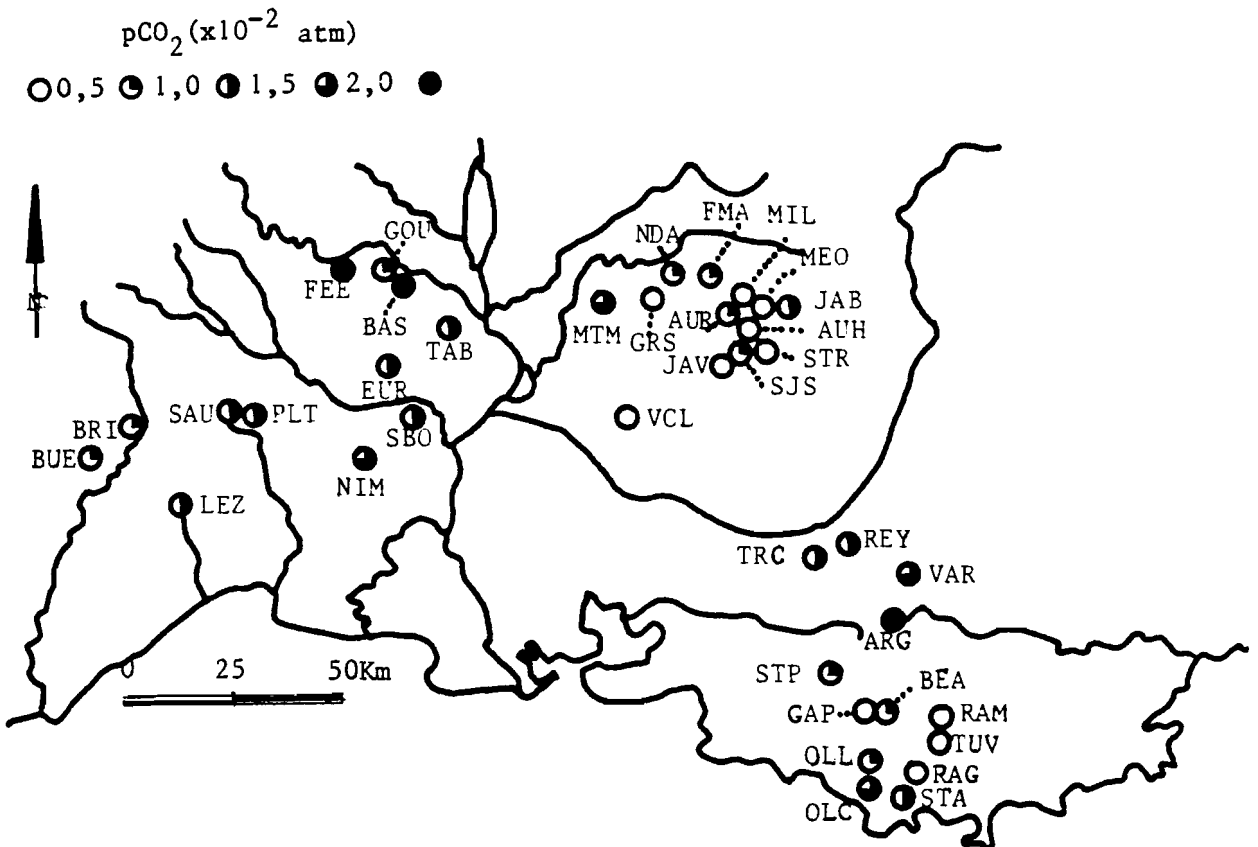
En revanche, les sources du Lez et de Plantat, dont la température est élevée, peuvent être en relation avec le Trias par un circuit profond guidé par la fracturation cévenole (Plantat) ou un pli synclinal (Lez - MARJOLET et SALADO, 1975).

Les sources de Nîmes, de St Bonnet émergent à faible distance de l'importante faille de Nîmes, mais leur teneur en sulfates peut difficilement être imputée au Trias.

Les sources issues des calcaires oligocènes (Javon, Aurel) sont plus chargées que les émergences issues du Crétacé dans le même contexte, les dépôts oligocènes pouvant renfermer des évaporites.



▲ Fig. 230 : SUD-EST : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES RAPPORTS a Mg/a Ca ET AFFLEUREMENTS DOLOMITIQUES - DECEMBRE 1981



▲ Fig. 231 : SUD-EST : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES pCO_2 CALCULEES - DECEMBRE 1981

La répartition des teneurs en sulfates est donc intimement liée à la géologie : lithologie et fracturation.

L'ion sulfate peut être un moyen de contrôle de la présence du Trias à la semelle des unités chevauchantes, si l'Oligocène ne participe pas à l'impluvium.

XIII.4.2. Teneur en magnésium et affleurements dolomitiques

En basse Provence, le Malm est fréquemment dolomitique, en particulier au voisinage du front des trois grandes unités chevauchantes : fronts Nord et Sud Provençaux, Chaînon du Faron (fig. 230).

Dans le Languedoc méditerranéen, on rencontre des calcaires dolomitiques dans le Lias, le Dogger et le Malm, au voisinage de la vallée de l'Hérault (Séranne) et sur le Haut-Gard.

Les émergences les plus riches en magnésium (rapport rMg/rCa maximal) se rencontrent dans ces secteurs dolomitiques.

On peut ainsi remarquer que le système de St Pons sur la Sainte-Baume ne semble pas drainer de secteurs dolomitiques, alors que les émergences du pied sud de la chaîne (Gapeau, Beauprés) semblent alimentés par le Malm dolomitique.

Le rapport rMg/rCa permet donc d'avancer des hypothèses sur les impluviums des émergences.

Comme pour les sulfates, les sources des calcaires oligocènes du bloc nord-provençal sont plus riches en Mg que les sources issues du Crétacé inférieur.

XIII.4.3. Conclusions

Le fort marquage lithologique observé peut être utilisé pour reconstituer les impluviums des émergences, il peut nuire à la comparaison hydrocinématique des systèmes, certains éléments leur étant extérieurs (SO_4^{2-}), d'autres n'étant pas répartis de manière homogène dans la région (magnésium).

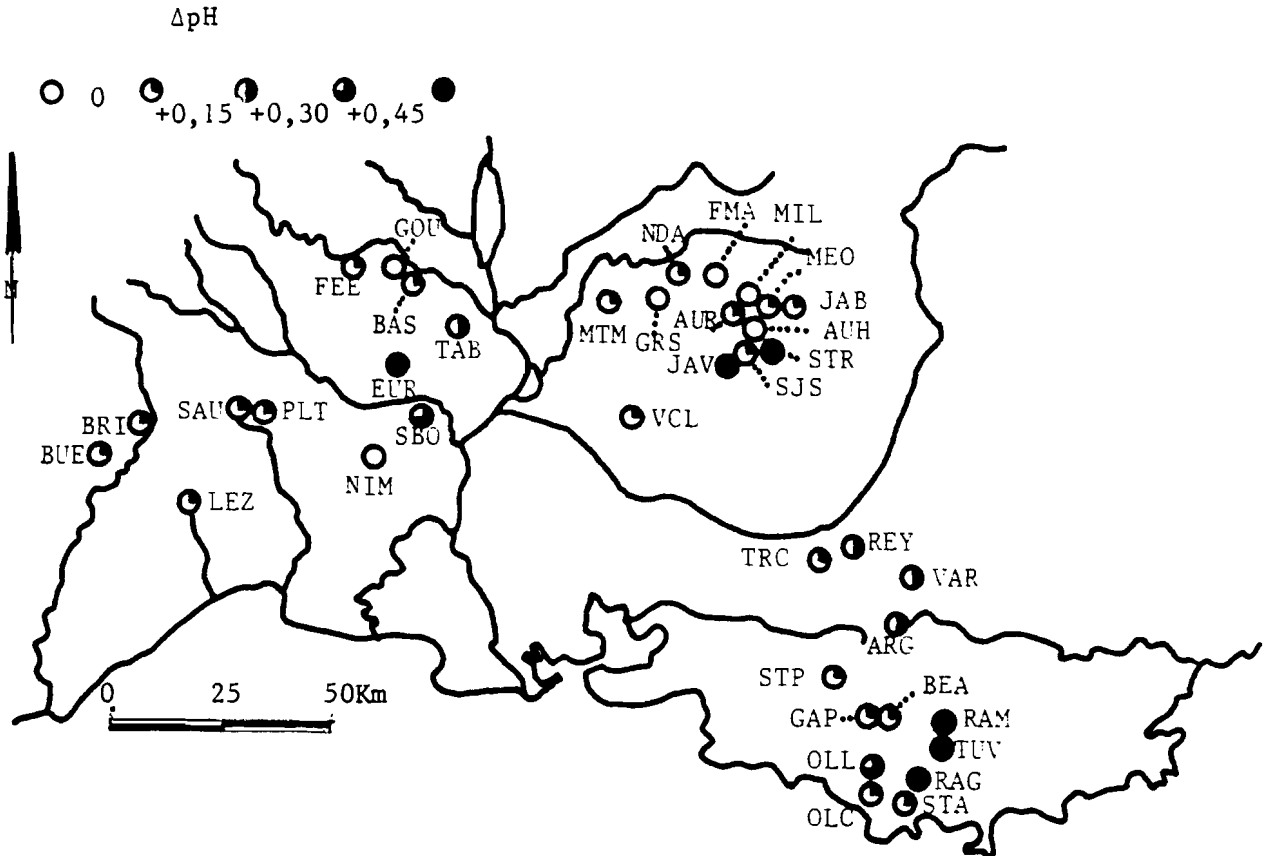
XIII.5. pCO_2 ET SATURATION

XIII.5.1. pCO_2

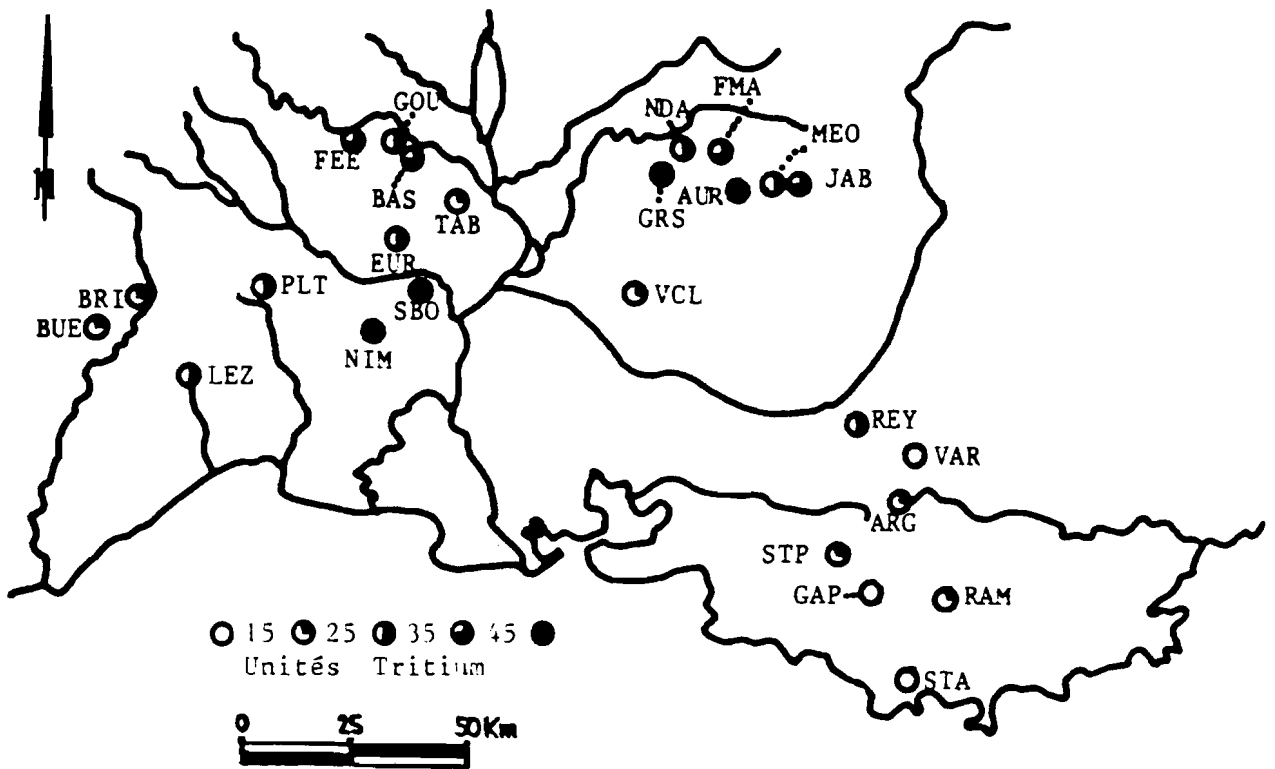
La répartition géographique des pCO_2 (fig. 231) oppose les émergences à valeurs inférieures à 1.10^{-2} atmosphère, situées à l'exutoire de systèmes à impluvium de montagne fortement dénivelé (Séranne : Buège et Brissac, Ventoux et Monts de Vaucluse, Ste Baume : St Pons, Gapeau, Rampins, Mt Faron : Ragast et Ollioules) à des émergences situées dans des contextes variés.

Certaines sources sont à faible altitude dans des situations quelconques (Montmirail, Bastide, Fontaine d'Eure), d'autres sont situés à proximité d'accidents actuellement actifs (GRILLOT et al., 1983) comme la faille de Nîmes : il s'agit des sources de Sauve, Plantat, Nîmes, St Bonnet, Tabion ...

En Provence, les sources avoisinant le bord sud du bassin du Beausset (Ollioules, St Antoine), le front nord provençal (Varages, Argens), la faille d'Aix (Traconnade, Font Reynaude) ont également de fortes pCO_2 .



▲ Fig. 232 : SUD-EST : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES ΔpH CALCULES - DECEMBRE 1981



▲ Fig. 233 : SUD-EST : REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES TENEURS EN TRITIUM - DECEMBRE 1981

L'examen géographique de ce paramètre permet donc d'opposer les sources à faible pCO_2 (d'origine pédologique - BAKALOWICZ, 1979) aux sources à forte pCO_2 (d'origine sans doute profonde) situées au voisinage d'accidents tectoniques majeurs et actifs.

Cette dernière famille inclut en outre la plupart des sources anormales en température, en chlorures et en sulfates.

Il conviendra de préciser cette origine profonde à l'aide de la teneur relative en carbone 13.

XIII.5.2. Saturation

En cette période d'étiage prolongé, pendant laquelle les temps de transit sont grands eu égard aux temps de réalisation des équilibres calco-carboniques, la plupart des sources écoulent des eaux sursaturées.

Seuls certains systèmes des garrigues languedociennes (Nîmes, Goudargues) et les émergences de la zone montagneuse du Vaucluse montrent une faible sous-saturation (fig. 232).

Les émergences des systèmes à faible profondeur du plateau de Vaucluse (St Trinit, Javon) sont très nettement sursaturés.

Une mention particulière doit être portée aux émergences nettement incrustantes comme les sources des Rampins et des Tuves dans le Var, en permanence sursaturées (BAKALOWICZ, 1979), ou la Fontaine d'Eure à Uzès (épais dépôts de carbonates dans l'aqueduc romain du Pont du Gard).

Le paramètre saturation au cours de cet instantané confirme donc deux observations faites par ailleurs.

- l'abondance des dépôts carbonatés à l'exutoire de systèmes (Gard et Var) due à une sursaturation permanente.
- la restitution d'eau à séjour bref aux émergences du pied de la zone montagneuse du Vaucluse.

XIII.6. TENEURS EN TRITIUM

25 sources ont été choisies pour un dosage de tritium après enrichissement électrolytique.

Contrairement aux instantanés effectués dans le Jura, les systèmes aux débits d'étiage les plus élevés (Vaucluse, Lez, Tabion, Argens, Gapeau, Eure, Buège, Brissac), connus pour l'importance de leurs réserves pérennes (DROGUE et al., 1983 ; COVA et DUROZOY, 1980) ont les teneurs les plus basses en tritium (fig. 233) en opposition avec les petits systèmes ou les systèmes dépourvus de réserve noyée pérenne (Groseau, Féas, Bastide, Aurel, Jabron, Font de Marin) plus riches en tritium.

Cette différence avec les observations faites sur le Jura vient du fait que l'étiage très sévère de 1981 a mobilisé sur les grands aquifères des eaux peu accessibles en année normale, précipitées avant le pic des années soixante.

Ainsi, les faibles teneurs traduisent un long temps moyen de résidence et les teneurs supérieures à 35 UT montrent la prédominance des précipitations récentes dans l'écoulement (les pluies de 1980 et 1981 avaient des teneurs de 33 et 44 UT à Thonon et des valeurs plus élevées à Avignon).

Fig. 234 : SUD-EST, ACP, CAMPAGNE TOTALE SANS TRITIUM, DECEMBRE 1981
 DIAGRAMME DES VARIABLES (plan I x II)

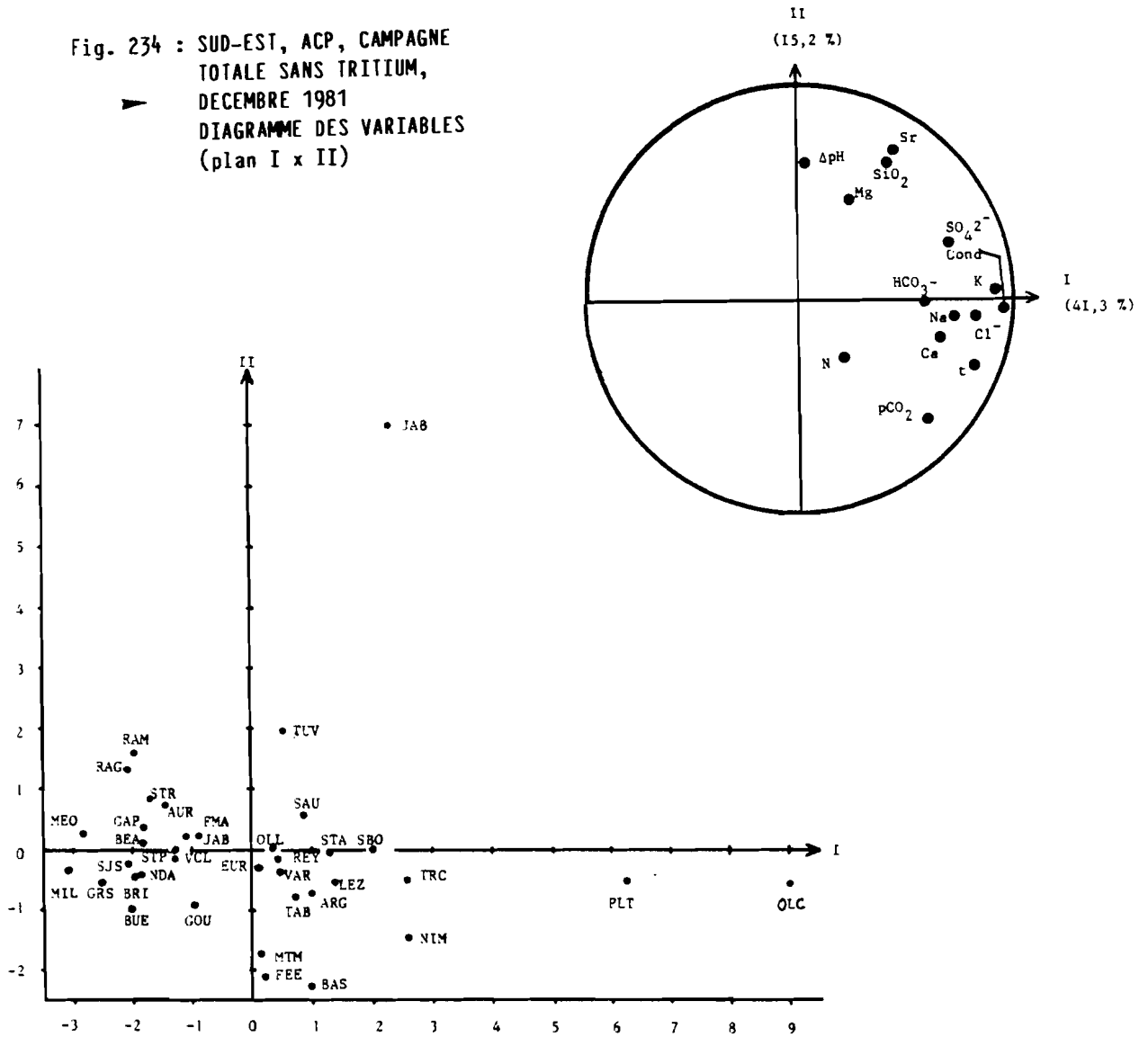


Fig. 235 : SUD-EST, ACP, CAMPAGNE TOTALE SANS TRITIUM, DECEMBRE 1981, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan I x II)

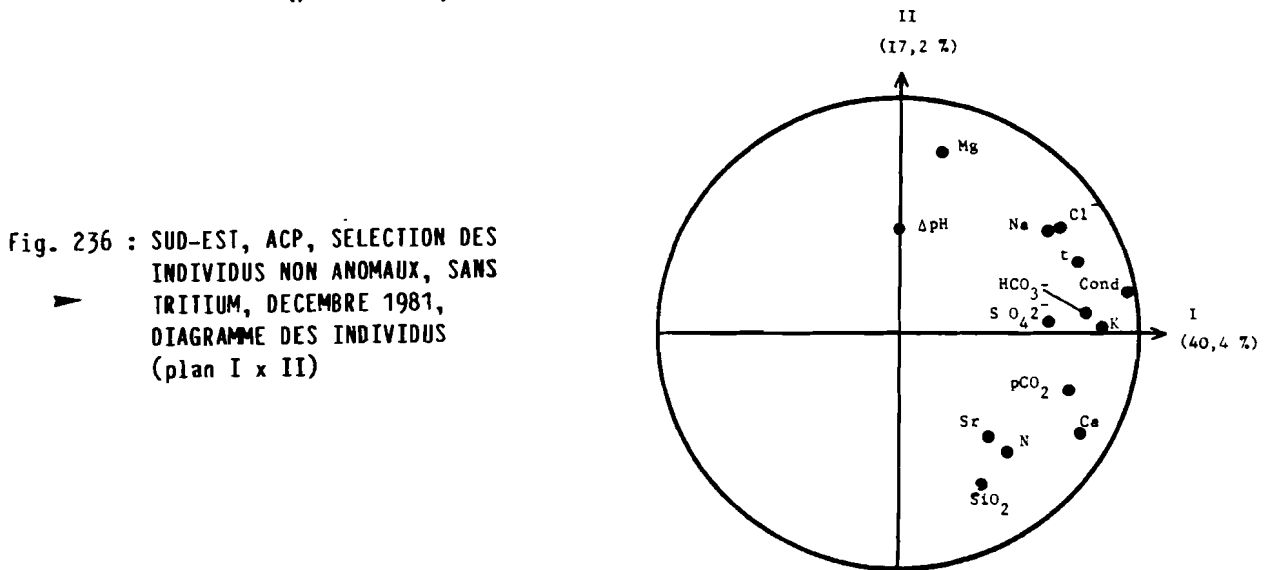


Fig. 236 : SUD-EST, ACP, SÉLECTION DES INDIVIDUS NON ANOMAX, SANS TRITIUM, DECEMBRE 1981, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan I x II)

XIII.7. Synthèse des données physico-chimiques au moyen de l'ACP

Le recours simultané aux nombreux descripteurs est possible grâce à l'ACP.

XIII.7.1. ACP globale (toutes les sources, 14 paramètres)

Cette analyse utilise les descripteurs température, conductivité, pCO_2 , saturation, Ca, Mg, Sr, Na, K, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , N/ NO_3^- , SiO_2 .

Le diagramme factoriel I x II, qui recueille 56,5 % de la variance totale (fig. 234) montre deux groupes de paramètres, l'un définissant l'axe I : (température, conductivité, azote, chlorures, sodium, bicarbonates, sulfates, calcium), l'autre l'axe II (Mg, Sr, SiO_2 , saturation).

L'axe I est un axe traduisant les relations des systèmes avec la profondeur : eaux tièdes, bien minéralisées en traceurs des milieux évaporitiques triasiques (Na, K, Cl, Ca, SO_4) et riches en carbonates (pCO_2 , HCO_3^-).

L'axe II définit les milieux dolomitiques.

Cette ACP sur l'ensemble des individus prouve que le caractère dominant des systèmes karstiques du Sud-Est est leur contexte géologique : lithologie (évaporites, dolomies) et structure (accidents tangentiels ou fractures actives).

Ce contexte masque leur fonctionnement karstique proprement dit, comme nous l'avons déjà remarqué dans l'étude diachronique du Pont de Gys (voir III.3.2.A.).

Le diagramme des individus (fig. 235) montre le poids exorbitant de certains systèmes (Ollioules, Plantat pour la composante profonde, Javon pour la composante dolomitique), c'est pourquoi une ACP a été refaite sans ces individus.

XIII.7.2. ACP sans les sources très marquées

L'axe I (fig. 236) garde la même signification, l'axe II oppose le magnésium à l'azote, la silice et le strontium.

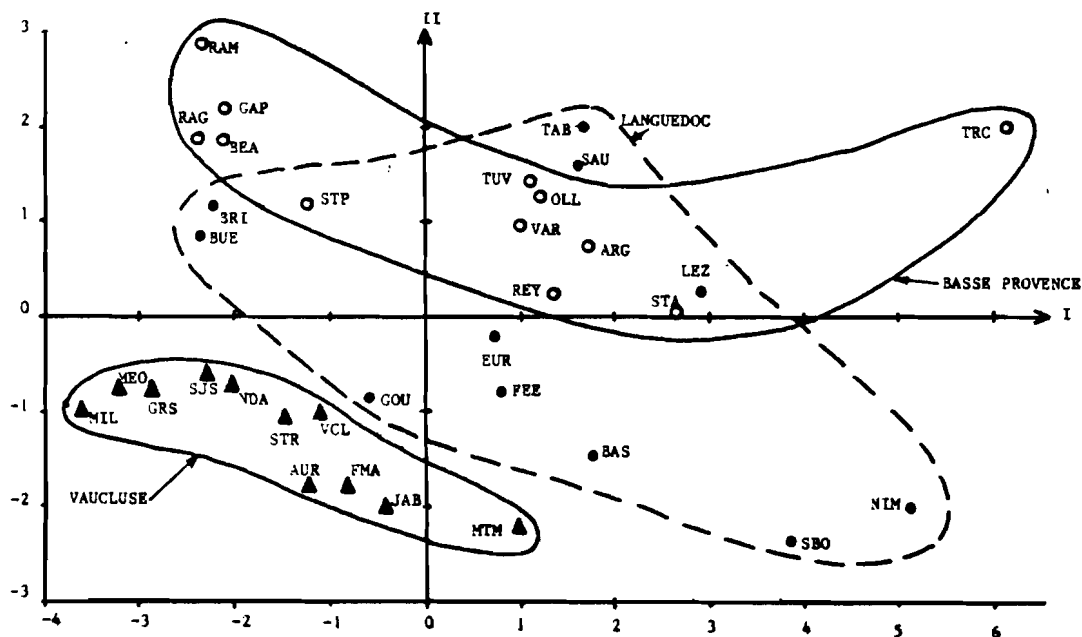
Le fonctionnement karstique des systèmes n'apparaît pas plus clairement, la distinction se faisant toujours entre le rôle du Trias et celui des dolomies.

La répartition géographique des individus montre (fig. 237) que le bloc nord-provençal est le secteur le moins affecté par ces paramètres litho-structuraux, que la basse Provence calcaire est la plus affectée et que le Languedoc occupe une position intermédiaire, à l'exclusion des sources de Tabion, Sauve et Lez.

Ce schéma est tout à fait conforme à la configuration structurale et lithologique de ces trois régions, le bloc nord-provençal étant exempt de séries dolomitiques et de relations avec le Trias, la Provence ayant au contraire un style tectonique dû au Trias et les garrigues du Gard et de l'Hérault étant découpées par des accidents actifs.

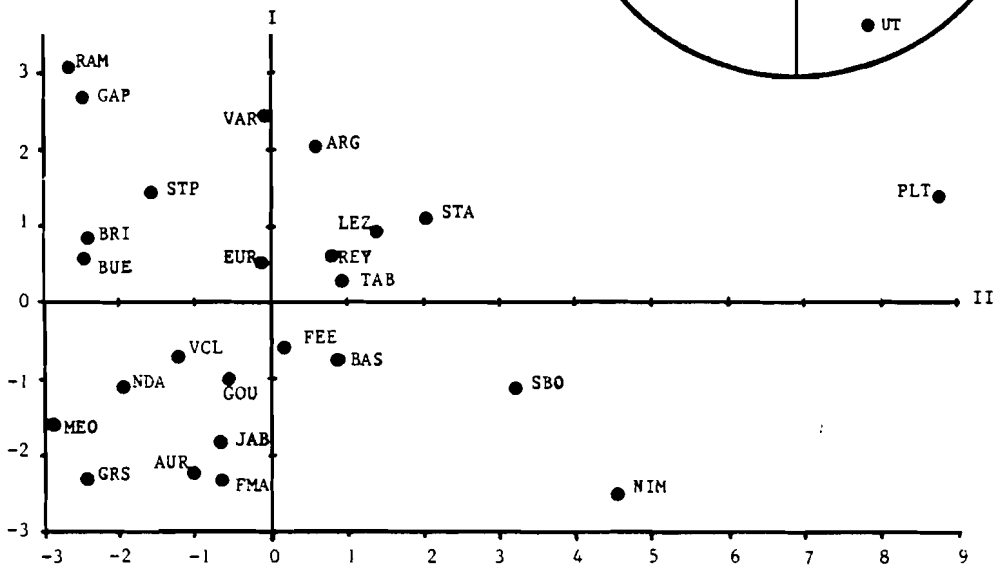
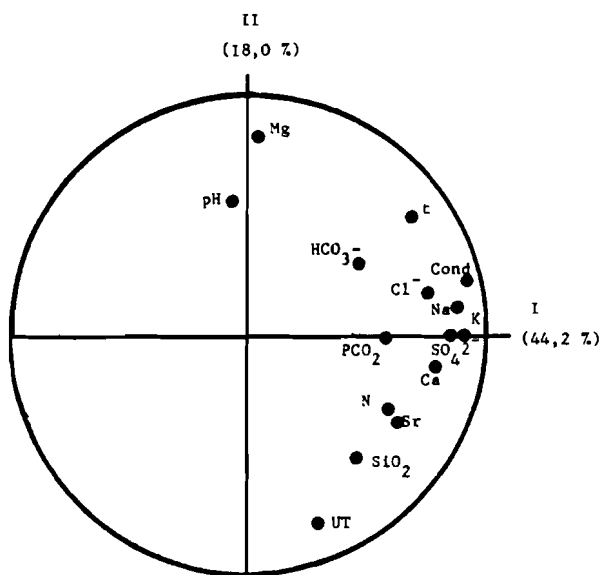
XIII.7.3. ACP globale avec tritium

L'analyse avec tritium accroît la signification de l'axe II (fig. 238), les fortes teneurs en tritium étant associées (en négatif) à l'azote, la silice et le strontium, et s'opposant aux eaux sursaturées riches en magnésium.



▲ Fig. 237 : SUD-EST, ACP, SELECTION DES INDIVIDUS NON ANOMAX, SANS TRITIUM, DECEMBRE 1981, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan I x II)

▲ Fig. 238 : SUD-EST, ACP, CAMPAGNE TOTALE AVEC TRITIUM, DECEMBRE 1981, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan I x II)



▲ Fig. 239 : SUD-EST, ACP, CAMPAGNE TOTALE AVEC TRITIUM, DECEMBRE 1981, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan I x II)

Cette répartition des variables accreditte l'hypothèse de l'écoulement d'eaux anciennes pauvres en tritium et bien minéralisées en magnésium, sursaturées aux exutoires de grands systèmes, en opposition avec les eaux plus riches en tritium, à l'équilibre (ou sous-saturées) et peu minéralisées aux exutoires de petits systèmes, principalement de montagne.

Le diagramme des individus (fig. 239) montre encore le poids démesuré des sources de systèmes avec eaux profondes (Plantat, Nîmes, St Bonnet).

XIII.7.4. ACP avec tritium sans les sources très marquées

La suppression des individus à grand poids inverse la polarité de l'axe II (fig. 240) et améliore la signification de l'axe I.

Le diagramme des individus (fig. 241) discrimine très bien les systèmes : l'axe I oppose les aquifères mobilisant des eaux "de fond" (tièdes, minéralisées en traceurs des évaporites, avec CO₂ d'origine profonde) abscisses positives aux systèmes mobilisant des eaux météoriques (à l'équilibre thermique avec le réservoir, peu minéralisées en tous les traceurs, à teneur faible en CO₂ d'origine pédologique) abscisses négatives.

L'axe II oppose les eaux récentes (à teneur en tritium voisine de la moyenne pondérée des précipitations, sous-saturées ou à l'équilibre calco-carbonique, pauvres en magnésium) abscisses négatives - abscisses positives aux eaux anciennes, (sursaturées, riches en magnésium, à teneur faible en tritium).

Les 3 régions se discriminent bien sur le critère "profondeur" (relation avec le Trias).

Le facteur II est ubiquiste car si pour les secteurs calcaires il distingue bien les renouvellements rapides des renouvellements lents, la présence de séries dolomitiques peut occulter cette distinction.

Ainsi, la Fontaine de Vaucluse, malgré ses réserves connues, demeure proche des systèmes "rapides" du bloc nord-provençal.

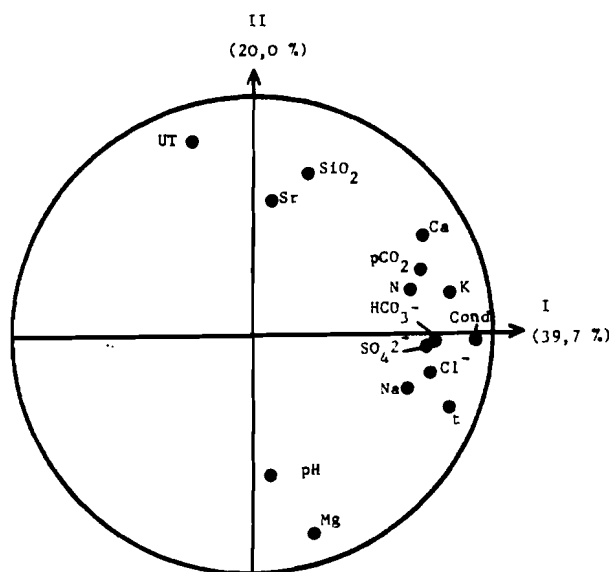


Fig. 240 : SUD-EST, ACP, SELECTION DES INDIVIDUS NON ANOMAX, AVEC TRITIUM, DECEMBRE 1981, DIAGRAMME DES VARIABLES (plan I x II)

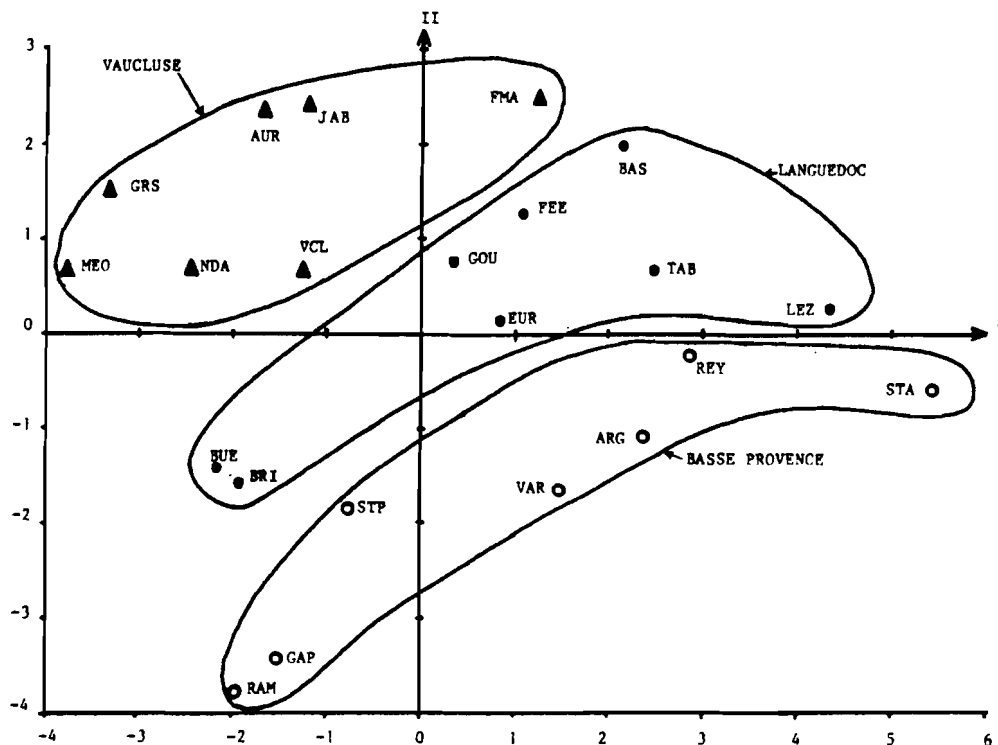


Fig. 241 : SUD-EST, ACP, SELECTION DES INDIVIDUS NON ANOMAX, AVEC TRITIUM, DECEMBRE 1981, DIAGRAMME DES INDIVIDUS (plan I x II)

XIII.7.5. Conclusion

Dans une région vaste, variée comme le Sud-Est de la France, le comportement karstique des systèmes ne prédomine pas sur l'influence des facteurs lithologiques et structuraux.

