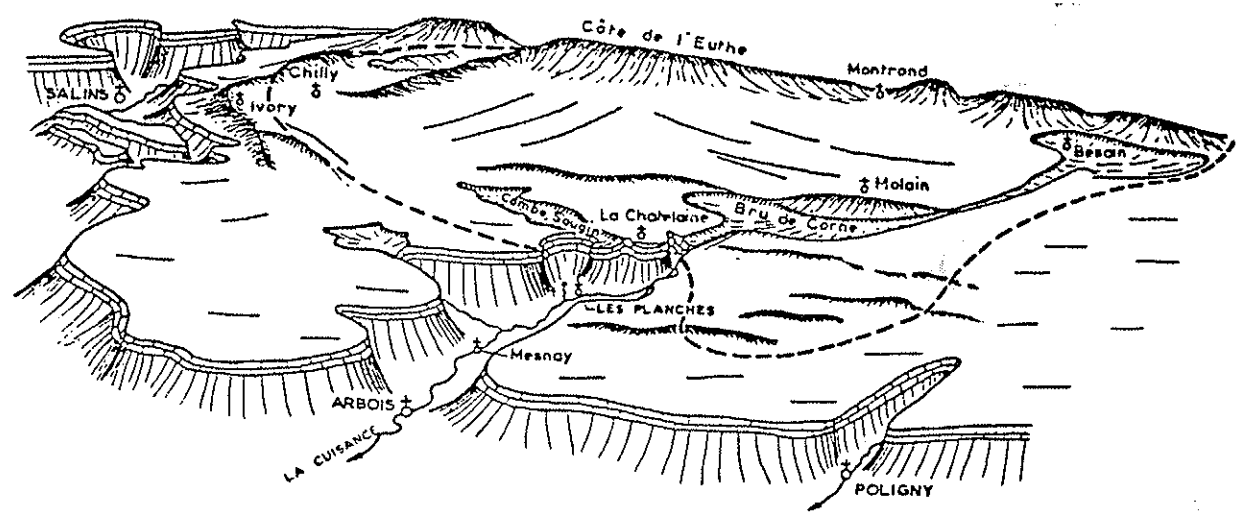


M. CAMPY

# LE CHIMISME DES EAUX DE LA CUISSANCE EN AMONT D'ARBOIS (JURA)

## INFLUENCE du KARST, des SOLS et des ACTIVITES HUMAINES



Françoise DUBREUCQ

# THESE

présentée à

L'U.F.R. des SCIENCES et TECHNIQUES  
de FRANCHE COMTE-BESANÇON-

pour obtenir le

**DIPLOME DE DOCTEUR DE  
L'UNIVERSITE DE BESANÇON  
MENTION SCIENCES DE LA TERRE**

par

**Françoise DUBREUCQ**

Maître es Sciences

***Le CHIMISME des EAUX de la CUISSANCE  
en AMONT d'ARBOIS (JURA)***

**INFLUENCE du KARST, des SOLS et  
des ACTIVITES HUMAINES**

**Soutenue le 15 Janvier 1987 ,devant la Commission d'Examen:**

P. CHAUVE,	Professeur à l'Université de Franche-Comté -Besançon-	} Président Rapporteur
R. LETOLLE,	Professeur à l'Université P. & M. Curie -Paris VI-	
Y. PEYRE,	Maître de Conférences à l'I.N.A. -Paris-Grignon-	} Rapporteurs
P. BROQUET,	Professeur à l'Université de Franche-Comté -Besançon-	
S. BRUCKERT,	Professeur à l'Université de Franche Comté - Besançon-	} Examineurs
J. MANIA,	Professeur à l'Université de Franche-Comté - Besançon-	
F. REMY,	Professeur à l'Université de Franche-Comté - Besançon-	

**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 Gie 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
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 Gie 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
BESSON Raymond	: Electronique	ROQUES-CARMES Claude	: Physico-Chimie des Matériaux
HAURAT Alain	: Automatique	VATERKOWSKI Jean-Louis	: Electronique

**Responsable des services administratifs :** Madame Jocelyne HAUTON

- l'ensemble du personnel des laboratoires de Géologie et de Pédologie :  
Messieurs : S. ANDRE, J. PEGUENET, J. SAUVARD, C. TRUCHE et Mesdames  
O. ROQUESTAL, C. MIGNOT et G. SALOMON,

- mes camarades de troisième cycle et plus particulièrement :  
Messieurs J.L. BLONDE, J. ITTY, B. MECHERI, Y. ROSSIER, J. VINTAER et  
Mesdemoiselles F. BONJOUR, A. GAUTHIER et N. GOBET.

- Les élus des communes de Chilly sur Salins ; la Chatelaine ;  
Molain et Besain en les personnes de Messieurs : J. Gagneur ; J. JOSEPH ; R. MOUGET ;  
et J. SOLDUBOIS ainsi que les exploitants agricoles de ces communes et plus  
particulièrement Messieurs : P. BLONDET ; R. CLERC et J. MAIRE.

## INTRODUCTION

-----

Le comportement hydrologique et géochimique des eaux d'un système karstique calcaire dépend des différents milieux traversés, karstiques et épikarstiques. Ainsi de nombreuses études hydrologiques et géochimiques (A. MANGIN 1974, J.J. MISEREZ 1972 ; A. BURGER 1979-1983 ; M. BAKALOWICZ 1979) nous informent sur le fonctionnement et la qualité des eaux issues de la matrice calcaire. Alors que d'autres études; pédologiques et morphologiques (A. AUBERT 1969, M. POCHON et J.P. SIMEONI 1976, S. BRUCKERT et M. GAIFFE 1980-1985), apportent des informations essentielles sur la forme et les conséquences que peut avoir l'épikarst en milieu karstique. Les activités humaines, agricoles et domestiques, peuvent également avoir une influence sur le chimisme des eaux.

Dans le présent travail, nous utiliserons les méthodes décrites et expérimentées par un grand nombre de chercheurs, afin d'étudier le système karstique de la Cuisance, en amont d'Arbois dans le Jura (fig. 1). Nous suivons et essaierons de comprendre le mécanisme hydrologique de ce karst. Nous étudierons l'influence de chaque milieu traversé et des activités humaines sur le chimisme des eaux. Pour cela, nous avons subdivisé ce travail en trois parties :

- la première partie nous apporte une connaissance approfondie du système karstique de la Cuisance et de son fonctionnement hydrologique avec une recherche des limites de son bassin d'alimentation, une définition des systèmes morphologiques et géologiques associés, une caractérisation de la couverture pédologique avec la répartition et l'utilisation des sols, une connaissance de la couverture végétale et une estimation des volumes d'eau mis en jeu avec leurs caractéristiques hydrologiques. Nous nous attarderons sur la nature et le comportement de l'épikarst ainsi que sur le fonctionnement hydrochimique du karst, en vue de distinguer les influences possibles de ces facteurs sur le chimisme des eaux, dans la seconde et la troisième partie de ce mémoire.

- la seconde partie, grâce à un suivi hydrochimique détaillé, nous permet d'observer, sur une résurgence, l'évolution de certains ions au cours d'un cycle hydrologique complet. Puis nous comparerons le comportement de quelques ions aux deux résurgences de la Cuisance au cours d'épisodes particuliers (étiage et crue). L'étude des résultats et leur analyse statistique mettront en évidence l'influence des divers milieux traversés sur la concentration et l'évolution de ces ions.

- La troisième partie nous renseigne sur l'acquisition du chimisme des eaux à travers l'épikarst et de son impact sur les eaux karstiques, grâce à l'étude d'un petit bassin expérimental (représentatif d'une partie de l'épikarst du bassin de la Cuisance). Il est équipé de plaques lysimétriques permettant de suivre l'évolution des eaux de percolations dans différents sols et sous plusieurs types de cultures. Un ruisseau draine ce bassin expérimental et nous permet de suivre simultanément son chimisme avec celui des eaux lysimétriques.

Grâce à cette étude nous aurons pu suivre le chimisme des eaux des précipitations jusqu'aux résurgences de la Cuisance en passant par l'épikarst et le karst.

PREMIERE PARTIE

ETUDE DU SYSTEME KARSTIQUE ET DE SON

FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

Chapitre I - Structure, géométrie et  
activité du karst étudié

Chapitre II- Bilan climatique et  
hydrologique

Chapitre III-Fonctionnement hydrologique

Conclusion de la 1ère partie

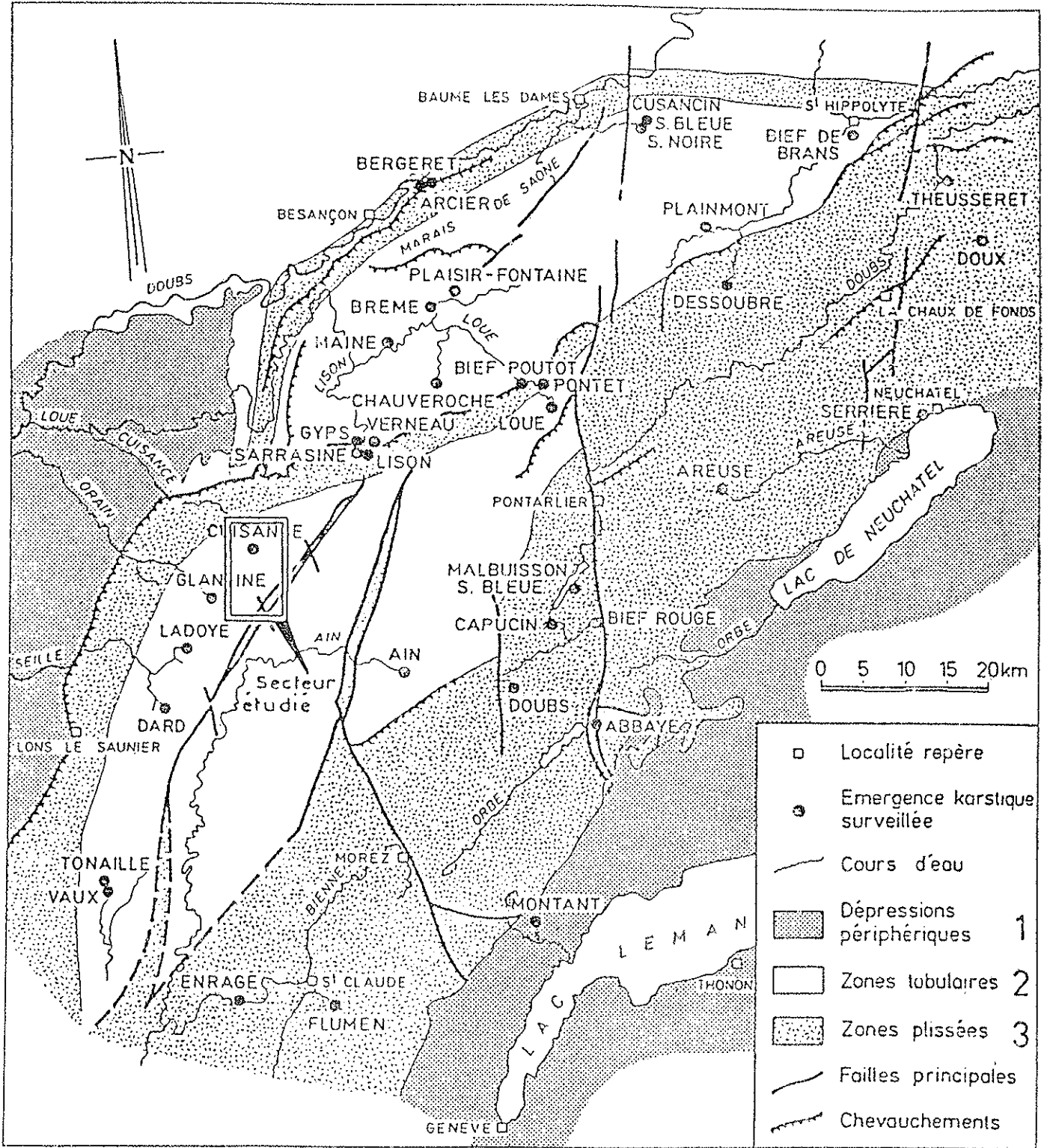


Fig. 1 - Localisation des sources de la uisance par rapport aux autres émergences karstiques du Jura (d'après B. BLABOUX - A. BURGER - P. CHAUVÉ - J. MUDRY - 1979).

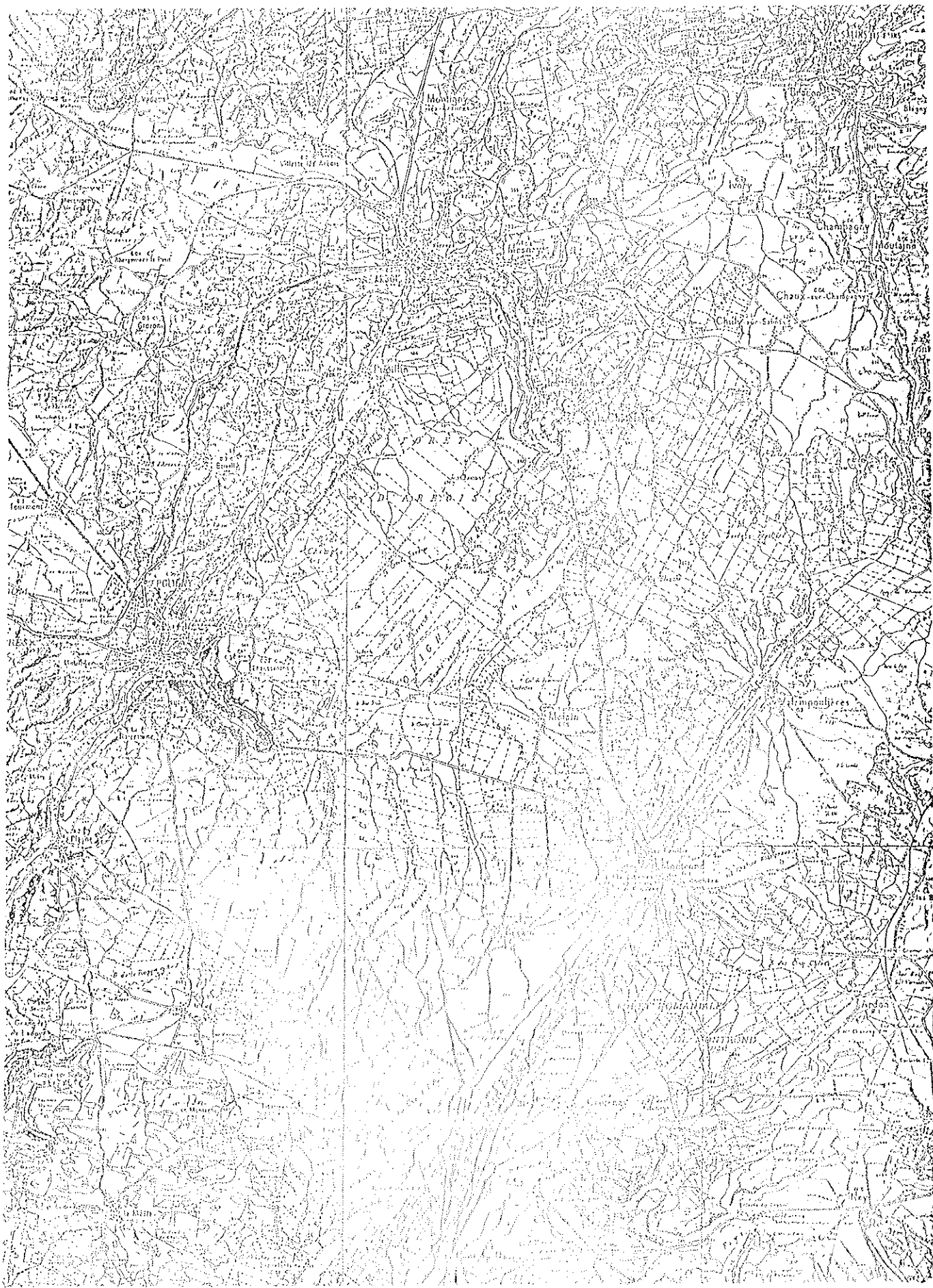


Fig. 1.011. Carte topographique de la Région étudiée d'après  
le 1/50 000ème de 1913. II

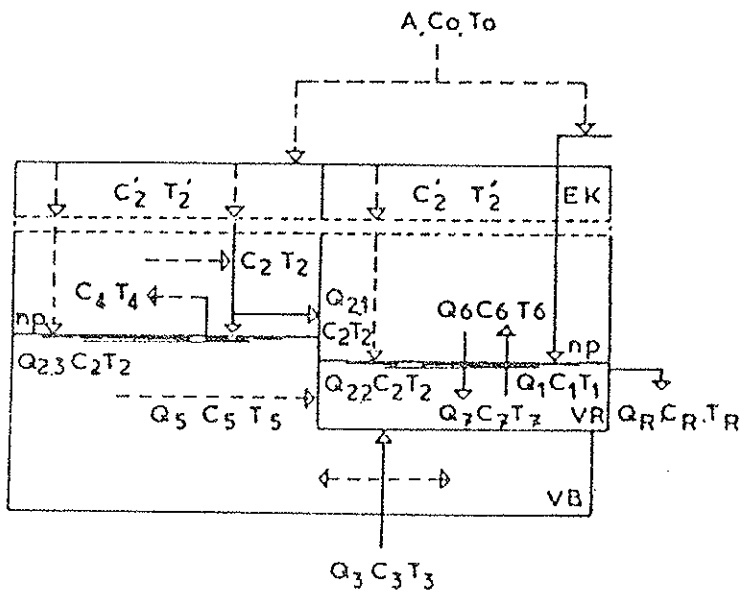


## CHAPITRE I - STRUCTURE, GEOMETRIE ET ACTIVITE DU KARST ETUDIE

### I - SCHEMATISATION D'UN SYSTEME KARSTIQUE

Un système karstique se compose de réservoirs d'une grande complexité, entre lesquels s'effectuent de nombreux échanges. A. BURGER (1983) schématise ce système par l'interaction de trois réservoirs (fig. 2).

- à écoulement rapide (VR)
- à écoulement lent (VB)
- épikarstique (EK)



A : alimentation  
 —→ : écoulements concentrés  
 - - - -> : écoulements distribués

Fig.2 - Schématisation d'un système karstique (d'après A. BURGER, 1983)

avec :  $Q_R C_R T_R$  : débit, concentration, température à l'exutoire

ALIMENTATION  $\left\{ \begin{array}{l} Q_1 C_1 T_1 \\ Q_2 C_2 T_2 \end{array} \right.$  : écoulement concentré en surface

DU RESERVOIR  $\left\{ \begin{array}{l} Q_2 C_2 T_2 \\ Q_5 C_5 T_5 \end{array} \right.$  : écoulement du réservoir lent

RAPIDE  $\left\{ \begin{array}{l} 2-1 : \text{concentré dans la zone non saturée} \\ 2-2 : \text{distribué dans la zone non saturée} \\ 5 : \text{distribué dans la zone saturée} \end{array} \right.$

ALIMENTATION  $\left\{ \begin{array}{l} Q_{2-3} \\ Q_3 \end{array} \right.$  : infiltration distribuée

DU RESERVOIR  $\left\{ \begin{array}{l} Q_3 \\ Q_4 \end{array} \right.$  : par des systèmes karstiques à potentiel hydraulique plus élevé

LENT  $\left\{ \begin{array}{l} Q_4 \end{array} \right.$  : par irrigation à partir de chenaux

Nous tenterons d'analyser le système karstique des sources de la Cuisance en prenant le schéma de A. BURGER (1983) comme modèle.

## II - DELIMITATION DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA CUISANCE

Délimiter le bassin d'alimentation d'une source en région karstique soulève de nombreux problèmes car la circulation des eaux souterraines correspond rarement à la surface topographique du bassin. Pour remédier à cela, un certain nombre de techniques existent notamment les traçages chimiques, qui, comparés aux critères géologiques et confrontés aux données du bilan précipitations - évapotranspiration - débits, permettent de se faire une idée assez précise des limites recherchées.

### 1. TRACAGES REALISES SUR LE BASSIN ETUDIE

Un certain nombre de traçages à la fluorescéine ont été réalisés antérieurement à cette étude. Les plus anciens laissent une part d'incertitude car la surveillance se faisait à l'oeil nu et un passage nocturne du colorant pouvait passer inaperçu. Il en est de même pour la coloration des Prés Bergeret (J.C. FRACHON, 1974), surveillée à l'oeil nu également, en un seul point.

Les autres traçages, surveillés à l'aide de charbons actifs (fluocapteurs), offrent une marge de sécurité plus importante.

A la vue des résultats obtenus, la délimitation du bassin d'alimentation et plus particulièrement la distinction des sous-bassins des deux sources de la Cuisance, semblait incertaine. C'est pourquoi nous avons réalisé sept autres colorations (Tableau 1). Pour cinq d'entre elles, effectuées dans des villages, nous avons injecté le colorant dans des réseaux d'eaux pluviales (ou d'eaux usées) afin d'avoir un écoulement permanent et de connaître l'aboutissement des eaux usées.

La coloration faite en Juin 1985 dans la forêt d'Arbois n'est pas ressortie. Injecté dans un trou, creusé à la tarière dans les argiles, le colorant est probablement resté piégé en l'absence d'une circulation d'eau suffisante.

### 2). RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Aucune courbe de restitution n'a été faite en raison de l'incertitude du lieu et de la durée d'apparition du colorant. Les vitesses qui figurent dans le tableau des colorations ne doivent être prises qu'à titre indicatif. Ceci permet toutefois de constater une vitesse de circulation des eaux plus rapide vers la Grotte des Planches que vers le captage du Fer à Cheval.

Les résultats de l'étude de ces circulations souterraines, schématisées sur la carte des colorations (Fig. 3), attestent d'une certaine complexité du réseau karstique.

#### a). Limites externes

En ce qui concerne les limites extérieures du bassin, elles peuvent être délimitées de la manière suivante :

- à l'Est par l'accident tectonique de la Chaîne de l'Heute qui joue le rôle de limite et de drain externe du bassin comme le montre la coloration de Valempouillères.

Grâce à une faille décrochante, transverse à une structure faillée, la circulation se fait vers l'extérieur du bassin, en direction du Bief du Moulin. Lors de crue (cas de la première coloration de 1967) la vitesse augmente plus rapidement vers le captage que vers la grotte mais l'écoulement vers l'extérieur

C O L O R A T I O N

Lieu	Caractéristiques	Coordonnées Lambert X Y Z	Date	Quantité kg	Type surveillance	Nbre pts surv.	Lieu apparition *	Coordonnées Lambert X Y Z	Date	Temps h	Distance m	Dénivelé m	Vitesse approx.	Auteurs
1 BIEF DE CORNE	Pie de la	864,70-213,50-380	15.3.65	1	Oeil nu	1	Captage Cuisance	864,51-213,57-380		40	2000		50m/h	J.C.FRACHON
2 BISSAIN VILLAGE	Réseau d'eaux pluviales	865,88-214,58-360	23.10.84	2	Fluocapteurs	9	1. Grotte des Planches 2. Captage Cuisance	865,10-214,68-360	27.10.84	96	11125	160	116m/h	F. DUBREUCQ
3 BISSAIN PERTE	Trou sans fond	-	-	-	-	-	Bief du Moulin	864,1-199,5-470						(COLLIN)
4 CHILLY PERTE (Village)	Entonnoir de la Mare de Chilly	865,68-215,72-360	30.12.86	5	oeil nu	1	Grotte des Planches	865,10-214,68-360	1.1.27	72	3750	255	52m/h	R. PELLETIER
5 CHILLY RU - BAS de PROLE	Perte du Ru du Bas de Prole	865,43-217,12-382	7.6.84	2	Fluocapteurs	0	Grotte des Planches	865,10-214,68-360	9.6.84	48	4125	222	86 m/h	F. DUBREUCQ
6 FORET d'ARBOIS SOMMIERE BRETONY	Piezomètre			3	Fluocapteurs	8	Pas de reaparition							F. DUBREUCQ
7 IVORY	Réseau d'eaux pluviales	867,88-218,42-360	20.5.83	2	Fluocapteurs	9	Ru du Grand Mont	865,57-215,42-475			3100	290		F. DUBREUCQ
8 MOLAIN	Réseau d'eaux pluviales	864,61-208,55-380	7.4.83	2	Fluocapteurs	5	1. Grotte des Planches 2. Captage Cuisance	865,10-214,68-360	9.4.83	>48	6125	245	130m/h	F. DUBREUCQ
9 MONTROND (1)	Faïlle - Doline - Perte	866,70-206,84-380	31.3.67	5	Fluocapteurs	11	1. Bief Moulin 2. Grotte des Planches 3. Cirque de la Chataleine	864,14-199,57-472	2.4.67	55	7000	108	127m/h	J.J.COLLIN et al.
MONTROND 9bis (2)	Réseau d'eaux pluviales	865,79-205,95-380	23.4.84	2	Fluocapteurs	10	1. Bief Moulin 2. Grotte des Planches 3. Cuisance captage	864,14-199,57-470	30.4.84	168	7000	110	42 m/h	F. DUBREUCQ
10 PERTE des PRES BERGERETS		861,70-206,60-360	10.4.63	1,5			Source de la Glantine	865,10-214,68-360	5.5.84	283	8700	220	20 m/h	
11 PONT D'HERY	Ptes Furieuse	871,65-213,62-395	14.8.47	-		2	See de Fonteny	871,75-215,04-370		20	1900		96 m/h	G. TISSOT Ph. TRESSE
12 VALEM-POULIERES	Réseau d'eaux pluviales	868,12-208,95-380	28.6.83	3	Fluocapteurs	8	Bief Moulin	864,14-199,57-470			10440			F. DUBREUCQ
13 CHAUX/CHAMPAGNY	Fromagerie	870,62-216,78-370	4.7.72	0,5		1	Ru Auberge Val d'Herby	870,57-217,52-470		13	600		46 m/h	J.P.METTELAL

Tous les dossiers de colorations sont répertoriés au SRAE de Franche-Comté.  
(\* le numéro précède le lieu, indique l'ordre d'apparition du colorant).

Tableau 1 : TRACAGES A LA FLUORESCENCE

Fig. 3 - Traçages à la fluorescéine

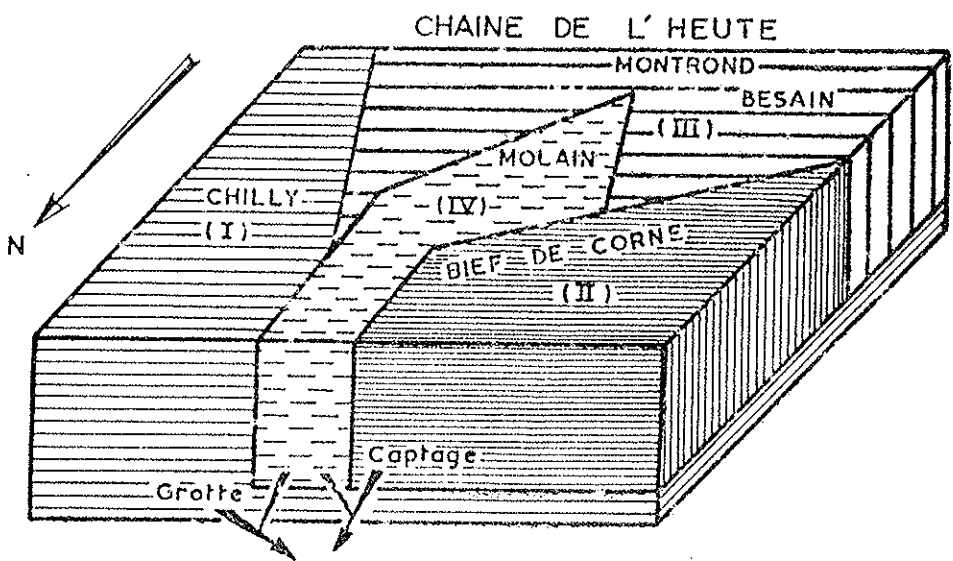
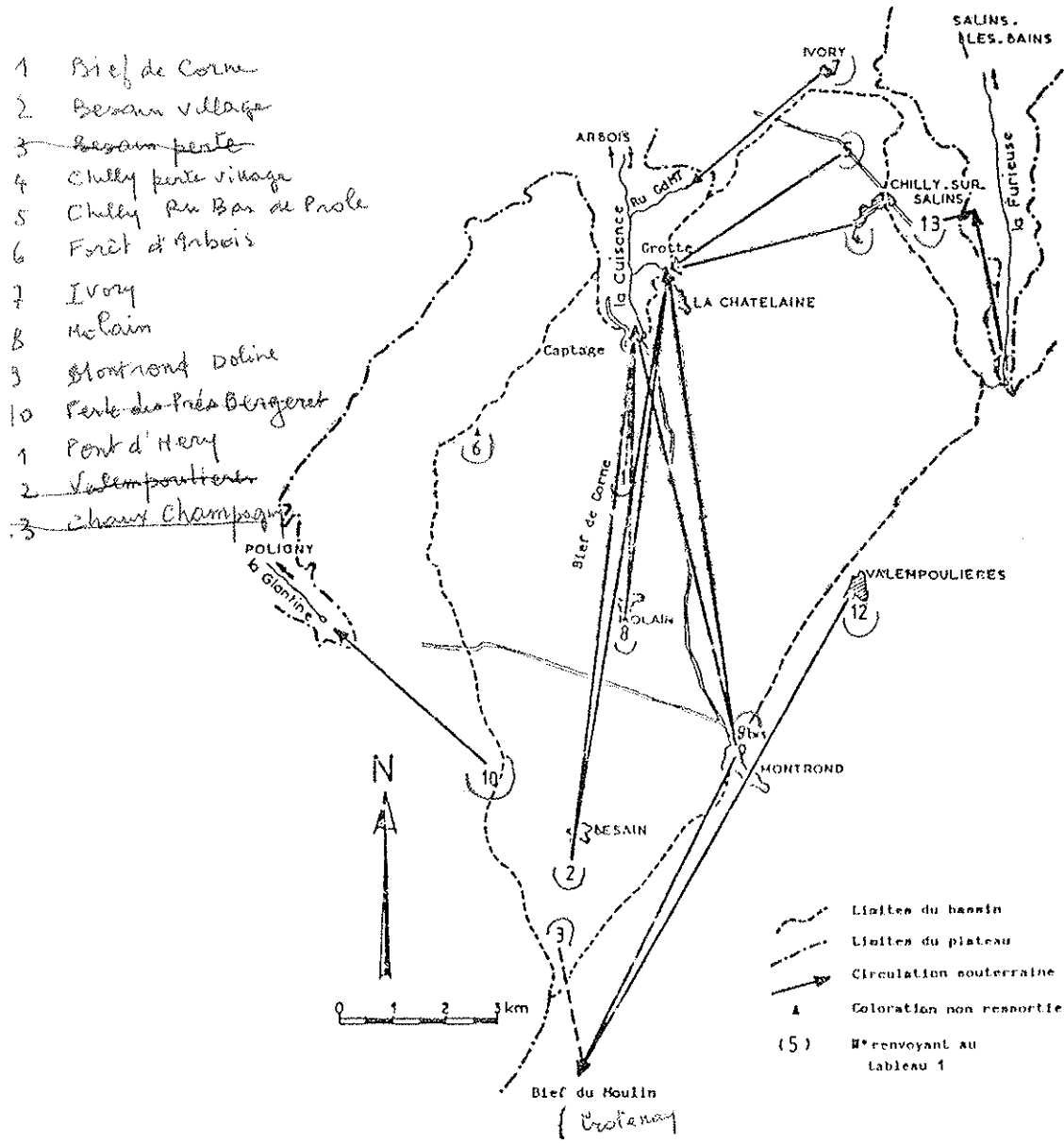


Figure 4 : Schématisation du compartimentage du karst étudié

du bassin reste le plus rapide. Ceci ne signifie nullement que le captage puisse être un trop plein mais plutôt que le mode de circulation diffère selon l'état hydrologique du karst.

- Au Sud, les colorations, peu nombreuses, permettent de penser que cette limite correspond à peu près à celle de la dépression de Besain. La coloration de "COLIN" (1964) passe au travers de la chaîne de l'Heute, et permet de penser qu'il existe peut-être un système de fractures de moindre importance de Champagnole à Montrond, non visible sur la carte géologique.

- A l'Ouest, la coloration des Prés Bergeret part en direction de la Glantine (Reculée de Poligny) et limite ainsi le bassin à la Combe des Prés Bergeret. Plus au Nord, l'absence de résultat de la coloration de la Forêt d'Arbois laisse un doute quant à l'appartenance de ce secteur au bassin. Nous l'y inclurons cependant le bilan hydrologique le justifiera.

- Au Nord, la limite suit une ligne en retrait de la bordure du plateau. La morphologie y diffère nettement et un nombre important de petites sources de la reculée de Salins-les-Bains nécessite de leur attribuer un petit bassin d'alimentation, de plus en surface des ruisseaux s'écoulent en direction de la reculée de Salins-les-Bains.

### b). Limites internes

Une partie du bassin d'alimentation semble commune aux deux sources alors qu'une autre paraît spécifique à chacune d'elles (Fig. 4). Ainsi au Nord, le secteur de Chilly (I) alimente uniquement la source de la Grotte, alors qu'à l'Ouest, le Rief de Corne et la forêt de Poligny-Arbois (II) alimentent la source du "Fer à Cheval". La partie commune drainée par l'ensemble des sources s'étend de Besain à la Reculée des Planches en passant par Molain.

Cette partie commune peut se subdiviser en deux secteurs en raison de la différence de vitesse de circulation des eaux entre les deux sources. En effet, d'après les résultats des colorations de Montrond et Besain, les eaux arrivent en moyenne trois fois plus vite à la Grotte qu'au Captage (quantitativement, aucune évaluation n'est possible), ce secteur (III) serait drainé par les deux sources mais préférentiellement par celle de la Grotte. Tandis que le secteur de Molain (IV) semble réellement commun puisque les vitesses de circulation sont du même ordre.

La délimitation du bassin d'alimentation karstique au cours d'un étiage ou en crue peut d'ailleurs varier en raison de la présence de seuils d'importances diverses. Les variations de vitesses peuvent indiquer des variations de gradient; mais surtout des variations spatiales de perméabilité, des stockages ou des ralentissements dans les zones noyées.

Le bassin d'alimentation des sources de la Cuisance, délimité dans son ensemble par de grands accidents tectoniques (chaîne de l'Heute, Combe des Prés Bergeret), est donc à son tour subdivisé en sous-bassins, plus ou moins imbriqués les uns dans les autres et quelques fois séparés par des accidents tectoniques (fig. 4).

La faille de Montrond les Planches pourrait jouer le rôle de limite entre les bassins individualisés et le bassin commun de Molain - Besain, mais servir aussi de drain.

Des colorations seraient nécessaires notamment au NE de cette faille dans la forêt des Moidons; et sur cette faille au SE de Montrond, sur le plateau de Champagnole pour définir son rôle.

Une différenciation verticale peut également exister, puisque les sources de la Grotte et du Captage sortent à des altitudes légèrement différentes et les vitesses mesurées lors des traçages varient d'une source à l'autre ce qui peut influencer sur le chimisme des eaux.

Le bassin d'alimentation ainsi défini couvre une surface d'environ 99km<sup>2</sup> soit 9900 hectares

### III- STRUCTURE - FRACTURATION - FISSURATION - ACTIVITE DU KARST

#### 1). GEOLOGIE

La Cuisance prend sa source à deux résurgences, au fond de la "Reculée des Planches". L'une sort à 350 m d'altitude, à la "Grotte des Planches" (1) (sortie d'une rivière souterraine); l'autre à 380 m au "Cirque du Fer à Cheval" (2) (emplacement du captage d'Arbois utilisé jusqu'en 1983, actuellement il n'alimente plus que le village des Planches). Elles drainent les eaux d'une partie du plateau lédonien, karstique, à bancs calcaires subhorizontaux légèrement inclinés vers l'intérieur de la chaîne du Jura (Fig. 5).

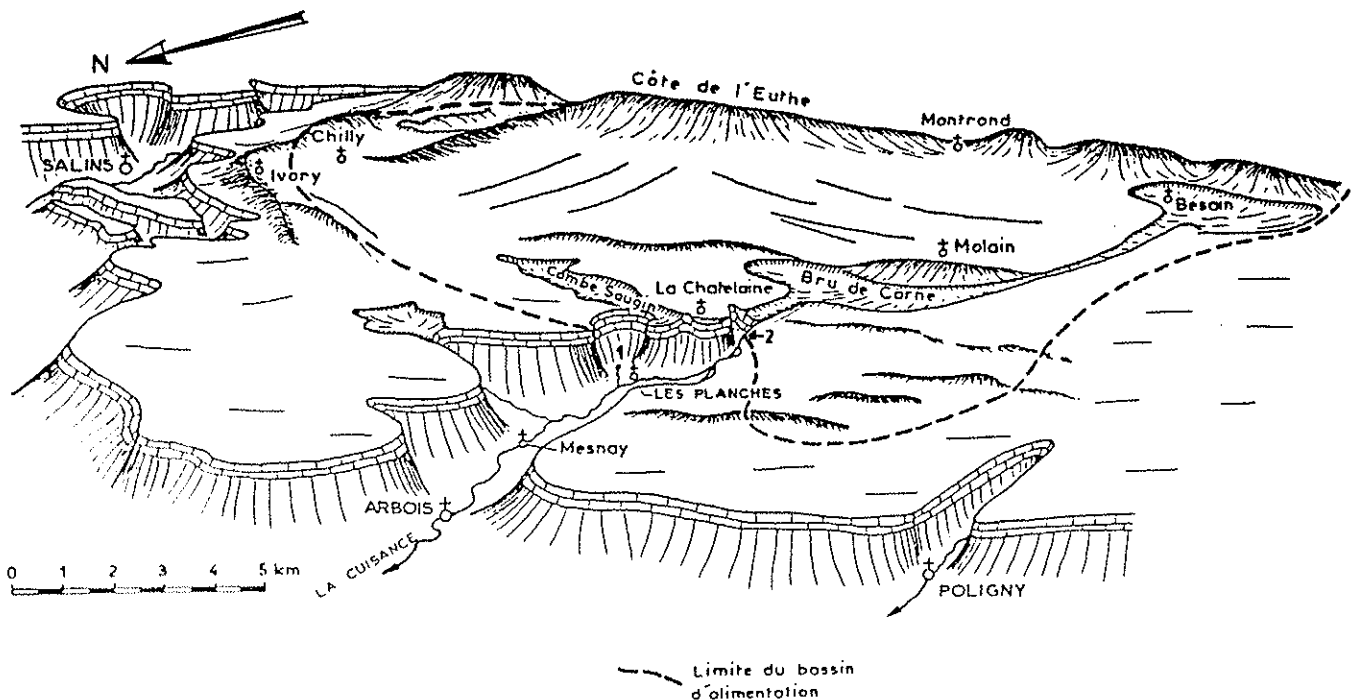


Figure 5 Le bassin d'alimentation de la Cuisance

#### a) Stratigraphie

Les principales formations rencontrées (Fig. 6) et schématisées dans le log (Fig. 8) d'après (J.LAJOT 1966) peuvent se résumer comme suit :

- Bajocien inférieur et Aalénien supérieur : calcaires grenus et marnes gréseuses ; calcaires à minéral de fer et calcaire marneux à rognons de calcaires phosphatés ; calcaire gréseux (87% CaCO<sub>3</sub>) puis ferrugineux à rognons de silex ; calcaires oolithiques.

- Bajocien moyen (Vésulien) : calcaires gris clair à silex et lits d'argiles gréseuses ; calcaires à polypiers ferrugineux à débris silicifiés ; calcaires lumachelliques.

- Bajocien supérieur (Grande Oolithe) : calcaire oolithique massif à ciment de calcite hyaline.

Fig. 7 - SCHEMA STRUCTURAL ET FISSURATION  
 d'après les cartes géologiques au 1/50 000ème de  
 - Salins les Bains (A. CAIRE, 1967)  
 - Champagne (S. & A. GUILLAUME, 1965)  
 - Poligny (Y. KERRIEN, 1981)

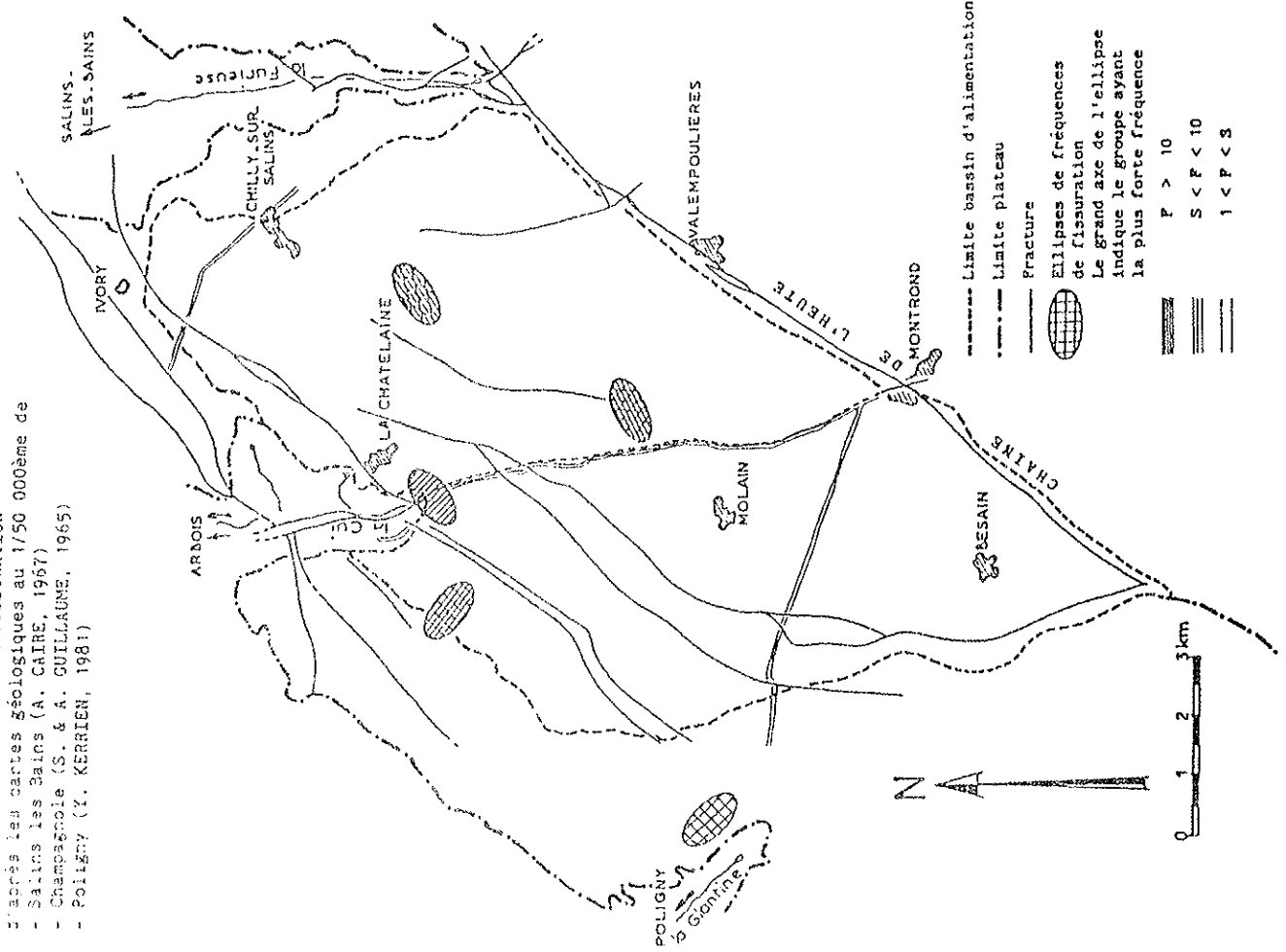
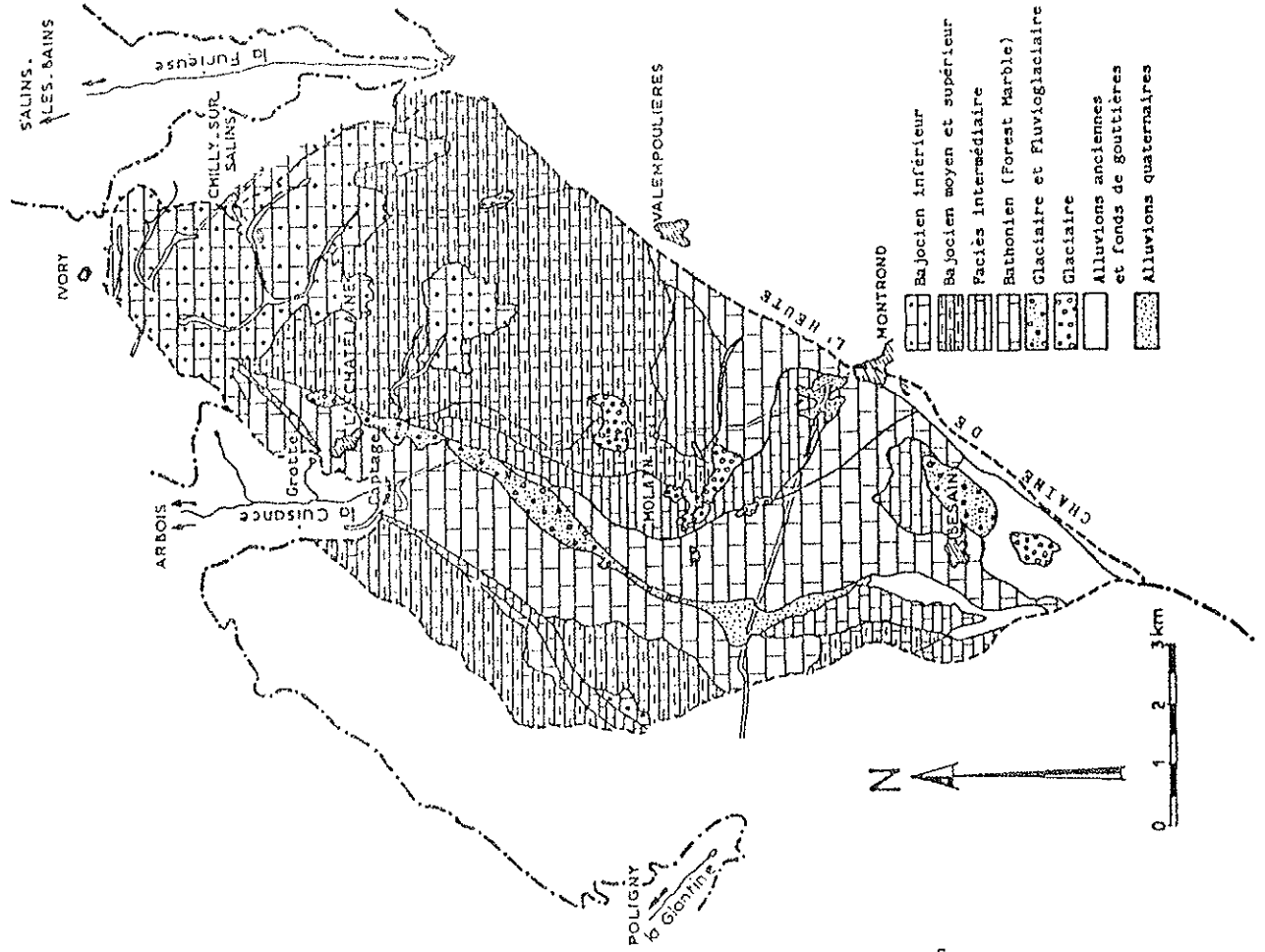


Fig. 6 - CARTE GEOLOGIQUE SCHEMATIQUE



- Bathonien (Forest Marble) : calcaires graveleux en bancs diaclasés sensibles à la gélifraction ; sans formation superficielle, il donne un aspect très karstifié.

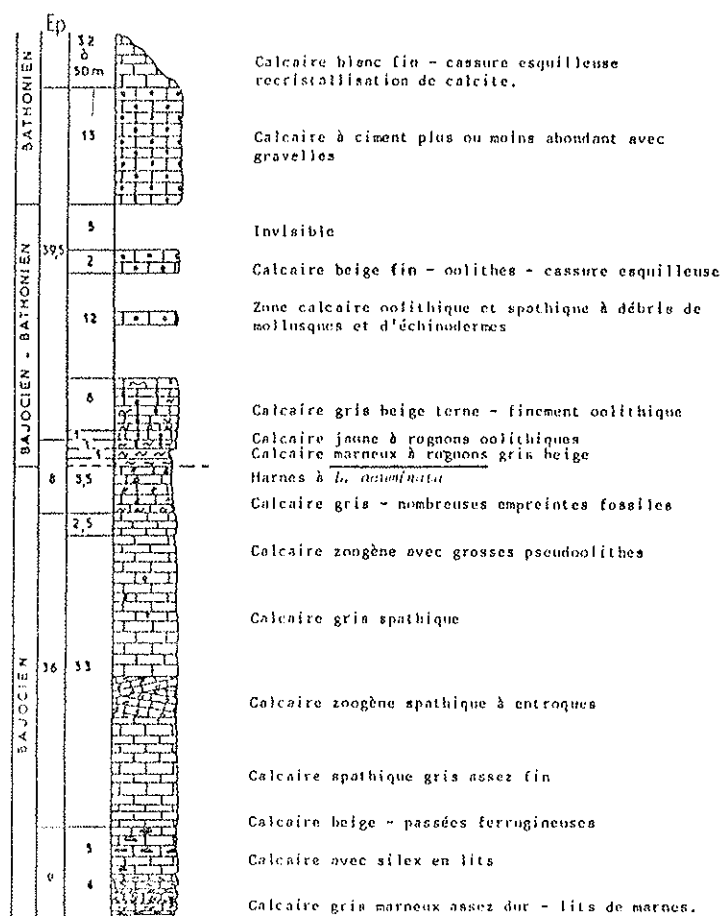


Fig. 8 - Coupe stratigraphique de la Grotte des Planches (d'après J. LAJOT, 1966)

- Argiles à chailles : formations superficielles, elles sont le produit de l'altération sur place de l'Argovien inférieur et moyen à silex. De couleur brun-rouge, elles recouvrent de grandes surfaces notamment à Chilly-sur-Salins et dans la forêt des Moidons. Elles forment un écran entre le sol et le karst et renferment des chailles (cailloux silicifiés). Elles se seraient formées "antérieurement aux déformations structurales et à l'érosion agissant sur le plateau" (A. CAIRE, 1967).

- Glaciaire et fluvioglaciaire : localisé essentiellement dans le Bief de Corne et dans la dépression de Besain, il se compose de placages plus ou moins épais allant des blocs erratiques aux dépôts lacustres. Le glaciaire (le plus souvent anté-würmien) proprement dit recouvre très partiellement le secteur de Molain et Besain.

- Alluvions anciennes : témoins de l'activité d'anciens cours d'eau (d'orientation ESE-WNW), elles tapissent le fond des vallées sèches ou des vallées structurales (preuve d'un régime karstique). Antérieures à la formation des reculées (A. CAIRE, 1967), elles se composent de dépôts argilo-graveleux à cailloux de : chailles et calcaires puisqu'elles se localisent sur cette formation superficielle

- Alluvions quaternaires : indifférenciées, elles résultent de colluvions dans les secteurs anciens et mal drainés, limoneuses la plupart du temps.



### b). Fracturation

Un schéma structural construit d'après la carte géologique de Salins-les-Bains (A. CAIRE, 1967) et complété par les cartes géologiques de Poligny, Champagnole et Lons le Saunier (Fig. 8) montre les accidents bien connus SW-NE, formant le faisceau salinois et la chaîne de l'Heute, mais également des accidents transverses de direction N-S, comme la faille de Montrond prolongée par la reculée des Planches. A ces grandes familles de failles, viennent s'ajouter de petits accidents d'effondrement occupés par des vallées sèches ainsi que toute une série de petites fractures, failles et déformations perpendiculaires aux grands accidents SW-NE, donnant un aspect gaufré au relief dans certains secteurs (non recouverts de formations superficielles).

Certains de ces accidents jouent un rôle important dans la circulation des eaux puisqu'ils limitent le bassin étudié (ex. la Chaîne de l'Heute).

## 2. GEOMORPHOLOGIE

Le secteur étudié se présente comme un parallélépipède tabulaire entaillé de reculées dont celle des Planches (Fig. 5). L'altitude moyenne de ce plateau est de 570 m ; elle diminue du NE vers le SW, de la chaîne de l'Heute (780m) à la dépression de Besain (525m), témoin d'une ancienne circulation de surface rissienne. Cet ensemble se subdivise en secteurs morphologiquement différents.

### a). Secteur de Chilly-sur-Salins

Un placage d'argiles à chailles comble trous et creux et masque le karst pour donner une morphologie douce. Peu visible car dissimulé sous les formations superficielles, le karst existe cependant comme en témoigne la présence de ruisseaux qui se perdent (ex. ru du Bas de Prôle, ru du village de Chilly sur Salins). La présence de cette formation superficielle allochtone trouve son explication dans la morphologie même du karst. Ce dernier constitué, au moins dans sa partie superficielle, d'une fissuration et de conduits de petit diamètre empêche l'entraînement des argiles. L'écoulement des eaux dans cette partie du système se fera lentement.

Quelques vallées "sèches" entaillent le relief adouci. Elles résultent d'anciens écoulements superficiels (W-E) dont il reste quelques vestiges matérialisés par des ruisseaux à faible débit.

### b). Secteur de Molain

Il diffère du précédent par l'absence de formations superficielles, hormis les recouvrements glaciaires très localisés, mais surtout par la présence de très nombreuses dolines (métriques ou décimétriques), preuve d'une activité karstique importante accompagnée d'un lessivage des matériaux (M. GAIFFE, S. BRUCKERT, 1985). De plus le calcaire y est souvent débité en petits blocs (décimétriques), favorisant les écoulements rapides ou parfois en lapiaz sous couvert forestier.

Plusieurs sous-ensembles karstiques se détachent : à l'Est et au Sud du village, un aspect "moutonné" est dû à de nombreuses dolines parfois comblées de cailloux ou de sols et à un recouvrement de sols très superficiels. Au Nord Ouest de Molain, au lieu-dit les "Rochettes" la karstification est moins visible mais les affleurements rocheux sont nombreux.

Dans ce secteur, les eaux circulent très rapidement et aucune accumulation de matériaux n'est possible ailleurs que dans les dolines, leur temps de séjour y est bref.

c). Secteur de Besain et du Bief de Corne

La petite dépression de Besain (au Sud du bassin) se poursuit vers le Nord par les combes "Froide" et "Noire" pour aboutir au Bief de Corne et à la reculée des Planches. Ceci correspond à la trace laissée par d'anciens écoulements post-glaciaires. Ces dépressions se tapissent donc de dépôts fluvioglaciaires, de granulométrie variée. Ainsi, au Bief de Corne, ces dépôts se composent de galets et très localement de sables, tandis qu'à Besain les marnes dominent. Là encore, malgré ces formations "superficielles", le karst apparaît sous forme de pertes et de dolines parfois importantes au Sud de Besain.

d). Secteur forestier des Moidons et de Poligny-Arbois

Il offre une morphologie variée. Ainsi les forêts des Moidons de Poligny-Arbois, en l'absence de formations superficielles, montrent un aspect ondulé voir gaufré en raison de nombreuses petites déformations structurales (ondulations décamétriques à hectométriques).

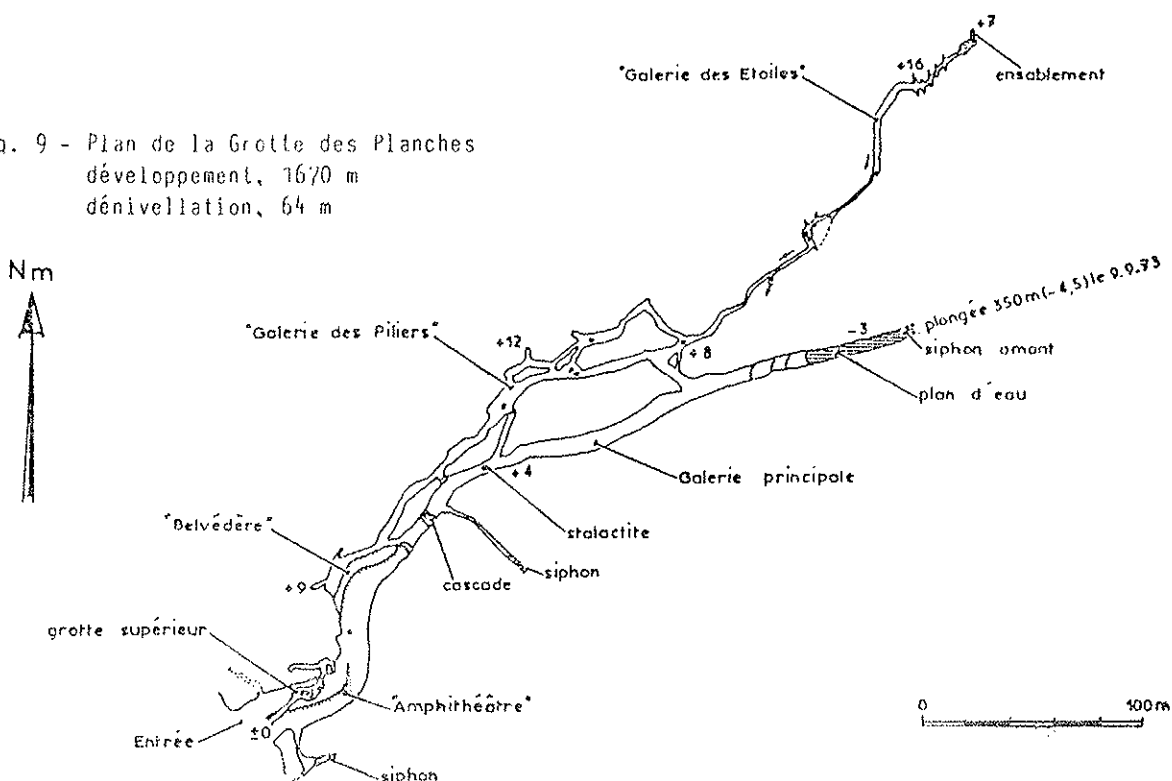
Par contre au Sud dans les forêts de Poligny au lieu dit le "Malrocher", de véritables champs de "lésines" se dressent et dévoilent un karst dit "ouvert" et très actif.

e). Aspect du karst souterrain

D'après les travaux des géographes et des spéléologues, nous avons à notre disposition un inventaire de la plupart des dolines et grottes, et la description de quelques unes d'entre elles.

Le relevé topographique de la Grotte des Planches établi par J.C. FRACHON et M. OUTHIER (1974) expose clairement la complexité des conduits karstiques (Fig. 9). Certaines galeries, ensablées, fossilisées restent inactives ; d'autres semi-actives voient un écoulement au-delà d'un certain débit, ce qui nécessite le fonctionnement de seuils ; une troisième catégorie, constamment noyée, est dite active. Ceci met en évidence l'évolution permanente des réseaux souterrains et la difficulté à délimiter précisément le bassin d'alimentation d'une rivière en milieu karstique.