Le caractère primordial mis en évidence, tant par plusieurs descripteurs pris isolément que par l'analyse multidimensionnelle, est le degré de relation avec des circuits "profonds", qui se sont établis soit par les chevauchements sur une semelle triasique (cas de la basse Provence) soit par une fracturation régionale permettant par ailleurs un thermalisme (cas du Languedoc méditerranéen).

L'échelle à utiliser pour la mise en oeuvre de campagnes synchrones dans cette région doit être modifiée afin d'échantillonner des entités climatiquement et géochimiquement plus homogènes, pour focaliser l'étude sur le comportement karstique des systèmes, comme dans le Jura.

C'est dans cette optique qu'a été réalisé l'instantané de juin 1981, portant sur la seule région vauclosienne.

		Température	Oxygène 18
Altitude de l'émergence	juin	-0,902 (NS)	-0,556 (NS)
	sep.	-0,861 (NS)	-0,493 (NS)
Altitude estimée de l'impluvium	juin	-0,723 (NS)	-0,604 (NS)
	sep.	-0,677 (NS)	-0,696 (NS)

Tabl. 62 - VAUCLUSE : TEMPERATURE ET OXYGENE 18 EN FONCTION DES ALTITUDES DES EMERGENCES ET DES IMPLUVIUMS (JUIN ET SEPTEMBRE 1981)

XIII.8. INSTANTANES DE JUIN ET SEPTEMBRE 1981

Les prélèvements correspondent au début du long étiage de 1981, la Fontaine de Vaucluse étant encore en décrue en juin.

Nous ne retiendrons de ces campagnes que 2 paramètres, la température et l'oxygène 18.

Les corrélations température et oxygène 18 en fonction des altitudes des émergences et des impluviums (tabl. 62) sont toutes non significatives, à cause du trop faible nombre de systèmes échantillonnés, malgré la belle allure graphique des gradients (fig. 242).

Ce graphique nous permet cependant d'attribuer à l'émergence des Borrys une circulation profonde, sans doute à la faveur du chevauchement frontal du Lubéron (GOUVERNET et al., 1971).

Les meilleurs coefficients de corrélations (tabl. 62), bien que non significatifs sont comme dans le Jura ceux du gradient de température en fonction de l'altitude de l'émergence et du gradient d'oxygène 18 en fonction de l'altitude d'alimentation.

Ainsi, l'étude du bloc nord provençal requiert un plus grand nombre de points de prélèvements, pour que l'incertitude sur la détermination de l'altitude moyenne des aires de recharge soit diminuée.

En effet, sur le faible nombre de systèmes échantillonnés, trop d'aquifères ont des impluviums à très grande dénivelée (par exemple : Vaucluse : 1800 m).

L'étalonnage d'un gradient régional demande l'utilisation de petits systèmes (ayant cependant un fonctionnement hydraulique comparable à celui des grands) à faibles dénivelées pour faciliter l'estimation de leur altitude moyenne.

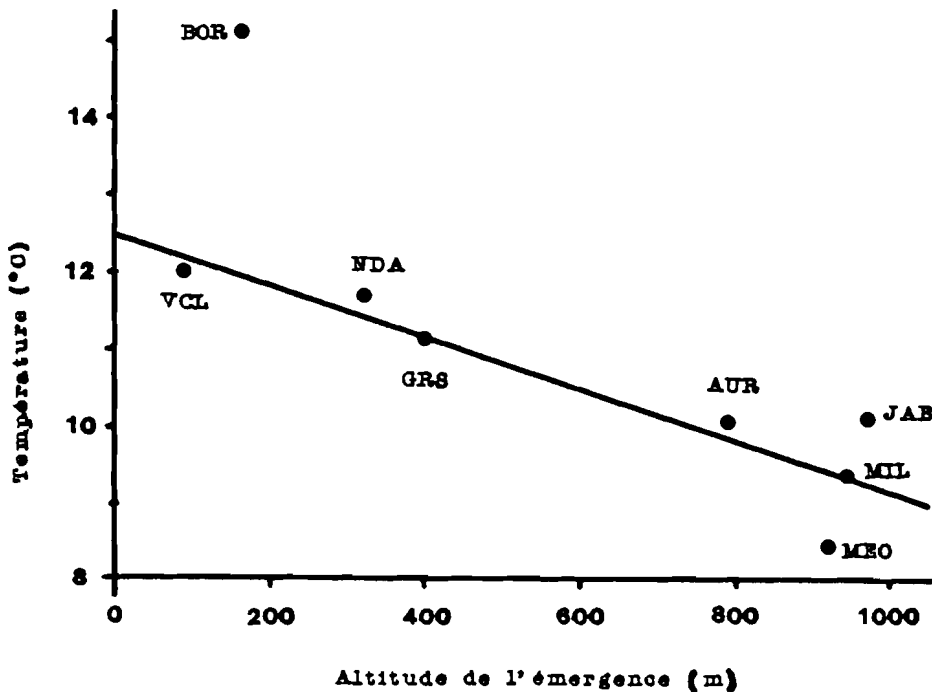


Fig. 242 : VAUCLUSE : RELATION TEMPERATURE DE L'EAU-ALTITUDE DES EMERGENCES, JUIN 1981

C H A P I T R E X I V

C O N C L U S I O N :

I N T E R E T D E S C A M P A G N E S

D ' I N S T A N T A N E S

La méthodologie des campagnes de prélèvements synchrones (ou instantanés) a requis une démonstration de sa validité et de ses limites d'emploi.

XIV.1. SECTEUR PROSPECTE

Pour fournir des informations hydrocinématiques, l'instantané ne peut s'appliquer qu'à une région homogène du point de vue lithologique : le secteur prospecté doit comprendre des systèmes développés dans les mêmes séries. Dans le cas contraire (Sud-Est, plateau de Vesoul), le facteur lithologique occulte le facteur hydrocinématique.

Le climat de la région étudiée doit également être homogène, afin que tous les systèmes subissent un signal d'entrée comparable. Cette condition, facile à obtenir sur une région à climat océanique comme la moitié nord de la France (Jura, Plateau de Vesoul), est difficilement réalisée sous des climats méditerranéens (Sud-Est) ou subtropicaux où les précipitations locales (orages) peuvent représenter 10 à 25 % du total annuel. Tant pour la lithologie que pour le climat, il ne faut pas de répartition discontinue.

En revanche, les contextes morfo-structural et climatique doivent être suffisamment variés de manière continue (pour engendrer des gradients) pour que l'on observe une répartition utilisable des indicateurs physico-chimiques. De ce point de vue le Haut Doubs est un secteur trop peu varié pour que la variabilité structurée (gradient) prime sur la variabilité aléatoire.

XIV.2. PERIODE D'ETUDE

L'étude de la représentativité des différents instantanés montre que le tarissement permet la comparaison des systèmes par le comportement de leurs réserves. L'obtention de périodes influencées synchrones au point de vue hydrocinématiques est difficile, cependant, dans les régions de montagne, la fonte des neiges généralisée apporte de nombreuses informations sur les processus d'infiltration. Les campagnes d'étiage peuvent être mises en oeuvre environ tous les ans. Une campagne seule est généralement représentative du comportement de la réserve, cependant, à cause de la mémoire des épisodes hydrocinématiques antérieurs il convient de confirmer un instantané de tarissement par un autre, surtout quand les conditions hydrométéorologiques n'ont pas été totalement homogènes.

XIV.3. OBJECTIFS DES INSTANTANES

Dans les régions où les relations des systèmes avec la structure ne sont pas clairement établies, l'instantané révèle de telles relations (avec la semelle de nappe de charriage, avec une fracturation profonde).

L'existence de gradients climatiques permet de déterminer l'altitude moyenne des aires de recharge (oxygène 18, chlorures) ou des réserves (température).

Les instantanés classent les systèmes selon le temps de renouvellement de leurs réserves (tritium).

Les instantanés permettent la mesure de l'atteinte anthropique des réserves des systèmes ; la répétition d'instantanés d'étiage est un moyen de contrôle de l'évolution inter-annuelle de la qualité de ces réserves.

De ce point de vue, il conviendrait maintenant de mettre en oeuvre des instantanés dans des régions où l'exploitation des ressources karstiques est envisagée sur une grande échelle, par exemple sur les Monts de Tlemcen en

Algérie où de vastes programmes de forage sont en cours (COLLIGNON 1986) ou bien encore sur des secteurs dont la globalité des possibilités aquifères n'a pas été étudiée (par exemple la Provence du Rhône à la frontière italienne, les Alpes du Sud, le Languedoc méditerranéen ou encore les Causses dans leur ensemble).

XIV.4. RESULTATS OBTENUS DANS LE JURA ET LE SUD-EST DE LA FRANCE

Malgré la difficulté d'obtenir des périodes non influencées sur un grand nombre de systèmes, particulièrement sous les climats montagnards, les instantanés physico-chimiques et isotopiques permettent une approche fructueuse du fonctionnement des aquifères karstiques.

Les campagnes de prélèvements synchrones (ou instantanés), appliquées au Jura et au Sud-Est de la France, ont permis, moyennant une réflexion critique sur leur validité, de mettre en évidence ou de confirmer de nombreux résultats sur le fonctionnement des systèmes.

Dans le Jura, le fonctionnement hydrocinématique a été abordé par l'atténuation de la marque thermique et isotopique de l'entrée, qui permet de préciser l'importance des mélanges avec l'eau des réserves.

Dans la plupart des cas, la température de l'eau des émergences est mieux corrélée avec l'altitude de la source, et la teneur relative en oxygène 18 avec l'altitude moyenne estimée de l'impluvium. Le traçage combiné température-oxygène 18 autorise la détermination de l'altitude moyenne des aires de recharge, ainsi que celle des réserves permanentes.

Le dosage du tritium favorise la distinction entre des systèmes restituant à l'étiage des eaux à teneur voisine de celle de la moyenne pondérée des précipitations (aquifères à temps de renouvellement rapide, voisin de l'année) et des systèmes restituant à l'étiage des eaux à teneur nettement supérieure, à temps de renouvellement pluriannuel.

Cette distinction isotopique est exactement calquée sur les deux domaines structuraux jurassiens : Haute-Chaine à forts gradients, à possibilités de stockage géométriquement restreintes, où les circulations préférentielles convergent, et plateaux à faibles gradients, à possibilités de piégeage importantes dans des structures à grand rayon de courbure, où les circulations mises en évidence par traçage diffluent et s'anastomosent.

Dans le Sud-Est, le temps de renouvellement des réserves peu sollicitées (l'étiage 1981 a une fréquence de retour pluridécennale) permet de distinguer des systèmes à temps rapide (les plus riches en tritium) et des systèmes à temps moyen de plusieurs dizaines d'années très peu chargés en tritium.

La restriction de la zone prospectée à une sous-région à conditions monotones a été tentée en Franche-Comté :

Dans le Haut-Doubs, où le contexte structural et lithologique est assez homogène, la variabilité aléatoire des phénomènes est grande devant la variabilité structurée (gradient), il s'ensuit une difficulté d'étude locale.

En Haute Saône, où la structure est peu contrastée, la lithologie est en revanche variée : sa marque prédomine sur celle du fonctionnement hydrocinématique : la prospection par instantanés y révèle surtout des particularités géologiques.

Dans le Sud-Est de la France, la variété des contextes lithologiques, structuraux et climatiques influence fortement les réponses physico-chimiques au cours des campagnes synchrones.

On met ainsi en évidence le rôle de certains faciès particuliers dans les systèmes, par exemple le Trias évaporitique ou le Jurassique dolomitique.

Comme dans le suivi diachronique du Pont de Gys, la marque du Trias occulte le fonctionnement karstique des systèmes.

En outre, certains ions et la température attestent de circulations profondes par les fractures actives (Languedoc méditerranéen) ou les plans de chevauchement (basse Provence).

Certaines émergences subissant ces influences profondes ont en outre des pressions partielles de CO_2 élevées.

Aux émergences non affectées par de tels apports, on explicite le rôle fondamental joué par les phénomènes de surface : la zone non saturée et son épikarst, soumis à l'intense évapotranspiration caractérisant le climat méditerranéen, concentrent les traceurs à origine météorique au point que la zone noyée alimentée par cette infiltration soit marquée par ce phénomène.

La matrice capacitive subit donc l'influence des phénomènes affectant l'aquifère épikarstique qui l'alimente.

Cette concentration est bien mise en évidence sur les teneurs en ion chlorure, auquel le système carbonaté est transparent, on peut ainsi reconstituer avec cet ion l'altitude moyenne des aires de recharge.

Une telle utilisation est illusoire dans le Jura où l'origine anthropique des chlorures prime sur leur origine météorique, et où l'évapotranspiration potentielle n'excède pas la réelle.

Dans le Jura, les traceurs de l'équilibre calco-carbonique révèlent même en tarissement des potentialités agressives pour de nombreuses sources ; la pCO_2 , comme l'oxygène 18 et la température confirme la présence d'eaux d'infiltration dans les campagnes de basses eaux d'hiver qu'on doit considérer comme de la décrue et non comme du tarissement.

L'étude des traceurs anthropiques (Na, Cl, N, K) permet de dresser un "état de santé" des réserves noyées des karsts jurassiens.

Elle devrait permettre la mise sur pied d'un réseau de surveillance de l'évolution de l'état des aquifères à l'échelle pluriannuelle.

D'ores et déjà, on peut constater, malgré un état de contamination encore faible, une atteinte inégale des systèmes, en relation avec la densité de population et l'activité humaine : réseau routier, agriculture, rejets d'eaux résiduaires.

Les plateaux et le Jura suisse sont plus atteints que le versant français de la Haute-Chaîne encore en régime naturel.

Dans le Jura, les analyses statistiques bi ou multidimensionnelles ont testé la validité de chacun des instantanés par rapport aux phénomènes étudiés.

Elles ont opéré une classification des systèmes fondée, comme celle issue du tritium, sur le temps de séjour donc sur l'existence de réserves, mais de plus sur l'atteinte anthropique dont fait l'objet l'aquifère.

On peut ainsi distinguer des systèmes à renouvellement rapide, peu affectés par la pollution et des systèmes à renouvellement plus lent plus ou moins affectés.

C H A P I T R E X V

C O N C L U S I O N S G E N E R A L E S

C O N C L U S I O N G E N E R A L E

XV.1. METHODOLOGIE

Les études hydrodynamiques menées sur les karsts ont permis de considérer les aquifères karstiques comme des systèmes, de préciser leur fonctionnement général et en particulier de mettre en évidence une hiérarchisation des écoulements. Elles montrent aussi la grande variabilité de ces systèmes suivant le degré de karstification et suivant la géométrie des massifs calcaires dans lesquels ils se situent. Mais, sauf rares exceptions, elles ne permettent pas d'individualiser spatialement et temporellement les masses d'eau en transit vers l'exutoire.

Le but de ce travail était de contribuer à leur analyse en utilisant les traceurs physico-chimiques et isotopiques comme mémoire du devenir des masses d'eau dans les systèmes. Dans ce but, l'étude de la qualité des eaux a été menée sur plusieurs émergences karstiques à des pas de temps différents (hebdomadaire et quotidien).

Les méthodes d'analyse de données mises en oeuvre maximisent l'interprétation : l'information physico-chimique traitée par les méthodes de régression linéaire bivariées (corrélations, comparaisons de pentes ...) et par les méthodes multidimensionnelles (analyses en composantes principales, analyse factorielle des correspondances, classification ascendante hiérarchique, analyse discriminante) apporte un grand nombre d'informations sur l'hydrocinématique des systèmes, informations qui ne contredisent pas les résultats de l'analyse des débits, de la distribution des fréquences, de l'analyse des séries chronologiques ...,

La comparaison de systèmes requiert toutefois la simultanée des cycles étudiés sur des systèmes différents.

Le pas de temps hebdomadaire à l'échelle d'un ou de plusieurs cycles, permet l'accès aux variations saisonnières et à leur reproductibilité inter-annuelle. L'étude de systèmes différents ne peut s'envisager que dans une région climatiquement homogène, au cours du même épisode. Les résultats obtenus corroborent, même sur des émergences aux variations chimiques de très courte durée, les résultats obtenus par d'autres auteurs à l'échelle de la crue. Tous les phénomènes peuvent être mis en évidence au pas hebdomadaire, en particulier l'histoire des eaux d'infiltration (retard et reconcentration dans l'épikarst...) et des eaux de la réserve (recharges chimiquement marquées...)

Le pas de temps quotidien à l'échelle d'un étiage a permis de détailler le mécanisme du tarissement en distinguant la part des phénomènes hydrocinématiques de celle des incertitudes analytiques. L'existence d'une fluctuation aléatoire autour d'un centre de gravité (en analyse multidimensionnelle) permet d'estimer la représentativité d'un échantillon d'étiage. Grâce au pas quotidien, l'infiltration immédiate, à faible débit et très marquée par les phénomènes de surface ainsi que son impact sur la qualité des eaux de réserve sont bien mis en évidence. On peut ainsi distinguer le tarissement s.s. des étiages chimiquement influencés.

Cette représentativité des échantillons d'étiage a démontré la validité du processus d'étude des systèmes par instantanés physico-chimiques et isotopiques, à des périodes hydrométéorologiques judicieusement choisies.

L'interprétation de la campagne instantanée autorise le choix de systèmes-types à étudier par suivis intensifs. Il y a donc interaction entre les deux types d'approche.

Les instantanés, particulièrement sous des régions climatiquement hétérogènes, doivent être répétés afin d'en vérifier la représentativité.

La sélection de systèmes dans les campagnes synchrones permet la prévision de ressources de remplacement qu'il convient d'étudier postérieurement par suivi intensif, afin d'en apprécier la vulnérabilité.

Les instantanés ont permis de dresser un "état de santé" des réserves des aquifères karstiques jurassiens et de déterminer le temps de séjour moyen de l'eau dans les réserves. Une détermination de l'altitude moyenne des aires de recharge et des réserves permanentes a pu être tentée, elle a confirmé l'acquis des essais de traçage artificiel.

Il convient donc à présent de mettre en oeuvre cette méthodologie dans des régions karstiques à l'hydrogéologie mal connue ou connue par des travaux non synchrones.

L'analyse des données synchroniques et diachroniques met en évidence les mêmes phénomènes à l'échelle spatiale qu'à l'échelle temporelle : la province hydrogéologique jurassienne prospectée par plusieurs instantanés permet de noter les mêmes comportements qu'une source karstique isolée au cours de son cycle.

XV.2. RESULTATS

Les résultats obtenus sur le fonctionnement hydrocinématique des systèmes concernent autant le tarissement que l'infiltration.

. Le tarissement apparaît d'un point de vue hydrochimique comme une phase de stabilisation des indicateurs physico-chimiques, qu'ils soient internes ou externes.

Statistiquement, la stabilisation se traduit par une absence généralisée de corrélations entre les teneurs des éléments ; avec les analyses multidimensionnelles, la phase de tarissement se marque par de faibles oscillations aléatoires au voisinage du centre de gravité du sous-nuage de points. Ce cheminement non structuré révèle aussi une stabilisation générale, aux erreurs analytiques près.

Ce comportement implique d'une part une homogénéisation statistique de la chimie de l'exhaure des différents systèmes "annexes", d'autre part la relative homogénéité de l'eau de chacun de ces sous-systèmes, aucune marque très spécifique n'apparaissant pendant le tarissement.

Cette phase hydrocinématique, pour laquelle les méthodes hydrodynamiques et physico-chimiques donnent une date commune de commencement, se termine à des instants différents selon les méthodes.

Pour l'hydrodynamicien, l'augmentation du débit est le critère déterminant (transfert de pression), alors que pour le physico-chimiste ce sont les modifications de la composition chimique qui signent le transit effectif des eaux d'infiltration.

. On peut ainsi différencier plusieurs processus d'infiltration

- Pendant la fin de la récession d'étiage, les faibles précipitations, principalement sous climat à important déficit hydrique, peuvent

remobiliser des eaux des milieux superficiels (sol, épikarst et zone non saturée) et les amener à l'exutoire sans changement du débit. Les pics de teneur observés à l'émergence attestent un transit d'eaux très minéralisées (reconcentrées en surface par l'évapotranspiration). Ce transit, s'il ne marque pas l'hydrogramme, peut cependant recharger pro-parte les milieux capacitifs du système (zone non saturée, blocs capacitifs noyés).

- En revanche, la contribution de l'infiltration rapide au débit de l'émergence, qui dilue les teneurs de l'étiage, n'intervient pas avec la prime montée du débit, elle ne débute souvent qu'au pic de l'hydrogramme, le maximum de cette composante n'intervenant qu'en décrue hydrodynamique. L'hydrochimie met donc en évidence un décalage entre les transferts et les transits dans le système.

- L'infiltration lente, plus minéralisée, relaie l'infiltration rapide.

Mis à part le décalage, les décrues de l'infiltration étudiées par la méthode hydrodynamique (soustraction de l'ajustement semi-logarithmique du débit de la réserve noyée mesuré) et reconstituées par la méthode physico-chimique ont des formes tout à fait comparables, exploitables pour une classification des systèmes fondés sur l'aptitude du système au drainage.

Les crues d'été sous climat méditerranéen apportent, avec des précipitations à faible rendement, une recharge très typée au point de vue chimique, particulièrement en éléments extérieurs aux systèmes.

Cette recharge détériore la marque chimique caractéristique du tarissement en mélangeant cette infiltration minéralisée aux eaux déjà présentes dans le système en tarissement.

Après ces épisodes, la chimie de la récession est distincte de celle du tarissement s.s.

Le fonctionnement hydrocinématique des systèmes peut donc être assimilé à celui de deux mémoires interactives.

Les réserves permanentes sont le siège d'une mémoire "morte" : le système est capable de "se rappeler" un fonctionnement pluriannuel. De plus, il dispose d'une mémoire "vive" stockant des informations à plus haute fréquence, telles que les recharges marquées. Le système mémorise alors l'épisode, restitue le contenu de sa mémoire qui est réinitialisée lors de la recharge suivante. C'est l'importance relative des deux types de mémoire qui conditionne la classification des systèmes : deux cas extrêmes peuvent alors être envisagés :

- le système n'ayant pas de mémoire morte qui restitue avec un minimum de déformations les fluctuations de l'entrée ;

- le système n'ayant pas de mémoire vive qui filtre totalement les fluctuations de l'entrée.

Ni le système-piston (1er cas), ni le système mélangeur (2ème cas) ne peuvent être considérés comme des systèmes karstiques, car aucun des deux ne fait intervenir une hiérarchisation des perméabilités.

Entre ces deux extrêmes, on rencontre les systèmes karstiques classiques : les uns, à mémoire morte importante ont des "lignes de base" hydrochimiques linéaires : les teneurs constantes en tarissement sont diluées au cours des crues. Les autres, à mémoire vive importante, ont des teneurs qui fluctuent autour de porteuses sinusoidales annuelles.

L'infiltration parvient donc à modifier la chimie de la réserve à l'échelle du cycle, cette réserve est donc limitée.

Les réserves, qui constituent la mémoire des systèmes ne doivent toute-

fois pas être totalement imputés à la zone noyée, les milieux de stockage pouvant être l'épikarst, le sol ou des terrains poreux.

En outre, le régime des précipitations joue un rôle important dans la forme de la porteuse des teneurs, la dégradation de la teneur de la réserve étant liée à un afflux d'eau d'infiltration important devant le volume de la réserve.

Ces types de comportement, révélés par les suivis et les instantanés sur les aquifères karstiques étudiés, permettent d'envisager les modalités de protection du milieu particulièrement vulnérable qu'est le karst. En effet, un système à affinités "piston" est susceptible de véhiculer et éliminer rapidement une pollution accidentelle de la surface vers l'émergence, mais avec peu de dilution. En revanche un système à affinités "mélangeur" peut "filtrer" totalement une telle pollution, mettant en péril la qualité de l'ensemble des milieux capacitifs si le volume des réserves est faible devant celui de la masse polluante.

On schématisera le fonctionnement du système en considérant l'interaction de deux milieux aux caractéristiques hydrodynamiques extrêmes, les blocs capacitifs et les drains. Les précipitations alimentent d'une part le ruissellement de surface, d'autre part les réservoirs non saturés en permanence que sont le sol, les milieux poreux superficiels, l'épikarst. Dans ces milieux, l'eau chasse celle qui y est éventuellement présente. Dans le cas où une part importante de l'eau de l'averse précédente a été évapotranspirée, l'eau fraîchement tombée lessive les ions reconcentrés par l'évapotranspiration.

Dans cette zone capacitive superficielle, des écoulements à forte composante horizontale permettent aux eaux d'infiltration de rejoindre les drains de la zone non saturée (et les eaux infiltrées depuis les pertes de cours d'eau).

Les faibles débits des lessivats des milieux superficiels peuvent rapidement atteindre l'émergence grâce aux drains. Des augmentations de teneur des ions à origine météorique signalent le transit de cette infiltration "immédiate" à la sortie du système, sans que le débit varie de manière importante.

L'infiltration rapide empruntant les chenaux transmissifs du système (dans la zone non saturée, puis dans la zone noyée) chasse devant elle les eaux qui la précèdent (infiltration immédiate ou eau de réserve présente dans les drains) son passage effectif à l'exutoire est généralement révélé par une dilution.

Une fois cette impulsion passée, les eaux d'infiltration retardée par la partie capacitive des milieux superficiels la relaient. La disparition de cette composante fait passer l'émergence de la décrue au tarissement.

On peut donc bien distinguer le fonctionnement hydrodynamique du système (transferts) de son fonctionnement hydrocinématique (transits) : dans le premier cas, on appelle crue une montée de l'hydrogramme, décrue la descente consécutive, et tarissement la phase d'ajustement linéaire ou semi-logarithmique des débits en fonction du temps.

. Dans le second cas, on appelle crue une période à la chimie influencée par les épisodes hydrométéorologiques (contribution mesurable d'une composante d'infiltration), et tarissement, une période à la chimie stabilisée.

Une crue (hydrodynamique) peut donc ne pas correspondre, ou être temporairement décalée par rapport à un transit effectif (et inversement). Un étiage peut inclure des épisodes d'infiltration immédiate invisibles sur l'hydrogramme, ainsi que des épisodes de décrue ayant des propriétés de tarissements au sens hydrodynamique.

La physico-chimie, grâce à son aspect qualitatif, est donc un complément indispensable à l'hydrodynamique pour l'étude du fonctionnement des systèmes karstiques.

R E F E R E N C E S

B I B L I O G R A P H I Q U E S



R E F E R E N C E S B I B L I O G R A P H I Q U E S

- American Public Health Association.—American Water Works Association.—Water Pollution Control Federation (1980).—Standard Methods for the examination of water and wastewater.—15th Edition, 1134 p.
- AMINOT A. (1974).—Géochimie des eaux d'aquifères karstiques - II les analyses chimiques en hydrogéologie karstique.—*Ann. Spéléol.*, 1974, 29,4, 461-483, 10 fig.
- AMINOT A. (1975).—Géochimie des eaux d'aquifères karstiques - 4 : le pH : Aspect théorique, mesure et interprétation géochimique.—*Ann. Spéléol.*, 1975, 30, 1, 7-20, 7 fig., 4 tab.
- ANDRIEUX C. (1976).—Le système karstique du Baget 2.—Géothermie des eaux à l'exutoire principal selon les cycles hydrologiques 1974 et 1975.—*Ann. Scient. Univ. Besançon géologie*, 2, (25), 1-26, 5 fig., 7 tab.
- AUBERT D., PETCH M., JEMELIN L. (1970).—Expérience de coloration de la Dôle (Jura vaudois).—*Bull. Labo. Géol., Minéral., Géophys. et du Musée Géol. de l'Univ. de Lausanne n° 185*, et *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 333, (70), 8 p., 3 fig.
- AUBERT J. (1972).—Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région d'Orgelet (Jura).—Thèse 3e cycle U. de Franche Comté - Besançon, 162 p.
- BACHELIER G. (1968).—Contribution à l'étude de la minéralisation du carbone des sols.—*Mém. ORSTOM* 30, Paris, 145 p.
- BACK W. et HANSHAW B.B. (1970).—Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan.—*Journal of Hydrology* 10 (1970), 330-368, 15 fig., Amsterdam.
- BAKALOWICZ M. (1974).—Géochimie des eaux d'aquifères karstiques 1.—Relation entre minéralisation et conductivité.—*Ann. Spéléol.* 29 (2), 167-173, 2 fig., 3 tab.
- BAKALOWICZ M. (1975).—Géochimie des eaux karstiques et karstification.—*Ann. Spéléol.*, 1975, 30, 4, 581-589, 1 fig., 5 tab.
- BAKALOWICZ M. (1976).—Géochimie des eaux karstiques.—Une méthode d'étude de l'organisation des écoulements.—2e Coll. Hydrol. Pays Calc.—*Ann. Sci. Univ. Besançon - Géologie* (3), 25, 49-58, 5 fig., 1 tab.
- BAKALOWICZ M. (1977).—Etude du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés par une méthode hydrogéochimique nouvelle.—*C.R. Acad. Sc. Paris*, D, 284, 2463-2466, 3 fig.
- BAKALOWICZ M. (1979).—Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification.—Thèse Paris VI, 269 p.
- BAKALOWICZ M. (1980).—Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO₂-H₂O carbonate.—Coll. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates - Bordeaux 11-23, 2 fig., 5 tab.
- BAKALOWICZ M. (1982).—La genèse de l'aquifère karstique vue par un géochimiste.—Reunion monografica sobre el karst-Larra, 159-174.
- BAKALOWICZ M. et AMINOT A. (1974).—Géochimie des eaux d'aquifères karstiques - 3 : Premiers résultats obtenus sur le système karstique du Baget durant le cycle hydrologique 1973.—*Ann. Spéléol.*, 1974, 29, 4, 484-493, 6 fig.
- BAKALOWICZ M., ANDRIEUX C. (1974).—Le système karstique du Baget (Ariège) les éléments du climat.—*Ann. Spéléol.*, 1974, 29, 3, p. 267-282, 8 fig., 21 tab.
- BAKALOWICZ M., BLAVOUX B., MANGIN A. (1974).—Apport du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique - Teneur en oxygène 18 de trois systèmes des Pyrénées, France.—*Journal of Hydrology*, 23, 141-158, 7 fig., 6 tab.
- BAKALOWICZ M., MANGIN A. (1980).—L'aquifère karstique.—Sa définition, ses caractéristiques et son identification.—*Mém. H. Sér. Soc. Géol. France*, 11, 71-79, 9 fig.
- BARBAUD J.Y. (1983).—Etude chimique et isotopique des aquifères du Nord de la chaîne des Puys.—Temps de transit et vulnérabilité des systèmes de Volvic et d'Argnat.—Thèse 3e cycle Avignon, 209 p., 113 fig., 39 tab.
- BARNES B.S. (1940).—Discussion of analysis of Runoff Characteristics by O.H. MEYER.—*Trans. Am. Soc. Civil Engrs.*, 105, 104-106.
- BERGERAT F. (1985).—Déformations cassantes et champs de contraintes tertiaires dans la plateforme européenne.—Thèse Etat Paris VI, 315 p., 233 fig., 15 pl.
- BLAVOUX B. (1978).—Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée.—Thèse Sci. nat., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, 332 p.
- BLAVOUX B. (1980).—L'eau dans le karst : les différentes composantes de l'écoulement et leur participation au débit à l'exutoire en crue et en étiage.—1er Coll. nat. sur la Protection des Eaux Souterraines Karst.—Besançon, 59-81, 9 fig.

- BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVE P., MUDRY J. (1979).—Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura.—*Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, 21 (4), 295-306, 10 fig., 4 tab.
- BLAVOUX B., CHAUVE P., CLAUDON G., METTETAL J.P., MUDRY J., PASQUIER C. (1976).—Premiers résultats d'expérience de traçage isotopique par l'oxygène 18 dans le karst du premier plateau jurassien au Sud et à l'Est de Besançon.—2e Coll. Hydrol. Pays Calc. et *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géologie*, (3), 25, 71-77, 3 fig., 1 tab.
- BLAVOUX B., CHAUVE P., MUDRY J., OLIVE P. (1982).—Essai d'évaluation du temps de renouvellement des réserves karstiques du Jura à partir de l'évolution des teneurs d'étiage en tritium.—3e Coll. Hydro. Pays Calc. Neuchâtel (Suisse).—*Ann. Sci. Univ. Besançon, Géol. Mém.* 1, 133-142, 5 fig. 4 tab.
- BLAVOUX B., MUDRY J. (1983).—Séparation des composantes de l'écoulement d'un exutoire karstique à l'aide des méthodes physico-chimiques.—*Hydrogéologie - géol. de l'Ing.* 4, 269-278, 8 fig., 1 tab.
- BLAVOUX B., MUDRY J. (1984).—Apport de l'hydrochimie à la compréhension hydrocinématique des aquifères karstiques périméditerranéens.—Coll. "L'eau, clef du développement au Maghreb" Wahran, 15 p., 10 fig., 2 tab.
- BLAVOUX B., MUDRY J. (1986).—Influence des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique : le rôle du sol et de l'épikarst dans la concentration des chlorures.—*Bull. Soc. Géol. France*, 4-1986, 141-148, 5 fig., 3 tab.
- BOTTON R. (1984).—Etude de certaines modalités du fonctionnement de l'aquifère karstique (zone d'infiltration et zone saturée) sur deux champs de forages nord-montpellierains.—Thèse 3e cycle Sciences de l'eau USTL-Montpellier II, 350 p., 124 fig.
- BURGER A. (1959).—Hydrogéologie du bassin de l'Areuse.—*Bull. Soc. Neuchâtel. de Géographie* NS, LII, n° 11, 5-304, 29 fig., 6 pl., 53 tab.
- BURGER A. (1979).—Recherche de critères pour la protection des eaux souterraines karstiques contre la pollution.—*Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel*, 3, 115-154, 9 fig., 3 tab.
- BURGER A. (1983).—Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura.—*Gaz - eaux - eaux usées*, 1983, 9, 533-583.
- BURGER A., MARCE A., MATHEY B., OLIVE P. (1971).—Tritium et Oxygène 18 dans les bassins de l'Areuse et de la Senière (Jura Neuchâtelois-Suisse).—Coll. Hydrol. Pays Calc. *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géologie*, (3), 15, 79-87, 4 fig.
- CAUCHIE Ph. (1979).—Une séquence altitudinale de sols sur calcaire dans le Chablais—participation des sols à la minéralisation des eaux du massif karstique de la Pointe d'Ireuse.—D.E.A. fédéral Pédologie Paris VI-VII, INA, ORSTOM 30 p., 7 fig.
- CHAUVE P. (1955).—Contribution à l'étude hydrogéologique de la région du Mont d'Or.—*Ann. Sci. Univ. Besançon*, (2), *Géologie*, 3, 41-44, 1 fig.
- CHAUVE P. (1971).—Rôle des failles dans les circulations souterraines du Jura.—Exemples et Applications.—Coll. Hydro. en Pays Calc., *Ann. Sci. Univ. Besançon - Géologie* (3), 15, 65-70, 3 fig.
- CHAUVE P., BLAVOUX B., MIGNOT C., MUDRY J. (1982).—Les éléments chimiques extérieurs au système karstique indicateurs de la qualité des réserves des calcaires jurassiens.—3e Coll. Hydrol. Pays Calc. (Neuchâtel) et *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géologie mémoires* 1, 23-38, 8 fig., 7 tab.
- CHAUVE P., DREYFUSS M. (1971).—Excursion hydrogéologique au marais de Saône et à la source du Lison.—Coll. Hydrol. Pays Calc. et *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géologie* 3e série 15, 265-270, 7 fig.
- CHAUVE P., ENAY R., CAMPY M., CONTINI D., LAUBSCHER H.P., MANGOLD C., MARTIN J., MUDRY J. (1980).—Excursion O24 A. le Jura franco-suisse.—26e Cong. Géol. Int. *Ann. Sci. Univ. Besançon (Géol.)* A, 1, 81-114, 38 fig.
- CHAUVE P., ENAY R., FLUCK P., SITTNER C. (1980).—L'Est de la France (Vosges, Fossé Rhéna, Bresse, Jura).—26 e Cong. Géol. Internat. *Ann. Sci. Univ. Besançon (Géol.)* 4, 1, 3-80, 42 fig., 4 tab.
- CHAUVE P., GAUDRON G., GODARD J.M., VATHAIRE J.C. (1976).—Exploration en grand des nappes souterraines profondes en pays calcaire.—2e Coll. Hydrol. Pays Calc. et *Ann. Sci. Univ. Besançon Géol.* 3e sci., 25, 157-166.
- CHAUVE P., MUDRY J. (1980).—Première reconnaissance des sources de la haute vallée du Doubs.—26e Cong. Géol. Int., *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géol.* (4), 2, 81-90, 10 fig. 3 tab.
- CHAUVE P., PASQUIER C. (1976).—Le bassin de Champlive.—2e Coll. Hydrol. Pays Calc. et *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géologie* (3), 25, 167-178, 7 fig., 1 tab.
- CHAUVE P., MUDRY J., ROSENTHAL P., TISSOT G., TRESSE P. (1986).—Rôle des abaissements d'axe dans les circulations karstiques du Jura.—*Bull. Soc. Géol. France*, 1986, 8, II, n°2, 135-142, 10 fig.

- CHAUVE P., PEGUENET J., TISSOT G., TRESSE P. (1979).—Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche-Comté.—S.R.A.E.—Labo. Géol. Struc. et Appl. Atlas, 10 p., 10 fig. ; annexes.
- COLLIGNON B. (1986).—Hydrogéologie Appliquée des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen (Algérie).—t1 : Hydrogéologie régionale.—t2 : Les forages hydrauliques dans les roches karstifiées.—Thèse nouv. rég. Avignon (Hydrogéol.), 282 p., 149 fig., 13 annexes.
- COLLIN J.J., DREYFUSS M., LIENHARDT G. (1965).—Connaissance de l'hydrologie du premier plateau du Jura.—Rapport n° 2 B.R.G.M. D.S.G.R. 65 à 73.
- CONTINI D. (1972).—Le Jurassique en Franche-Comté.—*Ann. Sci. Univ. Besançon (Géologie)* 3e s., 17, 3-18, 6 fig.
- CORBETT D.M. and others (1943).—Stream gauging procedure.—*U.S. Geol. Survey Water Supply Paper*, 888, 245 p.
- CORROY G., GOUVERNET C., CHOUTEAU J., SIVIRINE A., GILET P., PICARD J. (1958).—La Fontaine de Vaucluse.—*Bull. Inst. Océanographique* 1131, Monaco, 19-35, 3 fig., 1 pl. h. t.
- COVA R. et DUROZOY G. (1980).—Carte hydrogéologique à 1/200 000 du département du Var et notice explicative D.D.A. Var - B.R.G.M.
- CROUZET E., HUBERT P., OLIVE P., SIMERTZ E., MARCE A. (1970).—Le tritium dans les mesures d'hydrologie de surface. Détermination expérimentale du coefficient de ruissellement.—*J. Hydrol.*, 11, 217-229.
- DIDON J.F., JACQUIN D. (1979).—Le bassin de la Vieille Folle près de Déservillers (Doubs).—Etude géologique, hydrologique et géochimique.—D.E.S.S. "Qualité des Eaux" opt. Hydrologie Besançon.
- DREYFUSS M., LIENHARDT G., MAILLARY J.C. (1967).—Connaissance de l'hydrogéologie du premier plateau du Jura.—Expérience de coloration à Montrond (Jura).—*Bull B.R.G.M. D.S.G.R.*, 67-68.
- DROGUE C. (1963).—Sur l'utilisation des ions naturels en solutions comme traceurs, dans les aquifères calcaires. A propos d'un exemple des karsts sous cévenols.—*Ann. Spéléol.* XVIII, 4, 405-408, 1 fig., 2 tab.
- DROGUE C. (1963).—Essai de détermination des composantes de l'écoulement des sources karstiques. Evaluation de la capacité de rétention par chenaux et fissures.—*Ann. Spéléol.* XVIII, 4, 415-420, 2 fig., 1 tab.
- DROGUE C. (1969).—Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques, d'après l'exemple de quelques karsts périméditerranéens.—Thèse Doct. Sc. Nat. Univ. Montpellier, 462 p.
- DROGUE C. (1971).—De l'eau dans les calcaires.—*Sciences, Progrès et Découvertes*, (Dunod, Paris) 3433, 39-46.
- DROGUE C. (1980).—Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonatés fissurés. Application à l'interprétation de certains aspects du fonctionnement hydrogéologique.—*Mém. hors série Soc. Géol. France* 11, 101-108.
- DROGUE C., LATY A.M. et PALOC H. (1983).—Les eaux souterraines des karsts méditerranéens. Exemple de la région pyrénéo-provençale (France méridionale).—*Hydrogéologie - Géologie de l'Ingénieur*, 4, 1983, 293-311, 6 fig., 3 tab.
- EBERENTZ P. (1975).—Apport des méthodes isotopiques à la connaissance de l'aquifère karstique.—Thèse 3e cycle Univ. Pierre et Marie Curie (Paris IV - Moulis) 70 p.
- EMMEL R.H., SOTERA J.J., STUX R.L. (1977).—Atomic Absorption Methods manual vol 1 : Standard conditions for flame operations.—Instrumentation Laboratory, Wilmington M.A. (U.S.A.).
- ERIKSSON E. (1962).—Radioactivity in Hydrology in : H.I. ISRAEL et A. KREBS (Editors).—*Nuclear Radiations in Geophysics*, 42 Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg, 47-60.
- EVIN J., FLANDRIN J., MARGRITA R. et PALOC H. (1968).—Contribution des analyses chimiques, des colorations et des analyses isotopiques à l'étude des circulations souterraines en réservoirs karstiques - Exemple fourni par la Fontaine de Vaucluse et le sondage de Salignan (France).—*AIH*, Istanbul (1967) (8), 298-308, 2 fig., 7 tab.
- FABRE G. (1980).—Recherches hydrogéomorphologiques sur les karsts du Languedoc oriental.—Thèse doctorat d'état, Géographie, Aix-en-Provence, *Mém. Ass. Fr. de karstologie*, n°2, 470 p.
- FETH J.H., ROBERSON C.E., POLZER W.L. (1964).—Sources of mineral constituents in water from granitic rocks. Sierra Nevada, California, Nevada.—*U.S. Geol. Survey Water - Supply Paper* 1 535-I, 70 p.
- FIGUERES G. (1978).—Contribution à l'étude géochimique du Fer et du Manganèse dans les eaux de surface (rivières, lacs, estuaires).—Thèse 3e cycle Sciences de l'eau, Paris VI 148 p., 46 fig., 31 tab.
- FLANDRIN J. (1969).—Evaluation des réserves dans les karsts.—Compte rendu de fin de contrat D.G.R.S.T. 11 p.
- FLANDRIN J. et PALOC H. (1969).—Contribution à la connaissance du réservoir aquifère de la Fontaine de Vaucluse. Résultats des études effectuées en 1967-68.—Journée H. SCHOELLER Bordeaux, 611-643, 10 pl., 3 tab.
- FOLTETE J. (1968).—Etude hydrogéologique du Plateau d'Amancey (Doubs).—Thèse 3e cycle, Besançon.

- FONTES J.C. (1976).—Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. —Thèse état Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI) 208 p., 65 fig.
- FOURNIER E. (1914).—Le percement du Mont d'Or, ses conséquences économiques.—*Franche-Comté & Paris*, oct.-nov. 1913, 15 p., 2 fig.
- FOURNIER E. (1917).—Rapport sur les perturbations apportées dans le régime du Bief Rouge par les travaux de percement du Mont d'Or.—Besançon, Imp. Jacques et Demantrond, 14 p., 4 pl. H. T.
- FRESLON M. (1980).—Transferts d'eau et de solutés dans un loess sous climat méditerranéen. Traçage naturel par les isotopes.—Thèse 3e cycle Géologie dynamique Science de l'eau Paris VI-Avignon, 223 p.
- FRITZ P., CHERRY J.A., MEYER K.U., SKLASH M. (1976).—Storm runoff analysis using environmental isotopes and major ions. Interpretation of Environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology (Proceeding meeting Vienna, 1975).—I.A.E.A. Vienna.
- GAMS I. (1966).—Faktorji in dinamika korozije na karbonatrih kameninah slov. dënarskega in alpskega krasa (en serbo croate).—*Geografski vestnik* (Ljubjana) (38), résumé en anglais 64-68, 5 fig.
- GARRELS R.M., CHRIST C.L. (1967).—Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. —Gauthier-Villars Paris, monographies de Chimie minérale, 323 p.
- GIBERT J. (1986).—Ecologie d'un système karstique jurassien. Hydrogéologie, dérive animale, transit de matières, dynamique de la population de *Niphargus* (Crustacé amphipode). —Thèse état Lyon I *Mém. de Biospéologie* (Moulis) XIII (40), 379 p., 130 fig., 44 tab., 27 annexes.
- GOUISSET Y. (1981).—Le karst superficiel - Genèse, hydrodynamique et caractéristiques hydrauliques. Application à un karst du Languedoc.—Thèse 3e cycle USTL Montpellier.
- GOVERNET C., GUIEU G., ROUSSET C. (1971).—Provence.—Guide géologiques régionaux Masson Paris, 229 p., 120 fig.
- GRILLOT J.C., BOUSQUET J.C., PHILIP H. et DAZY J. (1983).—Hydrothermalisme carbogazeux, radioactivité et sismotectonique : exemple du Languedoc-Roussillon (France).—*Hydrogéol. géol. de Ing.* 4, 313-320, 3 fig., A tab. 1 carte H. T.
- GUYOT J.L. (1983).—La zone non-saturée dans l'aquifère karstique. Analyse des écoulements hypodermiques sur périmètre expérimental. Rôle de la zone non-saturée dans la différenciation des régimes de deux sources karstiques (Monts de Pardailhan-Montagne noire).—Thèse 3e cycle Science de l'Eau Montpellier, 139 p., 76 fig.
- HEM J.D. (1970).—Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters. —*U.S. Geol. Surv. Water Supply*, 1473, 269 p., 40 fig., 26 tab.
- HEYDARPOUR D. (1974).—Estimation de la composante souterraine de l'hydrogramme, par les méthodes physico-chimiques.—Thèse 3e cycle Univ. Paris VI, 198 p., 137 fig.
- HUBERT P., MARCE A., OLIVE P. et SIWERTZ E. (1970).—Etude par le Tritium de la dynamique des Eaux Souterraines.—*C.R. Acad. Sci. Paris*, 270, D, 908-911, 1 fig.
- International Atomic Energy Agency (1979).—Environmental isotope data n° 6 : world survey of isotope concentration in precipitation, *Tech. Rep. Ser.*, 192, I.A.E.A., Vienna.
- JEANBLANC A. et SCHNEIDER G. (1981).—Etude géologique et hydrogéologique du Risoux-Mont d'Or.—Thèse 3e cycle Géologie Appliquée Univ. Franche-Comté, 155 p., 111 fig., 104 tab., 34 annexes.
- JEANNIN D. (1970).—Contribution à l'étude géologique et hydrologique du marais de Saône (Doubs) en vue de son aménagement.—Thèse 3e cycle Besançon, 82 p.
- KIRALY L. (1969).—La notion d'"Unité hydrogéologique" dans le Jura (essai de définition). —Thèse Neuchâtel.
- KIRALY L. (1973).—Notice explicative de la carte hydrogéologique du Canton de Neuchâtel. —*Suppl. Bull. Soc. Neuchâtel Sci. Nat.*, 96, 1973, 16 p., 6 fig., 1 tab. et 1 carte H. T.
- KIRALY L. (1975).—Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques.—*Hydrogeology of karstic terrains* Int. Union of Geol. Sci., B, 3, 53-67.
- KIRALY L. (1978).—La notion d'unité hydrogéologique.—Essai de définition.—*Bull. Centre d'Hydrogéol. Univ. Neuchâtel* 2, 83-216, 30 fig.
- KIRALY L. et MULLER I. (1979).—Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst : effet sur la variation du chimisme des sources karstiques.—*Bull. Centre d'Hydrogéol. Neuchâtel* 3, 237-285, 9 fig.
- KULLMAN E. (1982).—Particularités du régime d'écoulement des eaux souterraines des karsts fortement développés.—3e Coll. Hydrol. Pays Calc. (Neuchâtel).—*Ann. Sci. Univ. Besançon*, Géol. mém. 1, 143-146, 5 fig.
- KUNKLE G.R. (1965).—Computation of groundwater discharge to streams during floods, or to individual reaches during base flow, by use of specific conductance.—*U.S. Geol. Surv. prof. paper* 525 D, pp. D 207-D 210, 1 fig.

- KUSAKABE M., WADA H., MATSUO S., HORIBE Y. (1970).—Oxygen and hydrogen isotope ratios of monthly collected waters from Nasudake volcanic area, *Japan Journ. Geophys. Research*, 75, 30, 5941-5951.
- LACAS J.C. (1975).—Introduction à la méthodologie d'étude et d'utilisation des champs hydrothermiques des aquifères karstiques.—Thèse 3e cycle USTL et CERCH mém. 10 (3) 1976.
- LANGMUIR D. (1965).—Stability of carbonates in the system $MgO-CO_2-H_2O$.—*Journal of Geology* 73, 730-754.
- LATY A.M. (1981).—Ressources en eau des karsts méditerranéens français - essai de synthèse.—Thèse 3e cycle Sciences de l'eau USTL 43 p., 44 p. annexes, cartes H.T.
- LEFEBVRE J. (1980).—Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles, 2e ed., 259 p., 70 fig., Masson (Paris).
- LEPILLER M. (1980).—La dissolution des carbonates dans un système aquifère très karstifié, à alimentation essentiellement météorique, conséquences pour l'estimation de la vitesse de karstification.—Coll. Cristallisation-déformation-dissolution des carbonates, Bordeaux, 295-306, 4 fig., 2 tab.
- LEPILLER M. (1980).—Contribution à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires.—Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute-Savoie, France).—Thèse 3e cycle Grenoble, 478 p.
- MAILLET E. (1905).—Essais d'hydraulique souterraine et fluviale.—Herrman, Paris, 218 p.
- MALLESSARD G. (1983).—Sur la présence de fer et de manganèse dans l'aquifère alluvial de la plaine d'Avignon (Vaucluse). Relations avec l'hydrochimie et l'hydrogéologie.—Thèse 3e cycle Géologie Appliquée, Avignon, 122 p., 46 fig., 3 tab., annexes, 3 pl. H.T.
- MALZIEU E. (1984).—Relations entre la fracturation et la karstification. Essai de mise en évidence dans les Monts de Vaucluse.—D.E.A. USTL 19 p., 12 fig.
- MANGIN A. (1970).—Le système karstique du Baget (Ariège). Note préliminaire.—*Ann. Spéléo.*, 25, 3, 561-580.
- MANGIN A. (1975).—Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques.—Thèse Dijon *Ann. Spéléo.*, 29, 285-332, 495-601 ; 30, 21-124.
- MANGIN A. (1981).—Probabilités et statistiques : leur emploi en Géologie.—Cours polycopié D.E.A. Toulouse, 141 p.
- MANGIN A. (1982).—L'approche systématique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques.—Reunion monografica sobre el karst Larra (Esoaña), 141-157, 2 fig.
- MARGRITA R., EVIN J., FLANDRIN J. et PALOC H. (1970).—Contribution des mesures isotopiques à l'étude de la Fontaine de Vaucluse.—IAEA (Vienna) SM 129/20, 333-348, 6 fig.
- MARJOLET G. et SALADO J. (1975).—Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la source du Lez (Hérault) II.—Etude du chimisme des eaux de la source du Lez et de son bassin.—CERGH, 9, 2, 101 p.
- MARTEL E.A. (1894).—Les abimes, Paris - Librairie Charles DELAGRAVE.
- MARTEL E.A. (1921).—Nouveau traité des eaux souterraines, Paris - Librairie Octave Doin.
- MARTINET J. (1982).—Quelques données statistiques sur la température et la pluviométrie du Nord-Ouest de la Nièvre en 1981.—Rapport Cent. Rech. Géophys. Garchy CRG/HYD/1982/04.
- MBA M. (1971).—Contribution à l'étude des variations des teneurs en chlore des eaux souterraines de quelques karsts de la région languedocienne.—Thèse 3e cycle USTL Montpellier II.
- MEYBECK M. (1984).—Les fleuves et le cycle géochimique des éléments.—Thèse état Paris VI-Normale sup., 478 p.
- MICHELOT C., MUDRY J. (1985).—Les exutoires de l'aquifère karstique de la Fontaine de Vaucluse.—*Karstologia*, 6, 11-14, 5 fig.
- MISEREZ J.J. (1973).—Géochimie des eaux du karst jurassien (contribution physico-chimique à l'étude des altérations).—Thèse, Neuchâtel, 313 p., 60 fig., 54 tab.
- MOOK W.G., GROENVELD D.J., BROUWN A.E., VAN GANSWIJK A.J. (1974).—Analysis of a run-off hydrograph by means of natural ^{18}O in "Isotopes Techniques in Groundwater Hydrology" Proceed. Symp.—IAEA Vienna I, 145-155.
- MUDRY J. (1980).—Classification automatique des données d'une campagne de prélèvements simultanés d'étiage des émergences karstiques jurassiennes (émergences, paramètres physico-chimiques et isotopiques).—8e réün. Ann. Sci. Terre, Marseille, p. 257, 1 fig., 1 tab.
- MUDRY J. (1981).—Sur l'origine des gradients de teneurs isotopiques et géochimiques dans les eaux karstiques du Jura (France).—*Journal of Hydrology*, 50 (1981), 167-178, 7 fig., 1 tab., Elsevier Amsterdam.
- MUDRY J. (1982).—Etude du fonctionnement hydrodynamique de la Fontaine de Vaucluse (SE de la France) à partir des analyses physico-chimiques hebdomadaires (cycle 1981-82).—3e Coll. Hydrol. Pays Calc. (Neuchâtel).—*Ann. Sci. Univ. Besançon (Géol.)* mém. 1, 191-203, 7 fig.

- MUDRY J. (1983).—Hydrogéologie de la Fontaine de Vaucluse et de son bassin d'alimentation. —*Etudes vauclusiennes*, XXX, 9-14, 5 fig., 1 tab.
- MUDRY J. (à paraître).—Apport du traçage physico-chimique naturel à la compréhension du fonctionnement des aquifères de la région du Mont-Ventoux (Vaucluse).—Coll. restit. trav. Scient. Mont-Ventoux (1986), 9 p., 5 fig.
- MUDRY J., BLAVOUX B. (1986).—Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France.—*Hydrogéologie*, 1, 53-59, 4 fig., 3 tab.
- MUDRY J., BLAVOUX B. (à paraître).—Le tarissement des aquifères karstiques : période non influencée ?.—Coll. A. BURGER Neuchâtel 1986, 9 p., 6 fig.
- MUDRY J., KIRALY L., MULLER I. (1979).—Analyse multivariée du chimisme de quelques sources karstiques du Jura suisse et franc-comtois.—*Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel*, n° 3, 183-221, 20 fig., 4 tab.
- MUDRY J. et MICHELOT C. (1984).—Remarques sur les exutoires de l'aquifère karstique de la Fontaine de Vaucluse.—10e Réun. Ann. Sci. Terre, Bordeaux, 1984, p. 410, 1 fig., 1 tab., livre en dépôt à la Soc. géol. Fr.
- MUDRY J. et PUIG J.M. (à paraître).—Le karst de Vaucluse, chapitre monographique de l'ouvrage collectif "Karsts de France".—Féd. Franc. Spéléo. éd.
- MUDRY J., ROSENTHAL P. (1977).—La Haute-Chaine du Jura entre Morez, St Claude et la Pesse. —Etude géologique et hydrologique.—Thèse 3e cycle Univ. Franche Comté, Besançon, 205 p., 95 fig., 7 pl. H.T.
- NAKAMURA R. (1971).—Runoff analysis by electrical conductance of Water.—*J. Hydrol.*, 14, 197-212, 9 fig.
- NUFFER R. (1968).—Coloration du bassin des Seignes de Passonfontaine.—*Bull. Ass. Spéléo. Est*, 5.
- OESCHGER H. et SIEGENTHALER U. (1972).—Umgabungsisotope im Dienste der Hydrologie und Ausblick auf neue Methoden.—*GWF - Wasser/Abwasser*, 113, 501-508.
- OLIVE P. (1970).—Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère nord par la méthode du Tritium. Thèse Sc. Nat. Univ. Paris VI (Thonon) 138 p., 54 fig., 20 tab.
- PAREIN R. et LANGUILLE A. (1981).—La Haute-Provence souterraine. Contribution à l'étude spéléologique du bassin d'alimentation présumé de la Fontaine de Vaucluse.
- PASQUIER C. (1975).—Les aquifères karstiques du plateau d'Ornana (Doubs) - le système de Bléfond - Pont les Moulins - Premiers résultats.—*Ann. Spéléo.*, 30, 3, 387-400, 14 fig., 1 tab.
- PERSOZ F., KUBLER B. (1973).—Composition minéralogique et chimique des roches in KIRALY L. Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel.—*Suppl. Bull. Soc. Neuchâtel Sci. Nat.*, 96, 16 p., 6 fig., 1 tab. H.T., 1 carte.
- PETITFILS B. (1981).—Etude d'un système aquifère complexe dans les calcaires du Jurassique de la Nièvre. Aspect hydrodynamique, hydrochimique et géophysique.—Thèse 3e cycle Ress. et Mat. min. Orléans, 236 p., 58 fig., 19 tab., 7 annexes.
- PINDER G.F., JONES J.F. (1969).—Determination of the ground water component of peak discharge from the chemistry of total runoff.—*Water res. res.*, vol. 5, n°2, 438-445, 5 fig., 1 tab.
- PINTA M. (1979).—Spectrométrie d'absorption atomique. t1 : Problèmes généraux 1-262. t2 : Application à l'analyse chimique 263-696.—2e éd., Masson-Orstom (Paris).
- PUIG J.M. (1987).—Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse.—Thèse 3e cycle Avignon (en cours).
- RODIER J. (1976).—L'analyse de l'eau.—Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie) ; tomes I et II, 5e éd., Dunod Technique, Paris (I : 629 p. ; II : 364 p.).
- ROQUES H. (1961).—Eléments pour une cinétique des phénomènes karstochimiques.—*Ann. Spéléo.*, 16, 4, 329-340.
- ROQUES H. (1963).—Sur la répartition du CO₂ dans les karsts (deuxième mémoire).—*Ann. Spéléo. CNRS* 18, 2, 141-184.
- ROQUES H. (1967).—Chimie des carbonates et hydrogéologie karstique.—*Mém. et Doc. Centre Rech. et Doc. Carto. et géogr.* Nelle série, 4, 113-141, 17 fig., (CNRS).
- ROQUES H. (1972).—Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux naturelles.—*Ann. Spéléol.*, 27, 1, 79-92.
- SANSON J. (1961).—Recueil de données statistiques relatives à la climatologie de la France. —Météorologie Nationale Paris, 148 p.
- SCHEIDEGGER A.E. (1968).—Horton's laws of stream lengths and drainage areas.—*Water Resources Research* 4, 5, p. 1015-1021.
- SCHOELLER H. (1962).—Les eaux souterraines.—Masson et Cie, Paris, 642 p.
- SCHOELLER H. (1965).—Hydrodynamique dans le karst (écoulement et emmagasinement). Hydrologie des roches fissurées.—Coll. Dubrovnik AIHS-UNESCO, 3-20, 7 fig.

- SCHOELLER H. (1969).—L'acide carbonique des eaux souterraines.—*Bull. B.R.G.M.* (2), III, 1, 1-32.
- SCHOELLER M. (1963).—Recherches sur l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines.—Thèse Bordeaux, 231 p., 30 fig., imp. Drouillard.
- SCHOTTERER U., MUELLER I. (1982).—Estimation of groundwater reserves of a karstic aquifer (Areuse spring, Jura of Neuchâtel, Switzerland).—*Bull. Centre Hydrogeol.* (Neuchâtel) 4, 231-229, 3 fig., 2 tab.
- SHUSTER E.T., WHITE W.B. (1971).—Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs : a possible means for characterising carbonate aquifers.—*J. Hydrol.*, 14, 93-128, 34 fig., 2 tab.
- SIEGENTHALER U., SCHOTTERER U., MULLER I. (1983).—Isotopic and chemical investigations of springs from different karst zones in the swiss Jura.—*Int. Symp. on Isotope Hydrol. in Wat. Res. Devel.*—IAEA - SM 270/51, 1-27, 9 fig., 1 tab., Vienna.
- SILVESTRE J.P. (1977).—Etude hydrogéologique de la montagne du Lubéron (Vaucluse) ou contribution à la connaissance de l'aquifère de la Fontaine de Vaucluse.—Thèse 3e cycle Aix-Marseille 1, 259 p., 36 pl.
- SNOW D.T. (1970).—The frequency and apertures of fractures in rock.—*Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 7, p. 23-40.
- SOTERA J.J., FOGG BANCROFT M., SMITH S.B., CORUM T.L. (1981).—Atomic Absorption Methods Manual vol 2 : Flameless operations.—Instrumentation laboratory, Wilmington MA (U.S.A.).
- STAIGRE J.C. (1983).—Nouvelles plongées à la Fontaine de Vaucluse.—*Spelunca* 4, 10-11.
- THEOBALD N. (1971).—Géologie et hydrogéologie de la Haute-Saône.—*Ann. Sci. Univ. Besançon* (3), Géologie, 14, 75 p., 15 fig., 10 pl. et 1 carte H.T.
- TISSOT G., TRESSE P. (1978).—Etude des systèmes karstiques du Lison et du Verneau-région de Nans sous Ste Anne (Doubs).—Thèse 3e cycle Besançon, 134 p., 50 fig.
- TOLER L.G. (1965).—Use of specific conductance to distinguish two base flow components in Econfina Creek - Florida.—*U.S. Geol. Surv. Prof. paper* 525 C, C206-C208, 2 fig.
- TOLER L.G. (1965).—Relation between chemical quality and water discharge in Spring Creek, Southwestern Georgia.—*U.S. Geol. Surv. Prof. paper* 525 C, C209-C213, 8 fig.
- TRIPET J.P. (1972).—Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois).—Thèse Neuchâtel, 183 p.
- UDOWSKI E. (1980).—Sur quelques aspects physico-chimiques de la formation des carbonates naturels in Y. TARDY. Géochimie des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches, 49-99, 95 fig., 6 tab., SARL éléments-Tarbes.
- VIAL R. (1976).—Etudes géologique et hydrogéologique de la région de Thonon-Douvaine (Haute-Savoie).—Thèse 3e cycle USM Grenoble, 169 p., 72 fig., 39 tab., 5 annexes.
- VILLEGER M. (1984).—Evolution tectonique du panneau de couverture nord provençal (Mont Ventoux-Lubéron-Moyenne Durance).—Thèse 3e cycle Orsay 181 p., 50 fig.
- VISOCKY A.P. (1970).—Estimating the ground water contribution to storm runoff by the electrical conductance method.—*Groundwater*, vol. 8, n°2, 5-10, 7 fig.
- VUYLSTEEK G. (1983).—Contribution à l'étude hydrogéologique, chimique et isotopique du massif karstique du Niffion (Chablais - Haute-Savoie).—Thèse 3e cycle Sciences de l'eau, Paris VI - Thonon, 93 p., 63 fig., 30 ann.
- WEYDERT P. (1963).—Morphologie karstique du plateau de St Christol (Vaucluse). Ses rapports avec la tectonique et la stratigraphie.—D.E.S. Marseille, 2 vol., 128 p., 80 pl.
- WEYDERT P. (1965).—Les relations entre les failles et les dolines sur le plateau de St Christol (Vaucluse).—*Bull. Musée Anthropologie préhistorique*, Monaco, 12, 1-16.
- WIGLEY T.M.L. (1973).—The incongruent solution of dolomite.—*Geochimica et cosmochimica Acta*, 37, 1397-1402, 2 fig., 2 tab., Pergamon Press (North Ireland).
- ZOTL J. (1960).—Die Hydrographie des nordostalpinen karstes.—*Steirische Beiträge Hydrogeologie* 1960-1961 (2), 183 p.
- ZUPPI G.M., FONTES J.C., LETOLLE R. (1974).—Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfurées dans le Latium.—In : "Isotope Technique in ground-water hydrology 1974". *Proceed. Symp.*, IAEA, Vienna, I, 341-361.

A N N E X E S

ANNEXE 1 : ANALYSES CHIMIQUES

Les méthodes de dosage mises en oeuvre au laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon appartiennent à 4 catégories : volumétrie, spectrocolorimétrie, absorption atomique classique et absorption atomique sans flamme (atomiseur électrothermique).

Volumétrie : Dosage des bicarbonates

On mesure l'alcalinité en neutralisant à l'acide sulfurique N/50 les ions OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- à des pH idoines. Le contrôle du point d'équivalence s'opère à l'aide d'un pHmètre (Radiometer pHM 80) au $1/100^\circ$ d'unité pH. La prise d'essai a un volume de 100 cm³ ou de 50 cm³ selon la teneur attendue. On mesure le volume d'acide avec une burette à piston de précision graduée en centièmes de cm³ (Metrohm). Au voisinage d'un pH de 4,50, la pente de la courbe pH-f (volume d'acide) est très redressée, l'ajout d'une goutte fait chuter le pH de dixièmes d'unités : la précision théorique est meilleure que 0,5% à condition que le titre de l'acide soit bon ($\pm 0,2\%$). Les causes de mauvaises valeurs de bicarbonates proviennent surtout de la conservation des échantillons : en toute rigueur, ce dosage devrait être fait sur le terrain. En conservant l'échantillon au frais pendant le transport, il peut être analysé dans la journée au laboratoire, voire plusieurs jours après s'il est conservé au réfrigérateur ou en pièce climatisée, à l'abri de la lumière. Le réfrigérateur ne doit impérativement pas congeler les échantillons : le carbonate de calcium précipite et ne passe plus en solution. Les flacons exposés à la lumière sont le siège de développements d'algues chlorophylliennes, qui en consommant le gaz carbonique de l'eau, font précipiter les carbonates. Les échantillons relevés par des préleveurs automatiques peuvent avoir des teneurs en bicarbonates altérées, lorsque l'appareil doit échantillonner des émergences non captées, l'été, sous un climat méditerranéen pendant de longues périodes. Ainsi les cycles de 28 échantillons ont subi une détérioration en été 1981 à la Fontaine de Vaucluse (fig. A1) : les échantillons de fin du cycle de prélèvement sont à peu près indemnes alors que ceux du début sont gravement endommagés. On remarquera la détérioration plus marquée pour les échantillons pairs que pour les échantillons impairs, en raison de leur position extérieure dans l'appareil.

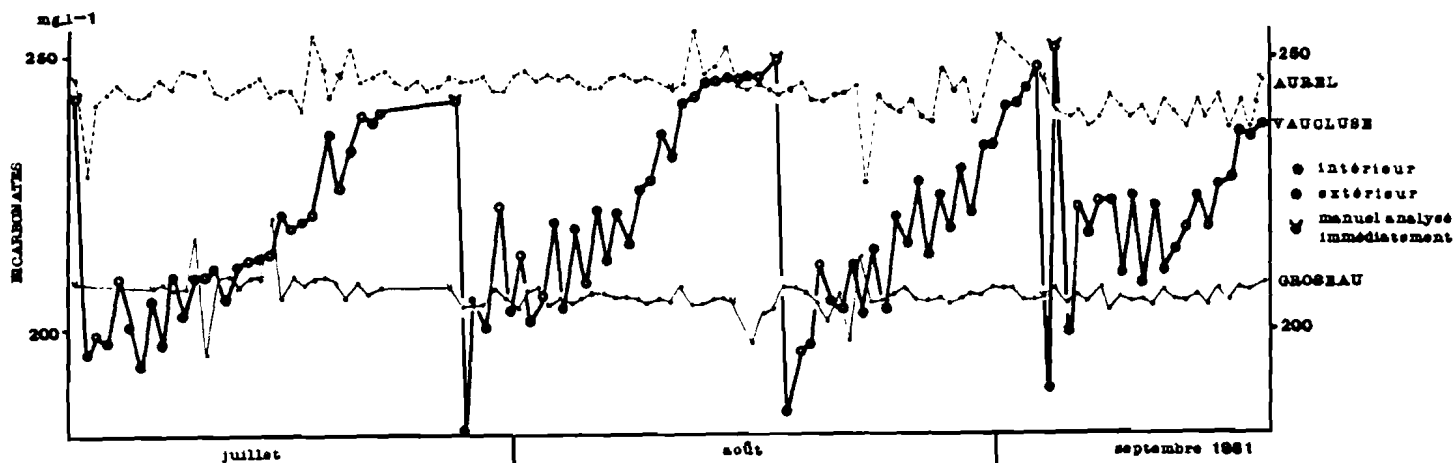


Fig. 243 : DEGRADATION DE LA TENEUR EN BICARBONATES PENDANT LES CYCLES DE PRELEVEMENTS AUTOMATIQUES

Spectrocolorimétrie

- Principe général :

Amener par une réaction chimique un ion (le plus souvent un anion) sous une forme colorée dont l'opacité est susceptible d'être mesurée par absorption d'un rayon lumineux de longueur d'onde spécifique.

La loi de Beer Lambert relie l'absorption (logarithme de l'intensité incidente sur l'intensité émergente) à la concentration. La relation est linéaire pour les faibles concentrations. Généralement, il faut prévoir une gamme d'étalons à chaque série de mesures (sauf pour les nitrates). Le spectrocolorimètre utilisé est un Cécil 292 à affichage digital. La source lumineuse est une lampe au tungstène, le dispositif de mesure comprend un monochromateur à réseau, un détecteur, un photomultiplicateur et un microprocesseur. La solution passe dans une cellule fixe en quartz à vidange automatique garantissant la reproductibilité des propriétés optiques du dispositif (trajet optique, dispersion et absorption des faisceaux).

Le tableau A1 résume les caractéristiques des dosages effectués par cette méthode. La précision est fonction de l'élément dosé, elle dépend d'une part de la longueur d'onde d'analyse (sensibilité différente à des longueurs d'onde différentes), d'autre part de la spécificité de la réaction colorimétrique (interférences), enfin de la nature même de cette réaction. (solution ou suspension ?)