Fig. 9 - Plan de la Grotte des Planches  
développement, 1670 m  
dénivellation, 64 m



d'après J.C. FRACHON et M. OUTHIER - 1974.

#### IV - L'EPIKARST

Constitué de la zone non saturée superficielle, il regroupe les formations pédologiques et la couverture végétale.

##### 1). COUVERTURE PEDOLOGIQUE

L'étude pédologique de l'ensemble du bassin de la Cuissance se compose : d'une carte au 1/50 000° et d'une description des principaux sols. Leur distribution et leur aménagement seront décrits et analysés en détail dans les secteurs les plus soumis aux activités humaines (terres cultivées). Ces sols feront l'objet d'une expérimentation lysimétrique.

##### a). Démarche méthodologique

###### a-1 - Les secteurs .....

L'observation des documents topographiques, géologiques, mais surtout la méthode utilisée font ressortir quatre secteurs :

- le secteur de Chilly comporte des cultures ou des prairies sur la totalité de la surface non boisée. Le recouvrement d'argiles à chailles supporte en majorité des sols bruns ; épais, fertiles, donc favorables à la culture de céréales si le climat était plus doux.

- le secteur de Molain et la Chatelaine sont recouverts de nombreuses prairies dites naturelles et non amendées qui témoignent de la présence de sols superficiels, impropres à la culture, associés à des sols d'accumulation dans les dolines. Au Nord de Molain une large dépression supporte quelques cultures, développées sur des sols plus épais.

- Le secteur de Besain montre d'avantage de cultures, cependant un facteur limitant apparaît, l'hydromorphie. Les marnes fluvioglaciaires perturbent l'infiltration et provoquent l'engorgement des sols. L'écoulement ne peut se faire que latéralement. Lorsque des bancs calcaires karstifiés affleurent ; des sols superficiels s'y sont développés.

- Le secteur forestier des Moidons et de Poligny-Arbois ne met pas en évidence des différences importantes dans la végétation. Les sols varient rapidement entre les creux, dans lesquels les sols sont épais et limoneux; et les bosses recouvertes de sols superficiels.

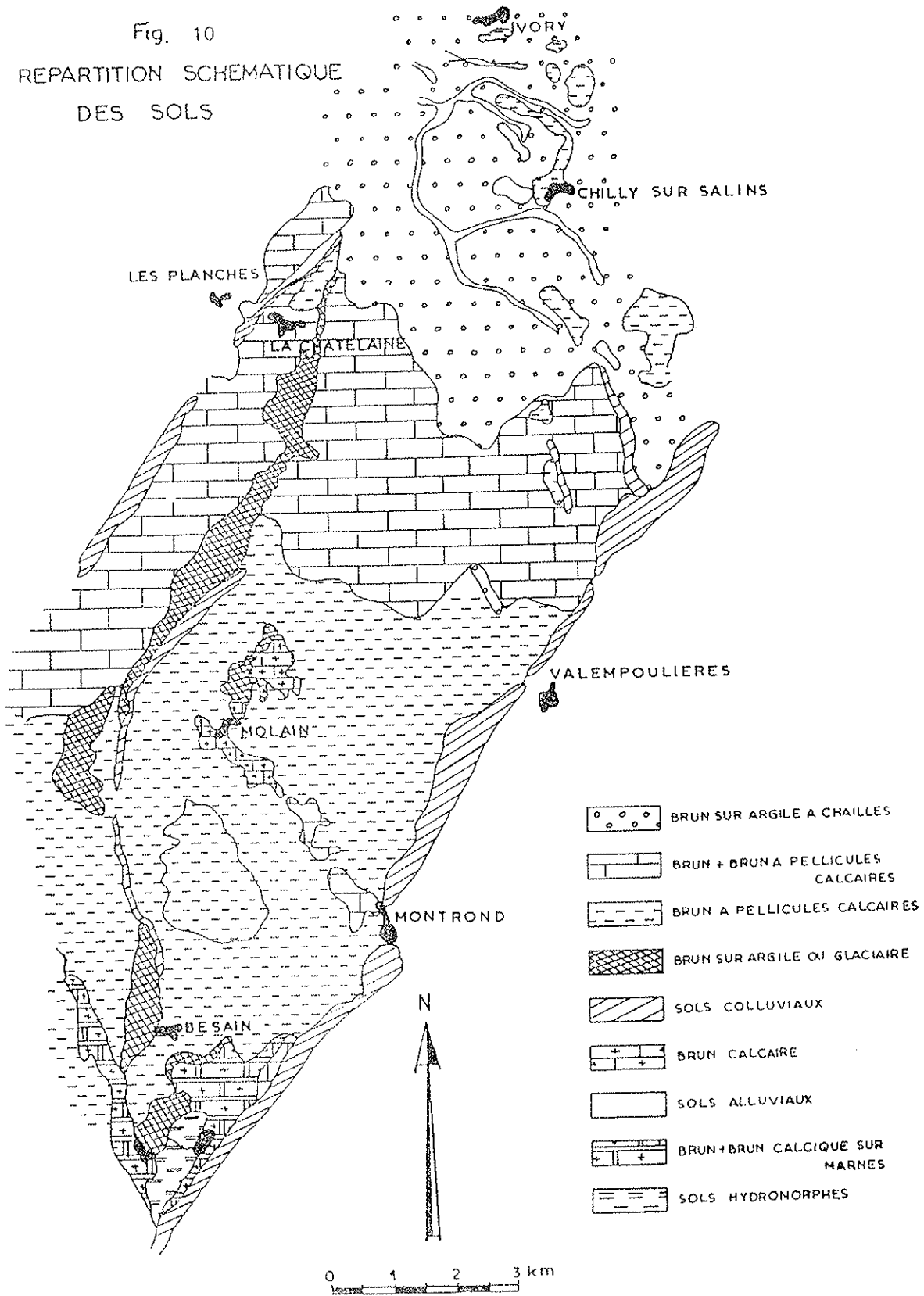
###### à-2 - Méthode cartographique .....

La carte des sols (Fig. 10) établie au 1/50 000° résulte de sondages effectués à la tarière. La densité de ces derniers est plus importante dans les zones cultivées qu'en forêt.

Chaque sondage a fait l'objet d'une description composée de plusieurs paramètres (nombre d'horizons ; profondeur ; charge en éléments grossiers ; effervescence à l'acide chlorhydrique ; structure ; texture ; couleur ; substrat ; etc...) Chacun d'entre eux a été subdivisé en classes. La combinaison statistique de l'une ou plusieurs de ces classes a permis d'attribuer un nom génétique à ces sols, puis de le répartir dans des unités regroupant un ou plusieurs types de sols.

Des difficultés apparaissent lorsque la représentation spéciale d'un type de sol est insuffisante au niveau de la carte, bien qu'il se répète et s'associe à un ou plusieurs autres. Dans ce cas, nous les associerons pour former une unité complexe. La carte des sols (Fig. 10) regroupe 9 unités complexes de sols.

Fig. 10  
REPARTITION SCHEMATIQUE  
DES SOLS



b). Description des sols

Pour schématiser les principaux paramètres des types de sols rencontrés, nous avons utilisé les symboles de P. DUCHAUFOR 1977 (Annexe 1, tableau 46).

b-1- Sols bruns

b.1.1.- Sols bruns à chailles

Localisés essentiellement dans le secteur de Chilly et la forêt des Moidons; développés sur argiles à chailles; l'épaisseur varie selon leur position topographique mais reste souvent supérieure à 50 cm, les horizons sont peu différenciés.

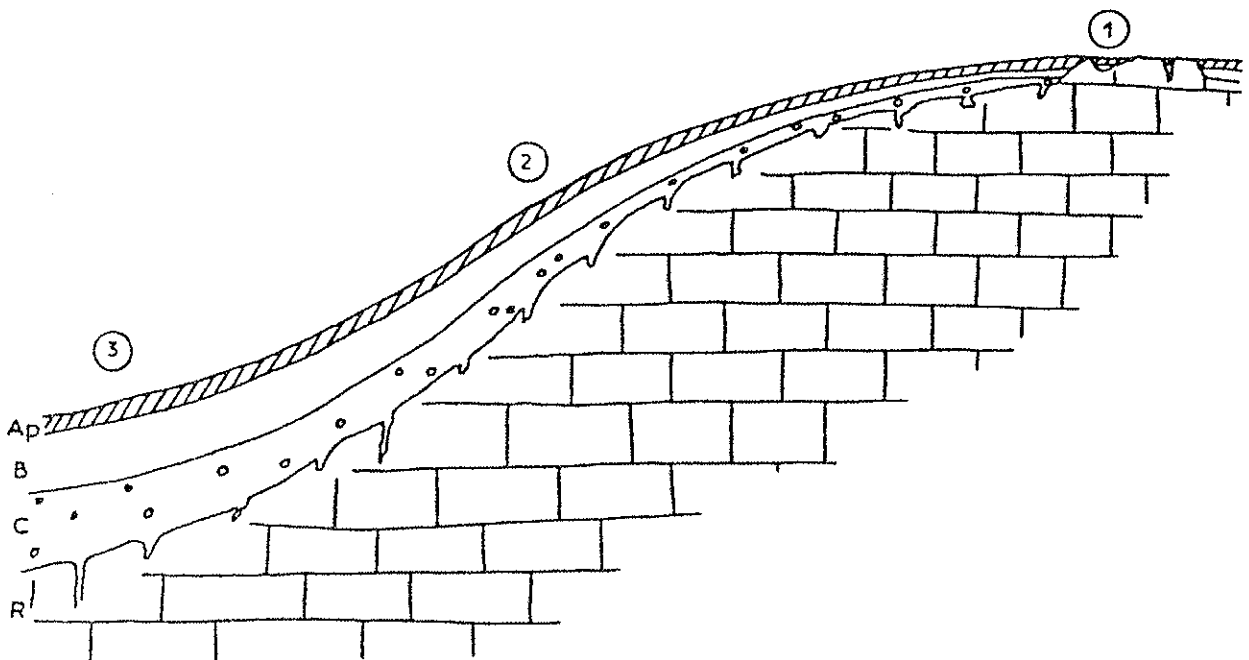
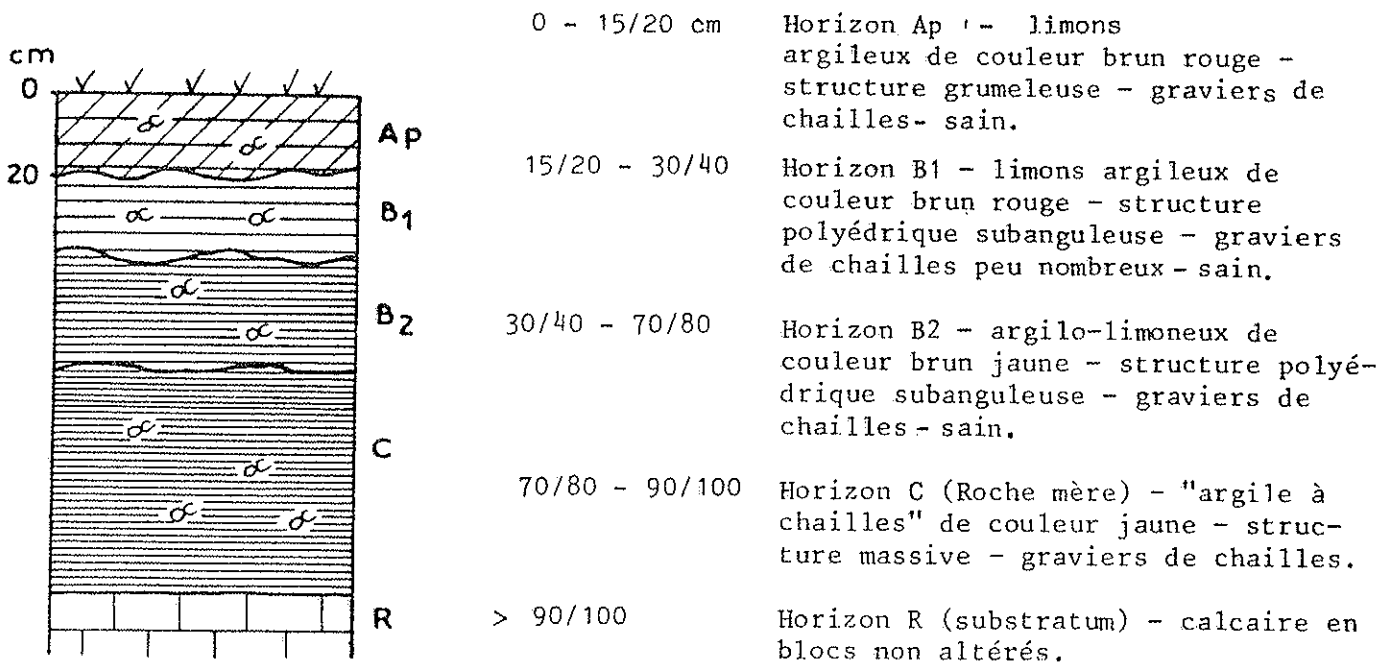
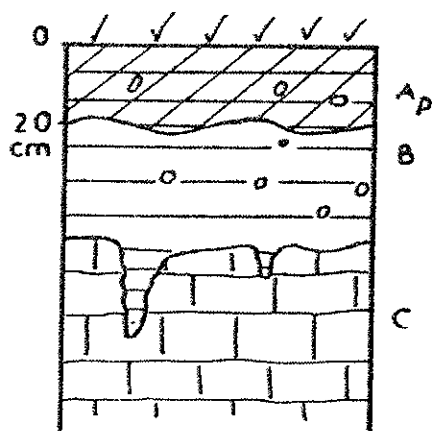


Fig. 11 - Répartition topographique des sols bruns à chailles

La répartition spatiale (fig. 11) montre un glissement de (1) et (2) vers les dépressions (3) qui se comblent. Sur les sommets, des sols moins épais, voire superficiels, apparaissent. En présence de replats, les argiles à chailles subsistent et l'épaisseur du sol augmente.

### b.1.2. Sols bruns sur calcaire dur

D'épaisseur variable mais toujours supérieure à 30 cm, ils présentent des similitudes avec les sols bruns à chailles. Ils se localisent un peu partout sur l'ensemble du bassin sur des zones plates ou de faible pente.

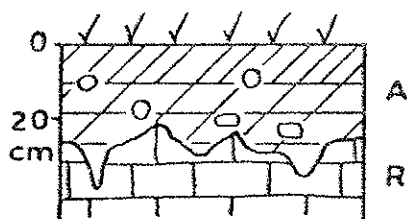


- |               |   |
|---------------|---|
| 0 - 20/25 cm  | Horizon Ap - limons argileux - brun rouge - plus ou moins chargé en éléments grossiers - structure grumeleuse.  |
| 20/25 - 40/50 | Horizon B - argilo-limoneux ou limons argileux - de couleur brune plus claire - plus ou moins chargé en éléments grossiers selon que le substrat se compose de calcaire ou de glaciaire - structure polyédrique subanguleuse. |

Les deux types de sols que nous venons de voir (bruns à chailles, bruns sur calcaire ou glaciaire) se classent parmi les sols bruns eutrophes ou mésotrophes selon la valeur de leur taux de saturation (eutrophe  $S/T > 75\%$ , mésotrophe  $S/T < 75\%$ ). Leur taux d'argile élevé s'accompagne d'une richesse en fer qui ne migre pas mais s'accumule sous de multiples formes plus ou moins amorphes ou cristallisées (M. POCHON, 1978). Lorsqu'ils se développeront sur argiles à chailles, ils peuvent être polycycliques.

### b.1.3. Sols bruns superficiels à pellicules calcaires

Ils occupent la plus grande partie de la couverture pédologique. On les trouve essentiellement sur calcaire dur, leur épaisseur varie de quelques centimètres à une profondeur toujours inférieure à 30 cm. Ils se caractérisent sur le terrain par la présence, dans le profil ou à sa base, de cailloux calcaires qui laissent une pellicule blanche (S. BRUCKERT, 1980). Ces sols s'apparentent à des sols bruns calciques en raison d'un taux de saturation élevé.



- |               |   |
|---------------|---|
| 0 - 15/20 cm  | Horizon A - brun rougeâtre, plus ou moins organique - argilo-limoneux - éléments grossiers non altérés calcaires. |
| 15/20 - 25/30 | Horizon B - brun rougeâtre - argilo-limoneux - quelques éléments grossiers calcaires non altérés.                 |

Comme tous les sols brunifiés, ils sont suffisamment pourvus en fer et en argile, aérés et bien drainés. Ils réagissent chimiquement comme des sols bruns eutrophes ou mésotrophes à forte perméabilité. Cette dernière est d'autant plus élevée qu'ils se situent sur des calcaires fissurés ou dans des secteurs très karstifiés. Les eaux de percolation se chargeront chimiquement moins que dans les cas précédents en raison de la faible épaisseur et de l'excellent drainage. Ceci rend plus délicat l'épandage des engrais puisqu'un risque de lixiviation importante existe. Toutefois, ces sols sont peu propices à la culture en raison de leur extension verticale limitée. (fig.12).

En forêt, ils s'associent à des creux comblés de sols épais, généralement limoneux.

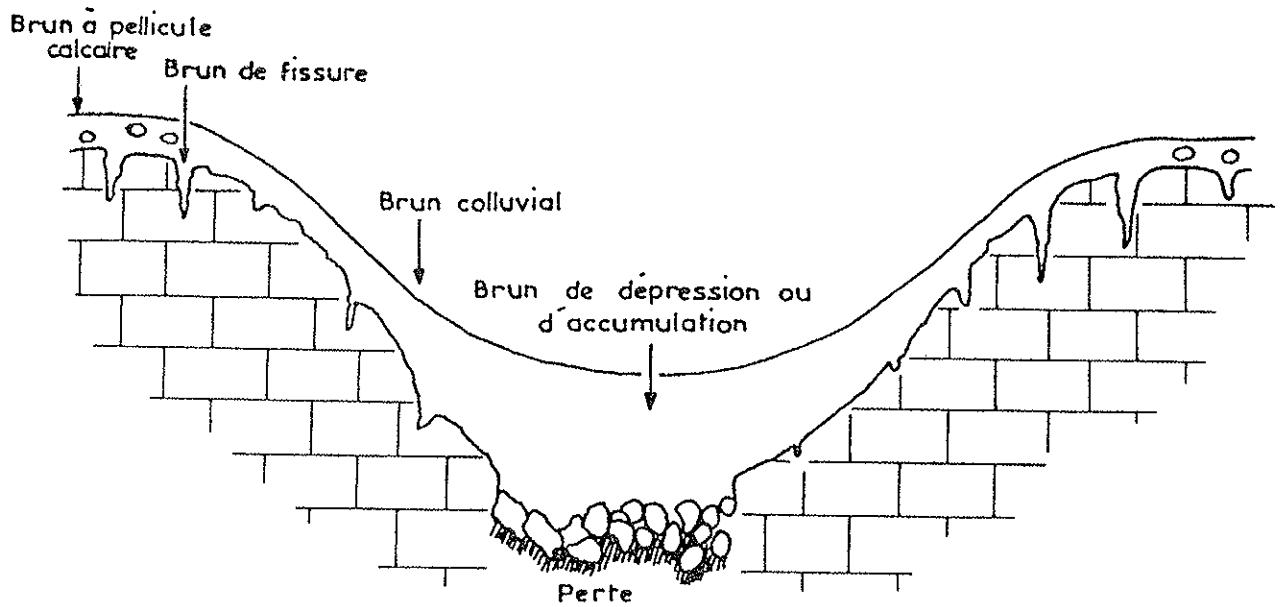


Fig. 12 - Répartition des sols dans le paysage.

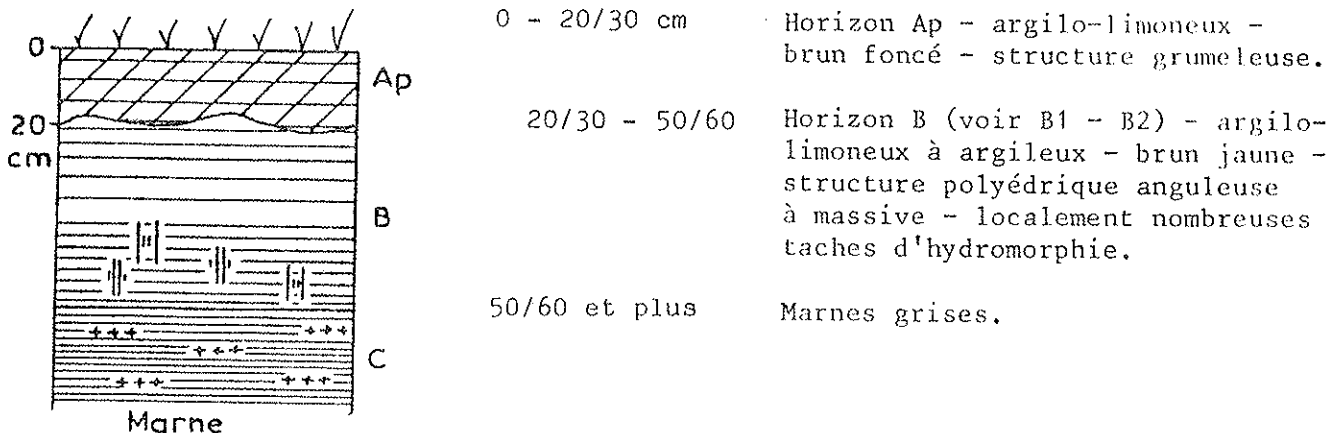
b-2- Sols bruns calcaïques

b.2.1.- Sols bruns calcaïques sur calcaires

	<p>0 - 20/30 cm</p> <p>Ap</p>	<p>Horizon Ap - limono-argileux - couleur brune - structure grumeleuse fine - éléments grossiers peu nombreux calcaires ou siliceux (argiles à chailles).</p>
	<p>20/30 - 35/45</p> <p>B</p> <p>BC</p>	<p>Horizon B - limono-argileux - couleur brune plus claire - structure polyédrique subanguleuse - éléments grossiers calcaires ou siliceux.</p>
	<p>35/45 - 45/55</p> <p>C</p>	<p>Horizon BC - limono-argilo-sableux - couleur jaune - carbonaté - éléments grossiers parfois abondants.</p>

b.2.2.- Sols bruns calciques sur marnes

On les rencontre essentiellement dans la région de Besain sur alluvions anciennes ou fluvioglaciaires marneuses. Ils sont épais (supérieur à 50 cm), présentent un taux de saturation élevé en profondeur et du calcium échangeable en quantité importante provenant de la décarbonatation des marnes. La présence d'hydromorphie est due aux marnes qui forment un obstacle à l'écoulement des eaux.

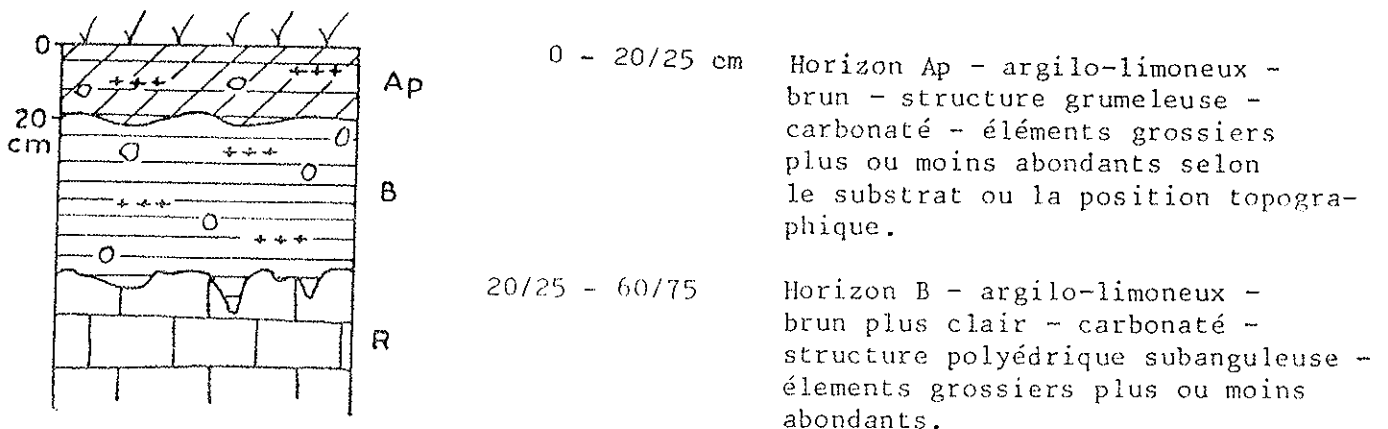


Les deux types de sols bruns calciques que nous venons de décrire se caractérisent par des taux de saturation élevés dans tout le profil. La capacité d'échange des cations (CEC) est élevée (20 meq/100g) dans la partie supérieure du profil. L'ion calcium (échangeable) domine largement, quant au fer et à l'aluminium, ils se concentrent en surface. La présence de  $\text{CaCO}_3$  n'apparaît qu'en profondeur. Le pH est assez élevé (7 à 8).

La décarbonatation de ces sols résulte d'un phénomène réglé par la présence de  $\text{CO}_2$  (provenant du système racinaire) dans les solutions percolant dans ces sols. Les ions bicarbonates contribuent à la solubilisation de la calcite. Selon A. DURAND, 1979, 70 % du  $\text{Ca}^{++}$  est en équilibre avec  $\text{HCO}_3^-$  sous prairie, alors que sous sols nus, les  $\text{NO}_3^-$  prédominent. Le  $\text{Ca}^{++}$  s'associe donc à  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  ou  $\text{SO}_4^{--}$  et subit un transfert régi par la dynamique de l'eau lors du drainage hivernal.

b-3. Sols bruns calcaires

Peu fréquents sur le bassin, ils sont moins évolués que les précédents, ou rajeunis. Ils se localisent sur des calcaires durs, des marnes, ou des formations glaciaires parfois en bas de pente où ils bénéficient d'un apport carbonaté colluvial. Ils se caractérisent par une carbonatation de tout le profil.





Ces sols, souvent argileux dans la région, présentent un complexe absorbant saturé en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  avec une CEC aux alentours de 20 meq/100g. La décomposition de la matière organique est excellente dans la partie supérieure du profil ; le rapport C/N de l'ordre de 10 et le pH élevé en raison de la présence de  $\text{CaCO}_3$  sur l'ensemble du profil.

### c). Analyses des sols

D'après l'analyse faite par le laboratoire de l'INRA d'Arras (Tableau 2), la plupart des sols sont argilo-limoneux à argileux, avec des capacités d'échange cationique moyennes à élevées. Les sols bruns calcaires et calcaires sont plus ou moins saturés en calcium et à pH neutre ; les sols bruns sont particulièrement désaturés et à pH plus acide.

TYPE DE SOL	ANALYSES PHYSIQUES			ANALYSES CHIMIQUES							
	Argiles %	Limons %	Sables %	pH H <sub>2</sub> O	Calcaire %/100	Matière organique %/100	K <sup>+</sup> %/100	Mg <sup>++</sup> %/100	Ca <sup>++</sup> %/100	CEC	
Brun à pellicule calcaire (Desain)	40	31,5	28,5	5,70	-	6,6	0,21	0,25	21	22	
Brun (Chilly)	40	31,5	28,5	5,70	-	6,6	0,21				
Brun (Chilly)	36	41	24	5,30	-	4,3	0,23	1,18	13,2	19	
Brun (Chilly)	40	37	23	6,05	-	5,2	0,55	1,03	15,5	20	
Brun (Chilly)	35	42	23	5,55	-	4,5	0,31	1,03	10,9	16,1	
Brun calcaire (Chilly)	42	38	20	6,45	-	5,2	0,29	1,37	24,3	22	
Brun dépression (Molain)	41	50	9	6,2	-	7,3	0,18	0,13	5,1		
Brun calcaire (Molain)	34	47	19	7,6	-	11,6	0,24	0,28	14	15	

Tableau 2 : - Analyses de sols (0 à 25 cm)

### d). Distribution des sols

La distribution générale des sols est tributaire de la morphologie et de la structure du karst. Les sols superficiels se localisent dans le secteur Sud du bassin, et se sont développés sur un karst très fissuré et très actif. Si l'aspect très ouvert de ce karst n'a favorisé que le développement de sols superficiels, ceux-ci ayant une production de  $\text{CO}_2$  très abondante accentuent la dissolution du calcaire, grâce à un drainage rapide, entretiennent cet aspect actif du système avec des écoulements accélérés.

Les sols épais sur argiles à chailles se sont développés sur un milieu moins fissuré, qui a permis leur accumulation et leur développement. La production de  $\text{CO}_2$  dans ces sols est importante mais le drainage est plus lent que dans les sols superficiels (en raison de leur épaisseur), ce qui entraîne une dissolution plus lente du calcaire. Le milieu favorise donc un écoulement relativement lent des eaux, aussi bien dans les sols en raison de leur épaisseur que dans les calcaires.

## 2). COUVERTURE VEGETALE DU BASSIN

La couverture forestière représente 60% de la superficie du bassin, les prairies et quelques cultures occupent les 40 % restants (fig.13)

### a). Les secteurs forestiers

Communale ou domaniale (fig. 105 - Annexe 1), la forêt se compose bien souvent d'un taillis-sous-futaie, progressivement remplacé par une futaie régulière (T. BEAUFILS, 1983). Ceci favorise la croissance du charme et du chêne, mais ce dernier présente quelques difficultés d'implantation. Le tableau 3, extrait de l'Inventaire Forestier National, dans le travail de T. BEAUFILS (1983), donne les espèces prédominantes de ces massifs forestiers.

Essence indigène ou introduite	Pourcentage
charme	48,80
chêne pédonculé	7,63
frêne	7,38
sapin	6,44
épicéa	5,53
hêtre	5,27
tilleuls	5,20
petits érables	3,72
chêne rouvre	3,14
grands érables	2,43

Tableau 3 : Essences forestières dominantes sur le 1er Plateau (d'après T. BEAUFILS, 1983)

### b). Les secteurs cultivés

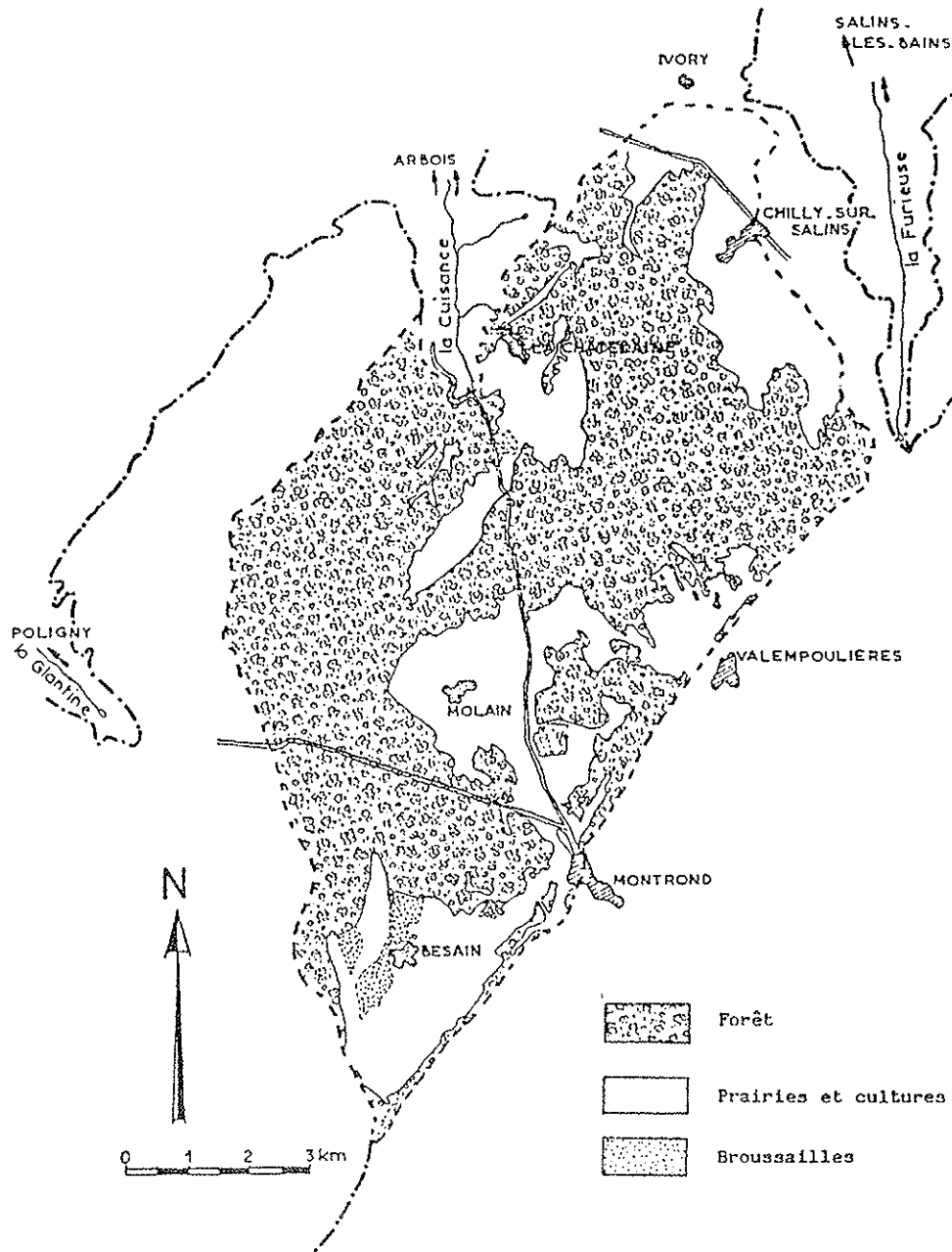
Ils sont dominés par les prairies naturelles au Sud du bassin, naturelles et artificielles au Nord. Les cultures, peu fréquentes, se localisent principalement sur des sols favorables, dans le secteur de Chilly-sur-Salins. Pour des raisons essentiellement climatiques, elles se composent d'orge, de seigle, de blé et de maïs.

### c). Les prairies permanentes

L'inventaire et la détermination de la couverture végétale en prairie fait l'objet d'une étude, effectuée par N. GOBET. Trente pour cent de la surface du Bassin de la Cuisance sont recouverts de prairies permanentes subdivisées en trois catégories :

- prairies semi-naturelles non amendées,
- prairies semi-naturelles amendées,
- prairies artificielles.

Fig.13 - COUVERTURE VEGETALE DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA CUISANCE



c-1. Les prairies semi-naturelles non amendées

Divisées elles-mêmes en deux catégories :

- les prairies humides, localisées dans le secteur de Besain sur des sols hydromorphes, ne font l'objet d'aucun amendement. Les espèces dominantes sont La Spirée ulmanie - Le Cirse oléreux - L'Angélique des bois - La Salicaire - La Lysimaque vulgaire - La Laiche gracile.

- les prairies sèches, localisées dans le secteur de Valempoulières, Molain, la Chatelaine et Montrond, sur des sols bruns à pellicules calcaires, ne sont ni amendées, ni fauchées. Les espèces dominantes thermophiles sont : La Brome érigée - La Koeleine pyramidale - La Brachypode - La Carline vulgaire - La Vulnéraire - La Polygale chevelue. La valeur pastorale de ces prairies est faible (0 à 30 tMs/h).

c-2- Les prairies semi-naturelles amendées  
.....

Elles se localisent dans les secteurs de Montrond, Molain, Valempoulières et la Chatelaine, dans des dépressions ou sur des sols bruns ; dans le secteur de Chilly sur Salins sur des sols bruns épais. Les espèces dominantes sont : Le Salsifis des prés - La Brome moue - L'Avoine - La Knautie des champs dans les prairies fauchées - La Crettelle - Le Ray - Le Cerass anglais - et Le Trèfle blanc dans les prairies pâturées. La valeur pastorale de ces prairies est bonne (50 à 70 tMs/h).

c-3- Les prairies artificielles  
.....

Localisées dans les secteurs de Chilly-sur-Salins et en faible proportion à Besain, sur des sols bruns et bruns épais. Les espèces dominantes sont : Le Ray grass d'Italie - La Fléole des prés - La Dactyle aglomène pour les graminées et Le Trèfle blanc - Le Trèfle violet pour les légumineuses. La valeur pastorale de ces prairies est élevée (80 tMs/h).

Conclusion du premier chapitre

Le bassin d'alimentation des sources de la Cuisance couvre une superficie d'environ 100 km<sup>2</sup> et se compose d'un système karstique calcaire complexe formé de sous-bassins imbriqués les uns dans les autres.

Deux grands secteurs se distinguent par leur morphologie, leur couverture pédologique et leur végétation.

Au Sud des sols superficiels se sont développés sur un karst très marqué et très actif (fissures - dolines). La faible épaisseur des sols favorise une couverture végétale composée principalement de forêts et de prairies naturelles. Les types de sols et de végétation permettent une forte production de CO<sub>2</sub>, rapidement entraîné en profondeur, responsable de la dissolution du calcaire et de la karstification. L'exploitation en prairies nécessite un apport d'engrais peu important.

Au Nord des sols bruns épais se sont développés sur des argiles à chailles. La qualité des sols favorise les cultures de céréales et nécessite l'apport d'engrais plus abondants dans ce secteur.

## CHAPITRE II - BILAN CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE

### I - EQUIPEMENT DU BASSIN D'ALIMENTATION DES SOURCES DE LA CUISANCE

#### 1). LIMNIGRAPHERS

Un premier limnigraphe installé par le SRAE, situé au "Vernois" à Mesnay (x = 864,14 ; y = 215,75 ; z = 319), enregistre les débits de la Cuisance en aval des sources étudiées depuis Juillet 1980. (Dans un premier temps, il avait été installé à la source de la Grotte des Planches, de 1978 à 1980 : x = 864,78 ; y = 214,5 ; z = 330).

Un second limnigraphe installé par le Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée de Besançon, à la Grotte des Planches (x = 864,74 ; y = 214,74 ; z = 300) depuis Juillet 1983, a permis d'enregistrer les débits de cette source. Par différence, nous obtenons le débit de la source captée du Fer à Cheval (avec une certaine erreur due aux petites sources qui se jettent dans la Cuisance en amont du Vernois, mais les débits sont faibles par rapport à ceux des deux sources principales).

#### 2). PLUVIOGRAPHES

La Météorologie Nationale dispose des stations de Besain, Supt, Arbois. Elles sont équipées d'un pluviographe et d'un thermographe. Nous avons complété cet équipement par trois autres pluviographes, à enregistrement hebdomadaire, situés sur le plateau :

. Molain	x = 864,94 ; y = 208,52 ; z = 575
. La Chatelaine	x = 865,46 ; y = 214,04 ; z = 562
. Chilly-sur-Salins	x = 869,28 ; y = 216,05 ; z = 632

### II - DONNEES CLIMATIQUES

Nous utilisons les données climatiques sur une période de 10 ans à Besain. Elles sont comparées aux autres stations du plateau (Chilly, Molain, La Chatelaine) pour la période correspondante au cycle hydrologique 1983-1984.

#### 1). PRECIPITATIONS

Les précipitations enregistrées à Besain (Fig. 14) sur une période de 10 ans (1973 à 1984) font ressortir des variations saisonnières avec deux minimums en Avril et en Août et deux maximums en Janvier et en Mai. La tendance de ces quatre stations s'observe également au cours du cycle hydrologique 1983-1984 qui semble être un cycle assez représentatif des précipitations du premier plateau, bien qu'en Décembre il y ait eu un léger déficit.

Le tableau ci-dessous (Tabl. 4) donne les maximums et minimums enregistrés à Besain pour une période de 10 ans.

	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOU
MINI (mm) (ANNEE)	18,8 (77)	45,3 (78)	26,1 (78)	66,7 (75)	112,1 (76)	29,5 (82)	29,8 (76)	26,4 (82)	67,6 (82)	60,6 (75)	41,7 (79)	46,1 (84)
MAXI (mm) (ANNEE)	219,7 (74)	302,9 (74)	223,8 (75)	296,4 (81)	230,8 (84)	341,4 (77)	271,4 (79)	332,2 (83)	384,2 (83)	236,5 (82)	220,8 (77)	202,0 (82)
MOYENNE (mm)	129,0	149,7	150,4	178,9	182,7	145,1	148,6	110,1	150,8	125,0	107,2	111,9
Δ MINI/MOY	-110,2	-104,4	-124,3	-112,2	-70,2	-115,6	-118,8	-83,7	-83,2	-64,4	-65,5	-65,8
Δ MAXI/MOY	+90,7	+153,2	+73,4	+117,5	+48,1	-196,3	+122,8	+222,1	+233,4	+111,5	+113,6	+90,1

Tableau 4 - Précipitations minimales et maximales à Besain

Le maximum des précipitations a été enregistré en Avril et Mai 1983, ce qui peut influencer le bilan réalisé pendant le cycle 1983-1984 en raison des importantes quantités d'eau qui ont pu être stockées. Le mois d'août 1984 a été le plus sec sur la période étudiée, offrant ainsi la possibilité de rétablir l'équilibre après l'excédant du printemps 1983, L'écart entre la moyenne mensuelle et ce minimum est peu important.

Au cours du cycle hydrologique 1983-1984 (Septembre 1983 à Août 1984), les précipitations enregistrées sur les quatre pluviographes montrent quelques différences (Tabl.5). En effet, nous sommes en-deçà de la valeur moyenne de Besain sur 10 ans, les précipitations semblent légèrement inférieures à Molain puis à la Chatelaine. Notons que les précipitations les plus basses ne se produisent pas en été mais en Avril. Une étude statistique plus poussée ne serait pas représentative sur un laps de temps aussi court.

SEPTEMBRE 83 à AOÛT 84	BESAIN	MOLAIN	LA CHATELAIN	CHILLY S/SALINS	MOYENNE BESAIN (sur 11 ans)
P mm	1423	1192	1262	1339	1670
Minimum	36,5 (Avril)	36,0 (Avril)	11,2 (Avril)	26,6 (Avril)	
Maximum	230,8 (Janvier)	173,6 (Janvier)	198,5 (Janvier)	216,2 (Janvier)	

Tableau 5 - Précipitations 1983-1984

## 2). TEMPERATURES

Les températures enregistrées à Besain sur une période de 10 ans présentent un minima en Janvier, un maxima en Juillet (Fig. 15) et une moyenne annuelle de 8,2°C.

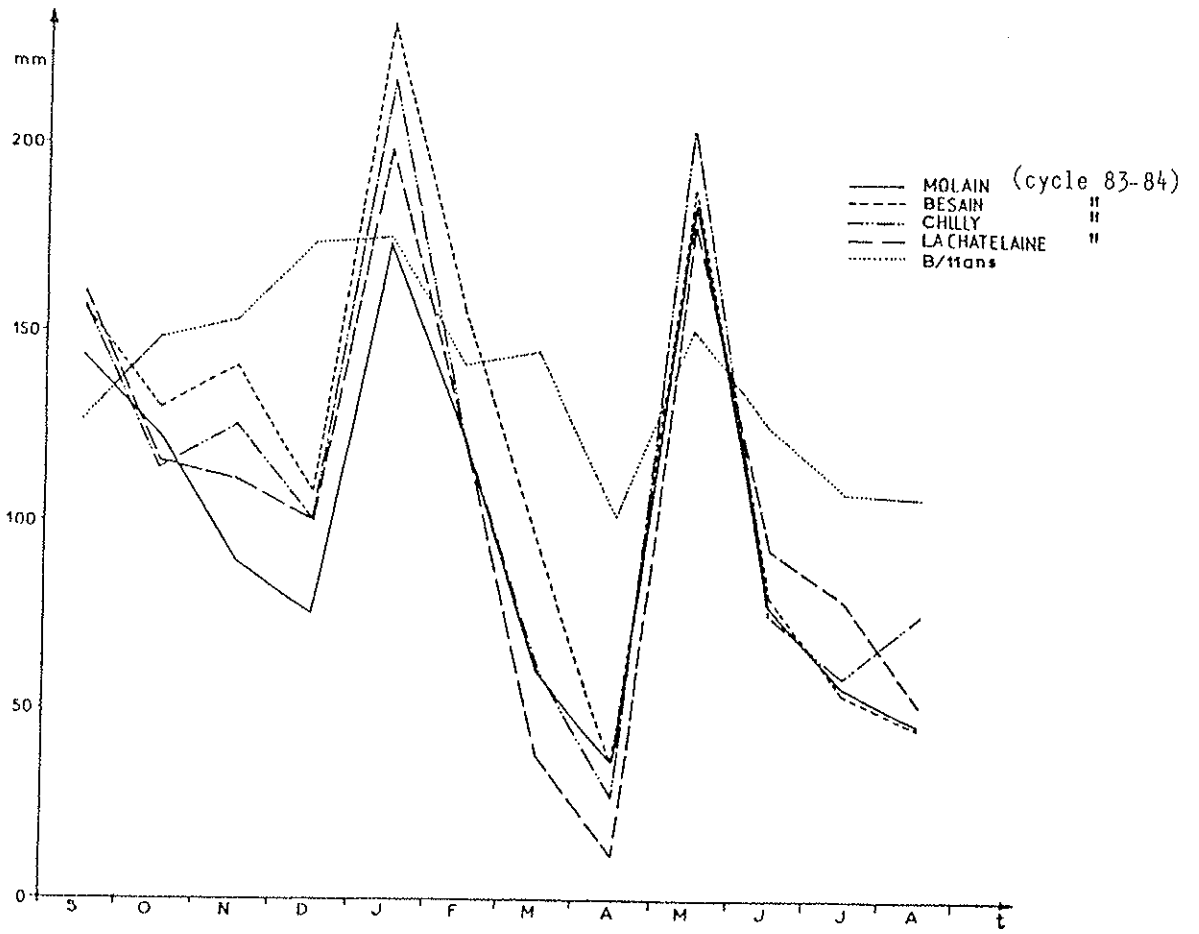


Fig. 14 - Courbes de précipitations

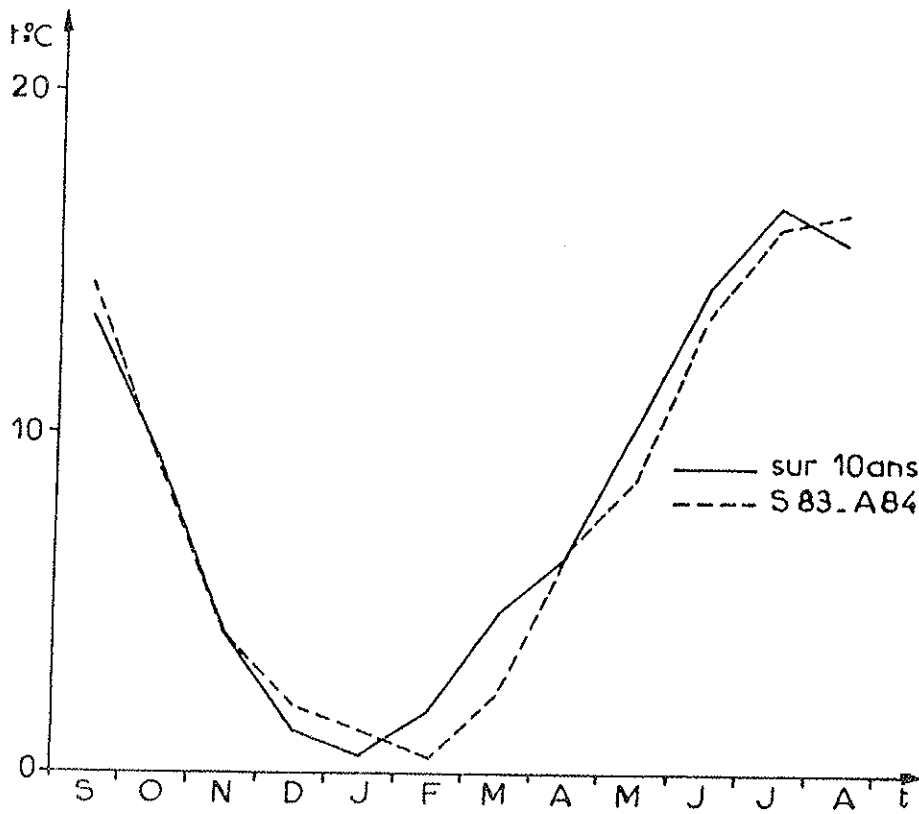


Fig. 15 - Températures à Besain

Le cycle 1983-1984 semble suivre cette règle, avec cependant un minimum en Février et un maximum en Août. Les variations les plus importantes se situent en Janvier et les moins importantes en Avril (Tabl.47, Annexe I).

### III - L'EVAPOTRANSPIRATION

#### 1). EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ETP

L'évapotranspiration (partiellement due aux végétaux ne souffrant d'aucune restriction) exporte une quantité maximale de vapeur d'eau appelée évapotranspiration potentielle. C.W. THORNTHWAITE (1954) émet, à certaines conditions, l'hypothèse que cette ETP ne dépend ni des espèces végétales, ni de la nature du sol. Aussi est-il nécessaire de raisonner sur de grandes surfaces (de l'ordre de la centaine d'hectares) et sur un intervalle de temps assez long (décadaire par exemple). Les formules utilisées n'apportent qu'une approximation dont les écarts sont parfois importants, car l'ETP regroupe deux phénomènes essentiels : la valeur limite évaporable par les végétaux et le pouvoir évaporant de l'atmosphère.

D'autres formules existent, notamment celles de F. TURC (1954) et PENMAN, mais l'absence de certaines données (le degré hygrométrique, le vent) ne permet pas leur utilisation dans le cas présent.

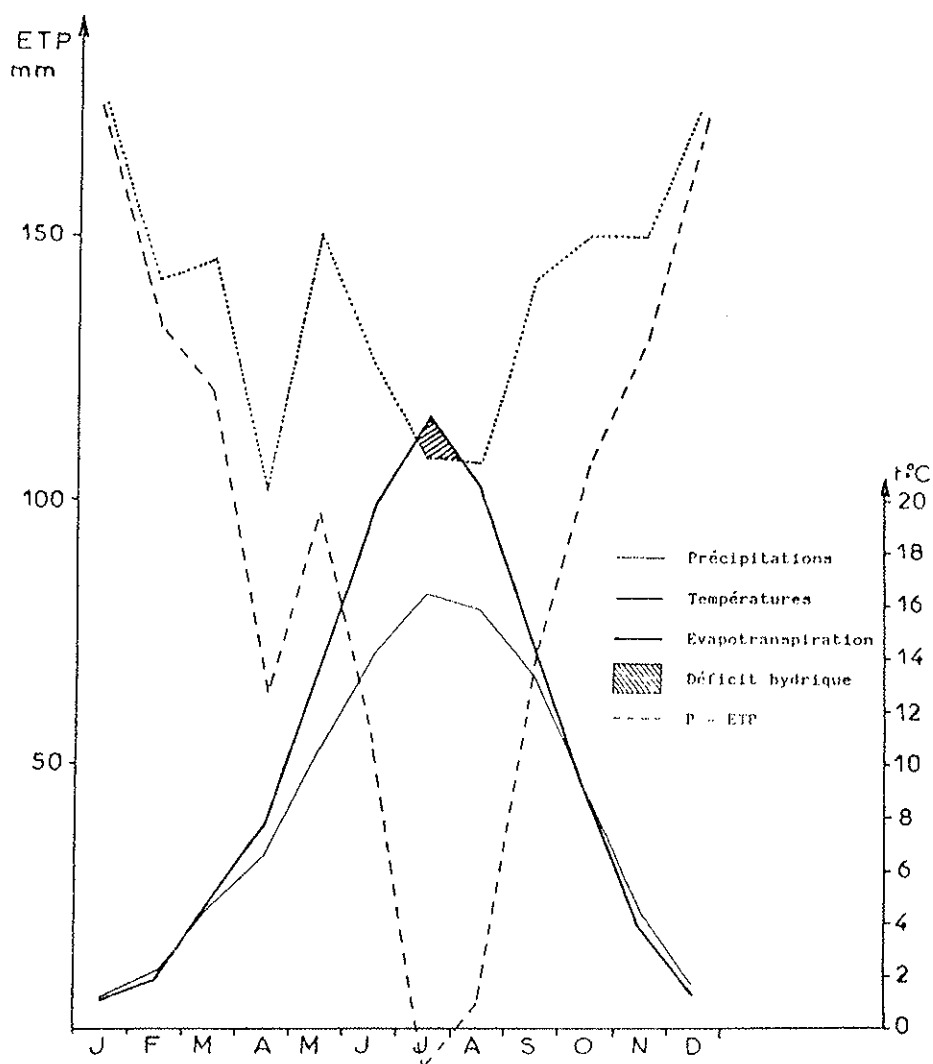


FIG. 16 - BILAN DES PRECIPITATIONS ET DE L'EVAPOTRANSPIRATION A BESAIN (MOYENNE SUR 10 ANS)



La formule empirique de THORNTHWAITE utilise des paramètres, telles que la température moyenne de l'air et la durée d'insolation dépendante de la latitude. Elle s'écrit :

$$ETP_{(mm)} = 16 \left| 10 \frac{t}{I} \right|^a F(\lambda)$$

avec  $t$  = température moyenne en °C

$$I = \text{indice thermique annuel} = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$i = \text{indice thermique mensuel} = \left| \frac{t}{5} \right|^{1,514}$$

$$a = \text{fonction de } I = \left| 6,75 \times 10^{-7} I^3 \right| -$$

$$- \left| 7,7 \times 10^{-5} I^2 \right| + \left| 1,79 \times 10^{-2} I \right| + 0,49$$

$F(A)$  = facteur correctif intégrant la durée d'insolation et la température.

Le Tableau 6 (ETP à Besain) regroupe les valeurs de l'ETP calculée d'après cette formule pour une période de 11 ans (1974 à 1984, années civiles).

BESAIN (11 ans)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNUEL
T(°C)	1,2	2,1	4,6	6,5	10,5	14,2	16,5	15,9	13,3	8,8	4,5	1,6	8,3
P(mm)	175,3	141,8	145,4	102,1	150,4	125,4	107,9	106,8	141,5	150,1	149,8	173,3	1669,8
ETP(mm)	5,6	9,2	23,9	38,1	67,8	99,2	116,1	101,8	71,8	42,7	18,9	6,4	601,5

Tableau 6 - ETP à Besain pour une période de 11 ans

La représentation graphique du tableau précédent (Fig. 16) montre que le déficit hydrique est de courte durée au mois de Juillet, ce qui correspond aux valeurs généralement trouvées sur le premier plateau (communication orale de M. GAIFFE). Le drainage hivernal théorique commence en Septembre pour se terminer en Mai.

Les éléments en excès dans les sols, à la fin de cette période, risquent d'être lixiviés.

L'ETP a également été calculée sur le cycle 1983-1984. Le calcul commence en Janvier 1983 afin de voir si l'épisode pluvieux du printemps 1983 entraîne des perturbations sensibles sur le cycle 1983-1984 (fig. 17). Le drainage hivernal théorique se produit du mois d'Octobre 1983 au mois d'Avril 1984.

## 2). EVAPOTRANSPIRATION REELLE ETR

L'évapotranspiration effective des végétaux fait appel à la réserve facilement utilisable (RFU). Celle-ci correspond à la quantité d'eau nécessaire aux plantes, retenue dans les sols par les forces capillaires. La quantité d'eau évaporée par les plantes correspond donc à l'évapotranspiration potentielle diminuée de la RFU et s'appelle l'évapotranspiration réelle.

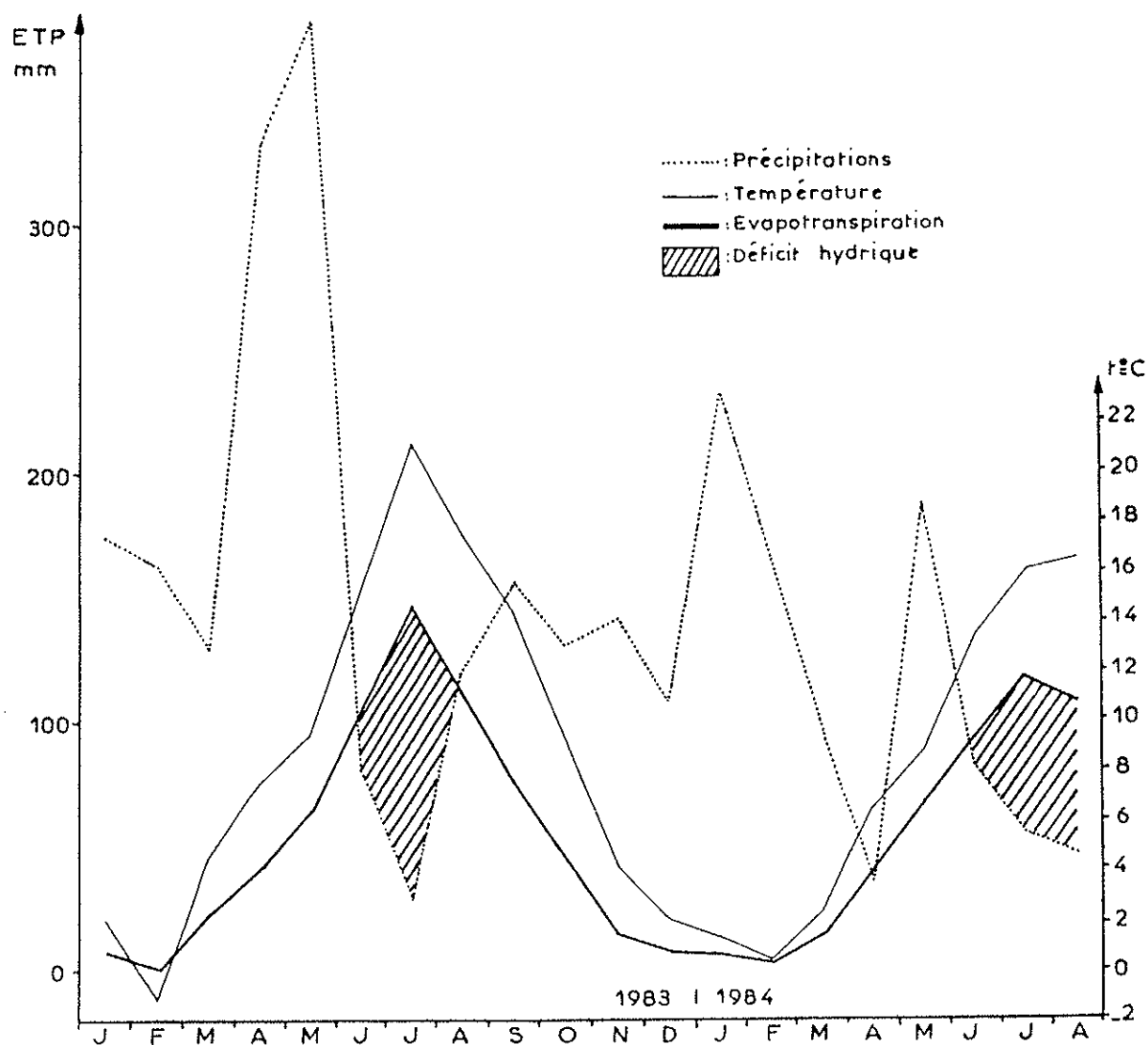


Figure 17 : Evapotranspiration potentielle et bilan hydrique à Besain. (Cycle 1983-1984).