Esèce Analysée	Prise d'essais (ml)	Longueur d'onde (nm)	Limite de détection (mg.l-1)	Limite de linéarité (mg.l-1)	Reproductibilité %
Chlorures	20	460	0,4	7	3
Azote Nitrique	20	410	0,05	3	2,5
Sulfates	20	≈ 420	2	24	5 (≈ 20 mg/l) 10 (< 10 mg/l)
Silice	20	810	0,1	6	2,5

≡ Cuves de 1cm de trajet optique.

xx Dans des séries différentes, avec une courbe d'étalonnage différente ($RZ = 100\sigma x/\bar{x}$)

Tabl. 63 : COLORIMETRIE : PARAMETRES ANALYTIQUES

- Dosage des chlorures :

Par la méthode de Swain au thiocyanate mercurique.

- Principe :

Le thiocyanate mercurique très peu dissocié en solution s'ionise en présence de chlorures (production de chlorure mercurique). L'ion thiocyanate donne avec le fer une coloration rouge, susceptible d'une détermination spectrophotométrique. Dans les eaux naturelles, seuls les autres halogénures (teneur négligeable devant celle en chlorures) peuvent interférer dans ce dosage.

- Réactifs utilisés

- Acide chlorhydrique N/10 (solution-mère à 3,55 g.l⁻¹ de chlorures)
- Acide chlorhydrique N/1000 (solution-fille à 35,5mg.l⁻¹ de chlorures) préparée à chaque série de mesures.
- Nitrate ferrique à 5% dans l'acide nitrique environ 4N (source de fer)
- Thiocyanate mercurique à 0,3% dans éthanol à 95%

- Précautions

Le dosage des chlorures des eaux karstiques est toujours une opération délicate à cause de la contamination par l'atmosphère ou par contact.

- Il faut bannir du laboratoire ou mettre sous hottes les réactifs concentrés volatils (acide chlorhydrique).
- Il faut interdire de fumer pendant la manipulation et au cours du séchage de la vaisselle.
- par temps chaud, il faut éviter la contamination par la transpiration : prises d'essais, dilutions, confection de gammes d'étalons, ajouts de réactifs, doivent être effectués tôt le matin ou en local climatisé.
- Il est impératif d'avoir une vaisselle irréprochable, donc une eau distillée déminéralisée très résistante (<1µS.cm⁻¹)

- Dosage des nitrates

- Principe

En milieu alcalin ammoniacal, le dérivé nitré de l'acide phénoldisulfonique présente une coloration jaune. Les eaux sont mises à évaporer à l'étuve, le résidu sec est attaqué par l'acide phénoldisulfonique en solution dans l'acide sulfurique concentré. Un ajout d'ammoniaque révèle la teinte jaune.

- Précautions

- Faire des ajouts dosés de chlorures quand leur teneur dépasse 20mg.l⁻¹ (interférences).
- refaire une droite d'étalonnage à chaque changement de flacon d'acide phénoldisulfonique.
- faire le dosage des nitrates rapidement si les eaux sont réductrices (passages nitrates → nitrites → ammonium).

- Dosage des sulfates par turbimétrie

- Principe

En milieu acide, l'ion sulfate se combine à l'ion baryum pour donner un précipité blanc dont la chute (loi de Stokes) est ralentie par la présence d'un tensio-actif. Le dosage n'est pas à proprement parler colorimétrique puisqu'il repose sur la mesure de la densité d'un trouble.

- Réactifs

- Acide sulfurique N/50 (servant au dosage des bicarbonates) contenant 960,65mg.l-1 de sulfates (solution étalon)
- Acide chlorhydrique N/10 (générateur de milieu acide)
- solution de chlorure de baryum (à 10% BaCl₂) stabilisée par le "Tween 20" (à 5%)

- Précautions

Ce dosage, délicat parce que peu reproductible, nécessite une manipulation stéréotypée : agitation au Vortex, évacuation de l'échantillon précédent, rinçage, remplissage de la cuve, attente du débullage, lecture doivent être rigoureusement minutés.

- Etalons et échantillons doivent être à la même température $\pm 1^\circ$ C.

- Dosage de la silice (complexe silico-molybdique)

- Principe

En milieu acide, la silice et les phosphates forment des complexes silico et phosphato molybdiques jaunes : l'acide tartrique détruit l'interférence des phosphates, Le complexe jaune est réduit en bleu par l'acide 1 amino-2 naphthal-4 sulfonique.

- Réactifs

- métasilicate de sodium à 214,14mg.l-1 (contenant 60,074mg.l-1 de silice)
- molybdate d'ammonium à 7.5% (avec 0,9% d'acide sulfurique concentré)
- acide tartrique à 10%
- Réactif réducteur (sodium métabisulfite 9%, sodium sulfite 0,7%, acide 1 amino 2 naphthal 4 sulfonique 0,15%,

- Précautions

- Les eaux, les solutions étalons et les réactifs ne doivent pas être stockés en flacons de verre.
- les réactions chimiques doivent se réaliser entre 20 et 30°C (les réactifs sont stockés au réfrigérateur).
- le réactif réducteur doit être conservé à l'abri de l'air : son stockage doit s'effectuer dans un récipient bien bouché et à géométrie variable : seringue PVC de 60ml ou poches de transfert de transfusion sanguine de plusieurs dl.
- les réactions colorimétriques doivent toutes avoir lieu (blanc, étalons, échantillons) dans des tubes de même matière et de même série de fabrication (verre borosilicaté). La lecture au spectrocromètre ne doit pas commencer plus d'une heure après l'ajout du réactif réducteur (pour limiter la durée du contact avec le verre.)

Spectrométrie d'absorption atomique (flamme)

Les analyses de cations ont été opérées sur un spectromètre d'absorption atomique IL 257. Le principe de l'absorption atomique utilise la propriété qu'ont les atomes à l'état fondamental d'absorber leurs raies de résonance. Une lampe à cathode creuse de la même matière que l'élément à doser émet un spectre de raies caractéristiques de l'élément. La solution à tester est nébulisée dans une flamme à haute température (air-acétylène) qui est une source de vapeur atomique. L'absorption du faisceau incident obéit à la loi de Beer-Lambert, il y a donc une relation exponentielle entre l'atténuation du faisceau et la concentration.

L'appareil utilisé est à double faisceau (faisceau de référence + faisceau d'analyse), il nécessite donc la récupération alternative et rapide des signaux sur les deux trajets optiques, à l'aide d'un dispositif optico-électronique (miroir tournant et microprocesseur). La sélection de la longueur d'onde utilise un monochromateur à réseau, le signal optique récupéré sur une cellule photoémissive est amplifié par un photomultiplicateur, le signal électrique est traité par le microprocesseur. Cet organe permet la calibration du dosage en mémorisant l'étiquette, la concentration et la densité optique d'un blanc et 5 étalons. Le recalibrage (tous les 5 échantillons) utilise un blanc (RAZ) et un étalon. Une imprimante permet de sortir à un pas de temps choisi par l'opérateur, le numéro, la moyenne, l'écart-type et l'erreur résiduelle de chaque échantillon. Les changements de paramètres instrumentaux et les recalibrages sont également imprimés.

Ce dispositif d'analyse nous a permis de doser les cations majeurs (tableau A2). Certains éléments, peu concentrés, ont pu être analysés "en direct". D'autres (Ca, Mg) plus abondants et/ou plus sensibles, ont dû être dilués, avec ajout d'un tampon spectral (chlorure de lanthane à une teneur finale de 0,5%).

Tous les cations ont été analysés sur échantillons acidifiés avec 1% d'acide nitrique concentré, stockés dans des flacons neufs en polyéthylène.

Les méthodes de dosage à l'absorption atomique étaient très sensibles. Cependant la sensibilité est une qualité acquise au détriment de la "tolérance" de l'appareil aux fortes concentrations ; le "revers de la médaille" de la précision est la nécessité de diluer pour doser les éléments abondants.

CATION	Longueur d'onde (nm)	Bande passante (nm)	Limite de détection (mg.l-1)	Limite de linéarité (mg.l-1)	Dilutions
Sodium	589,0	0,5	0,005	1	direct
Potassium	766,5	1	0,02	2	direct
Strontium	460,7	0,5	0,1	5	direct
Magnésium	285,2	1	0,005	0,4	x20 ^x
Calcium	422,7	1	0,01	3	x20 ^x

* Avec tampon spectral (Chlorure de Lanthane - teneur finale : 0,5 g.l-1)

Tabl. 64 : ABSORPTION ATOMIQUE FLAMME : PARAMETRES ANALYTIQUES

Spectrométrie d'absorption atomique (sans flamme)

(Atomiseur électrothermique ou four graphite)

Ces éléments-traces (Fe, Mn) ont été analysés sur un atomiseur électrothermique à température contrôlée IL 655. Cet appareil est conçu comme un accessoire du spectromètre 257, qui se substitue au brûleur.

Le principe de l'atomisation électrothermique est de remplacer la production "chimique" de hautes températures dans la flamme de l'absorption atomique par un chauffage électrique, utilisant l'effet Joule sur un tube de graphite. Le faisceau d'analyse de la lampe à cathode creuse passe dans le tube de graphite, il est absorbé par le nuage d'atomes neutres produit par le chauffage du tube, et cette absorption est reliée à la concentration de l'élément analysé.

Dans l'appareil IL 655, les échantillons sont introduits sous forme de nébulisat à l'aide d'un injecteur automatique (FASTAC IL 254).

Il subissent un cycle stéréotypé, adapté à l'élément dosé et à la matrice qui le contient (eau plus ou moins minéralisée). Le cycle comprend trois paliers à durée programmable, le temps de montée au palier est également réglable, et la température des 6 phases (3 montées au palier + 3 paliers) est contrôlée par un senseur en platine (appliqué sur le tube en graphite) dont les variations de résistivité (fonction de la température) sont équilibrés par un pont de Wheastone. Le tube en graphite est implanté au milieu d'une cellule dans laquelle circule un gaz inerte (argon ou azote) destiné à empêcher la combustion du tube graphite. Un circuit d'eau sert à ramener le tube à la température ambiante après un cycle.

Le cycle comprend, au moment de l'introduction automatique du nébulisat, une désolvation. Cette phase, à une température dépassant légèrement 100°C, se fait avec la porte de la cellule ouverte. La deuxième phase est une pyrolyse, elle succède à la fermeture de la porte et à la mise en route du flux d'azote : l'atomisation termine le cycle. La densité optique mesurée est celle du pic le plus intense du cycle (atomisation). Les eaux analysées, peu minéralisées, étaient des matrices simples à détruire, qui n'ont pas introduit d'absorption non spécifique.

Les analyses ont été faites sur eaux acidifiées à l'acide nitrique, les ions introduits étant facilement atomisables (il faut éviter les chlorures trop réfractaires). Malgré le caractère stéréotypé de la manipulation, la reproductibilité des dosages n'est pas bonne, à cause de l'évolution de l'état de surface des tubes (les tubes neufs nécessitent un rodage) les analyses nécessitent un passage par séries complètes et chaque échantillon (et étalon) demande plusieurs passages.

ELEMENT-TRACE	Longueur d'onde (nm)	Bande passante (nm)	Limite de détection (µg. l-1)	SECHAGE		CALCINATION			ATOMISATION		
				Température (°C)	Temps de montée au palier (s)	Température (°C)	Durée (s)	Température (°C)	Temps de montée au palier (s)	Durée (s)	Température (°C)
Fer	248,3	0,5	5	120	10	650	5	900	0	5	1 900
Manganèse	279,5	0,5	0,5	120	5	650	5	650	0	5	1 650

* Tabl. 65 : ABSORPTION ATOMIQUE SANS FLAMME : PARAMETRES ANALYTIQUES

ANNEXE 2 : FICHIERS DE DONNEES ANALYSES : SUIVIS

FONTAINE DE VAUCLUSE HEBDOMADAIRE
17 JANVIER 1981 - 10 DECEMBRE 1982

T cels	Cond	Debit	SiO2	Ca	Mg	Na	K	Fe	
Mn	Sr	Cl	SO4	HCO3	N*****				
V001	12.9	380.0	6.38	7.48	74.8	6.83	1.59	0.48	0.0250
0.0021	0.34	4.6	12.2	255.5	0.80				
V002	12.8	373.0	8.33	7.28	74.7	6.82	1.39	0.47	0.0215
0.0042	0.38	4.8	12.6	257.1	0.87				
V003	12.9	381.0	7.54	7.80	77.6	6.93	1.40	0.48	0.0201
0.0035	0.37	4.5	14.2	261.1	0.80				
V004	12.9	377.0	7.84	7.48	77.4	6.90	1.49	0.47	0.0230
0.0022	0.39	3.6	14.1	267.8	0.78				
V005	12.9	374.0	8.55	7.44	76.1	7.15	1.47	0.49	0.0206
0.0014	0.38	4.7	14.5	261.6	0.84				
V006	13.0	379.0	7.54	7.44	79.3	7.24	1.49	0.47	0.0223
0.0023	0.40	4.7	14.7	269.5	0.83				
V007	12.9	374.0	6.83	7.40	78.6	6.78	1.48	0.48	0.0181
0.0013	0.38	4.8	14.9	261.5	0.99				
V008	13.0	375.0	9.42	7.44	78.8	6.97	1.42	0.47	0.0212
0.0010	0.40	5.0	15.9	263.5	1.00				
V009	13.0	375.0	14.9	7.44	79.0	6.65	1.56	0.46	0.0255
0.0012	0.37	4.9	14.9	261.0	0.59				
V010	12.8	377.0	10.9	7.48	78.8	6.53	1.64	0.50	0.0244
0.0011	0.33	3.9	15.0	257.9	0.91				
V011	12.8	368.0	10.1	7.20	78.4	6.16	1.51	0.45	0.0235
0.0012	0.35	5.0	14.4	259.1	0.88				

T cels	pH	Cond	Debit	SiO2	Ca	Mg	Na	K	
Fe	Mn	Sr	Cl	SO4	HCO3	N*****			
V012	12.2	7.68	296.0	21.20	5.68	76.6	3.32	0.99	0.30
0.0426	0.0025	0.18	3.5	6.6	205.0	0.78			
V013	11.9	7.59	302.0	17.32	5.48	71.5	2.78	1.15	0.48
0.0425	0.0043	0.17	3.9	7.2	207.4	0.70			
V014	11.9	7.61	308.0	16.25	5.60	71.3	2.79	1.01	0.29
0.0266	0.0014	0.18	4.2	7.8	215.3	0.91			
V015	12.0	7.48	324.0	18.92	6.00	73.8	3.25	1.08	0.30
0.0278	0.0012	0.21	4.1	7.6	226.7	0.70			
V016	12.0	7.44	331.0	16.19	6.24	74.4	3.73	1.23	0.34
0.0202	0.0010	0.24	4.5	10.2	225.5	0.72			
V017	12.1	7.41	328.0	19.61	6.28	76.7	3.93	1.19	0.34
0.0215	0.0015	0.27	4.5	9.0	228.1	0.66			
V018	12.9	7.50	318.0	15.43	5.92	76.6	3.03	0.94	0.29
0.0172	0.0010	0.23	3.8	6.2	223.3	0.57			
V019	12.0	7.38	321.0	14.24	6.08	72.7	3.06	1.45	0.27
0.0180	0.0010	0.21	3.9	5.6	226.3	0.48			
V020	12.3	7.51	361.0	9.78	6.68	74.0	5.16	1.50	0.33
0.0266	0.0018	0.32	3.0	9.4	242.8	0.58			
V049	12.8	7.51	372.0	7.60	7.00	76.4	5.64	1.32	0.39
0.0154	0.0011	0.37	3.3	11.6	242.0	0.47			
V078	13.0	7.79	365.0	6.31	7.52	76.6	6.12	1.67	0.36
0.0145	0.0011	0.32	3.7	16.3	249.4	0.38			
V104	13.0	7.72	364.0	5.65	7.84	76.8	6.42	1.60	0.41
0.0293	0.0100	0.31	3.2	15.1	251.5	0.59			
V132	13.0	7.52	366.0	5.40	7.72	76.5	6.68	1.46	0.34
0.0140	0.0012	0.30	3.7	16.7	256.0	0.49			
V161	13.1	7.50	358.0	5.75	6.96	79.8	7.15	1.35	0.35
0.0169	0.0015	0.32	3.4	20.5	257.2	0.52			
V168	13.1	7.37	372.0	5.55	7.47	80.2	7.07	1.62	0.35
0.0144	0.0015	0.32	4.2	15.2	255.8	0.63			
V206	13.0	7.39	400.0	4.95	7.57	79.6	7.49	1.71	0.34
0.0145	0.0009	0.34	4.2	15.2	261.1	0.38			
V205	13.0	7.48	363.0	4.41	8.06	79.6	7.19	1.58	0.35
0.0155	0.0011	0.32	6.3	15.3	255.0	0.58			
V222	13.1	7.43	359.0	4.28	7.77	79.3	7.27	1.58	0.29
0.1588	0.0145	0.34	6.0	16.8	253.3	0.47			
V247	13.0	7.04	360.0	30.04	7.67	79.0	7.18	1.74	0.30
0.0173	0.0010	0.32	4.8	13.2	252.8	0.53			
V271	11.8	7.10	309.0	43.00	5.67	74.4	2.32	1.01	0.30
0.1832	0.0199	0.15	5.6	10.7	198.4	1.14			

V272	11.7	6.95	304.0	27.15	5.62	75.1	2.36	0.84	0.23
0.1156	0.0099	0.17	4.6	8.7	201.5	0.86			
V273	11.7	7.03	310.0	22.15	5.75	76.4	2.62	0.87	0.23
0.0452	0.0028	0.19	4.3	10.5	206.7	0.75			
V274	11.8	7.39	311.0	16.50	5.95	76.5	3.71	1.20	0.27
0.2488	0.0214	0.26	4.9	13.2	215.0	0.69			
V275	11.9	7.38	333.0	14.90	6.15	72.9	3.77	1.60	0.28
0.0243	0.0008	0.27	5.4	12.8	223.0	0.45			
V276	12.0	7.47	332.0	13.50	6.36	75.6	4.33	1.62	0.32
0.0193	0.0005	0.29	1.8	12.9	236.2	0.31			
V277	12.2	7.10	340.0	12.90	6.44	75.9	4.67	1.78	0.30
0.0185	0.0005	0.30	1.7	13.6	232.3	0.25			
V278	12.3	7.04	345.0	12.00	6.60	74.2	5.06	1.88	0.33
0.1164	0.0013	0.30	1.9	14.3	239.9	0.15			
V279	12.4	7.05	358.0	11.80	6.80	75.2	5.53	2.06	0.36
0.0143	0.0012	0.31	2.0	15.9	242.0	0.21			
V280	12.5	7.15	351.0	12.10	6.60	75.3	5.75	2.14	0.35
0.0203	0.0006	0.32	2.1	16.0	244.4	0.24			
V281	12.6	7.60	356.0	12.05	6.90	75.2	6.05	2.24	0.38
0.1848	0.0008	0.35	2.4	20.6	247.9	0.28			
V282	12.6	7.55	375.0	12.50	7.00	72.2	6.60	2.42	0.39
0.0147	0.0010	0.37	2.3	53.6	245.7	0.27			
V283	12.6	7.39	352.0	13.30	7.10	75.5	6.90	2.44	0.36
0.0102	0.0008	0.37	2.2	24.8	246.0	0.30			
V284	12.5	7.31	366.0	12.50	6.80	74.7	6.60	2.32	0.37
0.0097	0.0021	0.36	2.8	22.4	246.9	0.23			
V285	12.6	7.33	364.0	12.60	6.80	75.7	6.40	2.48	0.37
0.0172	0.0017	0.36	2.2	22.2	235.7	0.17			
V286	12.5	7.23	346.0	11.35	6.50	74.5	6.10	2.24	0.36
0.0197	0.0013	0.33	2.5	20.4	239.4	0.19			
V287	12.5	7.31	355.0	10.45	6.60	69.7	5.80	2.14	0.34
0.0190	0.0013	0.33	2.2	19.3	235.9	0.16			

T cels	pH	Cond	Debit	SiO2	Ca	Mg	Na	K	
Mn	Sr	Cl	SO4	HCO3	N*****				
V288	12.5	7.88	349.0	9.15	6.4	68.0	6.2	2.14	0.41
0.0012	0.35	2.3	18.2	238.1	0.18				
V289	12.5	7.85	340.0	6.75	6.3	67.4	5.4	1.90	0.31
0.0009	0.31	2.3	17.8	232.3	0.18				
V290	12.5	7.88	342.0	12.90	6.3	67.5	5.7	1.94	0.35
0.0009	0.34	2.4	17.8	236.2	0.16				
V291	12.4	8.02	345.0	10.25	6.1	69.6	5.9	2.08	0.36
0.0012	0.36	1.9	18.7	235.2	0.23				
V292	12.5	7.94	353.0	7.70	6.3	69.9	6.5	2.30	0.35
0.0009	0.36	2.0	20.2	246.2	0.26				
V293	12.5	7.80	352.0	6.56	6.2	69.6	6.6	2.16	0.34
0.0010	0.34	2.0	20.6	239.1	0.13				
V294	12.5	7.86	341.0	5.64	6.3	68.7	6.0	1.86	0.29
0.0007	0.28	1.7	14.5	242.0	0.17				
V295	12.6	7.93	365.0	4.65	6.6	68.6	7.5	2.00	0.32
0.0007	0.32	1.9	18.2	224.5	0.20				
V296	12.7	7.92	341.0	4.38	6.6	68.9	7.3	2.23	0.36
0.0011	0.34	2.1	17.5	238.9	0.19				
V297	12.8	7.88	367.0	4.82	6.6	69.4	7.5	2.34	0.34
0.0008	0.33	2.1	18.0	237.7	0.26				
V298	12.3	7.85	325.0	4.74	7.0	71.1	6.1	2.34	0.35
0.0010	0.26	2.3	18.2	225.7	0.21				
V299	12.9	7.96	366.0	5.21	6.6	77.6	6.3	2.34	0.34
0.0012	0.35	2.1	18.7	240.8	0.17				
V300	12.3	7.89	356.0	6.61	6.6	71.4	7.0	2.18	0.32
0.0007	0.29	2.1	18.6	244.7	0.33				
V301	12.0	7.79	186.0	33.52	5.6	65.9	2.8	1.70	0.25
0.0029	0.18	2.2	13.1	116.1	0.42				
V302	11.6	7.98	238.0	25.99	5.1	72.5	3.0	1.42	0.28
0.0258	0.19	3.5	15.2	158.6	0.80				

LAS HOUNTAS HEBDOMADAIRE
1 JUILLET - 30 DECEMBRE 1981

	Mn Debit		pH	Cond	SiO2	HCO3	SO4	Cl		
	Na	K								
1	0.05	0.0021	0.135	7.70	265.0	4.08	159.2	17.8	2.7	
	0.44	0.88	0.36	4.13	54.9					
H2	0.09	0.0020	0.120	7.65	263.0	4.18	161.7	17.6	1.7	
	0.54	0.83	0.37	4.18	53.5					
H3	0.08	0.0026	0.195	7.62	250.0	3.00	174.5	13.4	2.4	
	0.65	0.87	0.33	4.54	56.5					
H4	0.08	0.0019	0.195	7.58	275.0	3.34	179.3	13.4	1.5	
	0.48	0.85	0.34	4.07	57.8					
H5	0.09	0.0014	0.135	7.45	280.0	3.34	176.9	14.9	1.3	
	0.44	0.87	0.28	4.32	58.0					
H6	0.08	0.0001	0.125	7.44	280.0	3.46	174.5	16.1	1.3	
	0.48	0.89	0.29	4.13	58.4					
H7	0.09	0.0001	0.125	7.54	282.0	3.60	173.2	20.3	1.3	
	0.38	0.82	0.31	4.21	58.3					
H8	0.09	0.0002	0.090	7.52	255.0	3.86	170.2	17.6	1.3	
	0.44	0.88	0.32	4.23	56.2					
H9	0.07	0.0001	0.076	7.40	272.0	3.87	164.1	19.5	2.0	
	0.51	0.93	0.33	4.30	55.4					
H10	0.08	0.0001	0.072	7.50	282.0	3.86	166.5	22.9	1.3	
	0.44	0.99	0.34	4.51	57.2					
H11	0.07	0.0002	0.070	7.58	268.0	4.10	162.9	23.9	0.9	
	0.48	0.99	0.32	4.5	55.1					
H12	0.10	0.0007	0.069	7.55	278.0	4.12	165.3	21.2	1.5	
	0.42	0.92	0.33	4.6	56.9					
H13	0.09	0.0001	0.075	7.57	265.0	4.30	161.7	22.5	1.8	
	0.39	0.89	0.33	4.77	57.0					
H14	0.12	0.0002	0.100	7.66	284.0	4.33	158.0	30.3	1.5	
	0.39	0.88	0.35	4.76	57.1					
H15	0.11	0.0001	0.093	7.67	279.0	4.21	159.2	22.2	1.5	
	0.39	0.88	0.37	4.79	55.4					
H16	0.10	0.0078	0.440	7.62	276.0	4.04	160.4	23.7	1.6	
	0.48	0.88	0.40	4.96	55.3					
H17	0.08	0.0002	0.165	7.72	262.0	3.77	161.7	12.2	1.6	
	0.56	0.84	0.35	5.09	53.2					
H18	0.08	0.0005	1.090	7.70	307.0	3.72	197.6	19.0	2.4	
	0.80	1.11	0.74	5.73	64.6					
H19	0.08	0.0087	0.155	7.77	273.0	3.53	189.1	12.2	1.6	
	0.55	0.91	0.40	5.42	61.4					
H20	0.08	0.0005	0.125	7.82	275.0	3.40	189.1	16.6	1.4	
	0.54	1.08	0.33	5.04	60.7					
H21	0.08	0.0002	0.098	7.77	236.0	3.39	184.8	19.0	1.6	
	0.42	1.09	0.34	4.78	63.3					
H22	0.06	0.0002	0.100	7.72	282.0	3.51	179.3	20.3	1.4	
	0.47	1.04	0.34	4.57	40.8					
H23	0.06	0.0072	2.144	7.50	280.0	3.42	181.8	9.6	1.8	
	0.56	1.05	0.54	4.76	56.8					
H24	0.06	0.0010	0.475	7.57	295.0	3.17	194.0	12.4	1.8	
	0.45	0.95	0.5	4.09	63.1					
H25	0.02	0.0081	4.220	7.44	259.0	3.44	183.0	6.5	1.8	
	0.33	0.90	0.74	3.65	57.0					
H26	0.05	0.0050	1.840	7.50	260.0	3.73	175.7	9.6	1.6	
	0.35	0.94	0.59	3.78	55.4					
H27	0.04	0.0012	2.375	7.56	263.0	3.83	167.8	11.2	2.3	
	0.33	0.86	0.34	3.29	55.6					

PONT DE GYS HEBDOMADAIRE
25 AVRIL - 23 JUIN 1980 , 18 NOVEMBRE 1980 - 2 FEVRIER 1981

Sr	pH	Cond	SiO2	HCO3	SO4	Cl	N	Na	K*****	
GM1	0.44	8.10	316.0	2.65	153.7	53.8	0.82	0.45	0.64	0.24
GM2	0.85	7.93	433.0	3.24	164.7	108.6	0.85	0.28	0.94	0.32
GM3	0.32	7.83	277.0	2.26	151.3	34.7	0.63	0.16	0.52	0.20
GM4	0.32	7.82	283.0	2.65	154.9	35.2	0.85	0.14	0.51	0.16
GM5	0.18	7.77	256.0	1.95	156.2	16.0	0.98	0.20	0.39	0.17
GM6	0.45	8.05	310.0	2.77	146.4	55.7	1.28	0.22	0.67	0.25
GM7	0.83	7.88	438.0	4.37	165.9	107.4	1.14	0.91	1.07	0.45
GM8	0.68	7.71	415.0	3.39	178.1	96.4	1.06	0.27	0.93	0.42
GM9	1.01	7.97	499.0	5.36	173.2	138.1	0.98	0.28	1.05	0.20
GM10	1.40	8.03	592.0	5.74	175.7	190.3	1.02	0.37	1.26	0.45
GM11	0.33	7.96	299.0	2.82	173.2	31.4	1.22	0.41	0.72	0.21
GM12	0.35	8.09	296.0	2.82	158.6	40.8	1.02	0.25	0.55	0.16
GM13	1.26	7.99	511.0	5.10	150.7	166.0	0.85	0.20	1.12	0.32
GM14	1.36	7.65	566.0	5.10	172.0	172.9	0.94	0.18	1.19	0.35
GM15	1.08	7.83	491.0	4.39	165.6	125.7	0.98	0.19	1.06	0.37

VERNEAU HEBDOMADAIRE
6 NOVEMBRE 1981 - 18 JANVIER 1982

Debit	Mn	Cl	PO4	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	
Ca	Mg	Na	K	SiO2*****					
VER1	0.165	0.0334	14.2	0.190	10.6	244.6	2.05	0.0395	0.080
	88.0	5.10	1.70	1.75	5.75				
VER2	0.087	0.0070	14.2	0.350	10.8	261.9	2.12	0.0130	0.060
	92.0	5.85	1.80	2.39	5.75				
VER3	2.160	0.0218	16.0	0.390	11.4	260.0	2.20	0.0190	0.001
	96.0	6.05	1.90	3.90	6.00				

Debit	Mn	Cl	PO4	SO4	NO3	NO2	NH4	Ca	
Mg	Na	K	SiO2*****						
VER4	1.720	0.0340	5.6	0.32	16.6	2.63	0.150	0.000	86.0
	4.75	5.34	6.00						
VER5	0.880	0.0117	5.8	0.22	10.7	1.80	0.062	0.001	86.0
	4.21	1.30	1.69	4.85					
VER6	3.310	0.0302	6.0	0.26	15.1	1.48	0.150	0.000	73.0
	3.16	1.00	2.15	5.25					
VER7	2.040	0.0102	5.6	0.26	14.1	1.42	0.105	0.002	85.0
	3.55	1.00	1.13	5.00					

Debit	Mn	Cl	PO4	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	
K	SiO2	Fe*****							
VER8	0.434	0.0074	8.0	0.37	12.1	234.0	1.35	0.000	0.000
	1.45	5.09	0.02						
VER9	3.280	0.1251	6.0	0.28	11.5	125.0	0.80	0.015	0.009
	0.97	4.42	0.07						
VER10	1.040	0.0094	8.4	0.32	14.1	114.0	0.95	0.013	0.000
	1.27	5.69	0.12						
VER11	0.388	0.0112	8.3	0.25	13.6	208.0	1.20	0.000	0.000
	1.37	5.56	0.06						
VER12	0.145	0.0036	8.1	0.34	14.0	227.0	1.25	0.004	0.004
	1.15	5.70	0.04						

VERNEAU HEBDOMADAIRE
26 JANVIER - 1 DECEMBRE 1982

Debit	Mn	Cond	PH	CL	F04	S04	H03	N03	MA	NA	K	S02	FE*****
0.004	0.050	0.150	5	4	4	1.60	2.00	7.40	0.01				
VER13	0.382	0.1166	537.0	7	9	4.6	0.50	15.0	230.0				
0.002	0.020	0.750	3	3	0.90	0.80	6.70	0.00					
VER14	0.468	0.1054	304.0	7	9	4.8	0.14	16.2	204.0				
0.002	0.020	0.750	3	3	0.90	0.80	6.70	0.00					
VER15	0.226	0.0887	350.0	7	9	5.2	0.24	15.0	224.0				
0.003	0.050	0.840	4	4	1.25	1.20	7.00	0.01					
VER16	0.143	0.0441	551.0	7	8	3.4	0.38	16.2	230.0				
0.007	0.009	0.840	4	4	1.85	1.24	7.40	0.00					
VER17	0.184	0.0848	544.0	7	9	3.9	0.44	15.0	228.0				
0.006	0.009	0.840	4	4	1.60	1.40	6.56	0.06					
VER18	0.124	0.1192	564.0	8	2	4.3	0.43	15.0	208.0				
0.005	0.020	0.840	5	4	1.50	1.08	7.00	0.00					
VER19	0.232	0.0798	304.0	7	9	8.7	0.37	13.6	226.0				
0.000	0.009	0.870	5	4	1.30	2.50	6.63	0.05					
VER20	0.499	0.1089	473.0	7	8	3.5	0.51	15.4	216.0				
0.002	0.264	0.870	3	3	1.60	2.20	6.97	0.06					
VER21	0.680	0.1381	430.0	7	8	2.2	0.17	13.6	198.0				
0.001	0.019	0.780	3	4	1.30	1.40	6.56	0.06					
VER22	0.333	0.1461	484.0	7	9	3.5	0.50	12.8	220.0				
0.001	0.012	0.840	5	4	1.80	1.80	6.56	0.06					
VER23	0.247	0.0835	488.0	7	9	4.8	0.50	12.8	228.0				
0.022	0.024	0.870	5	3	1.40	1.70	5.89	0.07					
VER24	0.145	0.1062	538.0	8	0	5.6	0.45	13.6	308.0				
0.024	0.036	0.890	4	4	2.30	3.50	6.56	0.16					
VER25	0.100	0.0431	338.0	8	0	5.6	0.46	12.8	246.0				
0.005	0.056	0.987	4	8	2.10	2.90	5.82	0.10					
VER26	0.088	0.0050	524.0	8	2	3.5	0.25	13.4	250.0				
0.003	0.027	0.960	5	4	2.10	2.80	5.09	0.07					
VER27	0.073	0.0422	405.0	8	0	3.9	1.18	12.8	244.0				
0.005	0.000	0.950	5	7	2.32	2.22	5.66	0.03					
VER28	0.111	0.0780	401.0	8	7	3.9	1.17	17.8	226.0				
0.014	0.180	0.840	5	4	2.75	2.90	5.89	0.12					
VER29	0.067	0.1028	437.0	8	3	1.3	1.00	10.3	288.0				
0.000	0.000	0.830	9	5	1.3	3.05	4.25	0.01					
VER30	0.164	0.0206	454.0	8	1	2.4	1.24	10.7	285.0				
0.000	0.000	0.860	6	5	2.24	3.07	4.92	0.01					
VER31	0.110	0.0172	474.0	8	2	3.5	1.67	12.6	283.0				
0.000	0.000	0.880	5	8	3.28	3.62	5.50	0.03					
VER32	0.148	0.0267	400.0	8	2	2.6	0.44	12.1	249.0				
0.000	0.000	0.780	7	4	1.32	2.01	5.62	0.45					
VER33	0.470	0.0276	417.0	8	3	2.2	0.21	9.4	264.0				
0.000	0.000	0.870	9	3	1.52	1.65	5.55	0.07					
VER34	0.133	0.0080	433.0	8	4	2.6	0.41	10.6	285.0				
0.000	0.008	0.870	9	4	1.60	1.90	6.87	0.15					
VER35	1.330	0.0338	409.0	8	3	4.3	0.34	12.2	266.0				
1.420	0.020	0.820	6	3	1.40	1.85	7.65	0.54					
VER36	0.162	0.0204	415.0	8	5	6.0	0.40	12.0	264.0				
0.360	0.020	0.830	9	4	1.40	2.15	7.71	0.26					
VER37	0.077	0.0130	446.0	8	1	2.1	0.16	7.5	288.0				
0.000	0.020	0.920	4	5	1.72	2.82	2.95	0.00					
VER38	0.092	0.0184	450.0	8	0	2.4	0.20	7.7	293.0				
0.000	0.040	0.910	5	5	1.62	2.45	2.79	0.00					
VER39	0.081	0.0127	415.0	7	4	3.3	0.78	12.4	247.0				
0.000	0.090	0.830	5	4	2.66	2.65	3.55	0.01					
VER40	0.835	0.2081	406.0	7	6	3.1	0.51	11.4	245.0				
0.000	0.050	0.880	0	4	2.20	2.75	3.72	0.05					
VER41	0.307	0.0150	416.0	7	4	2.0	0.08	7.7	281.0				
0.000	0.030	0.907	3	9	1.44	1.55	2.96	0.00					
VER42	0.225	0.0455	400.0	7	7	2.0	0.32	8.3	297.0				
0.000	0.010	0.840	3	3	1.65	3.60	3.21	0.01					
VER43	0.117	0.0136	449.0	8	1	2.3	0.21	7.3	293.0				
0.000	0.020	0.930	9	4	1.80	3.05	3.07	0.04					
VER44	0.970	0.0285	447.0	8	1	1.9	0.21	7.2	243.0				
0.000	0.020	0.940	7	4	1.62	2.85	3.12	0.00					
VER45	0.590	0.0310	404.0	7	9	2.0	0.20	7.1	264.0				
0.000	0.020	0.867	3	6	1.33	2.62	3.16	0.00					
VER46	0.077	0.0027	449.0	7	4	2.2	0.20	7.5	295.0				
0.000	0.010	0.940	7	5	1.51	2.60	2.99	0.00					
VER47	0.284	0.0126	473.0	8	0	2.1	0.21	7.8	305.0				
0.000	0.010	0.970	6	4	1.80	4.00	3.23	0.05					
VER48	0.189	0.0044	441.0	8	3	1.9	0.21	7.3	289.0				
0.000	0.020	0.930	9	4	1.47	2.35	3.18	0.00					
VER49	0.540	0.0080	431.0	8	3	2.4	0.40	2.1	288.0				
0.000	0.020	0.770	8	3	1.26	2.50	1.16	0.12					
VER50	0.570	0.0078	438.0	8	3	1.8	0.14	8.3	288.0				
0.000	0.030	0.950	5	4	1.15	1.90	3.14	0.05					
VER51	0.115	0.0071	443.0	8	0	3.9	0.14	8.6	284.0				
0.000	0.000	0.950	5	7	1.33	1.50	5.75	0.05					
VER52	0.660	0.0347	397.0	8	0	6.0	0.33	8.6	241.0				
0.000	0.000	0.870	4	3	0.99	2.00	6.71	0.82					
VER53	1.760	0.0097	404.0	8	4	5.1	0.17	7.9	250.0				
0.000	0.000	0.860	4	3	0.91	1.55	6.35	0.32					
VER54	0.705	0.0064	432.0	8	1	2.7	0.10	8.6	264.0				
0.000	0.000	0.970	0	5	1.14	1.10	5.29	0.10					
VER55	0.456	0.0074	434.0	8	2	2.7	0.13	8.7	262.0				
0.000	0.000	0.900	0	5	1.14	1.10	5.29	0.10					
0.000	0.000	0.900	0	5	1.14	1.10	5.29	0.10					