Pour calculer cette ETR, de nombreuses formules existent et font appel à la RFU. En 1954, F. TURC donne une formule simplifiée (utilisée dans cette étude) et indépendante de la RFU ; elle ne reste exploitable que pour des laps de temps de l'ordre de l'année.

$$ETR_{(mm)} = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

avec  $P$  = précipitation moyenne annuelle en mm  
 $L = 300 + 25 t + 0,05 t^3$   
 $t$  = température moyenne annuelle en °C.

Une comparaison de l'ETP et l'ETR, de différents cycles hydrologiques, figure dans le tableau 7.

CYCLES	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	MOYENNE
T °C	9	8,5	8,5	8,4	7,7	7,8	8,1	7,6	9,0	9,1	7,9	8,3
P mm	1328	1675	1103	2101	1678	1583	1716	1622	1801	2182	1433	1656
ETR mm	521	519	492	524	495	495	508	490	537	535	525	513
ETP mm	605	596	594	594	570	583	581	583	613	620	571	592
% ETR/ETP	86	87	83	88	87	85	87	84	88	86	92	85

Tableau 7 - ETP - ETR sur 11 cycles hydrologiques

Lors du calcul des bilans hydrologiques, nous exploiterons les deux types d'évaporation. Cependant il est important de noter que l'ETR du cycle 1983-1984 représente 92% de l'ETP. La différence entre ces deux résultats est probablement inférieure à l'erreur faite avec les différentes méthodes (mesures-calculs). L'ETR tend donc vers l'ETP.

#### IV - ESSAI DE BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA CUISANCE

Le bassin délimité qualitativement au chapitre III de la première partie, va nous permettre de tenter de le définir quantitativement en dressant un bilan, entrée-sortie, des eaux.

Pour calculer ce bilan, nous ne disposons d'un enregistrement des débits à Mesnay que depuis 1980, ce qui ne couvre que quatre cycles hydrologiques. De plus parmi ces quatre cycles, celui de 1983-1984 peut être considéré comme exceptionnel, puisque le printemps 1983 a reçu des précipitations trentenaires. Ainsi le tableau 8 exprime la supériorité des précipitations de ce printemps 1983.

BESAIN	Pmm	RAPPORT
Avril 83	306	2,8
Moyenne Avril (10 ans)	110	
Mai 83	318	2,1
Moyenne Mai (10 ans)	150	

Tableau 8 - Rapport des précipitations moyennes à celles du printemps 1983  
Rapport :  $\frac{\text{Précipitations printemps 83}}{\text{Précipitations moyennes}}$

Les débits de l'été 1983 sont donc influencés par ces précipitations d'Avril et Mai 1983, il se peut donc que les débits soient quelque peu supérieurs aux précipitations sachant qu'une partie de l'eau reste stockée un certain temps dans le karst (voir paragraphe V).

### 11. BILAN DE L'ENSEMBLE DU BASSIN D'ALIMENTATION

Nous considèrerons que les débits enregistrés au Vernois à Mesnay rassemblent ceux des sources de la Grotte des Planches et du Captage du Fer à Cheval ainsi que ceux de quelques ruisseaux de moindre importance.

Le tableau 10 résume l'ensemble des chiffres utilisés et fait ressortir un écart de 6% entre la quantité d'eau infiltrée (en faisant intervenir l'ETR ou l'ETP) et la quantité d'eau sortie aux sources. La superficie du bassin définie au Chapitre I de la 1ère Partie s'étend sur 99 km<sup>2</sup>.

La dernière colonne des tableaux 9 et 10 indique les valeurs obtenues en tenant compte des précipitations enregistrées à Besain, Molain, La Chatelaine et Chilly-sur-Salins au cours du cycle 1983-1984, sachant que chaque station représente respectivement 17 %, 40 %, 26% et 17 % de la superficie totale du bassin.

BESAIN / CYCLE	80 - 81	81 - 82	82 - 83	83 - 84	MOYENNE
T moyenne (°C)	7,6	9	9,1	7,9	8,4
P moyenne (mm)	1622	1801	2182	1433	1759
ETR (mm)	490	537	535	525	522
ETP (mm)	583	613	620	571	597
P-ETR (mm)	1132	1264	1647	908	1338
P-ETP (mm)	1039	1188	1562	862	1162
Q moyen (m <sup>3</sup> /s)	3,78	3,69	5,71	2,97	4,04

Tableau 9 - Paramètres climatiques et hydrologiques des quatre cycles considérés

Nous pouvons maintenant comparer les volumes infiltrés et les volumes écoulés (Tabl. 10). Aux volumes infiltrés à la suite des précipitations, il faut ajouter le volume d'eaux usées rejetées dans le système. Ce volume est estimé à 50 l/habitant/jour par C. GOUGOUSIS-DELPY (1982), nos mesures (moins nombreuses) donnent 60 l/hab/j. Le bassin comprend environ 400 habitants, et produit un volume de 88.10<sup>6</sup> l/an, insignifiant si nous le comparons aux volumes écoulés ou infiltrés.

SUPERFICIE 99 km <sup>2</sup>	80 - 81	81 - 82	82 - 83	83 - 84	MOYENNE
Volume écoulé (m <sup>3</sup> )	119.10 <sup>6</sup>	116.10 <sup>6</sup>	180.10 <sup>6</sup>	94.10 <sup>6</sup>	127.10 <sup>6</sup>
Volume P-ETR Infiltré (m <sup>3</sup> )	112.10 <sup>6</sup>	125.10 <sup>6</sup>	163.10 <sup>6</sup>	90.10 <sup>6</sup>	122.10 <sup>6</sup>
Volume P-ETP Infiltré (m <sup>3</sup> )	103.10 <sup>6</sup>	118.10 <sup>6</sup>	155.10 <sup>6</sup>	85.10 <sup>6</sup>	115.10 <sup>6</sup>

Tableau 11 - Comparaison des volumes infiltrés et écoulés (encadré : Volume infiltré incluant les eaux usées).

Compte tenu des erreurs et approximations faites sur les mesures (débits, précipitations) et sur les calculs de ETP et ETR, nous pouvons considérer que la superficie du bassin est approximativement correcte puisque les volumes écoulés ne sont que légèrement supérieurs aux volumes infiltrés).

2). RECHERCHE DE LA SUPERFICIE DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA SOURCE DE LA GROTTÉ

En procédant de la même manière et avec la même marge d'erreur, à laquelle s'ajoute le fait que les calculs ne peuvent se faire que sur 3 cycles hydrologiques non suivis, nous tenterons de définir la superficie du bassin de la source de la Grotte des Planches (Tableau 11).

BESAIN	78 - 79	79 - 80	83 - 84	MOYENNES	CHILLY 83 - 84
$\bar{Q}$ Grotte (m <sup>3</sup> /s)	1,6	2,2	1,4	1,7	1,4
$\bar{P}$ Besain (mm)	1583	1716	1433	1577	1339
$\bar{T}^{\circ}$ Besain (°C)	7,8	8,1	7,9	7,9	7,9
ETR (mm)	495	508	525	509	490
ETP (mm)	583	581	571	578	573
P-ETR (mm)	1088	1208	940	1079	849
P-ETP (mm)	1000	1135	862	999	766
V écoulé (m <sup>3</sup> )	50.10 <sup>6</sup>	69.10 <sup>6</sup>	44.10 <sup>6</sup>	54.10 <sup>6</sup>	44.10 <sup>6</sup>
(P-ETR) Superficie (km <sup>2</sup> ) (P-ETP)	$\frac{46}{50}$	$\frac{57}{61}$	$\frac{48}{51}$	$\frac{50}{54}$	$\frac{52}{57}$

Tableau 11 - Calcul de la superficie du bassin de la Grotte

D'après ces résultats, nous pouvons supposer que ce bassin couvrirait une superficie d'environ 50 Km<sup>2</sup>.

3). RECHERCHE DE LA SUPERFICIE DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA SOURCE CAPTEE DU FER A CHEVAL.

Par déduction, nous pourrions attribuer une superficie de 99 - 49 = 50 km<sup>2</sup>. Cependant, nous la vérifierons comme précédemment en choisissant le débit comme étant la différence de celui de Mesnay et de la Grotte des Planches. Nous ne pouvons donc tenir compte que d'un cycle hydrologique (Tableau 12).

CAPTAGE	83 - 84
$\bar{Q}$ (m <sup>3</sup> /s)	1,5
P - ETR (mm)	940
P - ETP (mm)	862
V écoulé (m <sup>3</sup> /s)	47.10 <sup>6</sup>
Superficie (km <sup>2</sup> )	50 54

Tableau 12 - Calcul de la superficie du bassin de la source captée du Fer à Cheval.

Nous pouvons donc considérer que la superficie de ce bassin s'étendrait sur environ 49 à 50 Km<sup>2</sup>.

Les superficies des bassins d'alimentation de chaque source, ainsi définis, supposeraient leur juxtaposition. Or nous avons vu qu'ils s'emboîtent. Nous pouvons donc envisager que la partie commune prédomine en surface et les bassins spécifiques à chaque source ont une surface équivalente.

#### V - PROSPECTION ISOTOPIQUE

Quelques dosages isotopiques du Tritium et de l'Oxygène 18, réalisés en 1979 par B. BLAVOUX, A. BURGER, P. CHAUVE et J. MUDRY, ont tenté de définir l'origine et le temps de séjour, dans le karst, des eaux qui alimentent certains cours d'eau dont la Cuisance.

L'<sup>18</sup>O tend à déterminer l'origine des eaux. D'après la carte des teneurs en <sup>18</sup>O (Fig. 18), il ressort que la Glantine, la Cuisance et d'autres sources montrent des valeurs voisines. On peut ainsi supposer que leurs zones d'alimentation se situeraient à une même altitude.

Comparer les teneurs en Tritium d'une eau souterraine à celles de la pluie, permet de donner un ordre de grandeur du temps de séjour des eaux dans un milieu souterrain. D'après les résultats obtenus (Fig. 19), il semblerait que les eaux des rivières bordant le plateau lédonien notamment la Cuisance, la Glantine et la Seille, auraient un temps de séjour relativement long. Il apparaît par ailleurs que celui des eaux de la Cuisance est supérieur à celui de la Glantine, et que le temps de séjour des molécules d'eau est :

- < 1 an pour 10%
- < 2 ans pour 19%
- > 7 ans pour 50%

Les différentes valeurs de Tritium mesurées lors d'un étiage sembleraient dues à des variations d'altitudes des résurgences. D'après le tableau 13, les plus fortes teneurs sont constatées dans la Glantine et les plus faibles dans la Cuisance, or l'altitude de la source de cette dernière est plus élevée que la précédente. Ceci semble valable pour l'ensemble de ces cours d'eau. Plus au Nord, le système, certainement différent ou plus complexe, ne montre pas la même régularité (Loue, Lison, etc ...).

Rivière	Altitude	T.
Glantine	450	282
Seille	385	217
Cuisance	350	188

Tableau 13 - Tritium des sources karstiques du Jura

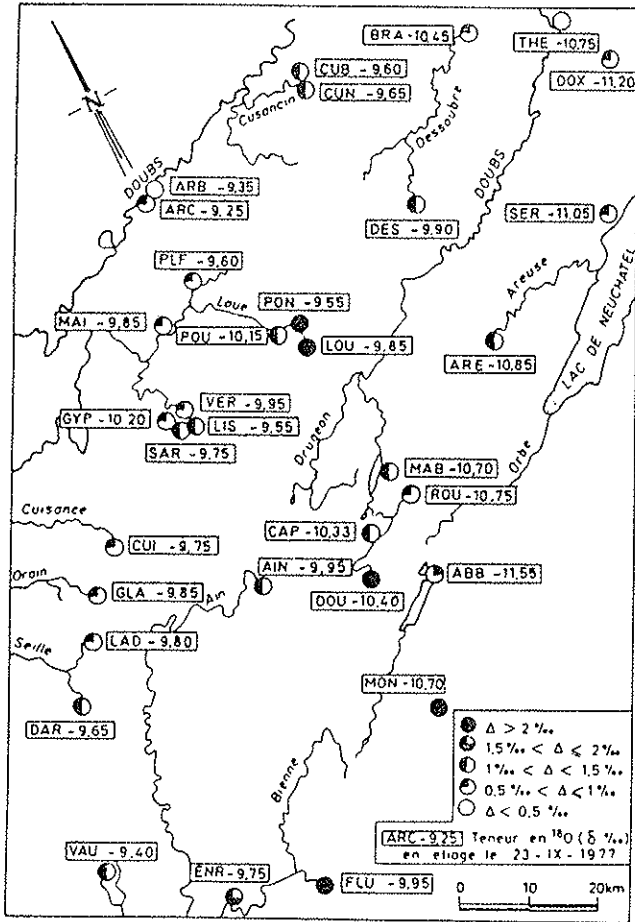


FIG. 18 - Carte des teneurs en  $^{18}\text{O}$  lors de l'étiage et amplitude des variations ( $\Delta$ ) entre crue de fonte des neiges et étiage de septembre.

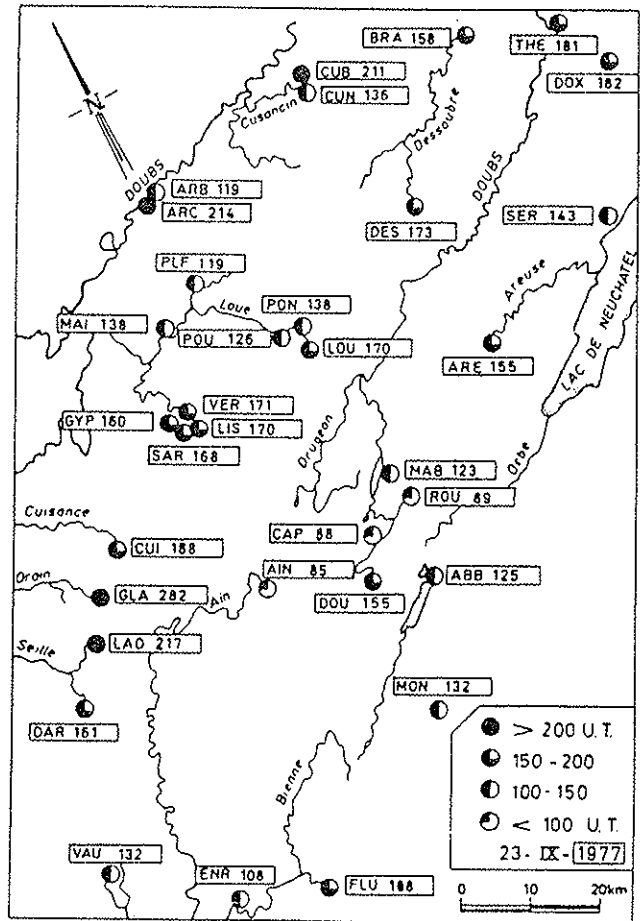


FIG. 19 - Carte des teneurs en tritium lors de l'étiage.

d'après B. BLAVOUX - A. BURGER - P. CHAUVE - J. MUDRY (1979)

### . Conclusion du deuxième chapitre

La superficie d'environ  $100 \text{ km}^2$  du bassin d'alimentation des sources de la Cuisance, délimité d'après la géologie et le résultat des traçages à la fluorescéine, est confirmé par le bilan hydrologique global. En effet, le volume infiltré représente 90 à 105% du volume écoulé, selon que l'on tienne compte de l'évapotranspiration potentielle ou réelle ainsi que de l'apport d'eaux usées.

Les résultats de ce bilan hydrologique laissent supposer que les sous-bassins qui alimentent chaque source ont une superficie et un volume semblables, bien qu'ils soient imbriqués l'un dans l'autre.

L'ensemble du bassin bien arrosé ( $\approx 1600 \text{ mm/an}$ ), peu enneigé, avec des températures moyennes de  $8^\circ\text{C}$  présente un déficit hydrique de faible importance et de courte durée, ce dernier laisse présager une facilité à la lixiviation des éléments d'Octobre à Juillet et plus particulièrement en automne et en fin de printemps en raison de fortes précipitations qui correspondent également à des périodes propices aux épandages agricoles.

## SECONDE PARTIE

### ACQUISITION DU CHIMISME DES EAUX KARSTIQUES

---

Chapitre IV - Mécanismes d'acquisition  
du chimisme des eaux et  
apports extérieurs sur  
le bassin d'alimentation  
de la Cuisance

Chapitre V - Composition et évolution  
chimiques des eaux de la  
Cuisance à la Grotte  
des Planches

Chapitre VI - Comparaison du chimisme  
des eaux issues des deux  
compartiments karstiques

Conclusion de la seconde partie



### CHAPITRE III - FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

Pour cette étude, nous avons choisi le cycle hydrologique 1983-1984. Les débits, enregistrés au Vernois (Mesnay), à la Grotte des Planches et déduits au captage du Fer à Cheval (Fig. 21), montrent qu'en moyenne les pointes de crues à la Grotte sont supérieures à celles du Captage. L'irrégularité des crues domine et aucune hiérarchisation n'apparaît dans le temps. L'étude de la décrue et du tarissement; des débits classés, ainsi que la comparaison d'épisodes particuliers conduit à une meilleure compréhension du système karstique de la Cuisance, système préalablement défini d'après les récents travaux de A. BURGER (1983).

#### I - ETUDE DE DECRUE ET TARISSEMENT

##### 1) Rappel de la schématisation d'un système karstique

Nous reprendrons ici le schéma de A. BURGER (1983) en considérant les écoulements des trois réservoirs : lent ; rapide et épikarstique (fig. 20).

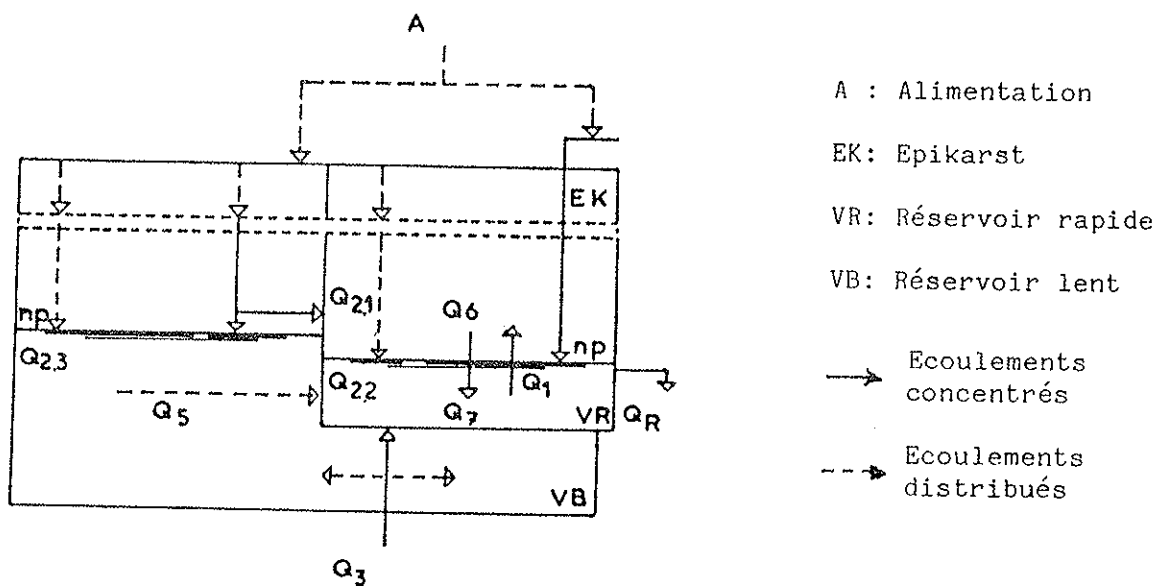


Figure 20 : Schématisation d'un système karstique (d'après A. BURGER, 1983)

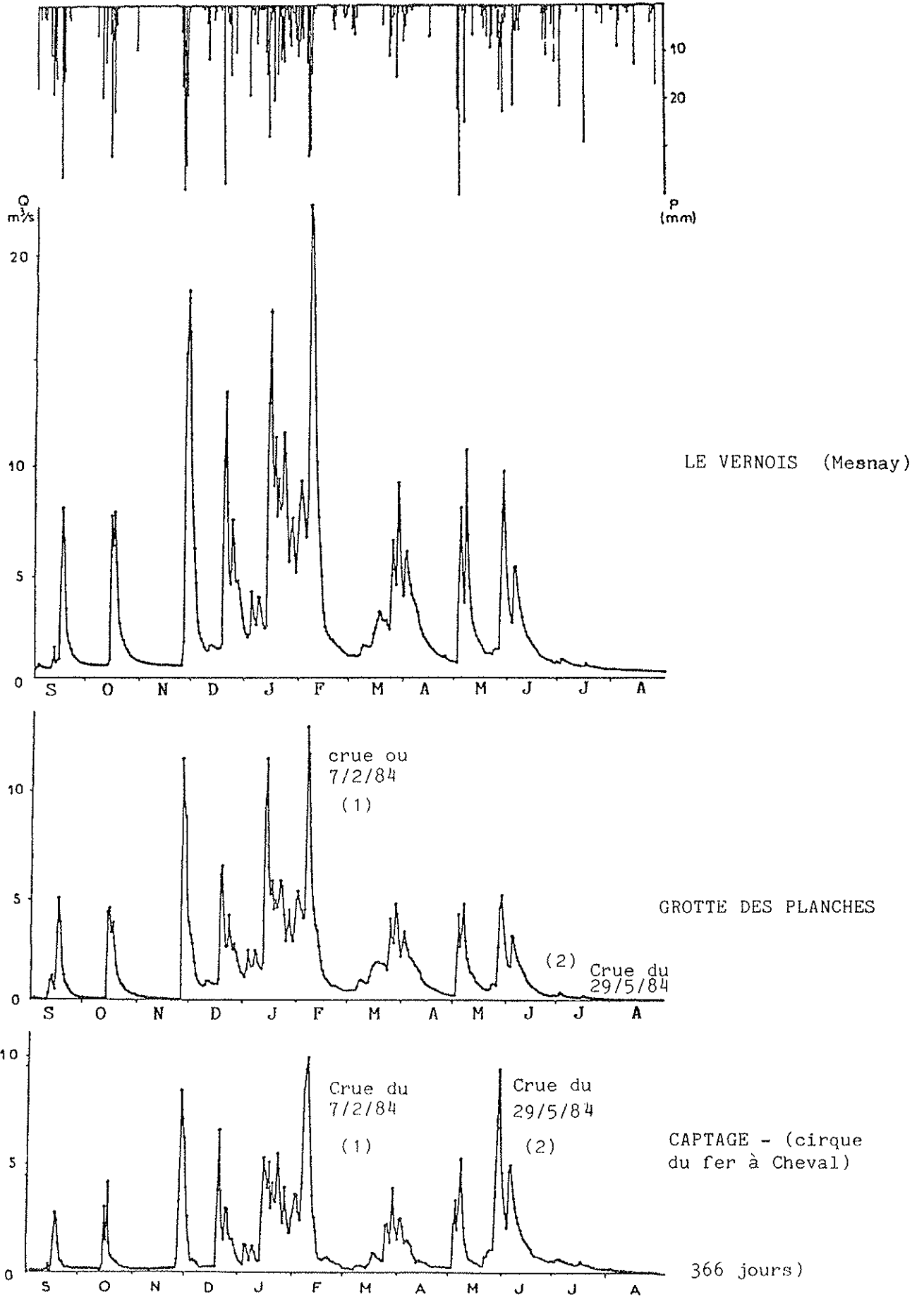


Fig.21 - Précipitations- Débits (Le Vernois - le Captage - La Grotte)  
Cycle Septembre 83 à Aout 1984

avec :	$Q_R C_R T_R$	:	débit, à l'exutoire
ALIMENTATION	$\left\{ \begin{array}{l} Q_1 \\ Q_2 \end{array} \right.$	:	écoulement concentré en surface
DU RESERVOIR		:	écoulement du réservoir lent
RAPIDE			2-1 : concentré dans la zone non saturée 2-2 : distribué dans la zone non saturée 5 : distribué dans la zone saturée 7-6 : échanges capillaires
ALIMENTATION	$\left\{ \begin{array}{l} Q_{2-3} \\ Q_3 C_3 T_3 \end{array} \right.$	:	infiltration distribuée
DU RESERVOIR		:	par des systèmes karstiques à potentiel hydraulique plus élevé
LENT	$Q_4$	:	par irrigation à partir de chenaux

## 2). DECRUE ET TARISSEMENT : RAPPEL DE LA "METHODE MANGIN"

Diverses méthodes existent pour décomposer un hydrogramme. Celle de A. MANGIN (1974), bien adaptée aux rivières à régime karstique, a été appliquée à plusieurs crues et, simultanément aux deux sources de la Cuisance.

Un hydrogramme de crue se compose d'une montée de crue, d'une décrue et d'un tarissement. Les deux derniers épisodes font l'objet d'une décomposition graphique qui apporte des informations sur les eaux des réservoirs mis en jeu : à écoulement rapide, à écoulement lent, épikarstique et ruisselé. La méthode décrite pour les eaux du système à écoulement lent s'applique à tous les autres.

L'équation générale d'une crue s'écrit :

$$Q = Q_{R_0} e^{-\alpha t} + q_0 \frac{1-\mu' t}{1+\varepsilon t}$$

elle résulte de deux fonctions significatives : la réserve  $\phi(t)$  et l'infiltration  $\psi(t)$ . La première, appelée fonction de tarissement, proposée par E. MAILLET (1905) est de la forme :

$$\phi(t) = Q_{R_0} e^{-\alpha t}$$

La seconde proposée par A. MANGIN (1974), concerne la décrue, et s'écrit :

$$\psi(t) = q_0 \frac{1-\mu' t}{1+\varepsilon t}$$

avec :  $Q$  = débit à l'exutoire ;  $Q_{R_t}$  = débit des réservoirs

$q_t$  = débit des écoulements épikarstiques et ruisselés =  $Q - Q_{R_t}$

$t$  = temps ;  $\alpha$  = coefficient de tarissement =  $\frac{\log Q_{R_{t_1}} - \log Q_{R_{t_2}}}{0,4343(t_2 - t_1)}$

$\mu'$  = coefficient de durée =  $\frac{1}{t_i}$  ;  $\varepsilon$  = coefficient d'hétérogénéité de l'écoulement =  $\frac{q_0 - q_t}{q_t \cdot t} - \frac{\mu' q_0}{q_t}$

Ces paramètres vont nous permettre de déterminer et d'analyser plusieurs crues avec les volumes d'eau mis en circulations.