SiO2	SO4	Cl	N	Na	K	Mg*****	
A003	12.4	10.3	2.1	0.64	0.60	0.47	8.34
A004	12.4	10.9	1.7	0.68	0.67	0.47	8.36
A005	12.3	12.3	1.7	0.73	0.63	0.46	8.35
A006	12.3	12.6	1.6	0.70	0.67	0.44	8.02
A007	12.6	10.0	2.1	0.74	0.64	0.46	8.06
A008	12.5	10.9	1.7	0.78	0.67	0.47	8.36
A009	12.7	11.1	1.8	0.66	0.69	0.47	8.40
A010	12.5	10.2	1.8	0.64	0.66	0.46	8.35
A011	12.7	10.9	1.7	0.61	0.59	0.49	8.62
A012	12.8	10.3	1.6	0.67	0.68	0.48	8.65
A013	12.6	11.3	2.4	0.64	0.67	0.45	8.29
A014	12.6	10.5	1.6	0.66	0.67	0.45	8.39
A015	12.6	9.8	1.8	0.67	0.69	0.43	8.32
A016	12.7	8.9	1.9	0.75	0.67	0.45	8.32
A017	12.7	11.0	2.1	0.69	0.68	0.46	8.43
A018	12.8	11.3	1.8	0.71	0.67	0.48	8.34
A019	12.7	11.1	2.0	0.62	0.68	0.47	8.29
A020	12.7	12.0	1.6	0.69	0.72	0.47	8.32
A021	12.7	9.5	1.6	0.61	0.72	0.46	8.61
A022	12.8	10.3	1.5	0.61	0.70	0.45	8.37
A023	12.7	10.0	1.6	0.51	0.70	0.45	8.43
A024	12.8	11.3	1.5	0.87	0.70	0.48	8.36
A025	12.6	12.3	1.7	0.63	0.71	0.46	8.31
A026	13.0	10.7	1.6	0.74	0.71	0.44	8.36
A028	13.0	8.8	1.7	0.97	0.72	0.47	8.26
A029	12.8	10.9	1.6	1.00	0.71	0.47	8.45
A030	13.0	11.1	1.7	0.98	0.79	0.52	8.25
A031	12.8	11.4	1.7	0.96	0.75	0.52	8.35
A032	13.0	9.5	1.8	0.86	0.83	0.59	8.34
A033	12.9	10.4	2.0	1.00	0.75	0.51	8.33
A034	12.9	11.0	1.6	0.98	0.72	0.54	8.41
A035	12.9	10.9	1.9	0.98	0.92	0.55	8.37
A036	12.9	8.5	2.1	0.96	0.87	0.51	8.42
A037	12.9	11.6	1.8	0.96	0.82	0.48	8.22
A038	12.9	8.9	1.8	1.06	0.86	0.50	8.25
A039	13.1	10.5	1.9	0.97	0.96	0.58	8.28
A040	13.3	10.4	1.6	0.98	0.80	0.49	8.30
A041	13.0	10.6	1.6	0.94	0.81	0.50	8.25
A042	14.0	11.1	1.6	0.98	0.77	0.54	8.26
A043	13.1	9.2	1.5	0.91	0.79	0.49	8.21
A044	13.0	11.7	1.6	0.94	0.80	0.51	8.29
A045	13.5	11.0	1.5	0.91	0.71	0.49	8.37
A046	13.7	10.5	1.7	0.91	0.80	0.54	8.35
A047	13.3	9.5	1.6	0.87	0.78	0.52	8.42
A048	13.1	11.6	1.7	0.90	0.80	0.55	8.34
A049	13.1	12.2	1.7	1.06	0.76	0.66	8.26
A050	13.0	11.9	2.1	0.82	0.98	0.57	8.26
A051	12.9	10.1	1.9	0.90	0.70	0.51	8.32
A052	13.2	9.7	1.6	0.82	0.89	0.50	8.30

A053	13.3	9.7	1.7	0.68	0.85	0.50	8.29
A054	13.3	10.5	1.9	0.78	0.85	0.47	8.29
A055	13.3	11.1	2.3	0.56	0.84	0.48	8.37
A057	12.8	13.5	2.2	0.25	0.82	0.35	8.27
A058	13.2	13.8	3.1	0.32	0.83	0.35	8.35
A059	12.8	12.9	2.9	0.41	0.85	0.39	8.40
A060	12.9	11.6	3.0	0.46	0.84	0.36	8.21
A061	13.2	11.9	2.7	0.36	0.84	0.47	8.32
A062	12.9	11.9	2.9	0.44	0.84	0.48	8.26
A063	13.2	12.6	2.3	0.36	0.85	0.43	8.45
A064	13.1	12.7	4.4	0.41	0.86	0.47	8.35
A065	13.3	13.7	4.6	0.42	0.85	0.51	8.32
A066	13.1	13.5	2.6	0.44	0.85	0.49	8.72
A067	13.6	13.8	3.8	0.49	0.85	0.49	8.26
A068	13.8	14.0	2.2	0.41	0.87	0.51	8.29
A069	13.7	16.0	3.6	0.42	0.86	0.55	8.17
A070	13.5	16.7	2.2	0.41	0.86	0.50	8.17
A071	13.5	15.4	3.0	0.47	0.87	0.50	8.67
A072	13.1	15.5	2.8	0.36	0.83	0.47	8.36
A073	13.6	15.1	2.1	0.30	0.84	0.59	8.45
A074	13.9	13.2	5.4	0.29	0.86	0.52	8.29
A075	13.4	16.9	2.5	0.54	0.85	0.53	8.46
A076	13.5	15.0	2.3	0.39	0.85	0.51	8.57
A077	13.5	16.2	2.1	0.50	0.86	0.59	8.26
A078	13.4	15.6	3.8	0.65	0.87	0.63	8.18
A079	13.4	16.1	2.6	0.47	0.89	0.62	8.82
A080	13.7	14.9	2.7	0.43	0.87	0.63	8.33
A081	14.0	15.3	2.9	0.49	0.89	0.63	8.26
A082	13.9	16.8	2.3	0.36	0.85	0.61	8.19
A083	13.7	17.1	2.3	0.38	0.87	0.65	8.48
A084	13.9	15.4	3.6	0.46	0.86	0.61	8.60
A086	12.8	12.2	3.7	0.54	0.81	0.40	8.53
A087	13.6	16.1	2.1	0.29	0.84	0.61	8.27
A088	13.8	14.9	1.6	0.51	0.87	0.61	8.20
A089	13.4	16.2	2.5	0.52	0.84	0.60	8.23
A090	13.7	13.3	1.6	0.28	0.86	0.57	8.22
A091	13.7	15.1	1.8	0.24	0.83	0.61	8.44
A092	14.0	16.2	3.2	0.32	0.86	0.62	8.35
A093	13.8	12.3	2.4	0.22	0.86	0.62	8.29
A094	13.9	16.5	2.3	0.33	0.86	0.61	8.35
A095	13.7	16.5	2.1	0.24	0.86	0.61	8.28
A096	13.7	16.8	2.8	0.25	0.83	0.60	8.26
A097	13.9	14.5	3.0	0.08	0.84	0.61	8.40
A098	14.1	17.3	3.4	0.26	0.86	0.62	8.37
A099	14.1	14.6	2.3	0.28	0.87	0.63	8.35
A100	14.3	16.1	2.4	0.24	0.85	0.62	8.29
A101	14.2	15.4	1.4	0.26	0.85	0.62	8.29
A102	14.2	12.2	3.2	0.26	0.86	0.63	8.32
A103	14.4	16.2	1.5	0.22	0.86	0.64	8.37
A104	14.5	16.8	1.5	0.23	0.84	0.62	8.58
A105	14.2	18.4	1.8	0.40	0.87	0.63	8.33
A106	12.1	16.1	2.1	0.33	0.87	0.61	8.22

3 JUILLET - 17 SEPTEMBRE 1981
AUREL QUOTIDIEN

GROSEAU QUOTIDIEN
12 OCTOBRE 1981 - 7 JANVIER 1982

6135	0.09	6.10	5.9	4.5	0.11	0.96	0.14	3.04
6136	0.11	6.18	7.2	4.3	0.14	1.01	0.17	3.05
6137	0.09	6.17	6.4	3.9	0.18	0.99	0.15	3.24
6138	0.09	6.26	6.4	3.9	0.19	0.97	0.15	3.27
6139	0.08	6.25	7.5	3.6	0.19	0.98	0.14	3.24
6140	0.10	6.27	6.3	2.9	0.14	0.97	0.14	3.27
6141	0.12	6.28	6.3	3.7	0.15	0.97	0.15	3.16
6142	0.11	5.93	5.8	3.9	0.13	0.98	0.14	3.26
6143	0.11	6.19	7.1	4.4	0.12	0.97	0.14	3.24
6144	0.11	6.28	6.4	4.2	0.15	0.96	0.13	3.25
6145	0.11	6.12	6.1	3.9	0.11	0.96	0.14	3.24
6146	0.12	6.02	6.3	3.7	0.18	0.97	0.15	3.24
6147	0.11	6.20	6.5	3.4	0.13	0.96	0.14	3.26
6148	0.12	6.28	7.1	3.8	0.09	0.96	0.15	3.16
6149	0.13	6.15	6.5	3.7	0.15	0.98	0.14	3.18
6150	0.11	6.17	5.6	3.4	0.21	0.96	0.16	3.16
6151	0.09	6.25	6.4	5.9	0.11	0.97	0.14	3.22
6152	0.10	6.16	6.7	3.4	0.09	0.96	0.14	3.16
6153	0.10	6.15	6.3	2.4	0.16	0.96	0.15	3.22
6154	0.11	6.34	6.8	2.8	0.15	0.96	0.14	3.23
6155	0.09	6.24	6.5	3.7	0.09	0.97	0.19	3.26
6156	0.10	6.25	6.3	3.7	0.13	0.96	0.18	3.21
6157	0.10	6.19	6.1	3.6	0.15	0.96	0.18	3.23
6158	0.09	6.07	5.9	3.4	0.15	0.97	0.19	3.20
6159	0.10	6.34	6.9	4.0	0.12	0.96	0.19	3.20
6160	0.08	6.14	6.0	3.7	0.10	0.97	0.19	3.21
6161	0.09	6.09	7.5	4.4	0.13	0.95	0.19	3.22
6162	0.09	6.09	6.3	4.2	0.10	0.96	0.20	3.17
6163	0.09	6.24	6.5	3.1	0.10	0.97	0.20	3.16
6164	0.09	6.14	6.4	3.7	0.11	0.96	0.19	3.14
6165	0.09	6.20	6.3	3.2	0.24	0.99	0.24	3.07
6166	0.09	6.21	6.1	3.6	0.17	0.96	0.19	3.12
6167	0.08	6.11	6.1	3.6	0.17	0.96	0.20	3.18
6168	0.08	6.29	6.1	4.8	0.17	0.97	0.20	3.11
6169	0.08	6.13	6.4	5.8	0.17	0.97	0.19	3.17
6170	0.09	6.65	5.7	4.0	0.17	0.98	0.19	3.19
6171	0.08	6.68	5.1	4.2	0.19	0.97	0.20	3.20
6172	0.09	6.64	6.0	5.1	0.17	0.95	0.19	3.23
6173	0.07	6.73	5.5	3.6	0.11	0.95	0.19	3.20
6174	0.09	6.56	5.2	3.8	0.18	0.95	0.18	3.28
6175	0.08	6.39	5.4	5.9	0.11	0.95	0.19	3.15
6176	0.09	6.56	4.6	5.5	0.19	0.94	0.18	3.16
6177	0.09	6.61	5.6	4.2	0.13	0.94	0.19	3.16
6178	0.10	6.57	5.4	4.1	0.12	0.95	0.18	3.20
6179	0.10	6.67	4.8	4.3	0.24	0.94	0.17	3.16
6180	0.11	6.61	5.1	4.3	0.22	0.95	0.17	3.17
6181	0.10	6.61	5.2	4.5	0.18	0.95	0.16	3.12
6182	0.10	6.68	5.2	4.4	0.15	0.95	0.17	3.17
6183	0.10	6.62	5.1	4.5	0.17	0.94	0.17	3.16
6184	0.09	6.48	5.4	4.7	0.20	0.98	0.17	3.23
6185	0.09	6.71	5.5	4.2	0.17	0.98	0.17	3.21
6186	0.09	6.78	5.4	4.3	0.18	0.95	0.17	3.17
6187	0.09	6.61	5.2	4.2	0.19	0.96	0.17	3.12
6188	0.11	6.60	5.1	4.4	0.18	0.96	0.17	3.14
6189	0.11	6.43	5.2	4.1	0.15	0.97	0.16	3.12
6190	0.12	6.50	4.8	4.2	0.15	1.00	0.22	3.11
6191	0.11	6.51	5.1	4.2	0.30	0.96	0.17	3.14
6192	0.11	6.51	5.1	4.4	0.19	0.96	0.18	3.19
6193	0.12	6.83	5.0	4.0	0.24	0.96	0.18	3.29
6194	0.10	6.75	5.0	4.1	0.21	0.95	0.17	3.23
6195	0.09	6.57	5.6	4.0	0.15	0.97	0.17	3.13
6196	0.11	6.39	4.6	4.3	0.16	0.95	0.18	3.12
6197	0.10	6.52	5.2	4.3	0.17	0.96	0.17	3.12
6198	0.12	6.61	4.8	3.7	0.14	0.95	0.17	3.27
6199	0.10	6.51	4.1	3.8	0.13	0.96	0.17	3.12

Sr	Mn	SiO2	SO4	Cl	N	Na	K	Mg	*****
6200	0.12	0.00021	6.52	5.4	3.8	0.19	0.95	0.17	3.37
6201	0.12	0.00013	6.94	4.9	4.3	0.20	0.96	0.17	3.16
6202	0.12	0.00014	6.68	5.1	3.9	0.17	0.95	0.17	3.72
6203	0.11	0.00027	6.57	4.9	4.4	0.20	0.96	0.18	3.18
6204	0.12	0.00031	6.53	5.0	4.3	0.20	0.95	0.17	3.17
6205	0.10	0.00199	6.57	5.0	4.7	0.20	0.95	0.18	3.57
6206	0.12	0.00045	6.71	5.7	4.2	0.20	0.95	0.19	3.25
6207	0.14	0.00031	6.55	5.1	4.1	0.18	0.96	0.18	3.17
6208	0.12	0.00030	6.60	5.6	4.7	0.15	0.94	0.19	3.28
6209	0.12	0.00025	6.47	5.1	4.4	0.15	0.95	0.19	3.18
6210	0.10	0.00027	6.38	5.1	4.4	0.19	0.95	0.17	3.25
6211	0.11	0.00049	6.60	4.6	4.4	0.20	0.95	0.19	3.23
6212	0.10	0.00173	6.57	7.6	4.1	0.27	0.95	0.19	3.25
6213	0.11	0.00021	6.55	5.9	4.6	0.20	0.94	0.19	3.21
6214	0.11	0.00021	6.55	5.6	5.0	0.13	0.94	0.18	3.15
6215	0.11	0.00018	6.48	5.5	4.3	0.19	0.95	0.20	3.16
6216	0.11	0.00092	6.43	5.5	4.8	0.00	1.01	0.25	3.20
6217	0.10	0.00334	6.52	5.1	4.2	0.15	1.09	0.38	3.35
6218	0.08	0.00149	6.57	3.5	5.1	0.15	1.05	0.25	3.25
6219	0.10	0.00063	6.60	5.2	6.2	0.00	1.04	0.27	3.25
6220	0.11	0.00056	6.58	5.7	7.6	0.00	1.03	0.24	3.22
6221	0.12	0.00074	6.68	5.4	4.0	0.00	1.07	0.27	3.27
6222	0.10	0.00070	6.63	5.0	4.3	0.12	1.02	0.23	3.22
6223	0.09	0.00111	6.55	4.8	4.6	0.00	1.09	0.24	3.21
6224	0.10	0.00039	6.53	4.9	5.4	0.20	1.06	0.22	3.20
6225	0.10	0.00043	6.52	5.1	4.6	0.00	1.09	0.23	3.17
6226	0.09	0.00044	6.53	4.6	4.5	0.00	1.09	0.26	3.18
6227	0.09	0.00032	6.53	5.2	4.9	0.00	1.01	0.23	3.17
6228	0.08	0.00032	6.54	5.2	6.2	0.00	0.99	0.21	3.20
6229	0.10	0.00046	6.43	5.5	6.5	0.00	1.03	0.22	3.16
6230	0.11	0.00010	6.54	4.8	5.7	0.24	1.00	0.19	3.13
6231	0.11	0.00022	6.51	4.4	4.7	0.00	1.00	0.20	3.18
6232	0.10	0.00016	6.71	4.1	5.0	0.00	1.00	0.20	3.17
6233	0.11	0.00027	6.81	3.9	4.1	0.15	1.01	0.20	3.18
6234	0.09	0.00016	6.43	4.6	4.9	0.00	0.98	0.22	3.19
6235	0.09	0.00032	6.39	4.1	4.1	0.00	1.02	0.23	3.22
6236	0.10	0.00029	6.54	4.3	4.6	0.00	0.99	0.19	3.18
6237	0.10	0.00022	6.63	4.1	5.9	0.00	1.00	0.19	3.18
6238	0.09	0.00033	6.60	4.1	4.3	0.33	1.02	0.21	3.21
6239	0.09	0.00028	6.51	4.4	5.2	0.28	1.08	0.24	3.12
6240	0.08	0.00027	6.51	4.1	4.3	0.41	1.07	0.25	3.19
6241	0.09	0.00017	6.51	3.9	4.7	0.37	1.03	0.26	3.20
6242	0.08	0.00015	6.51	3.9	4.4	0.30	1.05	0.20	3.20
6243	0.07	0.00029	6.52	4.6	4.2	0.31	1.04	0.20	3.24
6244	0.06	0.00023	6.52	4.3	4.4	0.30	1.06	0.20	3.19
6245	0.06	0.00023	6.52	4.4	4.7	0.21	0.99	0.18	3.22
6246	0.05	0.00045	6.47	3.5	5.0	0.23	1.01	0.22	3.21
6247	0.09	0.00024	6.58	4.3	5.1	0.14	0.97	0.18	3.16
6248	0.08	0.00027	6.39	4.3	5.3	0.24	1.02	0.19	3.17
6249	0.11	0.00030	6.50	4.1	4.5	0.20	1.07	0.18	3.16
6250	0.12	0.00232	6.40	3.9	4.6	0.23	1.04	0.21	3.28
6251	0.09	0.00034	6.33	4.3	4.6	0.20	1.02	0.20	3.19
6252	0.11	0.00032	6.35	3.9	4.3	0.03	1.01	0.19	3.14
6253	0.10	0.00021	6.42	4.3	4.9	0.01	1.02	0.19	3.10
6254	0.09	0.00077	6.25	5.0	3.6	0.00	1.01	0.21	3.09
6255	0.08	0.00057	6.23	4.1	5.1	0.17	0.99	0.19	3.08
6256	0.09	0.00035	6.50	4.1	4.6	0.13	0.99	0.22	3.06
6257	0.08	0.00036	5.65	3.9	5.9	0.04	0.97	0.21	3.09
6258	0.09	0.00026	5.96	4.6	4.1	0.18	0.96	0.20	3.06

ANNEXE 3 :

COEFFICIENT DE CORRELATION DE RANG DE SPEARMAN

Le coefficient de corrélation de Spearman est un test non paramétrique qui se propose de comparer deux séries de données en se fondant sur le rang des observations dans chacune des séries.

Son expression est la suivante :

$$r_s = 1 - \frac{\frac{1}{6} \sum d_i^2}{n(n^2-1)}$$

avec : n = effectif commun aux 2 séries

d_i = différence de rang, pour l'individu i, entre les 2 séries d_i = r₂-r₁

Les seuils de signification sont donnés par la table de Kendall pour les effectifs de 6 à 10 individus, par la table de Snedecor au-delà (MANGIN 1981).

L'intérêt de ce coefficient est grand pour comparer des séries de rangs là où des valeurs numériques absolues n'ont pas de relations linéaire, les grandes valeurs étant par exemple aléatoires.

On peut ainsi tester par cette méthode la représentativité d'une campagne par rapport à d'autres...

DL	Seuil de 5%	Seuil de 1%
4 ou moins	--	--
5	1.000	--
6	0.886	1.000
7	0.750	0.893
8	0.714	0.857
9	0.683	0.833
10	0.643	0.794

DL	Seuil de 5%	Seuil de 1%
11	0,5529	0,6835
12	0,5324	0,6614
13	0,5139	0,6411
14	0,4973	0,6226
15	0,4821	0,6055
16	0,4683	0,5897
17	0,4555	0,5751
18	0,4438	0,5614
19	0,4329	0,5487
20	0,4227	0,5368
25	0,3809	0,4869
30	0,3494	0,4487
35	0,3246	0,4182
40	0,3044	0,3932
45	0,2875	0,3721
50	0,2732	0,3541
60	0,2500	0,3248
70	0,2319	0,3017
80	0,2172	0,2830
90	0,2050	0,2673
100	0,1946	0,2540



ANNEXE 4 :

ANALYSE DISCRIMINANTE

Cette analyse multidimensionnelle aussi appelée analyse canonique (LEFEBVRE 1980) repose sur la comparaison de groupes définis de manière inférentielle ou à l'issue d'autres analyses multidimensionnelles (ACP, AFC).

Elle se propose de comparer la covariance interpopulations (ou intergroupes) à la covariance intrapopulations (ou intragroupes) pour tester l'adéquation du choix des groupes.

Exemple : données de l'étiage 1981 à la Fontaine de Vaucluse (voir p. 106 et MUDRY et BLAVOUX 1986).

GRANDEURS STATISTIQUES DES QUATRE GROUPES ANALYSES

DECRUE

VARIABLE	MINIMUM	MAXIMUM	MOYENNE	VARIANCE	Ecart TYPE
Na	1.6000	2.1400	1.8620	.20679E-01	.1438
K	.3100	.3900	.3376	.32576E-03	.0180
Sr	.2500	.4000	.3190	.15647E-02	.0369
Mg	4.8200	6.6600	5.3600	.16713E+00	.4326
Cl	2.9500	4.1500	3.4885	.86476E-01	.2941
Su4	9.3000	14.2000	11.7975	.15163E+01	1.1473
N	.2600	.5600	.4075	.58632E-02	.0622
SUP	6.5400	8.1800	7.1424	.30553E+00	.5508
Debut	7.1100	9.7600	8.4085	.65506E+00	.8277

GRANDEURS STATISTIQUES DES QUATRE GROUPEES ANALYSES (SUITE)

TARISSEMENT

VARIABLE	MINIMUM	MAXIMUM	MOYENNE	VARIANCE	Ecart TYPE
Na	1 600	2 260	2 005	16654E-01*	1290
K	300	410	350	22644E-03*	0147
Sr	2700	3300	3000	18800E-03*	0130
Mg	6 000	6 920	6 5465	62477E-01*	2500
Cl	3 040	4 250	3 435	10279E+00*	3206
S04	13 400	19 100	14 600	11224E+01*	1 0595
N	2200	5900	4783	18237E-02*	0907
S02	7 000	8 660	7 825	1308E+00*	3618
Debit	5 640	6 710	6 075	6876E-01*	2479

CRUE D' AUTOMNE

VARIABLE	MINIMUM	MAXIMUM	MOYENNE	VARIANCE	Ecart TYPE
Na	2 020	2 460	2 202	93514E-02*	0967
K	1280	1390	1344	3737E-03*	0193
Sr	2900	3300	3124	86734E-04*	0093
Mg	5 640	7 300	7 075	3880E-01*	1964
Cl	3 300	5 560	3 789	25485E+00*	5048
S04	14 500	20 500	15 382	15970E+01*	1 2637
N	4600	7300	5893	27454E-02*	0524
S02	5 270	8 640	7 6105	17008E+00*	1827
Debit	5 270	8 250	6 2905	74631E+00*	1839

GRANDEURS STATISTIQUES DES QUATRE GROUPES ANALYSES (FIN)

```

*****
*      *      *      *      *      *      *      *      *
* VARIABLE * MINIMUM * MAXIMUM * MOYENNE * VARIANCE * ECART *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      Na *      1.3400 *      2.8000 *      2.3976 * .77272E-01 *      .2780 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      K *      .3000 *      5000 *      .3715 * .23442E-02 *      .0484 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      Sr *      .1500 *      .3400 *      .2949 * 27664E-02 *      .0526 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      Mg *      2.3200 *      6.4000 *      6.6105 * .22926E+01 *      1.5141 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      Cl *      4.6000 *      10.4000 *      5.7341 * .96371E+00 *      .9817 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      SO4 *      10.0000 *      15.4000 *      13.6854 * 30076E+01 *      1.7342 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      N *      .2700 *      1.1400 *      .6359 * .25351E-01 *      .1592 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      SiO2 *      5.6700 *      8.0400 *      7.2859 * .38760E+00 *      .6226 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*      Debit *      4.1700 *      50.7000 *      21.5173 * .20297E+03 *      14.2469 *
*      *      *      *      *      *      *      *      *
*****
    
```

CRUE D' HIVER

MATRICE DES CENTRES DE GRAVITE DES GROUPES

Les centres de gravité ne sont autres que les vecteurs point moyen des divers groupes.

Composantes de ces vecteurs :

	Na	K	Sr	Mg	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	N	SiO ₂	Débit
DECRUE	1.86	0.34	0.32	5.36	3.49	11.71	0.47	7.14	8.41
TARISSEMENT	2.01	0.35	0.31	6.55	3.44	14.60	0.48	7.70	6.10
CRUE AUTOMNE	2.20	0.34	0.31	7.07	3.78	15.38	0.59	7.61	6.29
CRUE HIVER	2.40	0.37	0.29	6.61	5.73	13.69	0.63	7.29	22.52

COORDONNEES ET REAFFECTATION DES INDIVIDUS ANALYSES

INDIV	GROUPES	DISTANCE	AXES	1	2	3
	(L1, L2)	(L1, L2)				
0021	1 1	11029	-1.17624	.21223	.99264	.15115
0031	1 1	12952	-1.26365	.28936	.87871	.13559
0041	1 1	152776	-1.06455	.30996	.57324	.08988
0051	1 1	1.11837	-1.20770	.13192	.86451	.06760
0071	2 2	1.24722	-.64438	.04672	-.33986	.01300
0081	2 2	26947	-.19712	.01830	-.79857	.30035
0091	2 2	02982	-.33565	.02994	-.72714	.14052
0101	2 2	27526	-.34269	.04131	-.53507	.10072
0131	3 2	27028	-.05099	.00093	-.76573	.20992
0141	3 3	68588	.34007	.04188	-1.39074	.70049
0151	3 3	19984	.24451	.00255	-.56561	.01366
0161	3 3	1.80724	.34257	.00551	-2.29507	.24755
0231	4 3	1.41178	.82723	.11738	-.21455	.00790
0241	4 4	1.26877	1.09726	.17464	-.12595	.00233
0251	4 4	1.61438	1.75309	.29703	1.33070	.17075
0261	4 4	.58190	.53862	.02766	.95224	.08645
0271	4 4	4.76115	.84092	.01291	.84151	.01293
0333	3 2	57929	-.11793	.00442	-.97591	.30237
0073	2 2	20537	-.69138	.07279	-.46889	.03345
0143	3 3	32678	.41475	.03269	-1.46382	.40720
0043	1 1	1.41616	-1.27752	.19647	2.02857	.49537
0153	3 3	.09305	.16959	.00767	-.74109	.14645
0083	2 3	1.22542	-.41902	.13293	-.18054	.03468
0163	3 3	6.23126	.71381	.02513	-1.31943	.08513
0033	1 1	.53103	-1.37989	.30221	1.52302	.27781
0233	4 4	1.25294	.86106	.05646	.41001	.01280
0093	2 2	.07176	-.58828	.13891	-.79887	.28444
0143	4 4	1.51432	1.28459	.20500	-.11561	.00166
0053	1 1	42634	-1.52119	.14059	1.24998	.12584
0253	4 4	.86113	2.19218	.25434	1.19576	.07588
0103	2 2	.27644	-.16318	.01095	-1.09049	.48906
0263	4 4	1.62154	1.80937	.15262	1.91787	.14900
0023	1 1	.18442	-1.34760	.28381	1.12095	.19637
0035	1 1	1.52456	-1.49700	.12639	1.05202	.06242
0105	2 2	.15687	-.31703	.01750	-1.01596	.17971
0165	3 3	2.20337	.59961	.04676	-.99621	.12907
0055	1 1	1.23810	-1.02967	.21400	.91110	.16755
0085	2 3	.67227	-.34409	.04354	-.65022	.15405
0235	4 4	1.59202	.68486	.03376	.32068	.00740
0135	3 3	.17295	.17046	.00657	-1.30952	.38757
0045	1 1	3.29544	-1.80707	.20300	1.63886	.16697
0245	4 4	1.79750	1.21500	.09709	.29066	.00568
0025	1 1	.99680	-1.67818	.27279	1.04324	.15631
0145	3 3	.17088	.29566	.05107	-1.12506	.73950
0255	4 4	.24637	1.50356	.17352	.52133	.02086
0095	2 2	.72943	-.40122	.05191	-.31884	.03278
0075	2 2	3.59741	-.51050	.01868	-.31672	.00719
0265	4 4	.87776	1.24398	.11345	1.72892	.21914
0135	3 3	.24339	.20801	.00683	-.58279	.05365
0097	2 2	.53847	-.35151	.01350	-1.03566	.13178
0037	1 1	.74028	-1.27915	.29490	.95449	.16420
0237	4 4	1.31363	.83535	.14993	.12665	.00345
0027	1 1	.37724	-1.34002	.33766	.40979	.03158
0147	3 3	.60530	.21499	.01915	-1.26335	.06135
0087	2 2	.57403	-.14980	.01241	-.98374	.53730
0247	4 4	1.22922	1.67352	.12424	.87721	.03415
0107	2 2	.24503	-.20037	.00866	-1.00060	.21956
0127	3 3	.37448	-.05685	.00132	-.76669	.36184
0157	3 3	.29267	.30952	.10667	-.49944	.27773
0257	4 4	6.63207	2.46878	.11709	3.08703	.19231
0047	1 1	.56541	-1.49876	.24921	1.28523	.16325
0077	2 2	1.45181	-.50736	.02629	.23018	.00582
0057	1 1	1.87912	-.97702	.21381	.71395	.11524
0267	4 4	3.56575	1.40191	.09064	1.37097	.08668
0157	3 3	.12492	.52050	.03999	-.89110	.17036
0239	4 3	1.18289	.80929	.25373	-.06496	.00165
0149	3 3	.07923	.29303	.05202	-.73347	.32593
0079	2 2	1.6493	-.53440	.14692	-.37133	.08591
0129	3 3	.38716	.20693	.00670	-.47475	.03629
0059	2 2	1.17910	-.55847	.08086	-.27806	.02004
0249	4 4	.52337	1.88254	.32969	.94516	.08310
0039	1 1	.67618	-.93799	.25573	.18730	.01020
0159	3 3	.27384	.46982	.01088	-1.35720	.09083
0099	2 2	.05751	-.42311	.06664	-.41638	.06453
0049	1 1	.43268	-1.65750	.22635	1.34445	.14905
0259	4 4	.66984	.88414	.05597	1.08504	.14094
0139	3 3	.00480	.34667	.03947	-1.04267	.35701
0059	1 1	1.13495	-.91309	.10537	-.16541	.00344
0089	2 2	1.0209	-.44415	.11898	-.63921	.26211
0059	1 2	.75597	-.50540	.07654	-.25596	.01963
0269	4 4	1.44026	1.44459	.08698	1.12013	.05302
0109	2 2	21004	-.26360	.02317	-.33232	.03710
0020	1 1	10171	-1.48913	.20171	1.04477	.09929
0030	1 2	1.09487	-1.24597	.29499	-.11663	.00259
0040	1 1	.87107	-1.07040	.17234	.42140	.02671
0050	1 1	1.08332	-1.10431	.32227	.68455	.12384
						.77080
						.15701

COORDONNEES ET REAFFECTION DES INDIVIDUS ANALYSES (SUITE)

INDIV	GRUPPE	DISTANCE	AXES	INDIV	GRUPPE	DISTANCE	AXES
0060	1	1	1	0060	1	1	1
0070	2	2	2	0070	2	2	2
0080	3	3	3	0080	3	3	3
0090	4	4	4	0090	4	4	4
0100	5	5	5	0100	5	5	5
0110	6	6	6	0110	6	6	6
0120	7	7	7	0120	7	7	7
0130	8	8	8	0130	8	8	8
0140	9	9	9	0140	9	9	9
0150	10	10	10	0150	10	10	10
0160	11	11	11	0160	11	11	11
0170	12	12	12	0170	12	12	12
0180	13	13	13	0180	13	13	13
0190	14	14	14	0190	14	14	14
0200	15	15	15	0200	15	15	15
0210	16	16	16	0210	16	16	16
0220	17	17	17	0220	17	17	17
0230	18	18	18	0230	18	18	18
0240	19	19	19	0240	19	19	19
0250	20	20	20	0250	20	20	20
0260	21	21	21	0260	21	21	21
0270	22	22	22	0270	22	22	22
0280	23	23	23	0280	23	23	23
0290	24	24	24	0290	24	24	24
0300	25	25	25	0300	25	25	25
0310	26	26	26	0310	26	26	26
0320	27	27	27	0320	27	27	27
0330	28	28	28	0330	28	28	28
0340	29	29	29	0340	29	29	29
0350	30	30	30	0350	30	30	30
0360	31	31	31	0360	31	31	31
0370	32	32	32	0370	32	32	32
0380	33	33	33	0380	33	33	33
0390	34	34	34	0390	34	34	34
0400	35	35	35	0400	35	35	35
0410	36	36	36	0410	36	36	36
0420	37	37	37	0420	37	37	37
0430	38	38	38	0430	38	38	38
0440	39	39	39	0440	39	39	39
0450	40	40	40	0450	40	40	40
0460	41	41	41	0460	41	41	41
0470	42	42	42	0470	42	42	42
0480	43	43	43	0480	43	43	43
0490	44	44	44	0490	44	44	44
0500	45	45	45	0500	45	45	45
0510	46	46	46	0510	46	46	46
0520	47	47	47	0520	47	47	47
0530	48	48	48	0530	48	48	48
0540	49	49	49	0540	49	49	49
0550	50	50	50	0550	50	50	50
0560	51	51	51	0560	51	51	51
0570	52	52	52	0570	52	52	52
0580	53	53	53	0580	53	53	53
0590	54	54	54	0590	54	54	54
0600	55	55	55	0600	55	55	55
0610	56	56	56	0610	56	56	56
0620	57	57	57	0620	57	57	57
0630	58	58	58	0630	58	58	58
0640	59	59	59	0640	59	59	59
0650	60	60	60	0650	60	60	60
0660	61	61	61	0660	61	61	61
0670	62	62	62	0670	62	62	62
0680	63	63	63	0680	63	63	63
0690	64	64	64	0690	64	64	64
0700	65	65	65	0700	65	65	65
0710	66	66	66	0710	66	66	66
0720	67	67	67	0720	67	67	67
0730	68	68	68	0730	68	68	68
0740	69	69	69	0740	69	69	69
0750	70	70	70	0750	70	70	70
0760	71	71	71	0760	71	71	71
0770	72	72	72	0770	72	72	72
0780	73	73	73	0780	73	73	73
0790	74	74	74	0790	74	74	74
0800	75	75	75	0800	75	75	75
0810	76	76	76	0810	76	76	76
0820	77	77	77	0820	77	77	77
0830	78	78	78	0830	78	78	78
0840	79	79	79	0840	79	79	79
0850	80	80	80	0850	80	80	80
0860	81	81	81	0860	81	81	81
0870	82	82	82	0870	82	82	82
0880	83	83	83	0880	83	83	83
0890	84	84	84	0890	84	84	84
0900	85	85	85	0900	85	85	85
0910	86	86	86	0910	86	86	86
0920	87	87	87	0920	87	87	87
0930	88	88	88	0930	88	88	88
0940	89	89	89	0940	89	89	89
0950	90	90	90	0950	90	90	90
0960	91	91	91	0960	91	91	91
0970	92	92	92	0970	92	92	92
0980	93	93	93	0980	93	93	93
0990	94	94	94	0990	94	94	94
1000	95	95	95	1000	95	95	95

COORDONNEES ET CLASSIFICATION (AFFECTATION) DES INDIVIDUS
SUPPLEMENTAIRES

L'interprétation de ces données est fournie p.113

INDIV	GRUPE	DISTANCE	AXES	1	2	3
0061	2 TARETE	49401	-81785	09484	-08304	00100
0062	2 TARETE	69197	-77614	09704	-20214	00655
0063	1 DECRUE	99854	-69953	03166	00381	00000
0064	2 TARETE	85478	-87799	09039	-27322	00875
0065	2 TARETE	311059	-79364	06496	-09297	00049
0066	2 TARETE	70967	-62006	05228	-91217	03567
0067	2 TARETE	01395	-36369	02129	-70814	08073
0068	2 TARETE	20017	-66290	10321	-34350	02771
0110	3 CRUAUT	117659	-11490	00482	-01651	00010
0111	3 CRUAUT	48178	-25609	00729	-85447	08112
0112	2 TARETE	39198	-12562	00373	-56403	07511
0113	3 CRUAUT	42837	02895	00020	-55142	07313
0114	3 CRUAUT	57670	-17404	00696	-99825	22732
0115	3 CRUAUT	50666	02479	00018	-72496	15297
0116	3 CRUAUT	42618	-25414	03802	-71871	30403
0117	3 CRUAUT	146130	23844	00505	-84948	03873
0118	3 CRUAUT	37335	-06685	00023	-56039	01522
0119	2 TARETE	06792	-27343	03640	-61432	18373
0120	2 TARETE	15613	-26956	05202	-57044	23294
0121	3 CRUAUT	56266	-10495	00417	-70646	18901
0122	3 CRUAUT	165412	37001	00577	-60905	01558
0123	2 TARETE	74315	08923	00192	-34957	02947
0124	3 CRUAUT	83250	-19140	00674	-24265	01405
0125	3 CRUAUT	28663	-07093	00147	-62235	11330
0127	3 CRUAUT	173909	62369	06353	-134753	16994
0168	3 CRUAUT	367253	39905	07071	-10551	10674
0169	3 CRUAUT	549425	91745	04213	-07842	00031
0170	3 CRUAUT	19193	23729	00570	-64495	04361
0171	3 CRUAUT	225512	-51614	02836	-91451	08911
0172	3 CRUAUT	102532	56432	06531	-77389	12282
0173	3 CRUAUT	115858	67167	09588	-106001	22520
0174	3 CRUAUT	345258	00182	05492	-96456	07944
0175	3 CRUAUT	278914	54296	02467	-74729	04673
0176	3 CRUAUT	88660	21126	00027	-52008	05012
0177	3 CRUAUT	285292	63263	02474	-40629	01031
0178	3 CRUAUT	422525	92688	07527	-91191	07286
0179	3 CRUAUT	447184	51167	01976	-38277	01107
0180	3 CRUAUT	1144825	107618	05030	-80008	02808
0181	3 CRUAUT	943775	185492	03483	-43847	00916
0182	3 CRUAUT	202391	62820	06250	-93071	14314
0183	3 CRUAUT	411443	34653	04664	-65747	06856
0184	3 CRUAUT	298152	71517	07004	-114668	18006
0185	3 CRUAUT	318955	49967	03209	-66148	05623
0186	3 CRUAUT	106879	58399	09394	-66343	12124
0187	3 CRUAUT	154634	69136	07880	-117467	22747
0188	3 CRUAUT	30746	44101	05933	-73199	16344
0189	1 DECRUE	1313674	-43901	00452	128473	03873
0190	3 CRUAUT	73222	107399	16561	-67030	06451
0191	3 CRUAUT	117725	59722	00040	-25360	01091
0192	1 DECRUE	740545	-71475	01017	13586	00037
0193	3 CRUAUT	261504	73952	06739	-35888	01415
0194	3 CRUAUT	238209	69318	05570	-63895	04733
0195	3 CRUAUT	284992	90050	06566	-18045	00344
0196	3 CRUAUT	663209	89478	05931	59340	02608
0197	1 DECRUE	1194084	-53851	00768	73143	01417
0198	3 CRUAUT	249140	88089	07822	-12377	00154
0199	4 CRUHVU	157970	40550	00645	48743	00931
0200	2 TARETE	75879	22327	01177	-14277	00481
0201	3 CRUAUT	421288	92156	06750	-10737	00092
0202	3 CRUAUT	1096540	44362	01024	78081	03168
0203	3 CRUAUT	364107	83081	06750	-06596	00043
0204	3 CRUAUT	830366	33147	00634	67012	02589
0205	3 CRUAUT	262722	102677	07572	18476	00246
0206	1 DECRUE	851147	-53199	00693	78085	01494
0207	3 CRUAUT	304783	84902	08421	14220	00236
0208	3 CRUAUT	545429	84162	06038	25285	00462
0209	4 CRUHVU	281744	72406	04562	93379	07254
0210	3 CRUAUT	146545	56066	06837	08450	00155
0211	3 CRUAUT	376434	117341	06359	23617	00339
0212	3 CRUAUT	149132	82043	08773	-44308	02559
0213	4 CRUHVU	328913	180301	04153	104052	06972
0214	3 CRUAUT	186993	101801	09223	-57363	02928
0215	4 CRUHVU	603973	153035	07405	89206	02516
0216	3 CRUAUT	423661	114204	09294	-30221	00651
0217	3 CRUAUT	322957	84053	07567	16618	00296
0218	3 CRUAUT	143378	62387	11139	-04405	00032
0219	3 CRUAUT	153051	64519	12601	-09146	00150
0220	3 CRUAUT	572431	138398	11803	02531	00004
0221	3 CRUAUT	908939	138411	09020	-29538	00411
0222	3 CRUAUT	417774	103476	04367	03796	00006
0223	3 CRUAUT	416321	73786	03524	-19721	00259
0224	4 CRUHVU	142947	62369	03168	63782	03316
0225	4 CRUHVU	154915	28105	00647	22615	00419
0226	3 CRUAUT	191937	110039	14025	-32124	01195
0227	4 CRUHVU	228603	79727	08924	38695	01156
0228	4 CRUHVU	158890	106473	08824	28797	00622
0229	3 CRUAUT	44977	30056	10123	-46823	06153
0230	3 CRUAUT	122535	110414	15138	-24056	00721

ANNEXE 5 :

CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE

Contrairement à la représentation graphique de plans factoriels qui fait appel à la projection d'un espace multidimensionnel sur ses directions d'allongement principal (ou facteurs), les classifications automatiques reposent sur la distance réelle entre les points d'un nuage multidimensionnel, chacun des points étant un vecteur dont les composantes sont les valeurs des différents descripteurs.

Cette méthode a été mise en oeuvre après une analyse factorielle des correspondances, c'est-à-dire que la métrique utilisée n'est pas une métrique euclidienne classique, mais une métrique du khi-deux. Cette métrique a été choisie car elle permet la représentation, dans le même nuage de points des individus (prélèvements) et des descripteurs (éléments chimiques). Ce mode d'analyse présente le même défaut que l'AFC : la perte des variables continues.

Les teneurs physico-chimiques et isotopiques des prélèvements sont tout d'abord discrétisées par entrée dans des classes. Les probabilités expérimentales de la matrice sont ensuite comparées aux probabilités marginales (en lignes et en colonnes), les distances entre points (entre individus, entre variables et entre individus et variables) sont ensuite calculées.

La classification ascendante hiérarchique agglomère ensuite les points en commençant par les plus proches, c'est-à-dire ceux qui sont à la plus faible distance dans l'espace multidimensionnel. Quand deux points sont agglomérés, leur centre de gravité représente l'ensemble, il est affecté d'un coefficient 2. L'algorithme compare ensuite les distances entre points et barycentres et choisit la plus petite distance. Chaque agglomération se fait à un noeud, et les noeuds sont numérotés à partir de $5n + m + 1$ (dans le cas de m individus analysés avec n descripteurs rangés dans 5 classes) ; plus le numéro est faible et plus les points auront été précocement agglomérés. Le noeud de numéro le plus élevé correspond à une super-classe contenant tous les points. On peut alors couper la hiérarchie afin d'obtenir une partition de l'effectif total en plusieurs classes. Sur l'exemple ci-dessous, où les lettres représentent des individus et des caractères discrétisés, on obtient 5 classes renfermant chacune des individus caractérisés par les modalités des descripteurs. (voir p. 259)

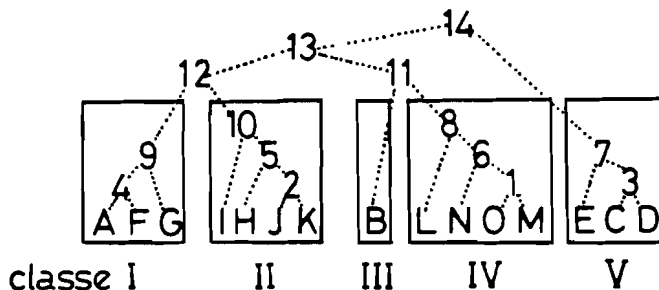


Fig. 244 : CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE : AGGLOMERATION DES INDIVIDUS ET DES DESCRIPTEURS

ANNEXE 6 : FICHIERS DE DONNEES ANALYSEES : INSTANTANES

T cels	pH	Cond	SiO2	Ca	Mg	Na	K	NH4		
Sr	Cl	SO4	HCO3	N	NO2	P	UTDelta	*****		
DOX1	7.41	7.20	396	3.28	97.8	5.38	2.94	1.32	0.004	
	0.17	6.09	8.48	280.1	1.48	0.000	0.050	176	-12.13	
MIL1	8.30	8.35	337	2.50	79.4	2.05	1.74	0.99	0.007	
	0.05	5.90	0.66	276.4	1.78	0.000	0.026	191	-11.44	
SEK1	8.49	7.40	393	3.38	82.9	7.60	2.12	0.81	0.006	
	0.14	5.57	7.24	269.4	1.84	0.000	0.018	154	-10.43	
ARE1	7.35	7.20	371	2.50	82.4	4.53	1.55	0.97	0.020	
	0.22	3.88	9.92	248.9	1.39	0.000	0.031	130	-11.56	
ABB1	6.41	7.6	300	1.80	65.4	3.93	0.67	0.26	0.007	
	0.15	1.31	5.03	205.9	0.84	0.000	0.011	95	-11.82	
MON1	8.10	8.25	602	4.94	107.7	13.30	22.70	3.95	0.010	
	0.02	59.5	10.56	106.5	1.41	0.041	0.052	102	10.27	
PLF1	9.00	7.75	406	2.94	88.3	1.81	1.18	0.27	0.007	
	0.05	3.32	5.92	257.7	1.83	0.000	0.012	144	-9.91	
CHA1	7.50	8.25	402	3.28	82.9	3.25	1.41	1.37	0.010	
	0.08	4.02	11.99	241.6	2.40	0.000	0.019	193	-10.15	
MAI1	9.00	7.28	444	3.60	95.5	2.72	2.42	1.42	0.013	
	0.08	6.42	9.55	278.2	2.11	0.007	0.047	152	-10.25	
SAR1	6.00	7.43	406	2.82	91.7	1.83	1.07	0.78	0.006	
	0.11	2.46	9.36	268.4	1.20	0.000	0.028	143	-10.34	
LIS1	8.00	7.29	407	2.86	90.6	2.10	1.15	0.85	0.008	
	0.11	2.77	8.71	268.4	1.28	0.000	0.035	145	-10.62	
GYF1	9.50	7.29	405	3.64	91.7	1.95	1.28	0.72	0.008	
	0.10	2.92	7.78	269.4	1.38	0.000	0.026	161	-9.93	
VER1	8.75	7.70	445	3.34	93.3	5.28	2.08	3.54	0.038	
	0.10	4.38	13.47	286.0	1.88	0.013	0.105	173	-10.24	
BRE1	9.50	7.38	443	3.52	98.6	2.52	2.51	1.62	0.010	
	0.06	6.32	9.28	282.6	2.34	0.007	0.054	150	-10.42	
POU1	9.50	7.40	438	3.40	95.7	3.68	1.54	1.33	0.081	
	0.09	4.09	10.26	281.6	2.34	0.007	0.049	152	-10.30	
PON1	8.25	7.49	436	3.16	94.9	2.09	1.87	1.95	0.013	
	0.10	4.89	7.39	280.6	2.35	0.003	0.097	149	-10.43	
LOU1	8.50	7.50	368	2.72	85.1	4.62	2.48	1.24	0.014	
	0.15	4.84	7.98	263.5	1.24	0.000	0.050	145	-10.10	
MAB1	7.00	7.82	403	2.66	87.7	3.30	1.02	1.04	0.010	
	0.09	2.06	5.24	270.4	1.10	0.000	0.012	120	-10.91	
CAP1	7.25	7.51	413	3.28	82.4	9.40	0.86	0.56	0.014	
	0.19	1.71	5.56	282.6	1.93	0.000	0.018	70	-10.68	
DOU1	6.00	7.62	319	1.76	69.5	3.09	0.59	0.26	0.007	
	0.05	1.26	4.58	214.2	0.75	0.000	0.009	108	-11.22	
ROU1	7.00	7.66	302	2.08	70.1	4.44	0.84	0.36	0.008	
	0.10	1.78	6.01	221.1	1.62	0.003	0.015	103	-11.51	
ARC1	8.25	7.73	398	4.38	92.5	2.36	2.93	1.72	0.012	
	0.06	8.61	11.74	254.2	4.06	0.003	0.066	167	-9.86	
CUB1	9.75	7.32	454	4.00	104.1	2.41	2.13	2.08	0.009	
	0.09	5.52	9.92	305.0	2.14	0.003	0.048	182	-10.30	
BRA1	9.50	7.23	422	4.12	99.1	2.52	7.44	2.01	0.006	
	0.08	13.40	10.97	287.4	2.55	0.007	0.252	135	-10.44	
DES1	8.50	7.33	461	3.26	94.9	3.98	4.38	2.63	0.062	
	0.12	9.68	8.09	283.0	2.39	0.023	0.175	147	-10.82	
CUI1	8.85	7.83	405	3.50	94.4	1.65	1.38	0.86	0.024	
	0.11	2.91	6.76	284.0	0.92	0.003	0.021	196	-10.45	
ENR1	8.73	8.16	303	2.14	67.4	4.79	2.39	0.99	0.011	
	0.09	4.56	7.51	215.7	0.65	0.007	0.033	94	-11.79	
FLU1	6.86	8.40	259	2.04	62.0	1.93	0.77	0.50	0.010	
	0.11	1.35	7.24	185.4	0.58	0.003	0.024	98	-12.12	
DAR1	8.77	8.30	444	3.76	95.7	2.51	4.79	1.03	0.025	
	0.10	10.67	8.86	279.6	2.29	0.013	0.043	143	-10.24	
VAU1	8.83	7.48	436	4.02	92.2	1.97	5.16	1.83	0.052	
	0.12	10.65	10.52	266.9	1.60	0.020	0.048	97	-10.68	
GLA1	8.70	7.34	461	2.98	103.6	2.68	3.08	0.64	0.014	
	0.11	6.79	12.03	307.9	0.70	0.000	0.013	242	-10.57	

JURA - JANVIER 1977
INSTANTANE 1

T	cel	pH	Cond	SiO2	Ca	Mg	Na	K	Sr
	Cl	SO4	HCO3	N	UTDelta	*****			
UUR2	7.5	7.35	376	2.30	79.1	2.89	1.70	1.07	0.10
	3.74	8.26	234.7	1.47	139	-12.17			
UUR2	4.4	7.00	351	1.90	71.9	2.21	5.67	2.61	0.05
	2.14	12.1	202.0	1.96	161	-11.10			
SER2	8.5	7.70	396	2.52	79.6	4.88	1.62	0.70	0.09
	4.25	9.11	245.0	1.73	114	-11.93			
ARE2	7.4	7.40	341	1.80	68.4	2.76	1.03	0.66	0.10
	2.12	6.81	209.8	1.12	89	-11.97			
MON2	8.1	7.50	346	1.76	66.2	4.71	1.20	0.47	0.18
	4.04	5.62	213.3	0.58	54	-12.79			
ABB2	6.5	7.60	296	1.24	58.1	2.63	0.49	0.22	0.09
	0.70	4.79	184.0	0.61	31	-13.18			
PLF2	8.8	7.64	382	2.88	85.4	1.20	1.10	0.22	0.06
	3.12	6.65	246.4	1.77	135	-10.19			
CHA2	8.8	8.40	386	2.80	84.1	2.00	1.18	0.61	0.07
	2.84	8.55	242.5	2.50	150	-10.75			
MAI2	9.1	7.28	399	3.28	86.7	1.96	1.57	1.03	0.09
	2.38	9.34	256.2	1.60	108	-10.81			
SAR2	8.8	8.01	336	2.26	74.9	2.48	0.94	0.55	0.08
	1.45	7.26	224.5	0.79	97	-11.51			
LIS2	8.8	7.81	344	2.28	75.4	2.44	0.95	0.58	0.08
	1.38	7.42	224.5	0.79	91	-11.12			
GYP2	8.8	7.85	334	2.76	74.5	2.36	0.95	0.56	0.08
	1.27	7.17	221.6	0.75	105	-10.95			
VER2	8.6	8.35	332	2.98	69.8	2.82	1.47	1.96	0.08
	2.52	9.86	211.8	1.43	129	-10.85			
BRE2	9.0	7.24	392	3.34	86.4	1.79	1.54	0.92	0.07
	3.03	8.02	254.7	1.51	115	-11.00			
FOU2	8.9	7.23	394	3.12	84.7	2.44	1.21	0.76	0.08
	2.59	9.03	250.3	1.78	115	-11.21			
FON2	8.7	8.10	354	2.60	78.1	1.46	1.17	0.95	0.09
	2.22	6.93	234.2	1.16	106	-11.61			
LQU2	8.3	7.35	372	2.32	79.6	3.40	1.00	0.78	0.08
	1.71	5.95	248.9	1.23	84	-12.72			
MAB2	7.5	7.64	356	2.06	77.3	2.87	1.00	0.52	0.11
	1.53	6.28	238.6	0.90	72	-12.01			
CAP2	7.0	7.51	320	1.56	68.4	3.97	0.64	0.31	0.05
	0.83	5.95	216.2	0.71	52	-11.74			
DOU2	5.8	7.56	279	1.46	59.1	2.08	0.85	0.22	0.04
	1.29	4.84	183.0	0.60	68	-13.36			
ROU2	7.3	7.30	393	2.40	88.3	2.04	1.91	1.05	0.07
	4.73	5.66	258.6	1.45	84	-11.71			
ARC2	9.1	7.75	408	4.10	91.8	1.87	1.50	1.05	0.09
	4.38	10.3	256.2	2.70	145	-10.06			
CUB2	8.9	7.30	419	3.74	91.0	1.58	2.64	1.23	0.07
	3.06	8.95	270.8	1.74	130	-10.75			
BRA2	9.1	7.30	420	3.48	86.7	2.02	1.62	1.21	0.08
	4.57	9.78	265.5	2.20	133	-11.35			
DES2	8.5	7.40	405	2.64	85.2	2.05	1.55	1.26	0.09
	4.93	7.34	255.2	1.88	173	-11.01			
CUI2	8.5	7.65	374	3.18	83.4	1.23	1.05	0.37	0.07
	1.74	5.91	254.2	0.77	158	-10.69			
ENR2	7.3	7.56	257	1.48	54.7	0.82	1.17	0.39	0.08
	1.47	4.50	173.7	0.39	39	-11.68			
FLU2	7.0	8.15	252	1.30	52.1	1.15	0.99	0.42	0.10
	1.20	4.63	162.5	0.42	56	-12.28			
DAR2	9.8	7.50	403	3.06	65.9	1.76	1.24	0.50	0.10
	2.06	6.97	178.1	1.64	118	-10.89			
VAU2	8.8	7.29	371	3.74	82.3	1.34	1.53	0.83	0.10
	2.25	5.99	247.9	0.81	97	-10.48			
AIN2	7.3	7.55	316	1.78	63.8	4.02	0.92	0.40	0.10
	1.36	4.92	214.2	0.64	33	-10.78			
GLA2	9.0	7.20	380	2.78	98.9	2.09	1.53	0.24	0.11
	2.35	8.18	299.1	0.51	196	-10.70			
CUN2	9.1	7.30	362	3.90	86.6	1.88	1.26	1.02	0.09
	2.62	8.71	258.2	1.67	150	-10.68			
TON2	7.8	7.51	363	2.94	79.2	1.34	1.86	0.85	0.09
	3.24	6.48	239.1	0.89	107	-10.70			
LAD2	9.5	7.24	386	4.34	61.3	1.95	0.98	0.26	0.11
	1.97	6.20	178.6	1.86	210	-10.33			
PLA2	8.8	7.75	402	2.78	86.2	1.65	1.35	1.37	0.07
	2.71	7.42	253.8	1.87	94	-11.28			
ARB2	9.1	7.40	414	4.28	91.5	2.02	1.82	1.01	0.07
	4.50	10.73	261.1	2.57	140	-9.73			

JURA - FEVRIER 1977
INSTANTANE 2

JURA - SEPTEMBRE 1977
INSTANTANE 3

Delta T	cels	UT	pH	SiO2	Ca	Mg	Na	K	
Cl	SO4	HCO3	M*****						
DOX3	-11.07	8.1	181	7.00	3.72	93.2	6.06	1.89	1.11
	3.99	9.14	299.6	1.23					
THE3	-10.62	8.2	181	7.00	3.02	84.3	2.26	2.11	1.52
	4.36	7.44	251.3	2.12					
SER3	-10.93	8.8	143	7.00	3.42	83.4	8.64	1.80	0.81
	4.76	8.14	280.1	1.76					
ARE3	-10.76	7.8	155	7.00	3.04	93.8	5.52	1.78	0.92
	3.28	12.19	297.7	1.06					
MON3	-10.57	6.4	132	7.00	2.74	80.2	7.44	0.93	0.44
	1.64	5.17	275.2	0.65					
ARB3	-11.14	5.1	125	7.00	1.94	75.3	3.87	0.61	0.32
	1.14	4.14	245.5	0.68					
PLF3	-9.44	10.0	143	7.25	3.34	106.1	2.08	1.19	0.27
	5.29	5.12	319.6	1.75					
MAI3	-9.90	10.0	138	6.75	3.66	104.8	3.29	2.27	1.34
	4.14	6.72	323.1	1.40					
SAR3	-9.63	10.0	168	6.70	3.14	104.8	2.06	1.15	0.90
	2.00	6.50	320.6	0.97					
LIS3	-9.46	8.75	170	6.75	3.22	106.1	2.63	1.23	0.87
	2.05	6.86	327.0	1.01					
GYP3	-10.09	9.5	160	6.70	4.14	101.3	2.26	1.16	0.84
	2.32	6.04	315.2	1.04					
VER3	-9.83	10.0	171	7.15	4.08	109.4	6.32	2.08	2.75
	3.95	8.88	355.3	1.70					
PGU3	-10.20	10.0	126	6.65	3.84	106.4	3.96	1.44	1.16
	3.07	7.62	331.8	1.82					
PON3	-9.60	9.5	138	7.05	3.68	105.8	2.26	1.54	1.56
	2.93	5.40	326.5	1.00					
LDU3	-9.89	9.5	170	7.00	2.42	84.9	4.72	2.56	1.08
	4.22	7.13	274.7	0.88					
MAB3	-10.76	7.6	123	6.92	2.60	91.6	3.47	1.10	0.96
	2.38	4.66	292.8	1.13					
CAP3	-10.22	7.4	88	6.76	3.60	85.4	10.60	0.87	0.54
	1.45	4.84	312.3	0.81					
RQU3	-10.79	6.8	89	6.98	2.08	75.5	4.79	0.59	0.26
	1.02	5.17	249.9	0.76					
ARC3	-9.03	10.5	214	7.50	5.44	104.5	3.53	2.93	1.57
	6.44	8.45	320.1	2.80					
CUB3	-9.64	10.5	211	6.92	4.50	117.6	2.89	1.78	1.35
	3.99	7.39	360.6	1.80					
BRAS	-10.33	9.5	158	6.90	4.44	109.4	2.49	3.44	1.81
	5.75	8.71	335.7	2.17					
DES3	-9.95	8.75	173	7.00	3.92	118.5	4.81	2.64	2.11
	5.01	6.95	372.8	1.77					
CUI3	-9.82	9.4	188	6.86	4.44	96.1	2.14	1.09	0.62
	2.24	5.49	297.7	0.86					
ENR3	-9.80	7.5	108	7.39	0.86	71.5	5.34	1.43	0.68
	2.19	5.22	240.1	0.56					
FLU3	-9.83	7.0	168	7.08	2.12	78.6	2.60	0.81	0.48
	1.37	5.58	249.9	0.49					
DAR3	-9.70	10.1	161	6.69	4.42	114.8	3.15	1.36	0.71
	2.98	6.32	352.8	1.63					
VAU3	-9.30	10.6	132	7.03	4.96	99.2	2.68	2.04	0.81
	3.77	6.04	312.3	0.82					
AIN3	-9.99	9.4	85	7.02	2.44	87.4	8.04	1.07	0.69
	2.14	4.98	302.1	0.80					
CUN3	-9.70	9.75	136	7.05	4.80	107.7	3.13	1.94	1.81
	4.14	7.39	332.8	1.66					
LAD3	-9.87	9.6	217	6.68	4.86	105.4	3.17	1.13	0.48
	2.61	5.72	323.1	1.54					
ARB3	-9.23	10.0	137	7.55	4.98	117.8	1.89	1.19	0.57
	3.08	8.71	361.6	0.40					
GLA3	-9.89	9.7	282	6.72	5.50	115.9	3.19	1.28	0.44
	3.35	6.77	348.4	3.34					
BQU3	-10.46	6.2	155	6.92	1.88	77.0	3.62	0.53	0.28
	1.16	3.33	250.3	0.47					

JURA - OCTOBRE 1978
INSTANTANE 4

T cels	pH	Cond	SiO2	Ca	Mg	Na	K	Sr	
CI	SO4	HCO3	NOdelta	UT*****					
IHE4	4.7	7.00	000	2.82	86.5	2.75	2.14	1.48	0.10
	4.4	7.3	254.7	1.90	-10.55	150			
MI4	7.0	7.00	000	2.74	00.7	5.42	1.50	0.76	0.29
	3.3	11.0	270.2	0.00	10.00	107			
DOX4	7.2	7.00	000	3.30	95.6	5.10	1.67	1.50	0.23
	3.0	8.7	299.6	0.97	-10.69	165			
MON4	6.6	7.00	000	6.98	85.0	16.78	6.12	2.50	0.22
	10.6	10.1	308.4	1.83	-10.79	66			
AB64	6.1	7.00	000	1.78	70.4	4.27	0.86	0.30	0.18
	1.5	6.5	223.0	0.65	-10.99	69			
CUN4*	9.9	7.45	487	4.66	107.3	3.40	2.20	2.06	0.11
	4.2	8.4	327.9	1.43	-9.66	129			
ARE4	9.8	7.90	502	4.86	110.2	1.85	1.07	0.46	0.08
	2.5	8.6	335.7	0.18	-9.11	138			
CUB4	10.3	7.00	512	4.42	115.3	3.48	2.05	2.27	0.09
	4.3	8.5	351.8	1.45	-9.36	123			
BRA4	7.5	6.90	492	4.42	105.9	3.26	6.34	2.54	0.08
	8.7	10.0	322.1	2.36	-10.26	126			
MA14	9.0	7.10	462	3.30	100.3	3.62	2.72	1.81	0.10
	4.6	7.7	308.9	1.32	-9.73	108			
PON4	7.0	8.15	459	3.28	103.8	2.54	2.12	1.90	0.12
	4.4	6.0	313.8	1.38	-9.03	100			
CHA4	9.0	8.15	473	3.00	96.8	4.61	4.38	4.95	0.10
	8.1	12.1	299.1	0.96	-9.26	131			
LOU4	9.0	7.85	396	2.26	82.3	5.01	3.39	1.33	0.18
	4.9	7.7	265.0	0.62	-10.00	105			
PLF4	9.8	7.85	417	3.04	80.6	2.13	1.15	0.32	0.07
	3.8	4.8	241.6	1.72	-9.63	128			
ARC4	8.7	8.00	473	5.60	101.7	3.82	3.95	2.73	0.09
	8.2	9.7	307.4	2.51	-9.24	134			
SER4	3.2	7.00	000	3.24	78.0	8.34	1.74	0.74	0.17
	4.1	7.4	265.0	1.29	-10.99	106			
FLU4	7.0	7.80	331	4.46	78.0	2.95	0.78	0.45	0.15
	1.4	8.3	233.3	0.66	-10.02	92			
LIS4	9.5	6.90	442	3.28	103.9	3.06	1.59	1.73	0.14
	3.1	9.8	309.4	1.42	-9.63	78			
DES4	9.1	7.00	541	3.64	112.7	5.18	2.71	2.03	0.15
	5.1	9.0	343.1	2.13	-9.92	127			
AIN4	7.8	7.05	399	2.26	87.1	7.20	0.93	0.63	0.17
	2.0	7.7	281.1	1.35	-9.53	74			
CAP4	7.4	7.15	399	3.88	79.8	12.20	0.92	0.74	0.26
	1.3	6.3	291.8	0.83	-10.44	62			
GYP4	9.5	7.00	429	4.36	103.0	3.00	1.52	1.25	0.12
	3.0	9.3	307.0	1.20	-9.83	107			
CUI4	9.3	7.15	365	5.02	85.6	2.60	1.36	1.00	0.21
	3.2	7.4	260.6	0.95	-9.83	122			
SAR6	9.5	7.05	420	3.14	100.9	2.46	1.60	1.75	0.13
	3.2	10.7	297.7	1.19	-9.43	97			
LA04	9.8	7.00	448	4.92	103.3	4.09	1.60	1.58	0.17
	3.9	8.8	310.9	1.78	-9.58	127			
DOU4	6.2	7.25	313	1.80	72.3	3.34	0.55	0.22	0.03
	1.5	5.4	224.5	0.69	-10.27	74			
VER3	9.2	7.10	449	4.06	100.7	5.82	2.61	3.75	0.11
	4.7	12.2	311.8	1.97	-9.83	93			
DAR3	10.2	7.10	475	4.84	112.3	4.28	2.72	2.26	0.11
	5.2	9.5	339.2	1.88	-9.39	106			
PLA4	5.9	7.00	000	2.92	76.0	2.61	1.37	0.31	0.04
	3.3	7.4	224.0	1.24	-9.72	100			
VAU4	9.4	7.10	414	5.42	98.6	3.27	2.81	1.52	0.14
	6.0	7.5	298.2	1.03	-9.39	100			
GLA4	10.1	7.15	506	6.54	107.9	3.83	4.68	6.97	0.23
	8.9	14.2	309.9	5.06	-9.70	179			
MAB4	7.1	7.50	399	2.66	90.3	3.83	1.03	0.99	0.11
	2.5	5.7	278.6	0.94	-10.72	104			
ENR4	9.0	7.10	359	1.02	29.2	1.82	0.85	0.38	0.05
	1.4	3.6	96.1	0.29	-9.14	89			
POU4	8.8	7.00	475	3.76	103.5	4.21	1.94	1.82	0.11
	3.5	10.0	311.8	2.165	-9.70	78			

T	ceils	Cond	Cl	PO4	SO4	HC03	N	NO2	NHA
Ca	Na	K	SiO2*****						
MAI6	9.0	580	7.84	1.1	15.5	327	1.92	0.000	0.000
	97.5	2.15	1.55	4.2					
BYP6	9.2	414	5.23	1.3	7.0	329	0.62	0.000	0.000
	94.5	0.87	0.87	4.7					
VER6	9.2	451	7.04	1.9	10.5	346	1.30	0.000	0.000
	93.0	2.15	3.90	4.5					
SAR6	8.5	413	4.22	0.3	6.0	335	1.00	0.000	0.000
	96.0	0.80	1.00	2.5					
LIS6	8.6	422	5.63	0.4	3.0	338	1.00	0.033	0.000
	96.9	0.95	1.10	2.2					
ARC6	9.4	407	11.86	0.0	7.0	235	2.74	0.000	0.000
	99.0	2.90	1.80	5.0					
ARB6	9.8	437	6.43	0.6	6.0	383	0.22	0.000	0.000
	111.9	0.32	0.53	5.4					
DUN6	9.7	401	6.43	1.4	6.0	329	1.76	0.000	0.000
	102.0	1.55	1.80	5.4					
DUB6	10.2	435	5.80	0.0	4.5	362	0.88	0.000	0.000
	106.0	1.40	1.45	5.0					
BRA6	9.6	414	10.05	0.0	6.0	335	1.52	0.000	0.000
	108.0	4.15	1.95	4.9					
PLA6	9.7	349	5.23	0.0	7.5	300	1.09	0.000	0.000
	87.9	0.71	0.46	2.8					
DES6	8.8	416	9.25	0.0	56.0	346	1.56	0.000	0.000
	100.5	2.25	2.00	3.3					
PLF6	9.0	332	10.05	0.0	4.0	281	1.22	0.033	0.000
	87.0	0.85	0.47	2.8					
BRE6	9.1	378	10.25	0.0	6.5	305	2.16	0.000	0.000
	93.0	1.92	2.20	3.2					
POU6	9.5	400	8.20	0.9	6.0	327	2.16	0.000	0.000
	96.0	1.10	1.50	3.6					
PON6	8.7	387	6.43	0.0	4.0	327	1.38	0.000	0.000
	97.5	1.10	1.35	3.3					
CHA6	9.6	415	9.65	0.2	7.5	337	2.74	0.000	0.000
	100.5	1.00	0.68	3.9					
CUI6	9.3	348	9.05	0.4	5.5	297	0.77	0.033	0.000
	91.5	0.75	0.65	3.3					
VAU6	9.1	338	11.26	0.0	7.0	281	1.30	0.066	0.038
	87.0	1.60	2.20	6.5					
ENR6	8.3	141	7.84	0.0	4.0	235	0.28	0.033	0.000
	72.0	0.90	0.60	1.3					
AIN6	7.6	282	9.25	0.0	4.0	235	0.88	0.033	0.026
	73.5	0.50	0.60	1.1					
FLU6	6.9	232	8.84	0.0	5.5	200	0.40	0.066	0.038
	65.4	0.30	0.70	0.9					
DAR6	9.9	415	11.46	0.0	7.0	254	2.96	0.033	0.179
	102.0	1.85	1.65	5.4					
ABB6	6.3	270	5.43	0.0	26.5	232	0.48	0.000	0.000
	72.0	0.10	0.30	0.8					
ROU6	7.9	352	26.33	0.4	4.5	286	0.77	0.000	0.000
	85.5	7.30	0.38	2.0					
DOU6	6.2	255	7.64	0.4	4.0	224	0.44	0.000	0.000
	67.5	0.50	0.20	0.7					
CAP6	7.4	316	4.22	0.9	4.0	289	0.12	0.000	0.000
	80.4	0.19	0.32	1.6					
MAB6	7.4	333	4.82	0.6	6.0	297	0.55	0.000	0.000
	82.5	0.59	0.44	2.3					
LOU6	8.6	322	9.05	0.0	4.5	322	0.88	0.000	0.000
	84.0	2.50	1.15	1.4					
PAP6	8.6	312	10.9	0.0	4.5	257	1.22	0.000	0.026
	79.5	0.61	1.10	2.0					