Volume dynamique initial

$$V_{di} = \frac{Q_{Ro}}{\alpha} C$$

Volume écoulé à l'instant t

$$V_e = \frac{Q_{Ro}}{\alpha} C(1 - e^{-\alpha t})$$

C = constante journalière

Courbe de décrue

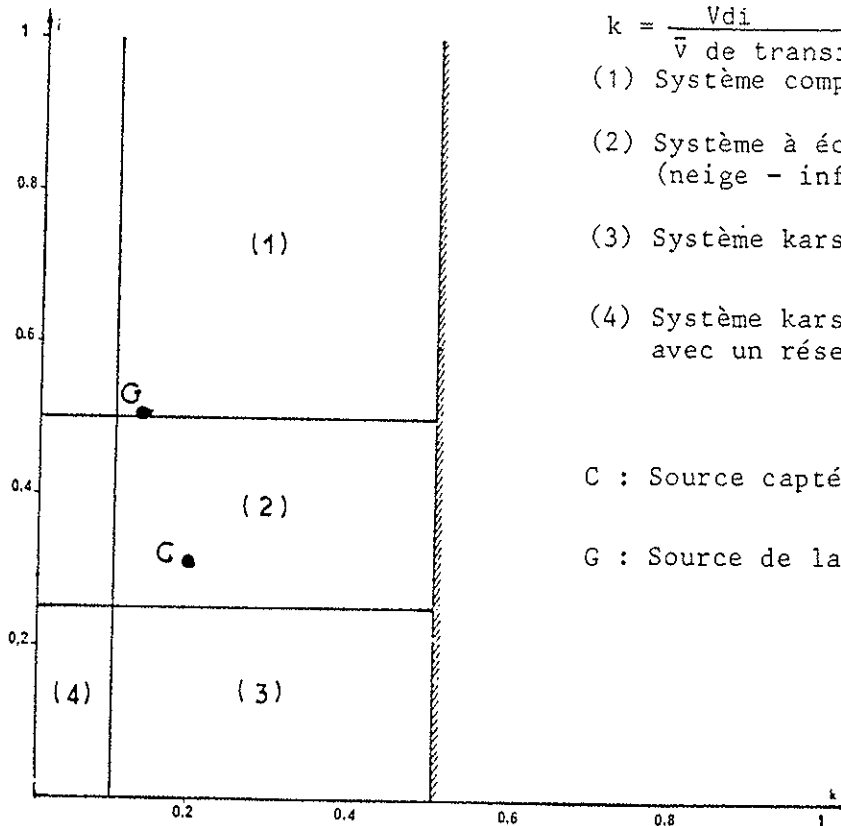
$$Y = \frac{1 - \mu' t}{1 + \epsilon t}$$

D'après les valeurs des deux coefficients i et k définis ci-dessous, A. MANGIN (1974) dresse une classification des galeries karstiques. Elle est résumée dans la figure 22 .

$$i = \frac{1 - \mu' t}{1 + \epsilon t} \quad \text{avec } t = 2$$

$$k = \frac{V_{di}}{\bar{v} \text{ de transit}} = \frac{\text{Volume dynamique}}{\text{Volume moyen de transit}}$$

- (1) Système complexe
- (2) Système à écoulement retardé (neige - infiltration lente)
- (3) Système karstique développé
- (4) Système karstique développé avec un réseau spéléologique



C : Source captée du Fer à Cheval

G : Source de la Grotte des Planches

Figure 22 : Essai de classification des systèmes karstiques

i rend compte de la forme de la décrue

k l'importance du karst noyé (d'après A. MANGIN, 1974)

### 3). APPLICATION A LA SOURCE DE LA GROTTTE

La difficulté d'obtenir un tarissement non perturbé par de nouveaux épisodes pluvieux, nous a conduits à considérer deux crues au cours du cycle hydrologique 1983-1984 ; la plus importante (7 Février 1984), et la dernière avant l'étiage le plus long (29 Mai 1984). La décomposition de ces deux

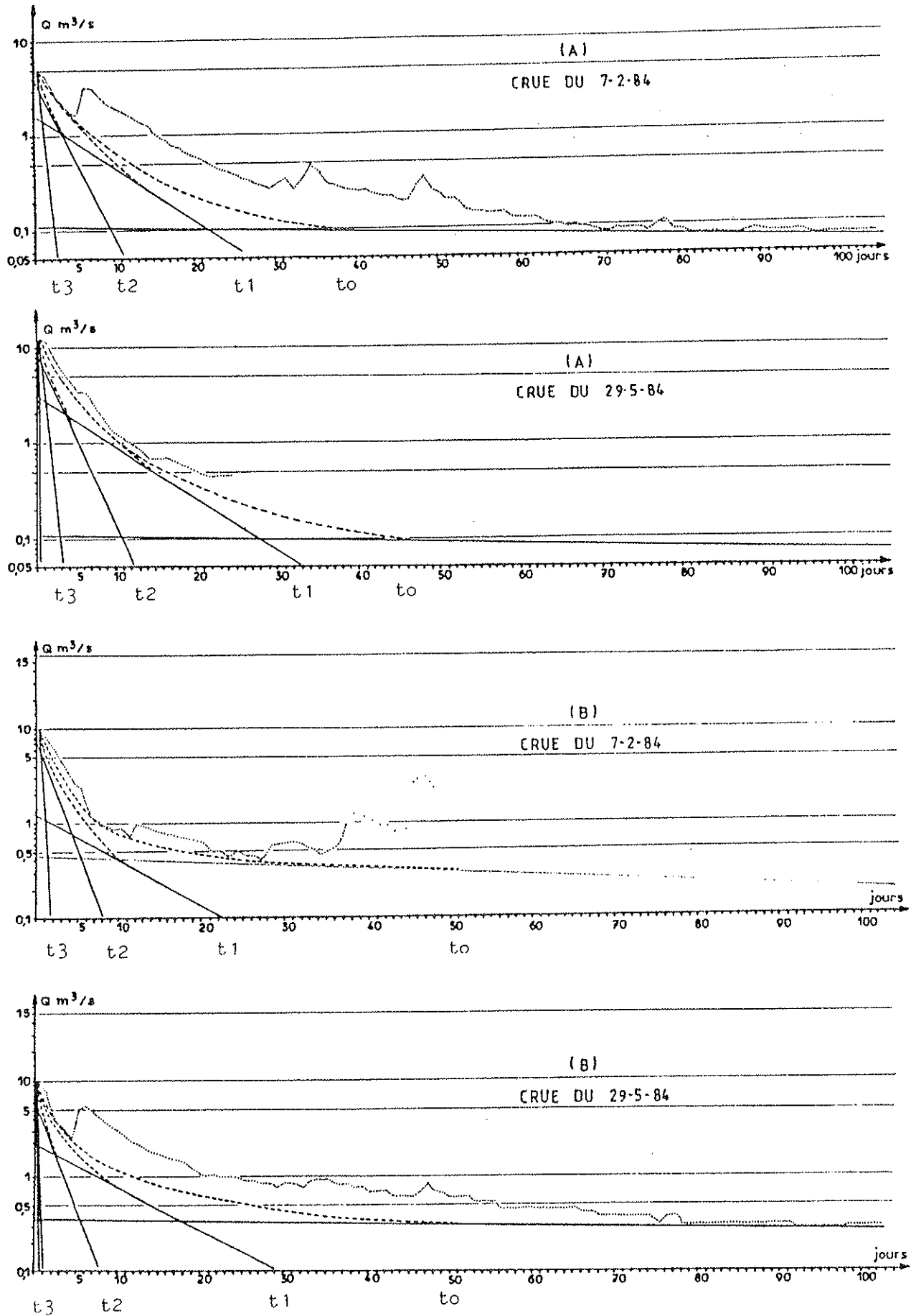


Fig. 23 - Courbes de tarissement -

A - à la source de la Grotte des Planches  
B - à la source captée du Fer à Cheval

hydrogrammes de décrue, reportés en échelle semi-logarithmique à partir du sommet de crue (Fig.23A), nous a permis, grâce à la méthode précédemment décrite, d'obtenir les résultats résumés dans le tableau 14 pour le réservoir principal. Le très faible coefficient de tarissement  $\alpha$  laisse imaginer une vidange très lente de ce réservoir dont le volume mis en circulation est assez important. Le coefficient  $\Sigma$  a été calculé pour des valeurs de  $t$  et  $q^*$  correspondant à la partie la plus rectiligne des courbes -  $Z = \frac{t_i - t}{q^*}$  (Fig.106, Annexe I). Les courbes de décrue  $Y$  (Fig. 24), très proches l'une de l'autre et à forte concavité, montrent que la vitesse de décrue est assez rapide.

RESERVOIR LENT	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>Ro</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>oTar.</sub> (m <sup>3</sup> /s)	$\alpha$	$\eta'$	c	i	k	Vd <sub>j</sub> (m <sup>3</sup> )	TEMPS DE TARISSEMENT (jours)	q <sub>o</sub> (m <sup>3</sup> /s)
CRUE DU 7.2.84	13	0.11	0.09	0.0015	0.02	0.55	0.46	0.14	6,4.10 <sup>6</sup>	38	12.89
CRUE DU 29.5.84	5	0.11	0.091	0.0015	0.025	0.37	0.54	0.14	6,4.10 <sup>6</sup>	46	4.89

Tableau 14 - Caractéristiques de l'aquifère principal à la Grotte

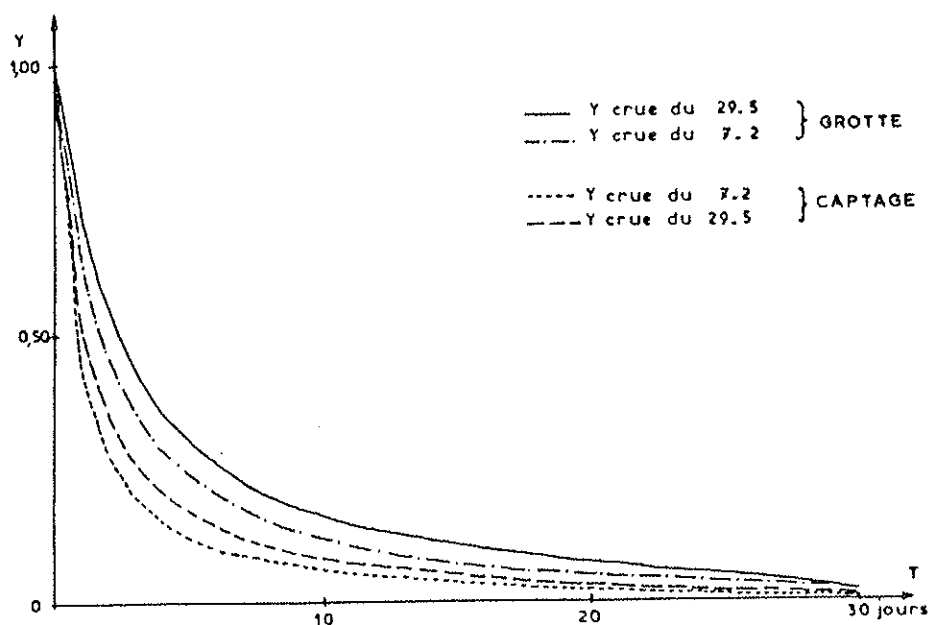


Figure 24 : Courbes de décrue à la Grotte des Planches et au Captage du Fer à Cheval

Les coefficients  $i$  et  $k$  moyens reportés sur la figure 22 ( $i = 0,5$  ;  $k = 0,14$ ), nous permettent de situer le système karstique de la Grotte des Planches dans la classification proposée par A. MANGIN (1974). Ce système appartient au domaine complexe bien qu'étant en limite du domaine à écoulement retardé, probablement par la présence d'argiles à chailles.

La soustraction successive des asymptotes aux courbes de décrue suit la même loi (Fig.23A ) et nous permet d'obtenir les temps de tarissement ainsi qu'une approche des volumes mis en circulation pour les différents réservoirs : lent, rapide, épikarst, ruisselé (Tabl. 15). Le parallélisme des asymptotes de chaque crue, nous autorise à penser que le lissage des courbes de décrue et l'orientation des asymptotes peuvent être considérés comme plausibles. Le ruissellement, peu important pour l'ensemble du bassin, est difficilement interprétable graphiquement, ce qui ne nous a pas permis de calculer les volumes mis en circulation.

	RESERVOIR LENT (NOYE)	RESERVOIR RAPIDE (FISSURE)	RESERVOIR EPIKARSTIQUE	RUISSellement
$\alpha$	0.0015 / 0.0015	0.13 / 0.13	0.44 / 0.38	2.84 / 1.89
$V_{d_i}$ (m <sup>3</sup> )	6,4.10 <sup>6</sup> / 6,4.10 <sup>6</sup>	2,1.10 <sup>6</sup> / 1,1.10 <sup>6</sup>	1,5.10 <sup>6</sup> / 8.10 <sup>6</sup>	
TARISSEMENT (jour)	38 / 46	15 / 14	4 / 3	<1/2 / <1/2

CRUE DU 7.2.84	CRUE DU 29.5.84
----------------	-----------------

Tableau 15 - Caractéristiques des aquifères du karst de la Grotte des Planches.

En prenant  $\mu'$  et  $\epsilon$  moyens, nous avons calculé le temps nécessaire à la diminution d'une partie du débit  $q_0$  :

- 1 à 2 jours pour une diminution de 50%
- 5 jours pour une diminution de 75%
- 21 jours pour une diminution de 95 %
- 36 jours pour une diminution de 99%

#### 4). APPLICATION A LA SOURCE CAPTEE DU FER A CHEVAL

Les débits de la source captée ont été calculés par différence entre les débits enregistrés au Vernois et à la Grotte des Planches. Afin de comparer les deux systèmes karstiques, la décomposition des hydrogrammes de décrue porte également sur les crues du 7 Février et du 29 Mai 1984 (Fig.23B ). Le coefficient de tarissement  $\alpha$  de l'aquifère principal bien que faible l'est cependant un peu moins que celui de la Grotte (Tabl. 16) par contre les volumes mis en circulation le sont davantage. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que nous raisonnons sur des débits calculés et non mesurés et qu'il y a par conséquent une marge d'erreur non négligeable.

Le coefficient  $\epsilon$  a été calculé pour des valeurs de  $t$  et  $q^*$  choisis dans la partie la plus rectiligne de la courbe

$$-Z = \frac{t_i - t}{q^*} \quad (\text{Fig.107 Annexe I}).$$

Les courbes de décrue Y (Fig.24 ) montrent une décrue un peu plus rapide au captage qu'à la Grotte, caractérisée par une concavité des courbes plus accentuée.

RESERVOIR LENT	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>RO</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>O</sub> (m <sup>3</sup> /s)	q <sub>O</sub> (m <sup>3</sup> /s)	α	η'	ε	T	R	Vd <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /s)	TEMPS DE TARISSEMENT (jour)
CRUE DU 7.2.84	10.47	0.36	0.32	10.12	0.003	0.02	1.23	0.28	0.2	10.10 <sup>6</sup>	50
CRUE DU 29.5.84	9.91	0.36	0.32	9.55	0.003	0.02	0.86	0.35	0.2	10.10 <sup>6</sup>	50

Tableau 16 - Caractéristiques de l'aquifère principal au Captage

Les coefficients  $i$  et  $k$  ( $i = 0,31$  ;  $k = 0,2$ ), calculés à partir de  $\mu'$  et  $\epsilon$  moyens, nous permettent de situer le domaine karstique du captage du Fer à Cheval dans la classification de A. MANGIN (1974) (Fig. 22). Il se situerait dans un domaine à écoulement retardé mais beaucoup moins que celui de la Grotte.

L'analyse des courbes de décrue (Fig. 24) et de la classification (Fig. 22), met en évidence la présence de deux karsts quelque peu différents. L'un (Grotte) étant plus complexe et à écoulement retardé plus important que l'autre (Captage), ce qui correspond aux descriptions de chaque système faites dans le chapitre précédent.

La soustraction successive des asymptotes aux courbes de décrue (Fig. 23B) nous a permis de calculer les temps de tarissement de chaque réservoir ainsi que les volumes mis en circulation à l'exception du ruissellement peu représentatif à l'échelle du bassin d'alimentation et graphiquement difficilement calculable. (tableau 17).

	RESERVOIR LENT	RESERVOIR RAPIDE	RESERVOIR EPIKARSTIQUE
α	0.003 / 0.003	0.11 / 0.105	0.52 / 0.53
Vd <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	10.10 <sup>6</sup> / 10.10 <sup>6</sup>	9.10 <sup>5</sup> / 1,7.10 <sup>6</sup>	9.10 <sup>5</sup> / 8.10 <sup>5</sup>
TARISSEMENT (jours)	50 / 50	10 / 9	2 / 2

CRUE DU 7.2.84 / CRUE DU 29.5.84

Tableau 17 - Caractéristiques des aquifères du karst du Fer à Cheval

Le temps nécessaire à la diminution d'une partie du débit  $q_0$  a été calculé à partir des coefficients  $\epsilon$  et  $\mu'$  moyens :

- 22 h pour une diminution de 50%
- 2 jours 16 h pour une diminution de 75%
- 13 jours pour une diminution de 95%
- 32 jours pour une diminution de 99%



## 5). CLASSIFICATION DU SYSTEME KARSTIQUE ETUDIE

Les deux sources de la Cuisance sont alimentées par deux sous-bassins imbriqués, dont l'ensemble peut être assorti à un système karstique au sens défini par A. MANGIN (1974). L'alimentation se fait uniquement par les précipitations et les exutoires sont les deux sources de la Grotte et du Captage du Fer à Cheval.

## II - ETUDE DES DEBITS CLASSES

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement du système karstique de la Cuisance, nous avons établi une courbe cumulative des débits classés pour chaque source, caractérisée par la dispersion des débits en fonction de leurs fréquences. Puis selon la méthode de A. MANGIN (1974), nous avons reporté les fréquences cumulées en ordonnées (en échelle de probabilité) et les classes de débits en abscisse (en échelle arithmétique ou logarithmique). Nous obtenons ainsi des droites dont les changements de pente indiquent la présence de trop-pleins ou l'influence de la réserve ainsi que la vitesse croissante ou décroissante de chaque classe de débits.

### 1). APPLICATION A LA GROTTTE DES PLANCHES

La courbe des débits classés, tracée pour le cycle hydrologique 1983-1984 (fig. 25) nous permet d'obtenir les valeurs des débits caractéristiques (tableau 18). Les polygones de fréquences montre un seul mode.

	DEBIT SPECIFIQUE	DEBIT MOYEN (m <sup>3</sup> /s)	DEBIT CARACTERISTIQUE MOYEN (m <sup>3</sup> /s)	Q CARACTERISTIQUE DE CRUE	Q CARACTERISTIQUE D'ETIAGE
CYCLE 83-84	29 l/s/km <sup>2</sup>	1,44	1,02	8,4	0,11

Tableau 18 : Débits caractéristiques à la Grotte des Planches

La comparaison des courbes de fréquences cumulées des débits classés (fig. 26) du cycle 83-84 et des cycles 78-79, 79-80, 83-84 (coordonnées gauss-arithmétiques) met en évidence :

\* Des fréquences cumulées plus élevées pour le cycle 83-84 que pour les autres, en raison d'une sous-estimation des débits d'étiage enregistrés sur le limnigraphe installé antérieurement à 1980 donc pour l'ensemble des trois cycles.

\* trois ruptures de pente avec une augmentation de la vitesse (croissante, ou décroissante) , jusqu'à un débit de 11,25 m<sup>3</sup>/s. La confirmation ou l'infirmité de la présence de trop-pleins peut être apportée par la même courbe reportée en ordonnées gauss-logarithmique (Fig. 27). Celle-ci fait ressortir deux droites principales de pente différente, sécantes, pour un débit de 2 m<sup>3</sup>/s. Comme le montrent de nombreux auteurs dont A. MANGIN (1974), C. PASQUIER (1975), G. TISSOT et P. TRESSE (1978), l'observation sur le terrain peut seule rendre compte d'anomalies dans les écoulements. En ce qui concerne la source de la Grotte des Planches un trop-plein (visible dans la Grotte aménagée) entre en action dès la fin des étiages et correspondrait approximativement au débit de 2m<sup>3</sup>/s et au début des écou-

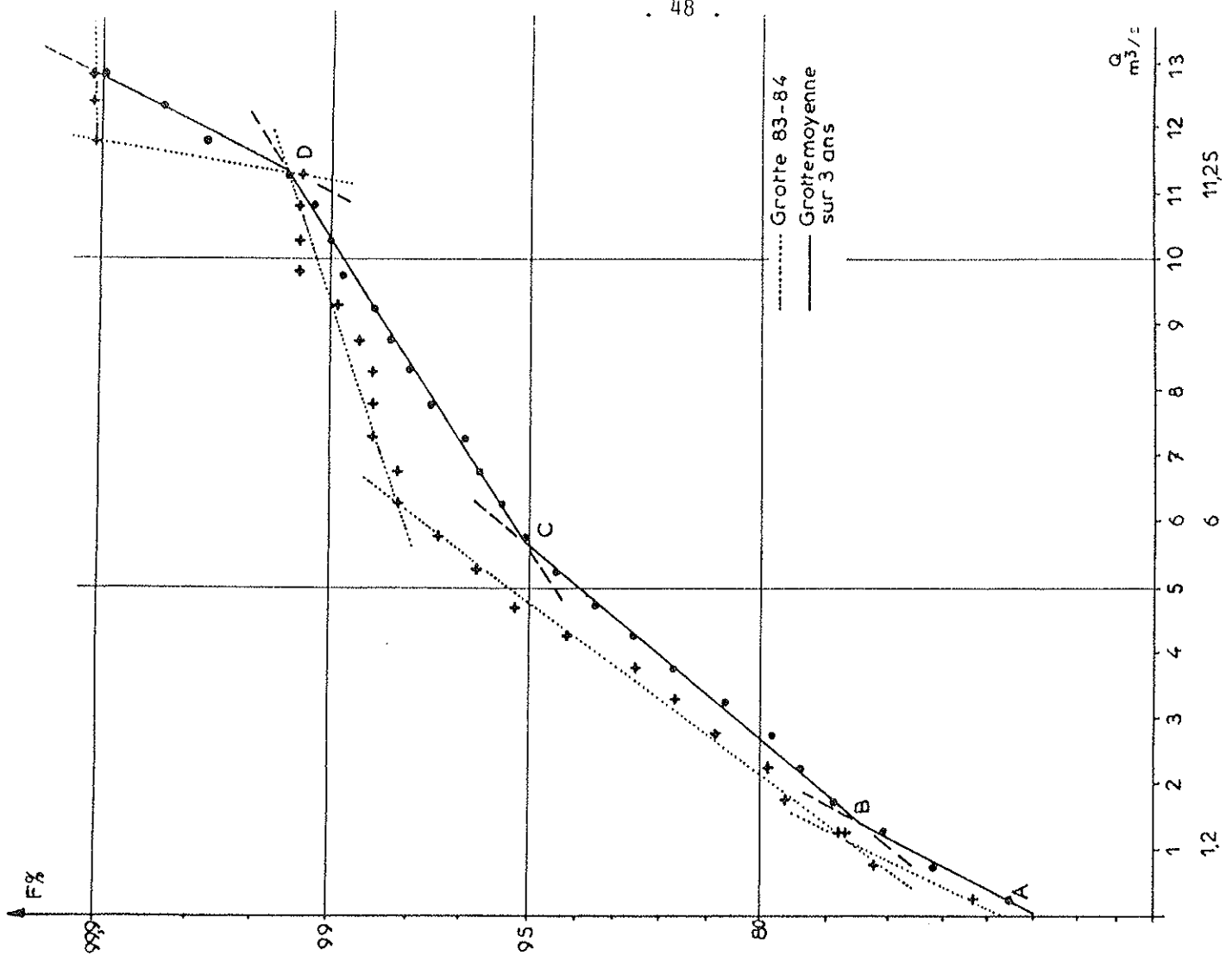


Fig.26 - Courbes des fréquences cumulées des débits classés à la grotte des Planches (cycle 83-84).

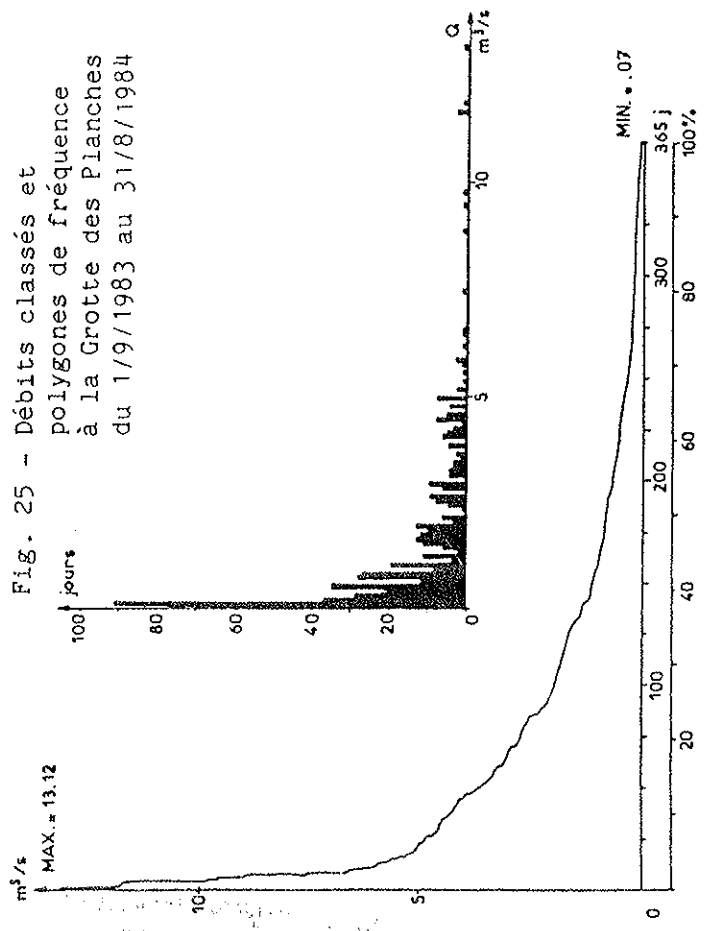


Fig. 25 - Débits classés et polygones de fréquence à la Grotte des Planches du 1/9/1983 au 31/8/1984

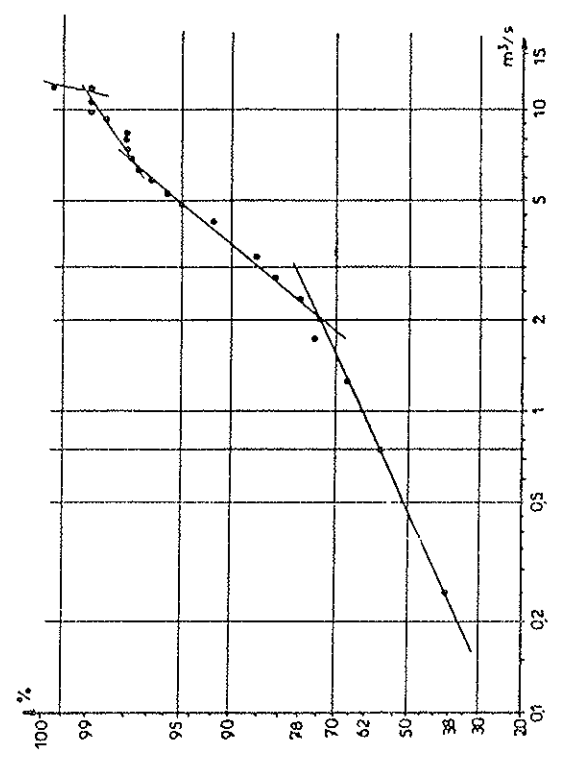


Fig. 27 - Courbe des fréquences cumulées à la Grotte des Planches (cycle 84-85)

lements non matriciels. Quant aux autres ruptures de pentes, pour des débits de 6,5 et 11,5 m<sup>3</sup>/s, elles correspondent aux seuils établis sur la première courbe probablement à l'influence de réserves, ou de trop-pleins, dont il est difficile de donner une préférence en raison du petit nombre de cycles étudiés. Une étude plus détaillée et sur une période plus longue serait nécessaire afin de préciser le fonctionnement de ce karst.

## 2). APPLICATION AU CAPTAGE DU FER A CHEVAL

Les débits de la source du captage du Fer à Cheval, obtenus par différence entre les débits enregistrés au Vernois et à la Grotte des Planches, entraînent une certaine approximation quant aux interprétations qui suivront, puisque quelques sources pérennes, mais de très faible débit, interfèrent sur les résultats.

La courbe des débits classés tracée pour la période du 1er Septembre 1983 au 31 Août 1984 (Fig. 28) donne les débits spécifiques (Tableau 19). Le polygone de fréquence est unimodal avec de faibles débits plus nombreux et leur répartition moins régulière (histogramme très net en J pour la Grotte).

	QS	$\bar{Q}$	D C M	D C C	D C E
CYCLE 83-84	26 l/s/km <sup>2</sup>	1,29	1,3	12	0,6

Tableau 19 : Débits caractéristiques au Captage

La courbe des fréquences cumulées des débits classés en coordonnées gauusso-arithmétiques (Fig. 29) met en évidence quatre ruptures de pente alors que la même courbe reportée en coordonnées gauusso-logarithmiques ne donne plus que deux ruptures de pente dont l'une à 3 m<sup>3</sup>/s (fig. 30). Elles correspondent probablement à des trop-pleins dont l'un donne naissance à une source pérenne à quelques dizaines de mètres au Nord du Captage. L'influence des divers ruisseaux précédemment cités peuvent donner des changements de pente ou en dissimuler d'autres. C'est pourquoi nous ne tenterons pas de développer plus avant ces résultats. De plus la période étudiée est beaucoup trop brève pour généraliser ces résultats.