JURA - DECEMBRE 1979
INSTANTANE 6

JURA - MARS 1982
INSTANTANE 9

T cels	Cond	pH	Cl	PO4	SO4	N	HCO3	NH4	
Ca	Mg	Na	K	SiO2	*****				
ABB9	5.2	305	8.2	6.09	0.1	2.0	0.07	174	0.02
	61	3.0	0.35	0.55	1.2				
DOU9	5.6	306	8.0	12.2	0.1	3.0	0.06	172	0.04
	61	2.5	1.03	0.35	1.2				
CAP9	8.5	360	7.9	12.2	0.1	4.0	0.10	219	0.00
	73	6.8	0.55	0.80	0.3				
MAB9	6.4	381	8.5	7.83	0.1	410	0.14	212	0.02
	77.5	3.5	0.75	0.65	1.9				
CUI9	9.1	406	8.0	4.35	0.1	4.0	0.07	238	0.00
	91.3	1.8	1.20	0.75	4.1				
GLA9	9.4	495	7.5	8.26	0.1	5.5	0.72	274	0.00
	108.2	3.0	1.20	0.60	6.2				
LAD9	9.4	454	8.0	3.48	0.15	4.5	0.19	278	0.00
	98.8	3.25	1.20	1.20	4.1				
DAR9	9.6	473	7.6	3.94	0.1	5.5	0.24	258	0.00
	103.0	3.0	1.65	1.20	5.6				
VAU9	9.0	453	7.7	5.65	0.15	6.0	0.12	248	0.00
	97.5	2.8	2.65	1.40	5.9				
ENR9	7.6	316	8.0	5.22	0.1	4.5	0.05	174	0.00
	64.7	3.75	1.4	0.60	2.3				
PAP9	9.1	365	7.8	3.91	0.1	4.5	0.11	208	0.00
	74.1	6.75	0.95	0.90	3.3				
AIN9	8.6	365	7.7	3.48	0.1	5.0	0.10	214	0.00
	74.1	7.3	0.95	0.75	3.0				
ARC9	8.0	441	8.0	3.48	0.2	5.5	0.37	238	0.00
	95.0	2.8	2.60	1.70	6.6				
ARB9	8.3	448	7.7	3.48	0.2	6.0	0.18	244	0.02
	74.0	2.8	2.25	1.40	6.2				
CUN9	9.0	462	7.5	1.30	0.2	5.0	0.10	230	0.01
	89.0	2.6	1.60	1.95	5.8				

CUB9	9.2	470	7.7	3.91	0.25	7.5	0.16	250	0.03
	97.0	3.0	1.60	2.10	5.6				
BRA9	9.1	469	7.6	6.96	0.5	4.5	0.14	240	0.00
	92.5	2.8	4.65	1.70	5.0				
PLA9	8.9	500	7.9	6.52	0.75	7.0	0.31	238	0.02
	90.0	3.25	5.30	7.20	5.6				
DES9	8.5	459	7.6	4.35	0.4	3.0	0.22	246	0.00
	91.5	3.75	2.75	2.50	3.3				
LOU9	8.1	392	8.3	5.22	0.2	3.0	0.00	216	0.00
	77.5	3.8	1.90	1.20	2.2				
PON9	8.1	423	8.1	4.13	0.3	2.0	0.13	236	0.00
	87.5	2.25	1.40	1.60	3.0				
POU9	9.2	436	7.6	5.22	0.2	6.5	0.16	240	0.00
	87.5	3.75	1.30	1.50	3.3				
CHA9	8.6	383	8.2	4.13	0.2	8.0	0.13	206	0.25
	77.5	1.0	1.30	1.45	3.9				
BRE9	6.2	488	8.4	4.35	0.1	24.5	0.00	262	0.03
	100.0	4.5	0.75	0.90	6.6				
PLF9	9.2	394	8.1	4.78	0.1	5.0	0.17	218	0.01
	82.5	1.5	0.80	0.40	3.0				
MAI9	9.1	444	7.7	4.35	0.1	5.5	0.15	242	0.00
	90.0	2.75	1.95	1.65	3.9				
LIS9	8.1	400	8.2	2.61	0.2	5.5	0.09	236	0.00
	89.0	2.2	1.15	1.50	3.3				
SAR9	7.4	400	8.6	6.52	0.15	6.0	0.07	230	0.00
	65.0	2.0	1.15	1.45	3.3				
VER9	8.5	390	8.8	5.65	0.4	8.0	0.19	208	0.50
	74.2	4.0	2.30	3.50	4.1				
GYP9	8.0	400	8.4	4.56	0.1	8.0	0.17	232	0.00
	86.3	2.2	1.30	1.05	4.1				
ROU9	5.8	337	7.9	4.35	0.25	3.5	0.11	192	0.25
	68.2	4.25	2.90	0.65	2.2				

T cels	pH	Cond	SiO2	Ca	Mg	Na	K	Sr
CI	SO4	HCO3	NO3Delta	UT*****				
ABB4	6.1	7.00	300	1.78	70.4	4.29	0.86	0.30 0.18
	1.5	6.5	223.0	2.97	-10.99	69		
CAP4	7.4	7.15	399	3.88	79.8	12.20	0.92	0.74 0.26
	1.3	6.3	291.8	3.66	-10.44	62		
FNR4	6.8	7.05	413	3.10	88.2	6.88	2.74	0.43 0.12
	6.5	6.3	286.9	2.92	-10.69	71		
DOU4	6.2	7.25	313	1.80	72.3	3.34	0.55	0.22 0.03
	1.5	5.4	224.5	3.05	-10.27	74		
MAB4	7.1	7.50	399	2.66	90.3	3.83	1.03	0.99 0.11
	2.5	5.7	278.6	4.15	-10.72	104		
VAL4	7.5	7.00	300	2.78	70.5	8.29	10.32	0.76 0.58
	1.6	37.5	238.6	2.87	-10.86	61		
CLD4	7.7	7.20	427	3.90	85.7	14.56	0.81	0.32 0.87
	0.9	10.8	313.3	3.01	-10.13	30		
MAG4	7.8	7.35	427	2.98	85.1	7.60	1.18	0.44 0.30
	3.8	9.1	278.6	4.11	-10.82	72		

T cels	Cond	SiO2	Na	K	HCO3	Cl	NO3	SO4
PO4	NH4	NO2*****						
DOU5	6.1	279	0.75	0.55	0.23	232.2	17.1	0.42 0.8
	0.08	0.000	0.000					
ABB5	6.1	281	0.85	0.46	0.28	245.7	17.1	0.50 1.5
	0.20	0.000	0.006					
VAL5	7.6	344	3.00	9.55	0.71	283.5	18.1	0.54 23.0
	0.10	0.000	0.008					
FNR5	7.3	368	3.30	3.90	0.55	307.8	30.2	0.41 2.5
	0.72	0.000	0.006					
ROU5	6.7	290	1.60	0.54	0.18	248.4	23.1	0.67 2.5
	0.10	0.000	0.009					
MAG5	8.3	366	2.75	1.69	0.67	307.8	29.1	0.80 2.0
	0.06	0.000	0.004					
MAB5	7.6	353	2.75	0.82	0.73	297.0	42.2	0.77 1.0
	0.06	0.000	0.005					
CLD5	7.7	380	3.30	0.46	0.28	351.0	12.1	0.47 3.5
	0.00	0.000	0.006					
CAP5	7.4	346	4.20	0.62	0.72	342.9	21.1	0.49 1.5
	0.06	0.000	0.010					

T cels	Cond	Cl	PO4	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4
Ca	Na	K	SiO2*****					
ABB6	6.3	270	5.43	0.0	25.5	232	2.12	0.000 0.000
	72.0	0.10	0.30	0.8				
ROU6	7.9	352	26.33	0.4	4.5	286	3.40	0.000 0.000
	85.5	7.30	0.38	2.0				
DOU6	6.2	255	7.64	0.4	4.0	224	1.94	0.000 0.000
	67.5	0.50	0.20	0.7				
CAP6	7.4	316	4.22	0.9	4.0	289	0.53	0.000 0.000
	80.4	0.19	0.32	1.6				
MAB6	7.4	333	4.82	0.6	6.0	297	2.43	0.000 0.000
	82.5	0.59	0.44	2.3				
FNR6	7.2	371	11.5	0.0	7.0	292	2.30	0.000 0.000
	85.5	4.10	0.54	2.8				
CLD6	7.3	360	4.22	0.0	6.5	305	3.01	0.000 0.000
	81.0	0.38	0.35	2.5				
MAG6	7.1	353	6.23	0.0	6.0	311	3.54	0.000 0.000
	84.0	1.05	0.61	2.6				
VAL6	7.1	341	6.03	1.2	20.5	286	2.03	0.000 0.000
	78.0	7.30	0.63	2.8				

HAUT - DOUBS
INSTANTANES 4, 5, 6, 8, 9

T cels	Cond	Cl	PO4	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4
Ca	Mg	Na	K	SiO2*****				
ABB8	6.3	320	11.5	0.00	3.0	302	0.32	0.00 0.00
	78	3.80	0.70	0.30	0.0			
ROU8	6.9	309	17.5	0.00	3.5	284	0.42	0.00 0.00
	74	5.00	0.80	0.20	0.1			
FNR8	7.2	417	13.0	0.00	3.5	365	0.16	0.00 0.00
	98	6.30	3.10	0.60	1.4			
MAG8	8.3	394	17.5	0.00	5.0	348	0.20	0.00 0.00
	90	6.60	1.50	0.55	1.1			
CLD8	7.6	416	13.0	0.00	6.5	375	0.09	0.00 0.00
	88	12.5	0.80	0.40	1.9			
DOU8	6.2	319	4.5	0.00	3.0	286	0.34	0.00 0.00
	81	2.80	5.40	0.40	0.0			
MAB8	7.5	385	8.5	0.00	3.5	346	0.51	0.00 0.00
	96	3.30	1.00	0.60	0.6			
VAL8	8.2	389	8.0	0.00	31.5	316	0.20	0.01 0.00
	82	7.70	7.90	0.70	1.1			
CAP8	7.5	418	6.5	0.00	4.0	373	0.35	0.00 0.00
	95	9.80	0.80	1.10	1.9			

T cels	Cond	pH	Cl	PO4	SO4	NO3	HCO3	NH4
Ca	Mg	Na	K	SiO2*****				
ABB9	5.2	305	8.2	6.09	0.1	2.0	0.32	174 0.02
	61	3.0	0.35	0.55	1.2			
DOU9	5.6	306	8.0	12.2	0.1	3.0	0.28	172 0.04
	61	2.5	1.03	0.35	1.2			
CAP9	8.5	360	7.9	12.2	0.1	4.0	0.44	218 0.00
	73	6.8	0.55	0.80	0.3			
CLD9	6.4	415	8.1	4.78	0.1	5.5	0.29	240 0.00
	74	10.3	0.50	1.70	1.0			
MAG9	10.8	363	8.1	9.13	0.15	4.0	0.58	232 0.00
	79	6.25	1.4	0.65	2.2			
MAB9	6.4	381	8.5	7.83	0.1	410	0.60	212 0.02
	77.5	3.5	0.75	0.65	1.9			
FNR9	5.1	430	7.7	3.48	0.1	4.0	0.60	242 0.01
	83.8	5.5	3.15	0.85	2.8			
ROU9	5.8	337	7.9	4.35	0.25	3.5	0.49	192 0.25
	68.2	4.25	2.90	0.65	2.2			
VAL9	5.5	403	8.6	4.35	0.1	18.0	0.28	206 0.00
	66.0	6.75	6.50	0.80	3.0			

T cels	Cond	SiO2	Na	K	HCO3	Cl	NO3	SO4		
PO4	NH4	NO2	*****							
TOU1	12.7	298	9.85	1.73	1.30	247.1	13.1	1.17	4.0	
	0.11	0.000	0.000							
IRM1	9.3	305	10.20	1.11	0.81	517.5	11.1	0.65	5.5	
	0.08	0.000	0.000							
NO11	11.6	442	9.05	3.45	2.05	322.7	18.1	4.56	4.5	
	0.11	0.016	0.006							
RAP1	9.9	186	11.25	1.45	0.81	156.6	15.1	0.32	0.1	
	0.00	0.000	0.000							
ROM1	10.6	416	5.75	1.25	0.38	345.6	2.0	1.08	3.5	
	0.08	0.000	0.000							
BA11	11.3	432	7.00	3.07	1.99	354.0	29.2	3.14	6.5	
	0.16	0.000	0.000							
DIA1	10.7	427	6.50	4.65	0.49	330.8	23.1	3.75	9.0	
	0.10	0.000	0.000							
CHM1	11.5	468	6.50	3.18	1.85	348.3	12.1	2.57	27.5	
	0.13	0.000	0.000							
FIL1	11.0	417	5.90	3.97	1.86	334.8	13.1	2.98	7.5	
	0.16	0.000	0.000							
RUH1	10.4	352	10.20	1.90	2.36	264.6	15.1	3.86	2.5	
	0.10	0.000	0.000							
QUE1	10.3	405	9.05	1.74	1.23	326.7	11.1	2.10	3.5	
	0.10	0.000	0.000							

T cels	Cond	Cl	PO4	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	
Ca	Na	K	SiO2	*****					
TOU6	9.2	295	13.1	0.7	18.5	219	2.2	0.03	0.03
	73.5	1.75	3.40	15.7					
ERM6	9.4	267	8.4	0.6	16.0	221	0.6	0.02	0.02
	73.5	1.00	1.35	3.9					
RAP6	10.6	273	16.3	0.3	4.0	194	3.3	0.01	0.00
	82.5	1.40	0.84	10.8					
NO16	10.3	353	18.5	1.0	13.0	259	3.1	0.02	0.02
	87.0	2.80	3.30	12.0					
ROM6	10.8	438	14.1	1.1	9.5	359	1.6	0.01	0.01
	106.5	1.05	0.70	8.2					
BA16	11.0	450	13.9	0.0	7.0	356	2.9	0.01	0.01
	105.0	2.40	1.75	8.9					
DIA6	10.8	442	20.9	0.6	11.0	338	2.1	0.01	0.00
	100.5	6.30	0.64	7.6					
CHM6	10.4	462	10.5	1.6	18.0	351	1.1	0.01	0.00
	104.4	2.55	2.15	7.9					
FIL6	11.0	439	12.3	0.4	9.0	351	1.9	0.01	0.00
	105.0	2.15	1.35	6.6					
RUH6	10.3	297	12.1	0.3	9.0	211	3.4	0.01	0.01
	71.4	1.93	3.20	9.9					
QUE6	10.4	383	13.5	0.5	14.0	302	2.3	0.02	0.02
	94.5	2.00	2.40	11.2					

T cels	Cond	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	NO2	PO4	
NH4	Ca	Mg	Na	K	*****				
TOU7	12.6	334	5.0	280.8	55.3	17.0	0.84	0.01	0.15
	0.00	84.0	2.30	1.75	2.11				
ERM7	9.8	355	5.3	329.4	60.3	17.5	0.22	0.01	0.00
	0.01	95.0	2.45	1.45	0.97				
NO17	11.4	418	4.6	340.2	162.8	17.0	2.06	0.01	0.20
	0.03	119.0	3.50	3.10	3.08				
RAP7	10.1	197	6.8	167.4	50.3	2.0	0.04	0.00	0.00
	0.00	52.0	2.20	1.10	0.71				
ROM7	10.9	438	1.8	359.6	12.1	20.0	0.98	0.01	0.10
	0.00	153.0	2.85	1.00	0.52				
BA17	11.6	457	2.5	396.9	23.1	17.0	1.74	0.01	0.20
	0.00	131.0	4.05	2.90	2.05				
DIA7	10.9	454	2.5	372.6	22.1	17.5	2.06	0.01	0.10
	0.00	118.0	5.90	5.80	0.56				
CHM7	11.8	454	5.0	361.8	14.1	34.5	1.03	0.01	0.15
	0.04	143.5	8.85	2.90	2.21				
FIL7	11.1	452	1.9	383.4	22.1	15.0	1.70	0.01	0.20
	0.03	189.0	3.75	2.80	1.65				
RUH7	10.4	327	3.9	280.8	16.1	10.0	2.80	0.01	0.10
	0.03	95.0	4.85	1.95	2.85				
QUE7	10.9	414	5.3	369.9	26.1	14.0	1.57	0.01	0.25
	0.03	115.0	3.10	2.50	2.03				

HAUTE - SAONE
INSTANTANES 5 , 6 , 7

T cels	Cond	Cl	PO4	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4
Ca	Mg	Na	K	SiO2	SiO2			
TOU8	11.0	342	9.0	0.10	5.0	313	2.48	0.00
	108	3.3	2.4	1.7	9.1			
RAP8	10.3	177	6.2	0.00	1.0	178	0.01	0.00
	50	2.5	1.5	0.9	10.1			
BAT8	11.5	452	11.4	0.20	7.5	394	2.22	0.01
	120	4.1	3.7	3.7	5.9			
NOI8	11.6	458	14.3	0.00	8.0	346	2.93	0.01
	116	4.1	3.1	3.1	7.8			
ERM8	9.5	431	6.7	0.00	8.5	365	0.87	0.01
	106	2.7	1.4	1.1	9.4			
DIA8	12.3	486	14.3	0.00	13.5	378	1.61	0.01
	120	4.1	4.5	2.7	5.9			
FIL8	11.8	509	11.9	0.20	9.0	410	1.70	0.015
	110	5.6	4.4	1.1	5.6			
ROM8	10.5	445	6.2	0.00	7.0	386	1.24	0.00
	106	3.3	1.4	0.6	6.8			
CHM8	12.8	602	6.0	0.05	66.0	405	1.70	0.00
	135	0.5	4.5	2.9	6.2			
RUH8	10.3	179	5.2	0.05	2.0	167	0.00	0.01
	46	1.9	1.4	1.1	10.4			
QUE8	10.9	424	9.5	1.15	7.5	365	1.76	0.00
	100	3.9	2.4	1.7	8.4			

T cels	Cond	pH	Cl	PO4	SO4	NO3	HCO3	NH4
Ca	Mg	Na	K	SiO2	SiO2			
TOU9	8.0	366	7.8	6.1	0.10	5.0	0.40	184
	63.5	2.4	1.53	1.40	9.4			
ERM9	9.0	349	8.2	2.61	0.10	3.0	0.00	132
	50.0	1.7	1.40	0.50	10.1			
RAP9	7.5	315	8.2	3.48	0.15	9.0	0.45	104
	42.0	2.5	1.32	0.95	10.4			
NOI9	10.0	301	7.5	5.65	0.10	6.5	2.00	212
	90.0	3.5	2.83	2.15	9.6			
ROM9	10.5	638	7.6	3.04	0.15	7.5	0.51	254
	102.3	3.0	1.32	0.50	8.1			
QUE9	10.0	634	7.9	2.17	0.20	7.5	1.10	248
	95.0	3.5	1.95	1.30	9.4			
RUH9	9.5	338	7.5	6.09	0.10	4.0	0.00	116
	44.0	1.5	1.25	1.00	11.9			
FIL9	10.0	692	7.6	5.65	0.20	7.5	1.43	258
	100.8	3.7	2.65	1.50	7.5			
BAT9	10.0	705	7.7	3.91	0.40	8.0	1.10	272
	105.6	3.3	2.05	2.20	8.1			
DIA9	10.0	634	8.1	4.78	0.70	8.0	1.17	244
	81.0	4.8	2.74	0.60	7.8			
CHM9	10.0	743	7.6	3.48	0.10	30.0	1.07	264
	110.3	9.1	2.57	1.70	6.5			

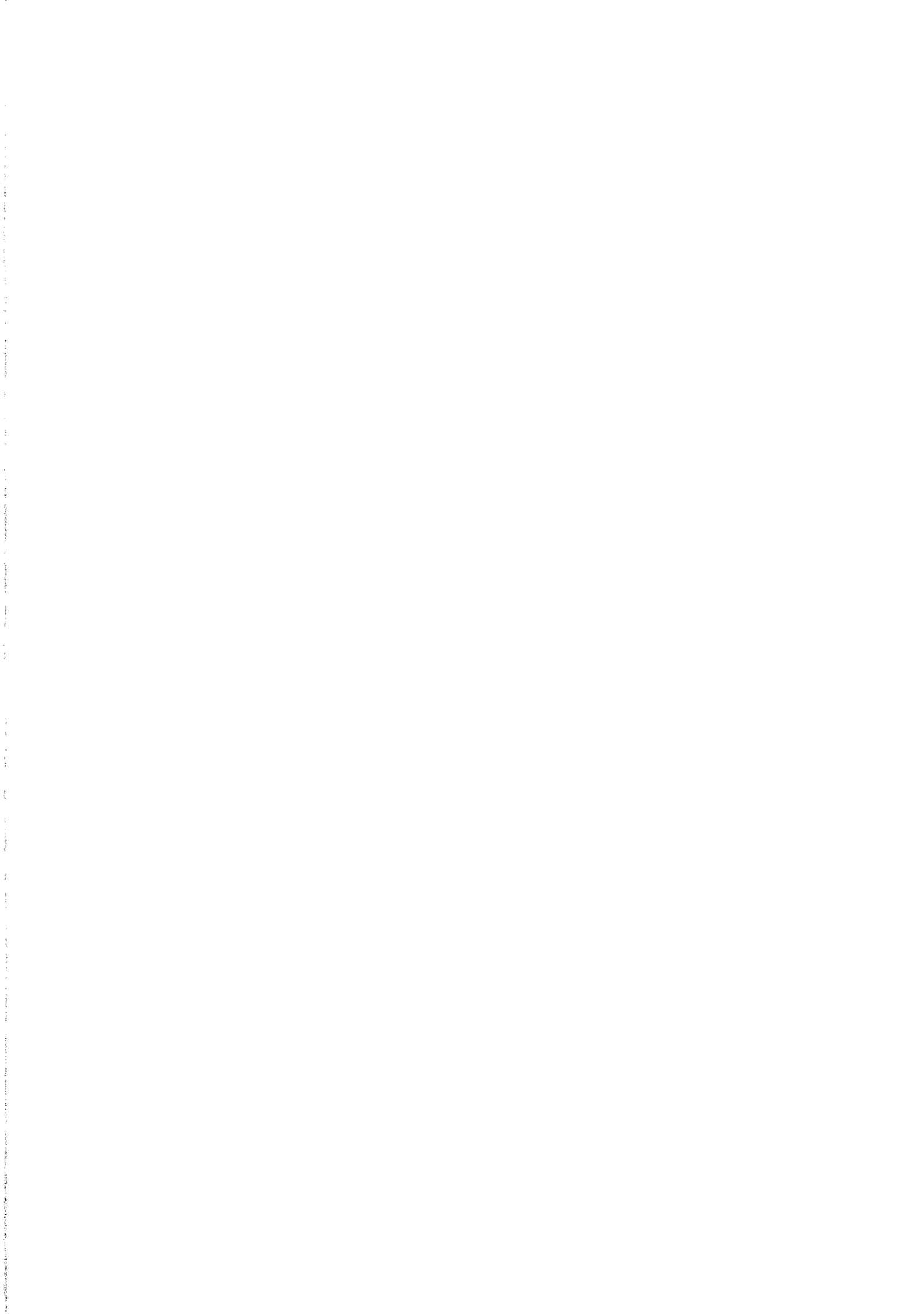
T cels	Cond	pH	Cl	PO4	SO4	HCO3	NO3	NO2
NH4	Ca	Mg	Na	K	SiO2	SiO2		
TOU10	10.6	223	7.05	6.5	0.16	11.1	200	1.80
	0.010	83	2.10	2.00	1.33	12.0		
ERM10	9.7	254	6.95	3.7	0.07	12.0	229	0.60
	0.015	97	1.70	1.35	0.60	10.5		
RAP10	10.1	103	6.87	3.2	0.04	2.8	98	0.30
	0.800	37	1.75	1.20	0.68	12.9		
NOI10	10.7	243	6.92	13.2	0.65	11.0	237	5.40
	0.095	102	2.90	2.35	1.51	10.7		
ROM10	10.6	279	7.0	5.7	0.07	12.0	279	1.75
	0.032	115	2.90	1.30	0.42	7.9		
BAT10	10.9	299	7.05	6.3	0.07	13.2	264	2.55
	0.052	113	3.20	2.05	1.04	8.5		
DIA10	10.7	288	7.25	12.6	0.00	14.0	250	3.70
	0.084	103	5.30	3.50	0.44	8.1		
CHM10	10.8	257	7.08	7.1	0.12	15.0	269	2.25
	0.010	111	4.70	2.25	1.14	8.5		
FIL10	10.8	426	7.1	8.4	0.16	12.2	266	2.75
	0.022	109	3.35	2.35	1.05	7.9		
RUH10	10.4	234	7.0	8.1	0.06	9.0	210	4.80
	0.009	89	4.85	1.65	1.40	10.7		
QUE10	10.6	217	7.05	5.9	0.04	10.7	256	1.45
	0.002	108	3.40	1.70	0.95	10.0		

HAUTE - SAONE
INSTANTANES 8 , 9 , 10

SUD - EST DE LA FRANCE
INSTANTANE D' ETIAGE - DECEMBRE 1981

SrT	ceis	pH	Cond	SiO2	HC03	SO4	Cl	N	
Na	K	Mg	Ca	UT*****					
V222	0.34	13.1	7.43	359	7.95	253.3	13.8	4.3	0.55
	1.58	0.38	7.12	78.8	22				
LEZ1	0.29	16.9	7.31	647	6.94	346.5	30.9	34.1	0.52
	0.97	1.56	9.91	112.0	28				
BUE1	0.04	13.0	7.50	345	3.10	240.1	6.6	5.5	0.21
	2.70	0.18	6.48	72.9	16				
BRI1	0.04	13.3	7.59	343	3.80	240.1	8.1	5.9	0.33
	2.90	0.30	10.97	66.3	23				
PLT1	0.64	18.9	7.24	1245	9.02	292.5	71.9	264.5	0.86
	30.40	5.36	15.00	145.0	35				
NIM1	0.36	14.0	7.15	615	8.06	322.6	69.6	39.8	4.51
	16.40	2.62	5.51	131.5	62				
SBO1	0.44	15.0	7.36	564	10.48	336.0	38.7	6.8	3.06
	8.80	1.88	9.12	170.0	46				
EUR1	0.11	14.3	7.49	514	8.00	386.7	7.5	7.9	0.47
	2.90	0.27	4.10	129.5	34				
STP1	0.14	14.0	7.54	387	4.90	267.4	16.2	7.4	0.31
	3.80	0.39	16.00	70.6	17				
STAI	0.31	16.0	7.34	544	7.80	297.4	63.4	21.1	2.09
	11.20	1.31	17.00	99.6	14				
RAM1	0.06	12.2	8.06	357	3.74	267.4	9.9	5.2	0.11
	2.90	0.31	25.00	55.4	21				
GAP1	0.08	13.8	7.67	354	3.86	253.3	9.1	6.4	0.10
	3.70	0.37	22.00	49.8	5				
ARG1	0.14	15.4	7.22	548	6.82	391.4	24.0	8.5	0.26
	4.80	0.51	20.50	110.0	20				
VAR1	0.14	14.8	7.30	524	6.16	378.4	20.7	5.3	0.50
	2.50	0.42	22.00	101.5	12				
REY1	0.20	14.0	7.36	522	7.74	335.0	29.4	17.1	1.40
	8.40	0.72	17.50	100.4	33				
A108	0.23	12.3	7.59	350	13.72	242.9	10.1	1.9	0.78
	1.03	0.50	7.64	74.0	50				
MEO3	0.26	9.0	7.76	281	5.84	200.3	6.4	2.0	0.31
	0.93	0.24	2.12	64.7	34				
JAB3	0.58	9.0	7.36	421	6.94	317.7	7.0	2.0	0.12
	2.70	0.51	3.39	112.0	38				
FMA2	0.46	11.0	7.39	374	8.42	247.9	31.7	2.1	0.22
	2.28	0.59	4.61	84.8	45				
NDA3	0.17	12.4	7.47	335	7.72	237.7	6.8	2.1	0.27
	1.17	0.27	5.03	73.1	32				
TAB1	0.14	16.4	7.32	504	10.16	352.3	16.8	7.9	1.29
	4.10	0.79	6.16	120.0	25				
BAS1	0.15	14.5	7.05	483	7.36	361.5	11.4	7.4	0.73
	3.20	0.91	2.80	132.0	36				
GOU1	0.17	14.1	7.36	360	7.38	236.6	24.2	6.8	1.39
	5.40	0.80	4.83	81.1	28				
FEE1	0.06	14.3	7.16	483	5.80	350.9	8.7	3.4	0.92
	4.10	0.45	1.46	127.5	40				
G215	0.11	10.8	7.55	295	7.14	205.4	4.4	4.3	0.47
	1.04	0.24	2.65	65.9	52				

L I S T E D E S F I G U R E S



LISTE DES FIGURES

N° (suite figures)	page
1 : Génèse d'un magasin carbonaté, fissuré et karstifié (DROGUE 1980)....	3
2 : Structure d'un magasin karstique (DROGUE 1971).....	4
3 : Effet d'échelle sur la perméabilité dans le karst (KIRALY 1975).....	4
4 : Effet d'échelle sur la perméabilité pour les réseaux de chenaux (KIRALY 1973).....	5
5 : Effet d'échelle sur la perméabilité pour les réseaux de fissures (KIRALY 1973).....	5
6 : Schéma d'un système karstique -(partie proche de l'exutoire) (dessin de R. ROUCH in MANGIN 1975).....	6
7 : Schéma théorique du régime de l'écoulement souterrain (TRIPET 1972)..	7
8 : Schéma d'un aquifère épikarstique dans la zone d'altération et de fracturation superficielle d'un karst (MANGIN 1975).....	7
9 : Profil moyen des perméabilités (Epikarst de Corconne)(GOUISSET 1981)	8
10 : Ecoulements hypodermiques - cause d'Hortus (Gard) (DROGUE 1969).....	8
11 : Comportement piézométrique du karst superficiel (GOUISSET 1981).....	9
12 : Systèmes étudiés (d'après GEZE in MANGIN 1975, simplifié).....	16
13 : Vaucluse : Echantillonnage de 3 sources.....	17
14 : Système du Verneau : carte géologique (TISSOT et TRESSE 1978).....	18
15 : Verneau : Lithostratigraphie (TISSOT et TRESSE 1978).....	18
16 : Faisceau salinois : coupes géologiques (FOLTETE 1968).....	20
17 : Réseau souterrain du Verneau - coupe schématique.....	20
18 : Verneau : Décrués (TISSOT et TRESSE 1978).....	21
19 : Préalpes du Chablais : schéma structural (CARON in DEBELMAS 1970)....	22
20 : Préalpes Médiannes Plastiques : lithostratigraphie (VUYLSTEEK 1983)...	22
21 : Massif du Nifflon-carte lithologique (VUYLSTEEK 1983).....	24
22 : Massif du Nifflon-coupe géologique (VUYLSTEEK 1983).....	24
23 : Massif du Nifflon-Précipitations et débits moyens mensuels.....	24
24 : Système karstique du Baget : carte (MANGIN 1975).....	25
25 : Sources de Poussarou et Malibert : comparaison des débits de crue....	26
26 : Système de Vaucluse : présentation géographique (MUDRY et PUIG 1987).	27
27 : Système de Vaucluse : coupe géologique (MUDRY et PUIG 1987).....	28
28 : Système de Vaucluse : schéma géologique (MUDRY et PUIG 1987).....	28
29 : Gouffre de Caladaire : coupe topographique (Société Spéléologique d'Avignon).....	30
30 : Fracturation et orientation des cavités karstiques A : accidents visibles sur photos aériennes (d'après BERGERAT 1985) B : longueur cumulée de galeries : gouffre de Caladaire (d'après MALZIEU 1984).....	30
31 : Fontaine de Vaucluse : coupe de l'émergence et principales étapes de son exploration (d'après VIARD in STAIGRE 1983, et complété).....	32
32 : Verneau : variations physico-chimiques.....	38
33 : Verneau : rendement des précipitations.....	38
34 : Verneau : dilution des traceurs calco-carboniques.....	39
35 : Verneau : pics des composés azotés.....	40
36 : Verneau : pics de fer et de manganèse.....	40
37 : Verneau : lessivage et dilution du sodium, du potassium et des phosphates.....	41
38 : Verneau : lessivage et dilution de la silice, des sulfates et des chlorures.....	41
39 : Pont de Gys : variations physico-chimiques.....	42
40 : Pont de Gys : indicateurs de transit d'eaux d'infiltration.....	44
41 : Pont de Gys : débit, température et saturation.....	45
42 : Relation $t = f(Q)$	46
43 : Pont de Gys : dilution des sulfates et des bicarbonates.....	46
44 : Pont de Gys : épisodes avec sous-saturation ou avec dilution.....	47
45 : Pont de Gys : indicateurs de lessivage du sol.....	47