## III - ETUDE DE CRUES PARTICULIERES

Au cours des étiages 1983 et 1984, quelques précipitations orageuses, localisées à certains secteurs du bassin d'alimentation de la Cuisance, nous ont permis de suivre et de comparer les réponses obtenues à la source de la Grotte des Planches. Nous étudierons deux épisodes orageux : 19 Août 1983, 14 Août 1984

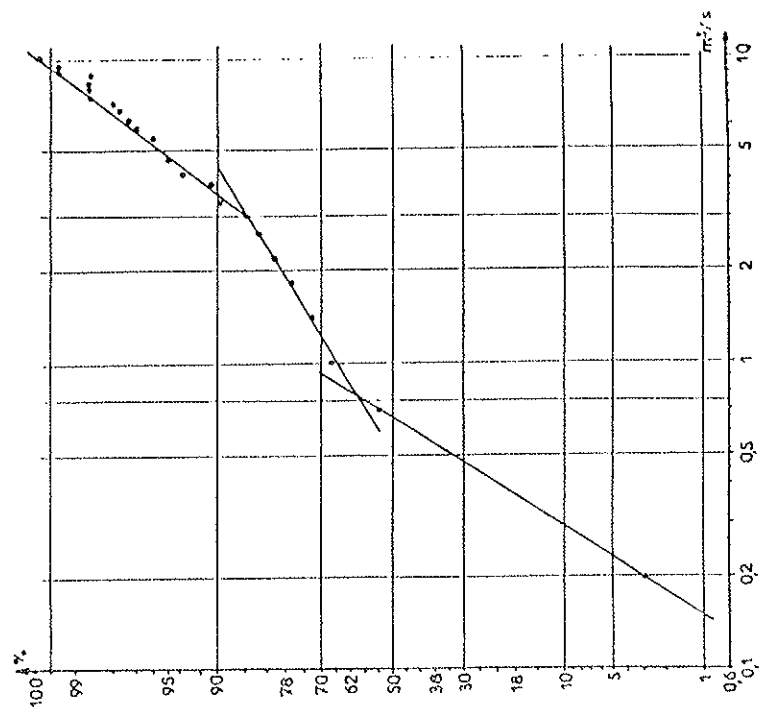
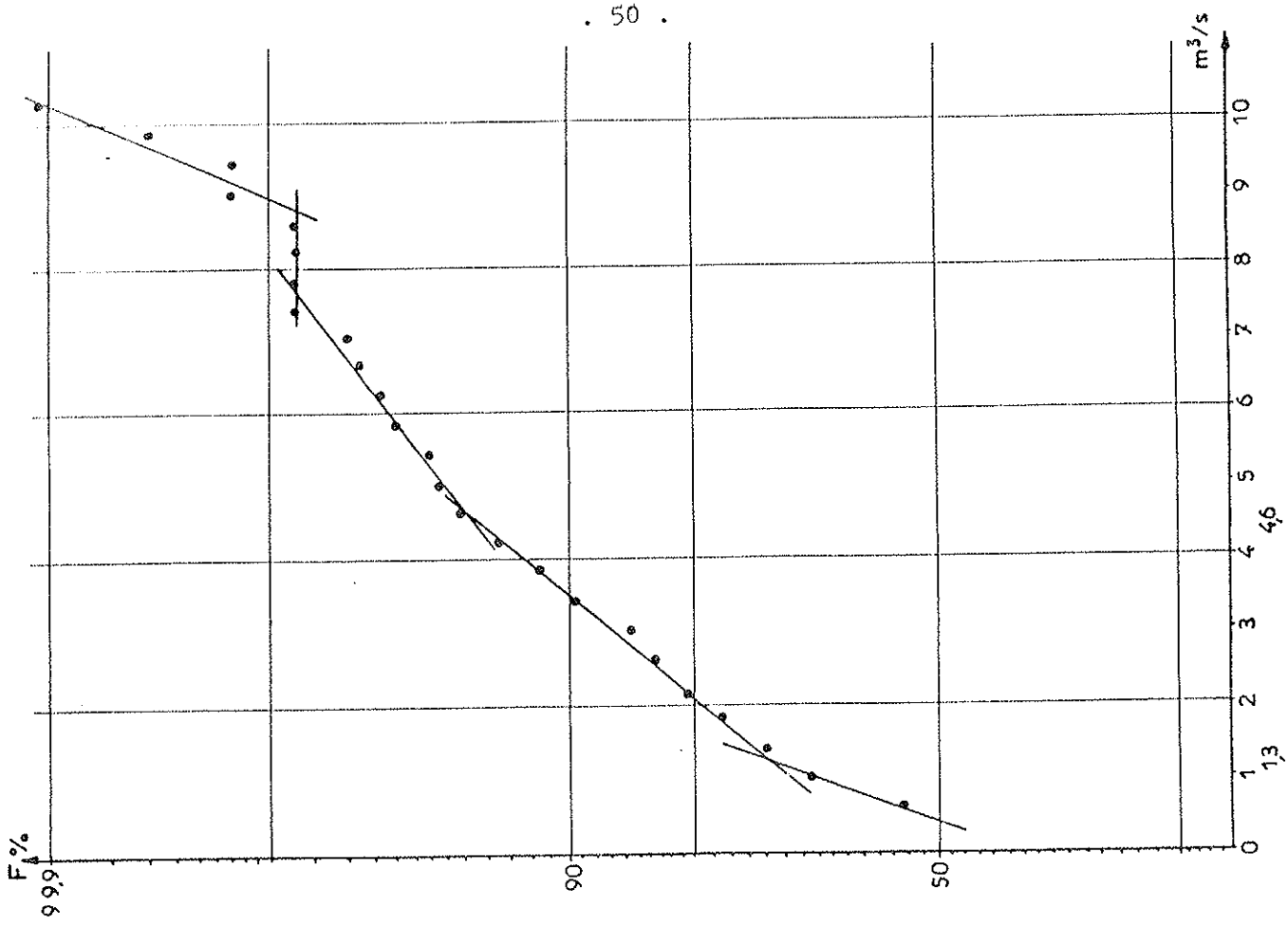
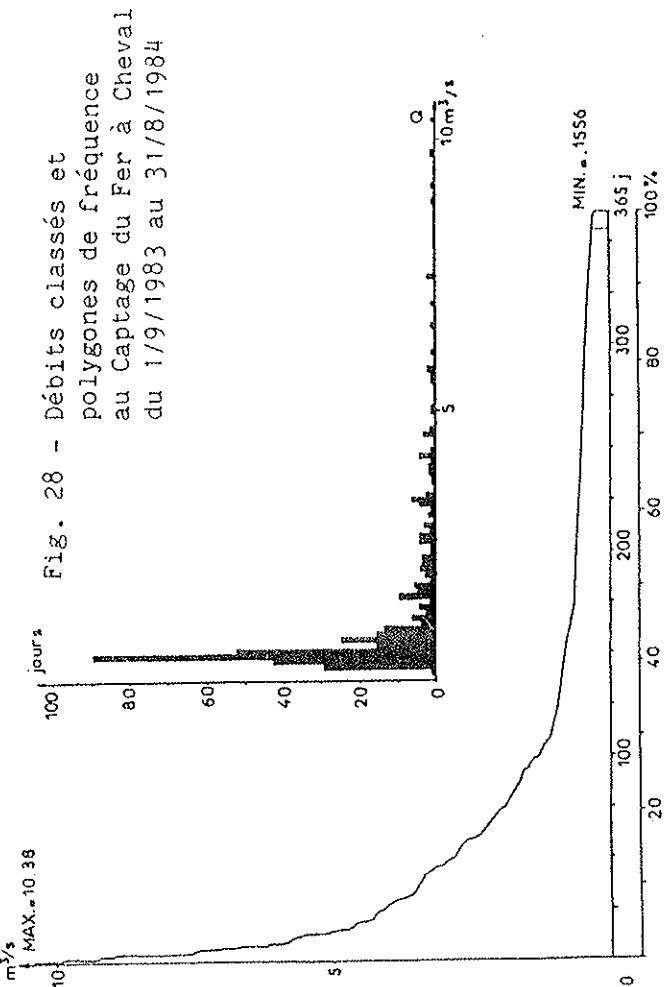


Fig. 29 - Courbe des fréquences cumulées des débits classés au captage cycle 83-84.

Fig. 30 - Courbe des fréquences cumulées (cycle 83-84)

1). ORAGE DU 19 AOUT 1983

Il se caractérise par de fortes précipitations à Besain et Molain (au Sud) et de faibles précipitations à La Chatelaine et Chilly sur Salins (au Nord). Le tableau 20 et la figure 31 résument cet épisode pluvio-orageux, ainsi que la réponse obtenue à la source. Le temps de réponse à la source est de 9 heures après la fin des précipitations.

19.8.83	HAUTEUR DE PRÉCIPITATION (mm)	INTENSITÉ MAXIMALE	INTENSITÉ MOYENNE
BESAIN	65,2	60	12
MOLAIN	54,0	40	10
LA CHATELAINE	16,0	2	4
CHILLY/SALINS	18,0	2	4

Tableau 20 - Caractéristiques de l'orage du 19.8.83

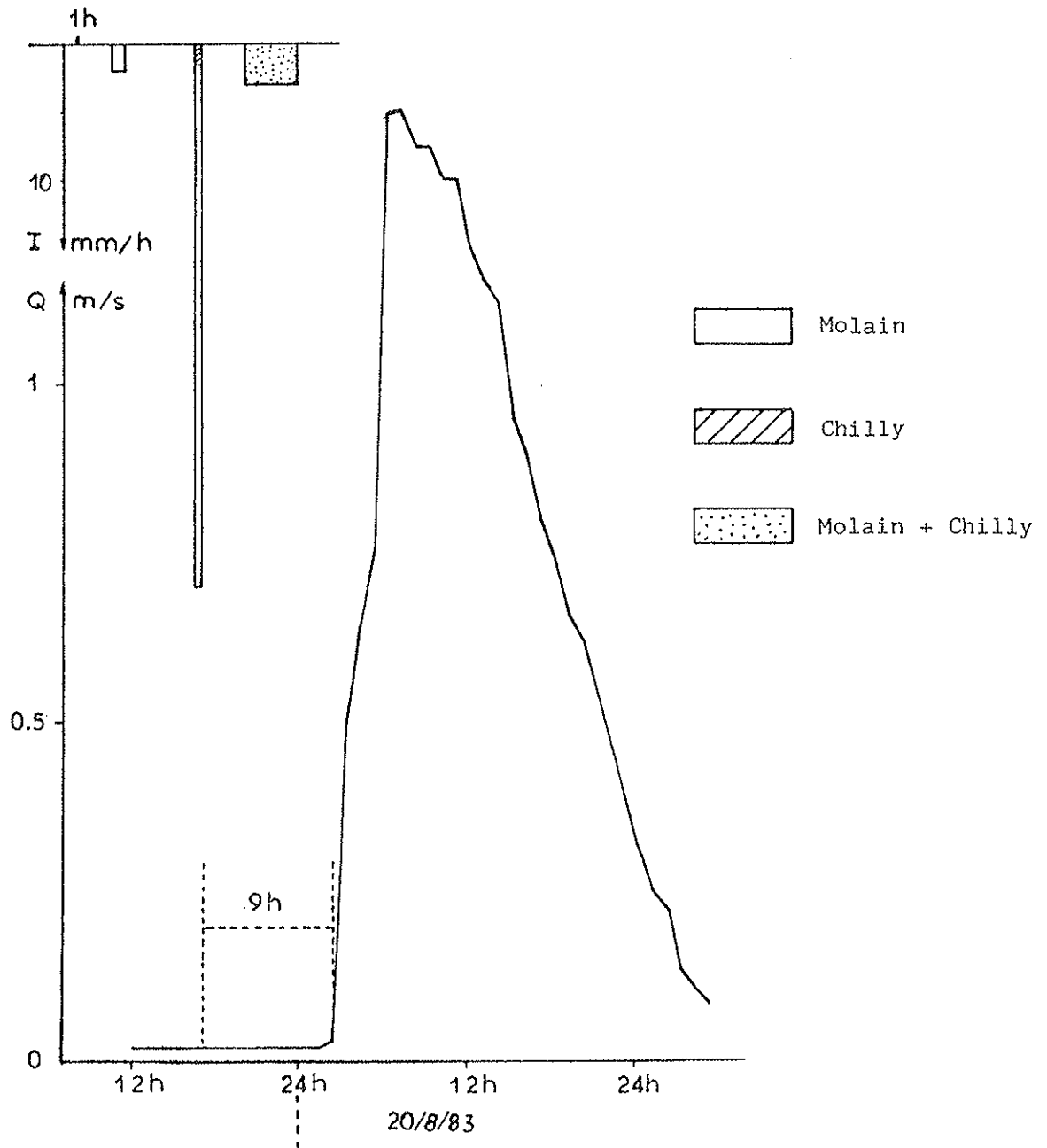


Figure 31 : Episode pluvio-orageux du 19.8.83 à la Grotte des Planches.

2). ORAGE DU 14 AOUT 1984

Ici la tendance est inverse. Les précipitations les plus intenses se localisent dans le secteur de Chilly (au Nord) alors qu'à Molain (au Sud) elles étaient peu importantes. Il ne faut cependant pas perdre de vue que ces précipitations se sont produites sur une superficie moins importante que précédemment. Néanmoins nous constatons (tableau 21 et figure 32) qu'une intensité maximale de 20 mm/h (40 précédemment) pour une durée d'une heure au lieu d'une demi-heure à Molain donne une réponse à l'exutoire fortement atténuée, avec un laps de temps de 6 heures entre la fin de la précipitation la plus intense et la montée de crue.

14/8/84	HAUTEUR DE PRECIPITATION (mm)	INTENSITE MAXIMALE	INTENSITE MOYENNE
BESAIN	2,6	1,5	0,9
MOLAIN	3,8	1,7	0,9
LA CHATELAINE	6,6	2,4	1,6
CHILLY/SALINS	36,6	20	7,3

Tableau 21 - Caractéristiques de l'orage du 14.8.84

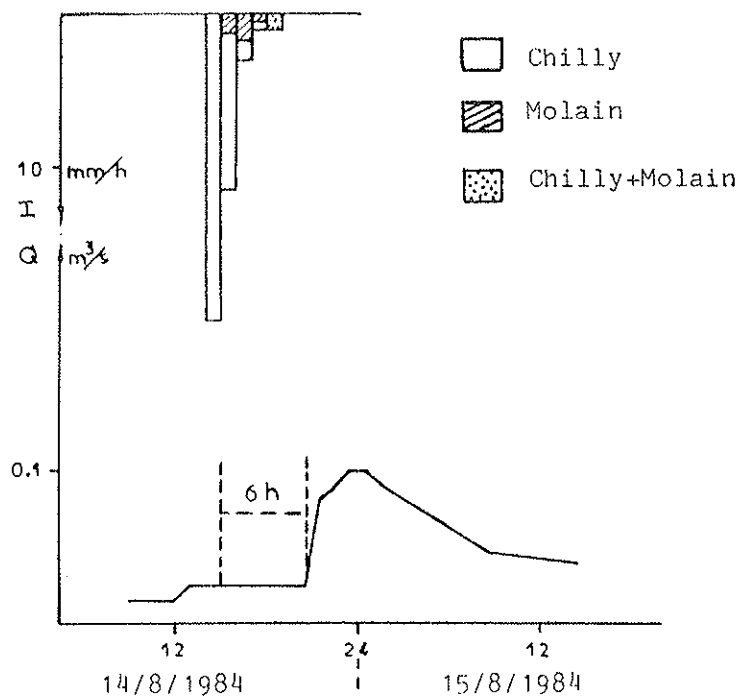


Figure 32 : Episode pluvio-orageux du 14.8.84 à la Grotte des Planches

Conclusion du troisième chapitre

L'étude hydrologique de ce karst montre la complexité générale du système par l'intermédiaire de la classification de A. MANGIN (1974) et des courbes de décrue. Il en ressort également une différence entre le Nord et le Sud du bassin, accompagnée d'un ruissellement logiquement inexistant dans les deux cas et des volumes d'eau mis en jeu importants. Pour des volumes d'eau précipités, équivalents au Nord et au Sud, la réponse à l'exutoire se produit avec un retard à l'écoulement et en quantité moindre dans le secteur de Chilly sur Salins. Ceci peut s'expliquer par la présence d'un système karstique à écoulement retardé et d'une couverture pédologique plus épaisse.

L'étude des débits classés met en évidence la présence de seuils apparemment plus nombreux dans le système karstique Nord de la Grotte des Planches que dans celui du Fer à Cheval au Sud.

## CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

### I - DELIMITATION ET STRUCTURE DU BASSIN KARSTIQUE DE LA CUISANCE

Le bassin d'alimentation des sources de la Cuisance est composé de bancs calcaires, tabulaires et karstifiés du Bajocien et du Bathonien, délimité par des traçages à la fluorescéine, la structure géologique et la morphologie. Il couvre une superficie d'environ 100 Km<sup>2</sup>. Le bilan hydrologique est en accord avec cette estimation.

La climatologie indique que le déficit hydrique est peu important et de courte durée ; par contre les périodes de lixiviation sont longues (Octobre à Juin), ce qui favorise la perte d'éléments chimiques à travers les sols.

La décomposition des hydrogrammes et la classification de A. MANGIN (1974) démontrent que le bassin est complexe. Il se subdivise en deux sous-bassins, l'un au Nord, l'autre au Sud, ils ont en commun le compartiment karstifié de Besain à Molain - La Chatelaine.

- le bassin Nord, spécifique à la source de la Grotte des Planches draine le compartiment de Chilly sur Salins. La morphologie karstique est indiquée par des dolines et des pertes, mais la fissuration se caractérise par sa faible densité.

- le bassin Sud, spécifique à la source du Fer à Cheval draine le compartiment regroupant le Bief de Corne et la forêt de Poligny- Arbois. Le karst, beaucoup plus développé est marqué par une densité élevée de dolines, de lésines et une fissuration importante.

L'observation du temps d'écoulement de fortes précipitations orageuses met en évidence une circulation ralentie au Nord et accélérée au Sud.

### II - CARACTERISTIQUES SPECIFIQUES AUX DEUX SOUS-BASSINS

La structure et la constitution du bassin de la Cuisance permettent de penser que l'acquisition du chimisme des eaux se fera d'une part à partir de roches calcaires de composition assez homogène, et d'autre part à partir d'un épikarst soumis à diverses activités humaines comme la mise en culture, l'aménagement des forêts, mais aussi les épandages d'engrais, les rejets d'eaux usées, et les épandages de sel en hiver.

Le karst imprimera, comme nous le verrons, un chimisme de fond constant et identique au bassin Nord et au Bassin Sud, l'épikarst par contre tendra à modifier la composition chimique des eaux de façon significativement différente entre le Nord dont les terres plus profondes sont cultivées en plus grande proportion et le Sud marqué par des sols superficiels et une couverture forestière.

### III - INTERACTION DU FONCTIONNEMENT KARSTIQUE SUR L'EPIKARST

Les relations karst-épikarst ont été interprétées par D. AUBERT (1969) et étudiées de façon plus approfondie par G. CALLOT (1978), S. BRUCKERT et M. GAIFFE (1980) ; M. GAIFFE et S. BRUCKERT (1985).

La première hypothèse émise par D. AUBERT a été que la couverture pédologique peut avoir, quand elle est épaisse, un effet retardateur dans les écoulements d'eaux karstiques. Les travaux plus récents démontrent que les actions géodynamiques produisent des processus d'érosion d'autant plus intenses que les bancs calcaires sont plus fragmentés. De ce fait, ce sont les effets géodynamiques du karst (appel au vide) qui règlent l'épaisseur du sol et non l'inverse.

## CHAPITRE IV - MECANISMES D'ACQUISITION DU CHIMISME DES EAUX ET APPORTS EXTERIEURS DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA CUISANCE

Le chimisme des eaux de source dépend essentiellement de la composition des milieux traversés et du temps de séjour dans chacun d'eux. En milieu karstique calcaire, ce chimisme est principalement régi par l'équilibre calco-carbonique ( $H^+$  ;  $OH^-$  ;  $Ca^{2+}$  ;  $HCO_3^-$ ) auquel viennent se greffer des éléments pouvant venir de l'aquifère, de son environnement ( $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $SiO_2$ ) et des éléments d'origines biologiques ( $NO_3^-$  ;  $NO_2^-$  ;  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ ...).

### I - PROTOCOLE D'ETUDE

#### 1). SUIVI GEOCHIMIQUE

Afin de suivre l'évolution et de tenter de connaître l'origine et le mécanisme du chimisme des eaux karstiques de la Cuisance, un grand nombre d'échantillons ont été analysés (environ 400).

- Au cours du cycle hydrologique 1983-1984, un suivi détaillé de la composition chimique des eaux a été réalisé à la source de la Grotte des Planches. La fréquence des prélèvements a souvent nécessité l'utilisation d'un préleveur automatique (de type ISCO) à pas de temps variant de moins d'une heure à quelques jours en fonction des débits enregistrés. Les échantillons ont été prélevés à environ 150m en aval de la source (au point  $x = 864,92$  ;  $y = 214,68$  ;  $z = 330$ ) pour incorporer les eaux de la galerie constamment noyée qui sortent en plusieurs petites résurgences dans le lit même de la Cuisance. A cet endroit, aucun effluent n'est rejeté dans le cours d'eau.

La densité de l'échantillonnage (un échantillon toutes les vingt quatre à quarante huit heures), nous a permis de mettre en évidence des événements absents (ou amplifiés) lors de prélèvement mensuels ou hebdomadaires.

- Au cours des crues : nous avons observé plus en détail l'hydrochimisme de la source de la Grotte des Planches. En raison de la brièveté des crues, un pas de temps d'une heure en moyenne a été choisi pour les montées de crue et de six à douze heures pour les décrues. Cependant, lors des montées de crues très rapides, un échantillon toutes les heures s'est avéré insuffisant.

- Au cours de l'étiage et des premières crues de l'été 1984, nous avons échantillonné simultanément les eaux de la source de la Grotte et de la source du Fer à Cheval à raison d'un prélèvement toutes les quarante huit heures en basses eaux et d'un toutes les vingt quatre heures en crue. Ceci nous a permis de comparer des eaux issues d'un même bassin d'alimentation ayant traversé des horizons pédologiques différents.

#### 2). MESURES PHYSIQUES ET ANALYSES CHIMIQUES

- Mesures physiques : elles ont été réalisées in situ, à l'aide
  - d'un thermomètre à mercure gradué au  $1/10^\circ$  de degré,
  - d'un conductivimètre (en  $\mu S/cm$ ) la conductivité est ramenée à  $20^\circ C$  d'après la formule :

$$C_{20^\circ} = \frac{C_t}{0,022t + 0,56}$$



Malheureusement, l'appareil utilisé ne permettait pas d'obtenir une précision supérieure à cinq unités, hormis les cinq pour cent d'erreur dûs à la précision du constructeur.

- d'un pH mètre (SCHOTT) dont la lecture ne permettait pas d'obtenir une précision supérieure à 3 100ème d'unité.

- Analyses chimiques effectuées au Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée de Besançon :

- par colorimétrie ont été dosés les éléments suivants :  $\text{NH}_4^+$  ;  $\text{NO}_2^-$  ;  $\text{NO}_3^-$  ;  $\text{SO}_4^{--}$  ;  $\text{PO}_4^{--}$  ;  $\text{SiO}_2$ .

- par dosage volumétrique :  $\text{Cl}^-$  et  $\text{HCO}_3^-$

- par spectro photomètre d'absorption atomique :  $\text{Ca}^{++}$  ;  $\text{K}^+$  ;  $\text{Mg}^{++}$  ;  $\text{Na}^+$  ; Fe total.

Les méthodes utilisées pour l'analyse de chaque élément figurent en annexe II (tableau 48), ainsi que la précision de chacune d'elles.

- Validité des analyses chimiques : chaque échantillon prélevé doit présenter une électroneutralité (puisque  $\Sigma$  anions =  $\Sigma$  cations). Après le calcul du bilan ionique ( $B = \frac{\Sigma \text{ cations} - \Sigma \text{ anions}}{\Sigma \text{ cations} + \Sigma \text{ anions}} \times 100$ ), les échantillons

dont le résultat de B excédait cinq pour cent ont été éliminés (pour les eaux karstiques). Pour le reste, le bilan ionique révèle généralement un déficit en anions, ceci peut être dû à une sous-estimation des ions  $\text{HCO}_3^-$  puisqu'ils représentent soixante dix pour cent de la minéralisation, alors que les autres anions ( $\text{Cl}^-$  ;  $\text{SO}_4^{--}$  ;  $\text{NO}_3^-$ ) ne représentent que un à deux pour cent de la minéralisation, ce qui est insuffisant pour donner une erreur de cinq pour cent de B (voir annexe II, tableau 49 bilan ionique).

## II EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE - ANHYDRIDE-CARBONIQUE

### 1). EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE

Les roches carbonatées, peu solubles dans l'eau, le deviennent plus aisément en présence d'anhydride carbonique. Ceci fait appel à trois chaînes : physique ; chimique ; cristallographique, de durée différente ; dans trois phases : gazeuse ; liquide ; solide, synthétisées par H. ROQUES (1964) (Fig.33).

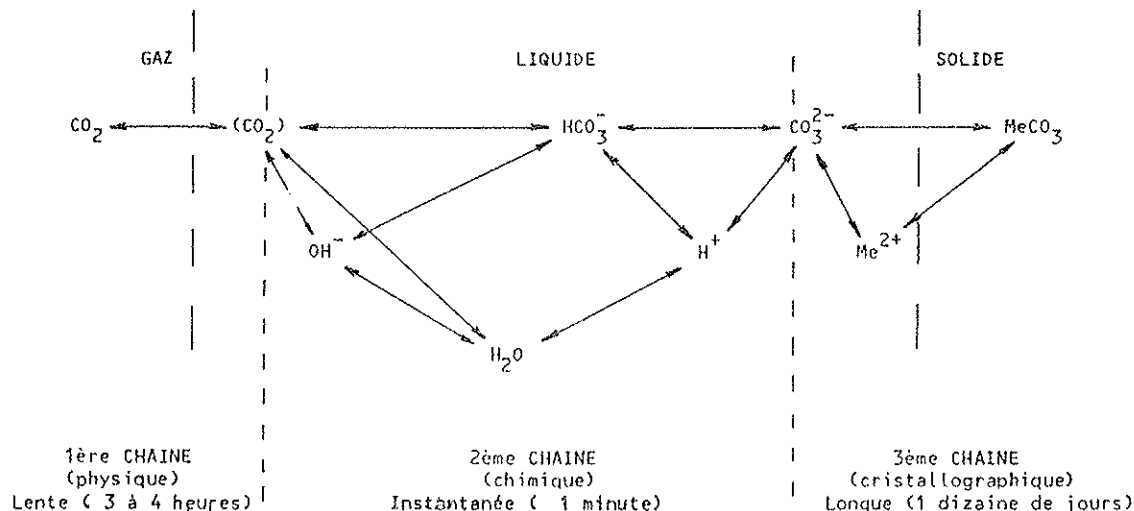


Fig.33 - Synthèse des trois chaînes de réactions (d'après H. ROQUES - 1964).

De nombreux auteurs ont décrit la théorie de la chimie des carbonates, aussi nous en rappelons simplement les grands traits. Nous disposons de dix éléments :  $[CO_2]$ ,  $[HCO_3^-]$ ;  $[CO_3^{2-}]$ ;  $[H^+]$ ;  $[OH^-]$ ;  $[Me^{2+}]$ ;  $[MeHCO_3^+]$ ;  $[MeCO_3]$ ,  $[MeSO_4]$ ; et  $pCO_2$ . ( $Me^{2+}$  représente un cation divalent) qui réagissent selon neuf équations pour permettre l'équilibre calco-carbonique, nous les avons regroupées dans le tableau 22.

La définition de ce système nécessite la connaissance de deux variables obtenues par la concentration de  $[Me^{2+}]$  exprimée en fonction de la  $pCO_2$  ou en fonction du pH (cette dernière solution est plus fréquemment utilisée pour des raisons pratiques). H. ROQUES en 1972 propose d'évaluer l'état de la solution par l'écart entre le pH mesuré et le pH à l'équilibre selon l'équation

$$pH_m - pHe = pH_m - \log K_s + \log K_3 + \log [Me^{2+}] + \log [HCO_3^-] + \log (1 - K_6 [SO_4^{2-}]) + C$$

avec  $C = 0,051526 \frac{(m_{Mg}^{2+})^{0,505662}}{Mg}$

- si  $pH_m > pHe$  = solution sursaturée = précipitation des carbonates
- $pH_m < pHe$  = solution sous-saturée dissolution des carbonates
- $pH_m = pHe$  = solution à l'équilibre

La  $pCO_2$  de l'aquifère s'établit (d'après H. ROQUES 1962 dans BAKALOWICZ 1979) d'après la relation (tabl. 22) :

$$\log (pCO_2 \text{ équi.}) = \log [HCO_3^-] - pH - \log K_0 - \log K_2$$

Elle fait appel à la  $pCO_2$  équilibrante qui correspond à une pression partielle de la phase gazeuse associée à la solution de la minéralisation. On peut ainsi en déduire :

$$\log CO_2 \text{ dissous} = \log K_0 + \log pCO_2$$

Pour compléter ces données générales, figurent en annexe 2 les tableaux 50 et 51 et quelques constantes d'équilibres relatives à l'hydrolyse de minéraux fréquemment rencontrés dans le karst ainsi que les constantes d'équilibres relatives à la dissolution de certaines espèces aqueuses (d'après B. FRITZ, 1975).

## 2). ANHYDRIDE CARBONIQUE

La dissolution des calcaires se produit en présence d'anhydride carbonique dont la majeure partie provient du sol. Dans ce dernier la production de  $CO_2$ , dépend principalement de l'activité des micro-organismes et des échanges avec l'atmosphère du sol. Tout facteur qui diminue ces échanges, favorise la production d'une atmosphère riche en  $CO_2$  dans le sol (taux élevé d'argile, hydro-morphie).

a) Les facteurs biologiques : la production de  $CO_2$  est étroitement liée à la présence de micro-organismes dont l'existence dépend des facteurs climatiques et chimiques du sol, mais également de l'apport naturel ou artificiel de matière organique. Le processus de minéralisation transforme, chaque année, une partie de la matière organique en  $CO_2$ .

Le  $CO_2$  produit par les sols se trouve la plupart du temps sous forme de "solution" au cours des échanges. Il est donc entraîné dans le karst par les eaux de percolation selon des cheminements plus ou moins rapides et peut, s'il s'éjourne assez longtemps dans l'aquifère, suivre les lois de l'équilibre calco-carbonique.

b). Les facteurs pédologiques : l'aération induite par la macroporosité favorise les échanges de  $CO_2$ . Celle-ci dépend de la structure du sol, résultat de l'agrégation des particules élémentaires et des débris végétaux liés

EQUILIBRES	CONSTANTES D'EQUILIBRE
<p><u>Passage de la phase gazeuse à la phase liquide</u></p> $(CO_2)_g \rightleftharpoons (CO_2)_l \quad (1)$	$K_0 = \frac{[CO_2]_l}{pCO_2}$
<p><u>Phase liquide</u></p> <p>- hydratation CO<sub>2</sub></p> $CO_2 + n H_2O \rightleftharpoons (CO_2, n H_2O)$ <p>- Ionisations successives</p> $(CO_2, nH_2O) + p H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+ + (n+p-1)H_2O \quad (2)$ $HCO_3^- \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H^+ \quad (3)$ <p>- Formation de paires d'ions</p> $HCO_3^- + Me^{2+} \rightleftharpoons Me HCO_3^+ \quad (4)$ $CO_3^{2-} + Me^{2+} \rightleftharpoons Me CO_3^0 \quad (5)$ $SO_4^{2-} \rightleftharpoons Me^{2+} + MeSO_4 \quad (6)$ <p>- Dissociation de l'eau</p> $2H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^- \quad (7)$	$K_2 = \frac{[HCO_3^-] [H^+]}{[CO_2]}$ $K_3 = \frac{[CO_3^{2-}] [H^+]}{[HCO_3^-]}$ $K_4 = \frac{[CO_3^{2-}] [Me^{2+}]}{[MeHCO_3^+]}$ $K_5 = \frac{[CO_3^{2-}] [Me^{2+}]}{[MeCO_3]}$ $K_6 = \frac{[MeSO_4]}{[SO_4^{2-}] [Me^{2+}]}$ $K_e = \frac{[H_3O^+] [OH^-]}{[H_2O]}$
<p><u>Passage de la phase liquide à la phase solide</u></p> <p>- Dissociations des carbonates</p> $Me CO_3 \rightleftharpoons Me^{2+} + CO_3^{2-} \quad (8)$ <p>- Neutralité électrique de la solution</p> $2^m CO_3^{2-} + ^m HCO_3^- + ^m OH^- \rightleftharpoons 2^m Me^{2+} + ^m H^+ + ^m MeHCO_3^+ \quad (9)$	$K_S = \frac{[Me^{2+}] [CO_3^{2-}]}{[MeCO_3]}$

Tableau 22 - Réactions présentes dans l'équilibre calco-carbonique ainsi que leur constante d'équilibre (d'après M.BAKALOWICZ - 1979)

entre eux par le complexe argilo-humique. Le taux d'argile du sol peut entraîner par gonflement une diminution de la macroporosité associée à une augmentation de la microporosité donc également à un enrichissement en CO<sub>2</sub>.

c). Les facteurs climatiques : la température joue un rôle important dans la production de CO<sub>2</sub> puisqu'elle favorise ou non l'activité microbienne du sol. Ainsi la production de CO<sub>2</sub>, nulle à 0°C, s'accroît fortement entre 15 et 20°C (d'après A.D. ROVIRA 1955 in M. BONNEAU-B. SOUCHIER, 1979). L'humidité du sol, dans les conditions optimales 20 à 30 % (M. BAKALOWICZ, 1979) favorise l'activité des microorganismes donc la production de CO<sub>2</sub>. Au cours de l'été, ou de sécheresses importantes, cette activité diminue, voire cesse. Il en est de même lorsque l'humidité s'accroît fortement et provoque un engorgement (passage d'un milieu aérobie à un milieu anaérobie entraînant la disparition des microorganismes). Dans ces deux cas, la production CO<sub>2</sub> diminue fortement ou s'arrête. La production de CO<sub>2</sub> varie donc en fonction des saisons comme le montre souvent le graphe (CO<sub>2</sub>)<sup>2</sup> = f(t) (annexe 2, fig. 108).