N° (suite figures)	pages
46 : Les Plagnes et le Pont de Gys : oxygène 18 et tritium.....	48
47 : Baget : variations physico-chimiques.....	50
48 : Baget : traceurs calco-carboniques.....	51
49 : Baget : strontium, sulfates et silice.....	52
50 : Baget : indicateurs de lessivage du sol.....	52
51 : Baget : nombre d'indicateurs de lessivage et de dilution.....	53
52 A et B : Vaucluse hebdomadaire : variations physico-chimiques.....	56-57
53 : Distribution des conductivités de 5 émergences (Plagnes, Pont de Gys, Baget, Verneau, Vaucluse).....	60
54 : Verneau, ACP, diagramme des variables (plan I x II, 10 descripteurs) A : crue de novembre 1977 (TISSOT et TRESSE 1978).....	63
B : cycle 1981-82.....	63
55 : Verneau 1981-82, ACP, diagramme des individus (plan I xII, 10 descripteurs).....	65
56 : Verneau 1981-82, ACP, diagramme des variables (plan I x II, 17 descripteurs).....	65
57 : Diagramme pH-potentiel rédox. Situation des courbes-limites Fe^{2+}/Fe et Mn^{2+}/Mn	66
58 : Verneau 1981-82, ACP, diagramme des individus (plan I x II, 17 descripteurs).....	67
59 : Verneau 1981-82, résumé du comportement hydrocinématique, 17 descripteurs).....	67
60 : Pont de Gys - ACP diagramme des variables ; (A : plan I x II et B : plan III x IV).....	68
61 : Pont de Gys - ACP diagramme des individus (plan I x II, 221 individus)	69
62 : Pont de Gys avec pH - ACP diagramme des variables (A : plan I x II ; B : plan III x IV).....	70
63 : Pont de Gys avec tritium - ACP diagramme des variables (plan I x II)	71
64 : Pont de Gys 1979 - ACP, diagramme des variables (A : plan I x II, B : plan III x IV).....	71
65 : Pont de Gys 1979 : diagramme oxygène 18 - Tritium-conductivité.....	72
66 : Les Plagnes 1979 - ACP - diagramme des variables (plan I x II).....	73
67 : Les Plagnes 1979 - ACP diagramme des individus (plan I x II).....	74
68 : Baget, ACP, diagramme des variables (plan I x II , 8 descripteurs) A :Crue début cycle (BAKALOWICZ 1979) B : 1981.....	75
69 : Baget 1981, ACP, diagramme des individus (plan I x II, 8 descripteurs)	76
70 : Baget 1981, ACP, diagramme des variables (plan I x II, 14 descripteurs)	76
71 : Baget 1981, ACP, diagramme des individus (plan I x II, 14 descripteurs)	77
72 : Poussarou et Malibert : histogramme des teneurs (GUYOT 1983).....	78
73 : Poussarou et Malibert : variation des teneurs en chlorures (d'après GUYOT 1983).....	78
74 : A : Poussarou ; B : Malibert - ACP - diagramme des variables (plan I xII)	79
75 : A : Poussarou ; B : Malibert - ACP - diagramme des individus (plan I x II)	80
76 : Vaucluse-hebdomadaire : ACP, diagramme des variables (plan I x II).....	80
77 : Vaucluse-hebdomadaire : ACP, diagramme des individus (plan I x II).....	81
78 : Vaucluse-crues hebdomadaire : ACP, diagramme des variables (plan I x II)	82
79 : Vaucluse-crues hebdomadaire : ACP, diagramme des individus (plan I x II)	83
80 : Vaucluse-étiages hebdomadaire : ACP, diagramme des variables (plan I x II)	84
81 : Vaucluse-étiages hebdomadaire :ACP, diagramme des variables (plan I x II)	84
82 : Fontaine de Vaucluse 1981 : Décrue et tarissement, variations physico-chimiques.....	88
83 : Fontaine de Vaucluse 1981 : Hydrogramme (échelle semi-logarithmique)....	89
84 : Groseau 1981 : Décrue et tarissement, variations physico-chimiques.....	90
85 : Fontaine de vaucluse 1981 : Crue d'été et basses eaux d'automne, variations physico-chimiques.....	92
86 : Groseau 1981 : Crue d'été et basses eaux d'automne, variations physico-chimiques.....	93

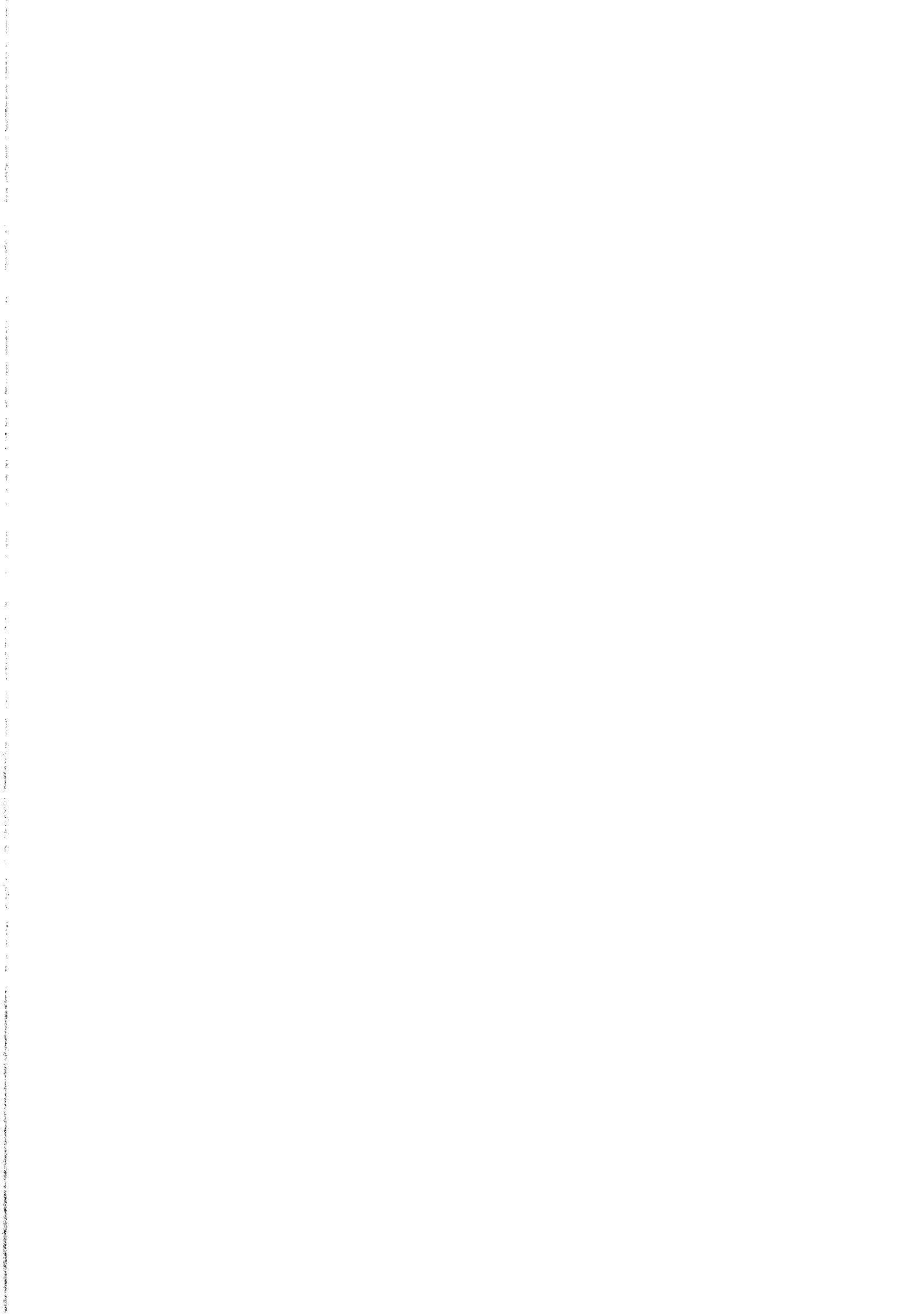
N° (suite figures)	pages
87 : Fontaine de Vaucluse 1981 : Crue d'hiver, variations physico-chimiques.....	94
88 : Groseau 1981 : Crue d'hiver, variations physico-chimiques....	95
89 : Distribution des teneurs en silice - Fontaine de Vaucluse et Groseau 1981.....	96
90 : Plateau de Vaucluse 1981, ACP, diagramme des variables (plan I x II).....	98
91 : Plateau de Vaucluse 1981, ACP, diagramme des individus (plan I x II).....	98
92 : Vaucluse-quotidien 1981, ACP, diagramme des variables (plan I x II).....	102
93 : Vaucluse-quotidien 1981, ACP, diagramme des individus (plan I x II).....	102
94 à 98 : Vaucluse quotidien, ACP par épisodes, diagramme des variables, plan I x II.....	104
94 : Décrue.....	104
95 : Tarissement	104
96 : Crue d'automne.....	104
97 : Basses eaux d'automne.....	104
98 : Crue d'hiver.....	104
99 à 103 : Vaucluse quotidien, ACP par épisodes, diagramme des individus (plan I x II).....	105
99 : Décrue.....	105
100 : Tarissement	105
101 : Crue d'automne.....	105
102 : Basses eaux d'automne.....	105
103 : Crue d'hiver.....	105
104 : Vaucluse - Analyse discriminante : épisodes analysés	106
105 : Vaucluse - Analyse discriminante : plages de variations physico-chimiques par épisode et par élément.....	107
106 : Vaucluse - Analyse discriminante : coefficients de variation par épisode et par élément.....	108
107 : Vaucluse quotidien - Analyse discriminante : diagramme des individus (plan I x II).....	112
108 : Vaucluse quotidien - Analyse discriminante , affectation des individus aux groupes déterminés a priori.....	114
109 : Décomposition hydrodynamique d'un hydrogramme de crue (BARNES 1940).....	126
110 : Courbes de débit, conductivité et écoulement souterrain calculé à Four Mile Creek (Tracer, Iowa - sep et oct. 1963 - KUNKLE 1965)	129
111 : Relation entre la conductivité des eaux de surface et la distance de l'écoulement (ln est la distance moyenne d'écoulement au cours d'eau dans le bassin (NAKAMURA 1971).....	129
112 : Composante souterraine de l'écoulement total pour le bassin de Fraser Brook calculée avec Ca et Mg. La courbe composite est estimée à partir de HCO_3^- , Ca, Mg et Na (PINDER et JONES, 1969)..	130
113 : Relation conductivité ³ x débit-débit dans la phase de récession d'un hydrogramme (NAKAMURA 1971).....	130
114 : Séparation de la composante "écoulement de surface" (NAKAMURA 1971).....	131
115 : Comparaison des hydrogrammes souterrains obtenus par les méthodes chimiques et graphiques (crue du 17 nov. 1972-HEYDARPOUR 1974).....	131
116 : Hydrogramme d'une crue (OLIVE 1970).....	131
117 : Comparaison des hydrogrammes souterrains obtenus par les méthodes isotopique, chimique et graphique (BLAVOUX 1978).....	132

N° (suite figures)	pages
118 : Modèle de fonctionnement du karst (BLAVOUX et MUDRY 1983, 1984	133
119 : Stabilisation des paramètres physico-chimiques à la Fontaine de Vaucluse - tarissement 1981 (BLAVOUX et MUDRY 1983, 1984).....	136
120 : Relation conductivité-débit à la Fontaine de Vaucluse - Cycle hydrologique 1981-82 (BLAVOUX et MUDRY 1983-1984).....	137
121 : Relation magnésium-débit à la Fontaine de Vaucluse - cycle hydro- logique 1981-82 (BLAVOUX et MUDRY 1983-1984).....	138
122 : Relation flux en calcium-débit, source du Verneau, crue de novembre 1977.....	138
123 : Relation flux en calcium-débit, source de l'Areuse, crue de novembre 1977.....	139
124 : Détermination du débit de la composante de ruissellement souterrain à partir des courbes de décrue et de tarissement.....	140
125 : Courbes de décrue et de tarissement, source du Verneau, crue de novembre 1977.....	144
126 : Décomposition de l'hydrogramme de la crue de novembre 1977 au Verneau	144
127 : Courbes de décrue et de tarissement, source de l'Areuse, crue de novembre 1977.....	146
128 : Décomposition de l'hydrogramme de la crue de novembre 1977 sur l'Areuse.....	146
129 : Décomposition de l'hydrogramme des crues de janvier-février 1980 au Pont de Gys.....	148
130 : Réaction du débit et de la conductivité aux cycles nycthémeraux gel-dégel (mai 1979), A : le Pont de Gys, B : les Plagnes (VUYLSTEEK 1983).....	150
131 : Relation flux en conductivité-débit-infiltration, Grotte de St Catherine (Ariège), crue de février-mars 1976.....	152
132 : Evolution des teneurs en isotopes (¹⁸ O,T) au cours de la crue du 4 novembre 1977 au Lison (TISSOT et TRESSE 1978).....	152
133 : Relation flux en oxygène 18-débit - source du Lison, crue du 4 novembre 1977.....	154
134 : Relation flux en tritium-débit. Source du Lison, crue du 4 novembre 1977.....	154
135 : Evolution de la teneur en oxygène 18. Source du Baget, crue de janvier 1973 (d'après EBERENTZ 1975, modifié).....	155
136 : Relation flux en oxygène 18-débit. Source du Baget, crue de janvier 1973.....	156
137 : Décomposition de l'hydrogramme de l'Areuse avec l'oxygène 18, crue de juin 1979 (SIEGENTHALER et al. 1983).....	156
138 : Relation flux en silice-débit. Fontaine de Vaucluse, cycles 1981-1982.....	160
139 : Décomposition de l'hydrogramme de la Fontaine de Vaucluse avec la teneur en silice - Cycles 1981 et 1982.....	160
140 : Décomposition d'hydrogramme avec la silice - comparaison avec l'information apportée par le magnésium et la température.....	162
141 : Relation flux en bicarbonates-débit. Source du Pont de Gys, 11 semaines en 1981.....	164
142 : Décomposition de l'hydrogramme du Pont de Gys avec les bicarbonates 11 semaines (février - mai 1981).....	164
143 : Contribution de l'infiltration déterminée par la méthode hydrody- namique.....	166
144 : Comparaison de 3 décrues de l'infiltration à la Fontaine de Vaucluse : débit normé de l'infiltration et fonction y.....	169
145 : Courbes de décrue de l'infiltration : fonction y sur 4 systèmes karstiques.....	171

N° (suite figures)	pages
146 : Courbes de décrue de l'infiltration, méthode physico-chimique sur 4 systèmes karstiques.....	171
147 : Comparaison du débit de l'infiltration pour t = 2 jours (méthode physico-chimique) et du paramètre i de MANGIN sur 4 systèmes karstiques.....	172
148 : Comparaison des volumes dynamiques initiaux (méthode MANGIN) et des volumes matriciels écoulés (méthode physico-chimique).....	172
149 : Evolution du chimisme lors d'une crue simple de début de cycle, au Baget (BAKALOWICZ 1979).....	176
150 : Relation flux en sulfates-débit. Source du Baget, crue de décembre 1972.....	176
151 : Evolution de la teneur en magnésium - Source du Lez, crue de juin 1973 (MARJOLET et SALADO 1975).....	177
152 : Relation flux en magnésium-débit. Source du Lez, crue de juin 1973.....	178
153 : Schéma structural du Jura (CHAUVE et al 1980).....	188
154 : Coupe géologique Est-Ouest du Jura (CHAUVE et al 1979).....	188
155 : Les grands ensembles lithologiques de Franche-Comté (CHAUVE et al 1979).....	190
156 : Localisation des émergences surveillées (BLAVOUX et al 1979)...	192
157 : Répartition temporelle des précipitations, station de Pontarlier (altitude 842 m), 1973-1981.....	192
158 : Histogrammes des températures mesurées au cours des 7 instantanés	197
159-161 : Gradients thermiques : températures de l'eau des émergences en fonction de l'altitude de la source.....	199 - 200
159 : Troisième campagne : étiage - septembre 1977.....	199
160 : Moyenne toutes campagnes.....	199
161 : Températures maximales.....	200
162 : Gradients thermiques : 7 campagnes, moyenne et maxima.....	200
163 : Géologie du versant SE de la Dôle (AUBERT et al 1970).....	203
164 : Coupe géologique Barillette - Plaine suisse (AUBERT et al 1970).	204
165 : Gradient thermique moyen Haut-Doubs.....	204
166 : Amplitude de la variation thermique observée au cours des 7 campagnes (valeur maxi -valeur mini).....	206
167 : Histogrammes des teneurs en oxygène 18 (4 campagnes).....	209
168-172 : Gradients d'oxygène 18 avec l'altitude moyenne estimée des impluviums.....	210 - 213
168 : Première campagne : étiage - janvier 1977.....	210
169 : Deuxième campagne : crue de fonte de neige - février 1977.....	210
170 : Troisième campagne : étiage - septembre 1977.....	212
171 : Quatrième campagne : étiage - octobre 1978	212
172 : Moyenne 4 campagnes.....	213
173 : Gradients d'oxygène 18, 28 sources communes aux 4 campagnes + moyenne.....	214
174 : Corrélacion entre les teneurs en oxygène 18 des campagnes d'octobre 1978 et septembre 1977.....	218
175 : Variabilité des teneurs en oxygène 18 entre crue de fonte de neige et étiages.....	220
176 : Teneurs pondérées annuelles de la pluie à Thonon et valeurs mesurées aux émergences (BLAVOUX et al 1982).....	223
177 : Distribution des teneurs en tritium - étiage d'octobre 1978 (BLAVOUX et al 1982).....	225
178 : Etiage 1978 : répartition géographique des teneurs en tritium (BLAVOUX et al 1982).....	226
179 : Histogramme des teneurs en tritium des sources jurassiennes (1977-1978) (BLAVOUX et al 1982, complétée)	227

N° (suite figures)	pages
180 : Variabilité des teneurs en tritium entre crue de fonte de neige et étiages.....	228
181 : Modèle exponentiel : teneurs en tritium simulées aux exutoires des systèmes karstiques avec des temps de renouvellement de 1, 2,5, 5 et 10 ans (BLAVOUX et al 1982).....	232
182 : Précipitationset teneur en tritium à Thonon les Bains (1974-1979).....	233
183 : Classification des aquifères karstiques jurassiens à l'aide de la teneur en tritium à l'étiage, de la variabilité des teneurs en tritium et de l'amplitude de variation thermique.....	234
184-187 : Diagrammes de Tillmans.....	238
184 : Janvier 1977.....	238
185 : Février 1977.....	238
186 : Septembre 1977.....	238
187 : Octobre 1978.....	238
188 : Evolution de la position des émergences sur le diagramme de Tillmans.....	239
189 : Diagramme d'équilibre dans le système $Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$	243
190 : Diagramme d'équilibre dans le système $K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$	243
191 : Distribution des teneurs en chlorures - octobre 1978 (CHAUVE et al 1982).....	248
192 : Distribution des teneurs en nitrates - octobre 1978 (CHAUVE et al 1982).....	248
193 : Distribution des teneurs en potassium - octobre 1978 (CHAUVE et al 1982).....	250
194 : Distribution des teneurs en sodium - octobre 1978 (CHAUVE et al 1982).....	250
195 : Carte des indices de contamination des sources du Jura.....	252
196 : Histogrammes des teneurs en chlorures (1977-82).....	253
197 : Histogrammes des teneurs en nitrates (1977-82).....	254
198 : Jura - Etiage 1977, ACP, diagramme des variables (plan I x II)	256
199 : Jura - Etiage 1977, ACP, diagramme des individus (plan I x II)	258
200 : Classification ascendante hiérarchique de la campagne de l'étiage 1978 (descripteurs et émergences).....	260
201 : Répartition géographique des 8 taxons de la classification ascendante hiérarchique de l'étiage 1978.....	261
202 : Jura - 4 campagnes (1977-1978), ACP, diagramme des variables (plan I x II).....	262
203 : Jura - 4 campagnes (1977-1978), diagramme des individus : enveloppes des 4 campagnes (plan I x II).....	263
204 : Jura - 4 campagnes (1977-1978), diagramme des individus : trajets au cours des 4 campagnes (plan I x II).....	264
205-208 : Répartition géographique des abscisses des émergences sur l'axe factoriel I.....	266
205 : Etiage janvier 1977.....	266
206 : Crue de fonte de neige février 1977.....	266
207 : Etiage septembre 1977.....	266
208 : Etiage octobre 1977.....	266
209 : Jura - 7 campagnes (1977-1982), ACP, diagramme des variables (plan I x II).....	267
210 : Jura - 7 campagnes (1977-1982), ACP, diagramme des individus enveloppes des 7 campagnes (plan I x II).....	267
211 : Jura - 7 campagnes (1977-1982, ACP, diagramme des individus : trajets au cours des 7 campagnes (plan I x II).....	268
212 : Haut-Doubs : localisation des émergences surveillées (CHAUVE et MUDRY 1980).....	269
213 : Haut-Doubs : cadre géologique (CHAUVE et MUDRY 1980).....	270
214 : Haut-Doubs, 5 campagnes, ACP, diagramme des variables (plan IxII)	272
215 : Haut-Doubs, 5 campagnes, ACP, diagramme des individus : trajets au cours des 5 campagnes (plan I x II).....	272

N° (suite figures)	pages
216 : Haute-Saône : localisation des émergences surveillées.....	273
217 : Haute-Saône : lithostratigraphie (CONTINI 1972).....	274
218 : Haute-Saône : cadre géologique et essais de traçage.....	274
219 : Haute-Saône : répartition géologique des teneurs en silice- septembre 1980.....	275
220 : Haute-Saône : répartition géologique des teneurs en azote nitrique septembre 1980.....	275
221 : Haute-Saône , mars 1980, ACP, diagramme des variables (plan I x II).....	277
222 : Haute-Saône, mars 1980, ACP, diagramme des individus (plan I x II)	277
223 : Sud-Est de la France : situation géologique des émergences prélevées en décembre 1981.....	280
224 : Sud-Est : température de l'eau en fonction de l'altitude des émergences - décembre 1981.....	282
225 : Sud-Est : relation teneur en chlorures-altitude des impluviums - décembre 1981.....	284
226 : Sud-Est : relation teneur reconstituée des précipitations en chlorures- distance à la côte - décembre 1981.....	284
227 : Sud-Est : répartition géographique des teneurs reconstituées des précipitations en chlorures - décembre 1981.....	286
228 : Sud-Est : histogramme des teneurs en sulfates des émergences décembre 1981.....	286
229 : Sud-Est : répartition géographique des teneurs en sulfates et af- fleurements triasiques - décembre 1981.....	286
230 : Sud-Est : répartition géographique des rapports a Mg/a Ca et affleu- rements dolomitiques - décembre 1981.....	288
231 : Sud-Est : répartition géographique des pCO ₂ calculées - décembre 1981	288
232 : Sud-Est : répartition géographique des ΔpH ² calculés - décembre 1981	290
233 : Sud-Est : répartition géographique des teneurs en tritium - décembre 1981.....	290
234 : Sud-Est, ACP, campagne totale sans tritium, décembre 1981 diagramme des variables (plan I x II).....	292
235 : Sud-Est, ACP, campagne totale sans tritium, décembre 1981, diagramme des individus (plan I x II).....	292
236 : Sud-Est, ACP, sélection des individus non anomaux, sans tritium, décembre 1981, diagramme des variables (plan I x II).....	292
237 : Sud-Est, ACP, sélection des individus non anomaux, sans tritium, décembre 1981, diagramme des individus (plan I x II).....	294
238 : Sud-Est, ACP, campagne totale avec tritium, décembre 1981, diagramme des variables (plan I x II).....	294
239 : Sud-Est, ACP, campagne totale avec tritium, décembre 1981, diagramme des individus (plan I x II).....	294
240 : Sud-Est, ACP, sélection des individus non anomaux, avec tritium, décembre 1981, diagramme des variables (plan I x II).....	295
241 : Sud-Est, ACP, sélection des individus non anomaux avec tritium, décembre 1981, diagramme des individus (plan I x II).....	296
242 : Vaucluse : relation température de l'eau-altitude des émergences juin 1981.....	297
243 : Dégradation de la teneur en bicarbonates pendant les cycles de prélèvements automatiques.....	325
244 : Classification ascendante hiérarchique : agglomération des individus et des descripteurs.....	351



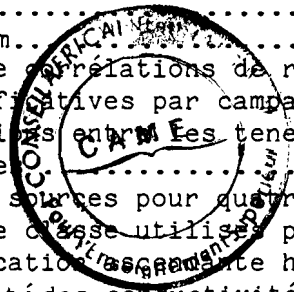
L I S T E D E S T A B L E A U X



LISTE DES TABLEAUX

N°	pages
1 : les émergences étudiées.....	16
2 : Paramètres climatiques du système de Vaucluse (MUDRY et PUIG 1987).	34
3 : Bilan du système de Vaucluse (MUDRY et PUIG 1987).....	35
4-5 Matrice des coefficients de corrélation linéaire entre descripteurs au Verneau.....	64
4 : Crue du 4 Novembre 1977, pas horaire (TISSOT et TRESSE 1978).....	64
5 : Cycle 1981-82, pas hebdomadaire.....	64
6 : Sources karstiques du Vaucluse, ACP, valeurs propres, pourcentages et cumuls.....	99
7 : Plage occupée par les abscisses des unités statistiques dans les cinq groupes de points sur les axes factoriels I et II (sources du Groseau, de la Fontaine de Vaucluse et d'Aurel).....	100
8 : Coefficient de variation des descripteurs, au cours des cinq phases hydrocinématiques (CV = $100\sigma_x/\bar{X}$).....	108
9-14 : Vaucluse quotidien : corrélation par épisodes.....	110
9 : Décrue.....	110
10 : Tarissement.....	110
11 : Crue d'automne.....	110
12 : Basses eaux d'automne.....	110
13 : Crue d'hiver.....	110
14 : Séquence complète.....	110
15 : Nombre de relations significatives et hautement significatives par phase hydrocinématique.....	111
16 : Analyse discriminante : matrice des centres de gravité.....	112
17 : Analyse discriminante : réaffectation des individus principaux.....	113
18 : Conductivité et teneurs en magnésium de quatre sources karstiques du Jura au cours des étiages 1977 à 1982.....	135
19 : Concentration en chlorures des eaux d'infiltration.....	142
20 : Volumes écoulés - crue de novembre 1977, source du Verneau.....	145
21 : Volumes écoulés - crue de novembre 1977, source de l'Areuse.....	147
22 : Teneur en bicarbonates au cours des crues de janvier-février 1980 au Pont de Gys.....	147
23 : Volumes écoulés - crues de janvier-février 1980 au Pont de Gys...	148
24 : Relations flux en conductivité-débit - crue de fonte de neige (mai 1980) aux Plagnes et au Pont de Gys.....	149
25 : Concentration en silice du "ruissellement souterrain" - Fontaine de Vaucluse - cycles 1981 et 1982.....	161
26 : Volumes délivrés par les deux composantes de l'écoulement - Fontaine de Vaucluse - cycles 1981 et 1982.....	162
27 : Volumes délivrés par les deux composantes de l'écoulement Pont de Gys - 1981.....	163
28 : Corrélation entre la variable y et le débit normé de l'infiltration (q^{\perp})	168
29 : Corrélation entre décrues observées de l'infiltration (q^{\perp}) et décrues simulées par la méthode MANGIN (y).....	170
30 : Comparaison des décompositions hydrodynamiques et les décompositions physico-chimiques.....	170
31 : Description géochimique de la série du Jura neuchâtelois (PERSOZ et KUBLER in KIRALY 1973).....	191
32 : Gradient thermique moyen annuel dans l'air.....	194
33 : Température de l'eau des émergences au moment des prélèvements.....	196
34 : Corrélations et gradients température de l'eau - altitude.....	198
35 : Etiages les plus complets : matrice des coefficients de corrélation linéaire.....	201
36 : Valeur de T pour la comparaison des gradients thermiques des diffé- rentes campagnes.....	202

N°	pages
37 : Haut-Doubs - corrélation température de l'eau -altitudes (9 sources, 5 campagnes).....	205
38 : Teneur en oxygène 18 des sources jurassiennes.....	208
39 : Corrélations oxygène 18 - altitudes - effectifs totaux quatre campagnes.....	211
40 : Gradient d'oxygène 18 dans quelques régions (BLAVOUX 1978).....	214
41 : Individus communs aux quatre campagnes : coefficients de corrélation linéaire.....	217
42 : Valeurs de T pour la comparaison des gradients d'oxygène 18 des différentes campagnes.....	218
43 : Teneurs en tritium des sources jurassiennes.....	222
44 : Teneur en tritium de la pluie à Thonon les Bains (teneur pondérée annuelle).....	223
45 : Débits de référence de quelques sources jurassiennes.....	225
46 : Tritium : corrélation inter-campagnes - 28 individus communs coefficient de corrélation linéaire.....	228
47 : Tritium : corrélation inter-campagnes - 28 individus communs coefficient de corrélation de rang de Spearman.....	228
48 : Tritium : corrélation inter-campagnes : individus communs à deux campagnes successives - coefficient de corrélation de rang de Spearman.....	230
49 : Modèle exponentiel : teneur en tritium à la sortie (période 1977-1980) pour des temps de renouvellement de 1 à 500 ans (BLAVOUX et al 1982).....	231
50 : Sources karstiques du Jura : Valeurs du ΔpH	240
51 : Sources karstiques du Jura : valeurs de la pCO_2	242
52-53 : Corrélations de rang de Spearman.....	244
52 : Chlorures.....	244
53 : Azote nitrique.....	244
54-55 : Corrélations de rang de Spearman.....	246
54 : Sodium.....	246
55 : Potassium.....	246
56 : Nombre de corrélations de rang de Spearman hautement significatives et significatives par campagne et par élément.....	247
57 : Corrélations entre les teneurs de quelques ions - octobre 1978, 47 sources.....	249
58 : Rang des sources pour quatre éléments - octobre 1978.....	250
59 : Seuils de classe utilisés pour la discrétisation préalable à la classification ascendante hiérarchique.....	259
60 : Variabilité des conductivités et des teneurs en silice au cours des six campagnes instantanées en Haute-Saône (1979-1982).....	276
61 : Sud-Est de la France : gradients climatiques avec l'altitude.....	282
62 : Vaucluse : température et oxygène 18 en fonction des altitudes des émergences et des impluviums (juin et septembre 1981).....	296
63 : Colorimétrie : paramètres analytiques.....	326
64 : Absorption atomique flamme : paramètres analytiques.....	329
65 : Absorption atomique sans flamme : paramètres analytiques.....	330



R E S U M E





CONTRIBUTION OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL
ENVIRONMENTAL TRACING TO THE HYDROCINEMATICAL
KNOWLEDGE OF THE CARBONATE AQUIFER

by Jacques MUDRY

ABSTRACT

Carbonate aquifers bear a memory of the recharge episodes. The environmental, physical and chemical tracing allows to specify the origin of the discharge water passing through the spring, hence it is an essential complement to the hydrodynamical studies.

The first part of this thesis deals with the study of the time-variations of the physical and chemical content of the karst springs, on weekly and daily bases.

The second part tries, from the chronological studies, to compute the amount of the reserves and of the underground flow in the total discharge of the spring, during flood and hydrological cycles.

The third part purposes to prospect the hydrogeological regions (Jura mountains and southeastern France) with synchronous snapshots.

This work allows a schematization of the behaviour of the system. At the end of a subsidence period, the precipitations percolate, accumulate and replace the stored water and solutes in the various "unsaturated" reservoirs -soil and epikarst- and saturated reservoirs -flow axes and capacitive zones-.

The outlet records the chemical character of both media: outside (=immediate infiltration) and waterlogged zone (=piston effect). The effective and massive contribution of the underground flow to the total discharge occurs in a mixture with the reserve water, often after the hydrograph peak, at the beginning of the subsidence. The drying up of the reserve begin when the contribution of the underground flow stops in the mixture. Hence the physical and chemical investigations allows well to discriminate between hydrocinematics and hydrodynamics, that is the transit and the transfer respectively.

The identification of the uninfluenced period, with the aid of the snapshots, allows to get many informations about the geochemical environment of the karst, its hydrocinematical behaviour at the regional scale in a mountain zone, the location of recharge areas and reserves, the mean age of permanent reserves and human influence on their quality.

The representativity of methods and studied periods has been proved.

KEY WORDS

Karst - Springs - Hydrochemistry - Hydrodynamics - Hydrological methods - Environmental isotopes - Infiltration - Reserves - Unsaturated zone - Water recession - Floods - Water subsidence - Jura mountains - Vaucluse.



R E S U M E

Les systèmes qui se développent dans des roches carbonatées gardent une plus ou moins grande mémoire des épisodes responsables de leur recharge. Les études hydrodynamiques diachroniques (analyse des courbes de récession et ajustement à des lois mathématiques) ou l'exploitation statistique des données (étude des débits classés, analyse spectrale et corrélatrice) permettent de mettre en évidence cette mémoire et de la quantifier en terme de réserves. L'hydrochimie est aussi un outil très puissant pour l'étude de la mémoire du système, car elle permet, grâce à son aspect qualitatif, de préciser l'origine des masses d'eaux transitant par l'exutoire, et ainsi d'affiner la reconstitution du fonctionnement hydrocinématique de l'aquifère.

Cette reconstitution a été tentée à partir de deux démarches complémentaires, le suivi diachronique, étude des variations temporelles de concentration ou de flux physico-chimique d'émergences sélectionnées (suivi hebdomadaire du Pont de Gys en Haute-Savoie, du Verneau dans le Doubs, du Baget en Ariège et de la Fontaine de Vaucluse, suivi quotidien de la Fontaine de Vaucluse, du Groseau et d'Aurel dans le Sud-Est de la France), et le cliché synchrone, prospection spatiale d'une province hydrogéologique à une période judicieusement choisie (Jura, Haut-Doubs, Haute-Saône et Sud-Est de la France).

Les deux modes d'approche fournissent des résultats concordants : le système karstique en période hydrodynamiquement réputée non influencée (tarissement s.s.) garde la mémoire d'épisodes de recharge ayant modifié la chimie de la réserve assurant ce tarissement. Inversement, les abondantes précipitations responsables d'une montée de crue peuvent mobiliser d'importants volumes d'une eau à marque chimique de la réserve : le système en crue garde l'empreinte chimique de ses réserves. Le fonctionnement hydrocinématique des systèmes résulte donc de l'interaction de ces deux types de mémoire : mémoire à court terme et à long terme.

La première partie de ce travail traite du suivi des paramètres physico-chimiques au cours du cycle hydrologique ainsi qu'en étiage. L'analyse des données montre que pendant le tarissement au sens strict les teneurs caractéristiques des réserves permanentes du système oscillent de manière aléatoire, aux erreurs analytiques près, autour d'une moyenne caractéristique de l'état hydrodynamique et hydrochimique de la réserve, et de l'histoire de sa recharge ; c'est pourquoi il est nécessaire, pour comparer le comportement de plusieurs émergences, de les étudier simultanément.

La physico-chimie du système en tarissement est très sensible aux apports d'eau par la surface : on peut observer d'une part des transits rapides et directs d'eau chimiquement marquée par la zone non saturée, sans que le débit varie de manière appréciable et d'autre part une recharge partielle des blocs capacitifs du système par cette même infiltration ; dans ce cas, on note une évolution de la qualité des eaux des réserves à la suite de ces précipitations. Les basses eaux consécutives à ces pluies ne peuvent dès lors plus être considérées comme du tarissement au sens strict.

Dans les systèmes bien karstifiés, les montées de crues mobilisent des eaux (marquées chimiquement par la réserve) présentes dans les drains au moment de l'infiltration. Cet effet piston, bien visible dans la chimie des eaux de l'émergence est suivi par l'arrivée des eaux d'infiltration qui se mélangent aux eaux de réserve.

La deuxième partie tente de calculer la part relative des deux composantes (infiltration et réserve) au cours de crues ou au cours de cycles. Les résultats ne contredisent pas ceux obtenus par des méthodes hydrodynamiques ; toutefois la méthode physico-chimique donne plus de poids à la contribution des réserves, mais surtout met bien en évidence les décalages temporels existant entre les variations du débit (transfert) et le passage effectif des masses d'eau à l'exutoire (transit). Ces décalages sont fonction du type et de l'importance de la karstification.

La troisième partie justifie l'emploi des campagnes de prélèvements instantanés des eaux des principales sources d'une région karstique, elle en précise les limites. Dans le Jura, l'altitude moyenne des impluviums et des réserves permanentes peut être obtenue par l'étude des teneurs en oxygène 18 et des températures. La chimie des eaux jurassiennes et son analyse multidimensionnelle mettent en évidence l'opposition structurale Haute-Chaîne-plateaux : les émergences de la Haute-Chaîne drainant des systèmes à faibles réserves (à temps de séjour faible) peu affectés par l'activité humaine, celles des plateaux drainant des aquifères à réserves plus développées établis sous des zones cultivées. Elles permettent de reconnaître les influences anthropiques et par là d'envisager un réseau de surveillance de la qualité de l'eau des réserves.

L'acquisition des données de pCO₂ de température et d'oxygène 18 fait considérer les campagnes de basses eaux hivernales comme de la décrue (ces campagnes incluant l'écoulement d'eaux d'infiltration différée) et non comme du tarissement.

Toutefois l'utilisation des instantanés dans des régions trop monotones ou trop contrastées en limite l'intérêt.

Dans le Sud-Est de la France, le rôle de la lithologie prévaut (dolomies ou évaporites) sur celui du fonctionnement hydrocinématique. Cependant, le rôle de l'évapotranspiration de surface est bien visible dans l'écoulement de l'émergence en basses eaux.