### III-CHIMISME MOYEN ANNUEL DES EAUX DE LA SOURCE DE LA GROTTÉ DES PLANCHES

#### 1). BILAN CHIMIQUE

Grace au suivi chimique effectué au cours du cycle hydrologique 1983-1984, nous avons calculé les valeurs moyennes et les écarts-types pour chaque élément chimique et chaque mesure physique (tableau 23). La densité des échantillons (301) permet de penser que ces valeurs moyennes sont assez représentatives de la réalité. Toutefois ceci ne donne pas d'information sur les phénomènes rencontrés au cours de ce cycle (voir chapitre 2, 2ème partie).

Les valeurs moyennes ont été reportées sur un diagramme de Schoeller (fig. 34) qui schématise la présence d'eaux bicarbonatées calciques.

Cuisance Grotte mg/l	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	pH	T° (°C)	Cond µS/cm	Q m <sup>3</sup> /s
Moyenne	4,13	0,06	246,9	4,9	6,1	88,5	1,6	1,2	0,6	1,6	7,29	9,9	525,4	2,0
Écart-type	1,9	0,09	12,2	1,1	1,2	6,8	0,4	0,4	0,3	0,3	0,5	-	65,3	2,6
Maximum	10,3	0,71	277	9,4	11	100	2,7	2,9	2,4	2,6	8,2	11,2	697	16,6
Minimum	1,0	0,00	215	2,9	1,6	73,3	0,98	0,6	0,23	0,75	6,5	8,0	394	0,07

Tabl.23 - Caractéristiques chimiques des eaux de la Cuisance à la Source de la Grotte (Cycle Hydrologique 1983-1984).

BV-55 km<sup>2</sup>

Dans la suite de cette étude, nous raisonnerons donc sur de faibles concentrations (à l'exception des ions bicarbonate et calcium). Cependant comme nous l'avons montré précédemment, la précision de l'analyse reste largement supérieure à l'écart des mesures.

Ces éléments chimiques peuvent avoir plusieurs origines :

- la matrice calcaire
- les sois
- les précipitations
- les eaux usées

Dans le paragraphe IV de ce chapitre nous tenterons de quantifier ces apports.

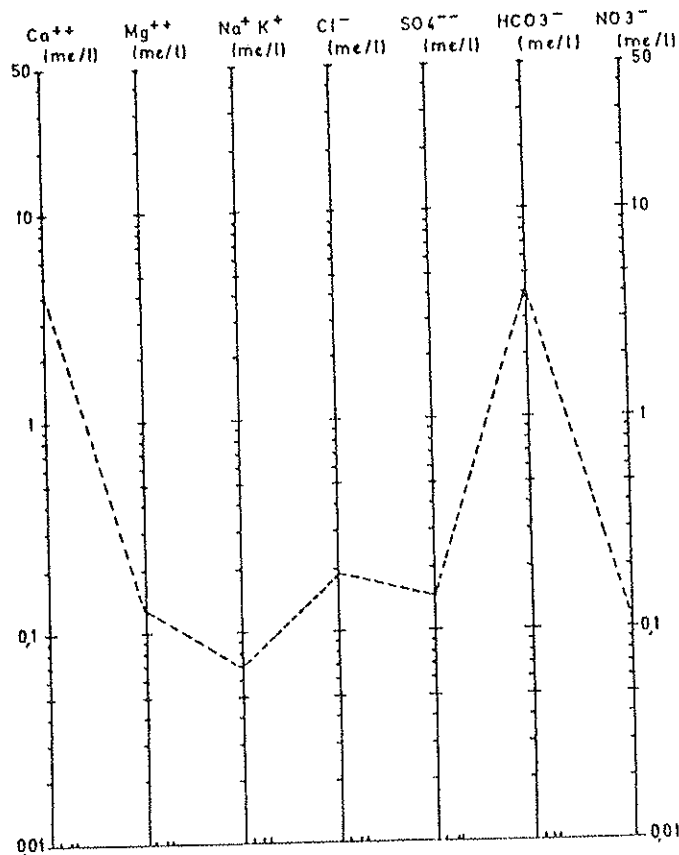


Fig. 34 - Cuisance-Grotte, diagrammes de Schoeller

## 2). MINERALISATION

Etant aisément mesurée par la conductivité, elle apporte de nombreuses informations sur les substances dissoutes et les types d'écoulement dont chaque échantillon rend compte.

M. BAKALOWICZ (1979) a établi un catalogue de distribution de fréquence de la conductivité pour différentes sources, dont la forme rend compte de la structure de plusieurs systèmes karstiques (fig. 35). Ainsi les distributions unimodales représentent des systèmes à milieux carbonatés poreux et fissurés peu karstifiés, alors que les distributions plurimodales symbolisent des systèmes d'autant plus karstifiés que les courbes montrent de nombreux pics plus ou moins confondus et un étalement dont l'importance caractérise aussi la complexité du système (ex. Fontaine du Vaucluse).

La courbe de distribution des fréquences de la minéralisation des eaux de la source de la Grotte des Planches (fig. 36) au cours du cycle hydrologique 83-84 est plurimodale et très étalée. En la situant dans le catalogue de M. BAKALOWICZ, elle semble très proche d'un système karstique complexe, ainsi que dans la classification de A. MANGIN (1974).

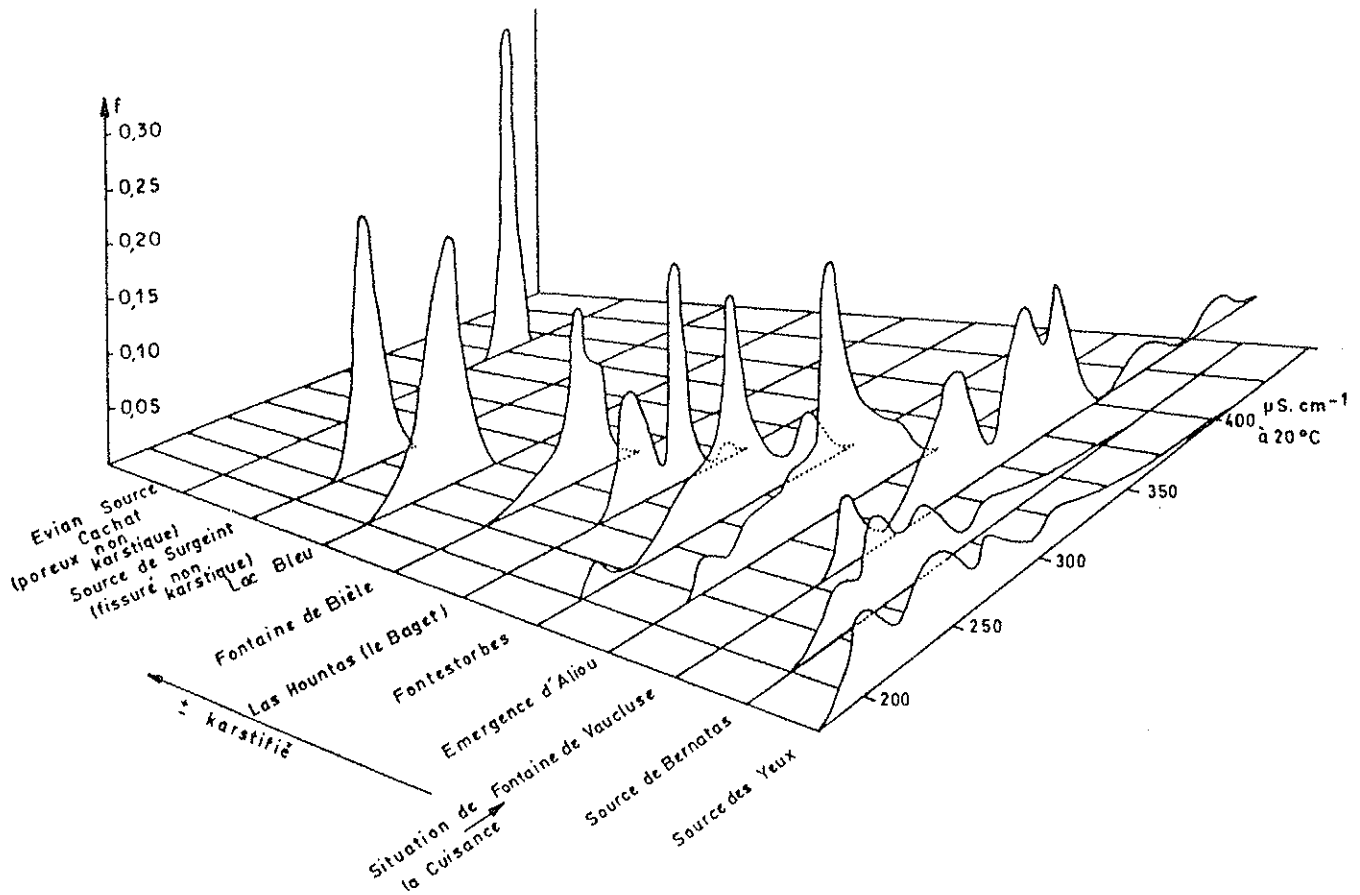


Fig. 35 - Catalogue de distribution de fréquences des valeurs de la conductivité des eaux de sources d'aquifères carbonatés poreux fissurés ou karstifiés. (d'après M. BAKALOWICZ 1979).

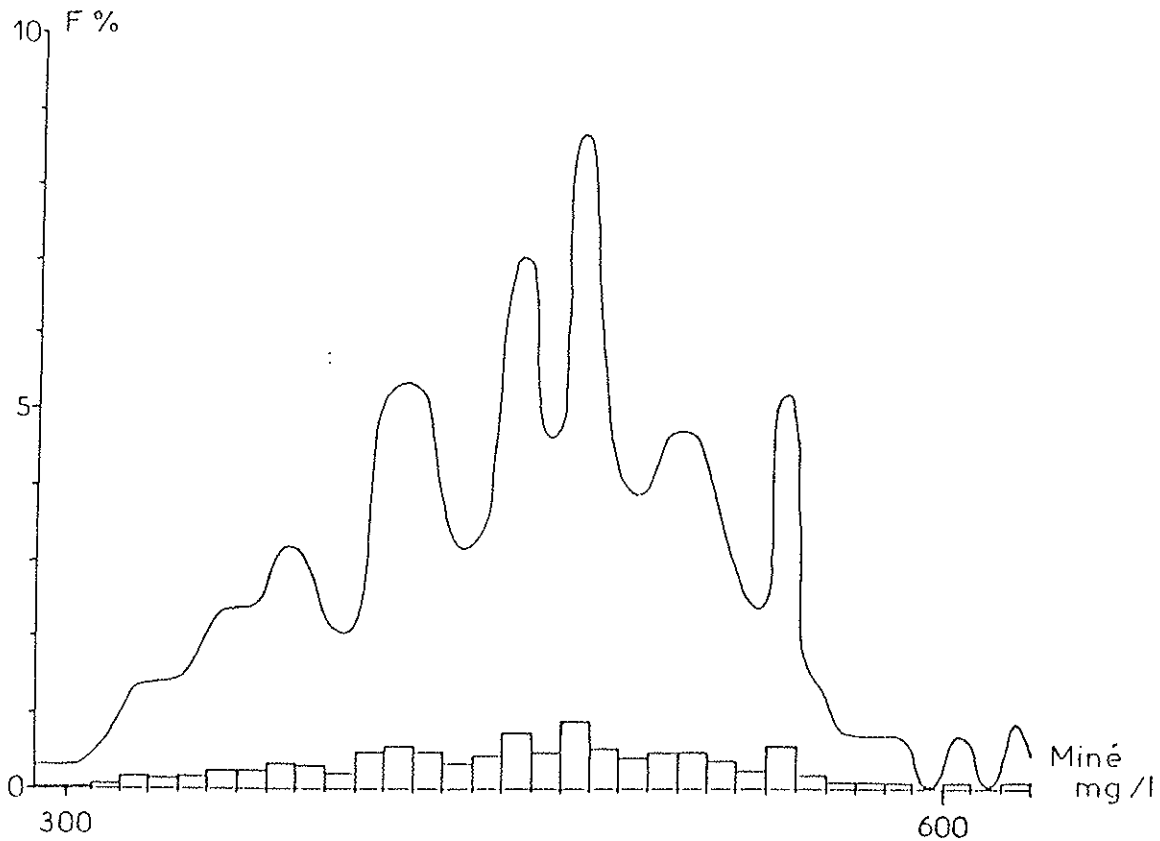


Fig. 36 - Minéralisation cuisance grotte  
Distribution de la fréquence des valeurs de la minéralisation des eaux de la Cuisance à la Grotte des Planches (cycle hydrologique 83-84)

#### IV - LES APPORTS D'ORIGINES DIVERSES ET LEUR INFLUENCE SUR LE CHIMISME DES EAUX

Le chimisme des eaux de la Cuisance est naturellement influencé par la composition de la matrice, mais également par les eaux de précipitation ; les eaux usées rejetées dans le karst et les apports d'engrais sur le plateau. Dans ce paragraphe, nous établirons une quantification approximative de ces trois derniers apports; tout d'abord par une estimation des quantités apportées en surface, puis par un bilan "entrée et sortie" du karst.

##### 1). APPORTS DUS AUX PRECIPITATIONS

L'importante variabilité de la composition chimique des eaux au cours d'une même précipitation nous a conduits à analyser un échantillon moyen, prélevé à proximité du pluviographe de Chilly sur Salins à l'aide d'un dispositif léger en P.V.C.

Nous avons recueilli et analysé dix sept échantillons. Ce petit nombre de prélèvements ne nous permet pas d'obtenir une représentation des variations au cours d'un cycle hydrologique, c'est pourquoi nous ne donnons que des valeurs moyennes ainsi que les maximums et les minimums (tableau 24). Ces valeurs mesurées sont proches de celles obtenues par J.J. MISEREZ (1972).

Précipitations 83-84	pH	Cond. μS/cm	Cl <sup>-</sup> mg/l	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup> mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> mg/l	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	Ca <sup>++</sup> mg/l	Mg <sup>++</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> mg/l	K <sup>+</sup> mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l
Moyenne	5,5	34	2,06 (3,42)	0,12 (0,20)	3,85 (6,39)	1,57 (2,61)	0,005 (0,008)	0,63 (1,05)	2,04 (3,39)	0,08 (0,13)	0,29 (0,48)	0,21 (0,35)	0,19 (0,31)
Maxi.	6,8	65	6,89	1,26	9,8	3,31	0,01	(4,4)	6,1	0,28	1,02	0,69	0,45
Mini.	3,9	12	0,53	0,00	0,00	0,25	0,00	0,04	0,65	0,02	0,01	0,03	0,00
Apport kg/ha/an	-	-	19 (31)	1,0 (2)	35 (58)	14 (24)	0,04 (0,07)	6 (9)	18 (31)	0,7 (1,2)	2,6 (4)	1,9 (3)	1,7 (2,8)

Tabl.24 : Caractéristiques physiques et chimiques des eaux de précipitations à Chilly sur Salins (valeurs affectées du coefficient de concentration "e")

Les quantités d'éléments chimiques apportées par les précipitations et selon nos calculs sont faibles si nous les comparons à celles des apports dûs aux engrais.

Nous avons affecté les valeurs moyennes d'un coefficient de reconcentration "e" obtenu d'après la formule :

$$e = P / (P - ETP) = 1,66$$

Celui-ci accroît sensiblement les valeurs moyennes et correspond à une reconcentration qui se produit lors de l'évapotranspiration.

## 2). APPORTS DUS AUX EAUX USEES

Cinq villages rejettent leurs eaux usées dans le karst. Chilly sur Salins Molain, Besain et Montrond possèdent des réseaux "d'eaux pluviales" auxquels sont raccordés la plupart des particuliers. Les eaux usées (domestiques, de lavage d'étables ou de laiteries) se concentrent dans des pertes, termes de ces réseaux.

D'après les résultats obtenus par les essais de traçage à la fluorescéine (chapitre 3, 1ère partie), nous savons que la majeure partie de ces eaux usées s'achemine vers les sources de la Cuisance, à l'exception de celles de Montrond qui aboutissent essentiellement à l'extérieur du bassin vers le Bief du Moulin. Seul le village de la Chatelaine n'est pas équipé d'un tel réseau et rejette ses eaux usées dans des puits perdus ou par écoulements diffus.

Peu d'auteurs apportent des renseignements sur la composition chimique des eaux usées en milieu rural (sans aucune industrie). C. GOUGOUSSIS-DELPY (1982) a réalisé un suivi chimique des eaux usées domestiques à des heures et des jours différents en vue d'un assainissement individuel. Pour connaître la composition chimique des eaux usées rejetées dans le karst de la Cuisance nous avons analysé quelques échantillons que nous avons comparés aux résultats publiés dans l'étude précédemment citée.

La collecte des échantillons (au nombre de 9) a été faite en fin de réseau (juste avant l'entrée dans le karst) à des heures différentes (huit heures et quinze heures) sur deux jours. Les échantillons prélevés à Chilly sur Salins ont été éliminés car une petite source emprunte le réseau et provoque une dilution.

Le tableau 25 expose les résultats obtenus et les compare à ceux de C. GOUGOUSSIS-DELPY (1982).

Eaux Usées	pH	Q	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>
Réseaux mg/l	7,7	601/ha/j	57	40	51	473	11	-	51	107	8,5	91	44	3
Réseaux kg/an	-	-	499	350	447	4143	96	-	447	937	74	797	385	26
Moyennes Gougoussis Delpy (mg/l)	6,4	501/ha/j	-	27	-	-	0,57	-	16,5	41	7	-	-	-

Tabl. 25 : Caractéristiques physiques et chimiques des eaux usées rejetées dans le bassin d'alimentation de la Cuisance.

## 3). APPORTS DUS AUX EPANDAGES D'ENGRAIS

Les terres agricoles occupent 28 % de la superficie du bassin d'alimentation de la Cuisance (soit 2675 hectares). L'élevage de bovins représente la principale activité du plateau et les prairies couvrent donc 23 % du bassin. Cependant les cultures de céréales (essentiellement l'orge et le maïs), peu abondantes dans l'ensemble, couvrent 7 % des terres exploitées dans le secteur de Chilly sur Salins contre 1 % ailleurs (voir tabl. 28).

Les prairies comme les cultures nécessitent des apports d'engrais chimiques ou naturels indispensables à l'amélioration des rendements, les plantes en exportent donc une forte proportion. Cependant, au cours des périodes de faible activité végétale, et de forte pluviosité, une partie de ces produits peut être lessivée en profondeur et se retrouver dans les eaux



souterraines. Aussi avons-nous inventorié les types d'engrais épandus, les quantités et les périodes d'épandage, grâce à une enquête réalisée auprès des agriculteurs de Chilly sur Salins et de Molain (deux pôles dont les sols différent; voir chapitre 1, 1ère partie)(annexe 2 tableau 50) et aux formations régionales communiquées par les Chambres d'Agriculture du Jura et du Doubs.

a). Principaux types d'engrais utilisés

Le tableau 26 regroupe les types d'engrais utilisés sur le bassin d'alimentation de la Cuisance, ainsi que les principaux éléments chimiques qui les composent.

Comp. Type	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO	Cl <sup>-</sup>
Engrais complexes *	x	y	z					
Ammonitrates *	33,5							
Scories potassiques *		12	12					
Scories Thomas *		12		6	3		50	
Chlorure de potassium *			61,5					38,5
Magnedol *					1,8		60	
Chaux *							85	
Purin kg/m <sup>3</sup>	4	1	6		1	2,5		
Fumier kg/t	5	2	7		1	1,5		

Tabl. 26 - Principaux composants chimiques des engrais utilisés (sur le premier plateau en Chilly et Besain) \*kg/100 kg

Les résultats de l'enquête et des informations obtenus nous ont permis de dresser un bilan mensuel des éléments chimiques épandus dans les secteurs de Chilly sur Salins et Molain (tableau 27). Nous les avons extrapolés pour les secteurs de Besain et la Chatelaine afin d'aboutir à un bilan global qui figure dans la dernière ligne de ce tableau.

Il en ressort que les périodes et les quantités épandues par hectare sont assez voisines d'un secteur à l'autre, l'hiver étant la saison au cours de laquelle les épandages sont les plus intenses. Toutefois la différence entre les deux secteurs apparaît lorsque l'on fait intervenir les surfaces supportant des épandages (tableau 28). En effet, la surface fertilisée à Chilly (30 %) est trois fois plus importante qu'à Molain (10 %) en raison de la qualité des sols très favorables à l'agriculture dans le premier secteur (voir chapitre 2, 1ère partie). Les quantités d'engrais épandues à Chilly pour une même superficie sont donc beaucoup plus importantes ce qui peut avoir des conséquences sensibles au niveau des eaux de la Cuisance puisque la source du Fer à Cheval ne draine pas le secteur de Chilly sur Salins.

c.c. pér.	N	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	SiO <sub>2</sub>	Ca <sup>++</sup>	Cl <sup>-</sup>
Sept.	0	0	25	15	0	55	315	40
Oct.	0	5	30	0	0	0	0	0
Nov.	90	0	0	0	0	0	0	0
Déc.	80	25	50	10	35	0	0	0
Jan.	100	70	35	15	60	50	280	55
Fév.	80	35	50	10	35	0	200	45
Mars	250	75	80	20	90	60	350	80
Avr.	70	30	20	10	30	30	175	40
Mai	60	20	55	15	75	0	0	0
Juin	60	0	0	0	0	0	0	0
Juil.	50	0	0	0	0	0	0	0
Aout	40	0	0	0	0	0	0	0
Moy.	75	20	25	7	30	10	85	20
Moy. rég.	100 à 150	55 à 70	30 à 45					

Tabl.27 - Périodes et quantités d'éléments chimiques épandus. (en kg/ ha).



c.c. = composants chimiques

pér. = périodes

surfaces agricoles secteurs	Surface exploitée	Prairies sans apports	Prairies permanentes	Prairies artificielles	Céréales
CHILLY sur SALINS	770 (100)	545 (71)	164 (21)	9 (1,2)	52 (7)
MOLAIN	775 (100)	708 (91)	49 (6,3)	9 (1,2)	9 (1,2)
BESAIN	645 (100)	580 (90)	26 (4)	32 (5)	7 (1,1)
LA CHATELAINE	460 (100)	420 (91)	12 (2,6)	23 (5)	5 (1,1)
VALEMPOLIÈRES	25 (100)	23 (92)	0,6 (2,4)	1,2 (5)	0,3 (1,2)

Tabl. 28 - Répartition des surfaces agricoles sur le premier plateau entre Chilly sur Salins et Besain, en ha et en %.

b) *Eléments exportés par les plantes* : une proportion importante des éléments apportés par les précipitations, les épandages d'engrais et le cycle biologique est exportée par les plantes. Nous avons tenté de la chiffrer pour l'ensemble du bassin d'alimentation de la Cuisance, (essentiellement pour les secteurs cultivés). Nous avons tenu compte des surfaces recouvertes par les prairies non fertilisées, les prairies permanentes, les prairies artificielles et les cultures, pour lesquelles les exportations données par différents auteurs figurent dans le tableau 53 en annexe II. Le tableau 29 résume ces exportations pour le cycle 1983-1984 (Septembre 1983 à Aout 1984).

Secteurs	N	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>++</sup>
CHILLY	22000	3400	17800	8600	4700	4300
MOLAIN	29300	2600	13500	6500	1600	3200
LA CHATELAINE	17300	1500	8000	3800	900	1900
BESAIN	24000	200	11200	5400	1300	2700
VALEMPOLIÈRES	950	100	400	200	60	100
TOTAL	93500	7800	50900	24700	8560	12300

Tabl. 29 - Exportation par les plantes pour l'ensemble du bassin d'alimentation de la Cuisance sur un an, en kg.

## V - BILAN GLOBAL ANNUEL DES ELEMENTS ENTRES ET SORTIS DU KARST

Ce bilan ne concerne que le bassin d'alimentation de la source de la Grotte puisque le suivi chimique, pour le cycle hydrologique 1983-1984, n'a été réalisé que sur cette source.

Il représente une approximation puisqu'un grand nombre d'incertitudes subsistent dans le calcul de chaque apport ou exportation. Nous ne considérons que les secteurs cultivés pour les entrées et sorties des éléments précipités ou épandus (le système forestier étant équilibré à plus des 2/3).

Le tableau 30 rassemble les calculs effectués pour le cycle 1983-1984. Ils ont été réalisés de la façon suivante :

comp. chim. origine	N	PO <sub>4</sub> <sup>----</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	SiO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	
Précipitations (sur 5000 ha)	30.10 <sup>-3</sup>	1,7.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-3</sup>	28.10 <sup>3</sup>	1.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-3</sup>	30.10 <sup>-3</sup>	ENTREES
Eaux Usées	0,3	0,3	0,4	0,9	0,07	0,4	0,03	0,5	
Engrais	28	8,5	10	50	5	17	6,5	5,8	
Exportations par les prairies	61	6,9	36	17	6,8	8,5	-	-	SORTIES
Sortie Grotte	15	2	20	2800	50	190	50	130	

Tabl.30 - Bilan entrée-sortie à la source de la Grotte des Planches au cours du cycle 1983-1984 en t/an (5000 hectares dont 2000 exploités)

Nous avons considéré que la surface cultivée, drainée par les eaux qui aboutissent à la Grotte des Planches représente les secteurs de : Chilly ; Valempoulières ; un demi Besain ; un demi Molain ; un demi La Chatelaine. Les secteurs de : Besain, Molain, La Chatelaine, drainés par les deux sources nous laissent supposer que cinquante pour cent de leurs eaux aboutissent à chacune d'elles.

A la vue de ces résultats nous ne pouvons pas équilibrer le bilan chimique des éléments entrés et sortis. Cependant, il apparait que pour certains éléments comme le magnésium, la silice, le potassium, les apports ne suffisent pas à expliquer les concentrations obtenues dans les eaux de l'exutoire. Il semble donc que ces éléments proviennent soit de la matrice calcaire, soit de la matrice sol, nous y reviendrons plus en détail dans le troisième chapitre de cette seconde partie. Quant à l'azote, le bilan n'est pas non plus équilibré en raison de l'impossibilité de mesurer la réserve stockée dans les sols. Les phosphates pour leur part restent fixés au niveau du sol (voir annexe 2 tableau 54).

Ce bilan nous a donc permis de constater que certains éléments abondants dans les eaux de la source proviennent de la matrice (Mg<sup>++</sup>) alors que d'autres ont une origine extérieure au karst (PO<sub>4</sub><sup>----</sup>). Pour le suivi chimique du chapitre II de la 2ème partie, un bilan mensuel serait intéressant mais les données trop approximatives ne nous le permettent pas. Aussi nous représenterons uniquement les périodes d'épandages et leur proportion à partir du tableau 27.

#### Conclusion du quatrième chapitre

Les eaux bicarbonatées calcaïques de la Grotte des Planches montrent des concentrations moyennes annuelles en-deçà des normes de pollution pour l'ensemble des éléments analysés. La composition chimique moyenne, en relation avec les milieux traversés, notamment avec le milieu calcaire et l'épikarst peut subir des modifications apportées par l'environnement extérieur du karst. Ainsi :

- les précipitations, peu minéralisées, apportent essentiellement de l'azote, des sulfates et des chlorures.

- les eaux usées, très minéralisées, bicarbonatées calciques sont riches en azote, sulfate, phosphate, potassium, chlorure et pauvres en silice et magnésium.

- les engrais dont l'utilisation varie en fonction du mode d'exploitation et des saisons se répartissent différemment entre Molain et Chilly sur Salins.

\* L'azote est abondamment utilisé sur les deux secteurs de Novembre Février puis en quantité moindre d'Avril à Août.

\* Les phosphates épandus principalement en hiver le sont davantage à Chilly sur Salins.

\* Les sulfates épandus eux aussi en automne et en hiver le sont beaucoup plus à Chilly qu'à Molain.

\* Le calcium épandu en hiver et au début du printemps domine largement à Chilly.

Dans la troisième partie, nous verrons plus en détail l'influence des sols sur le chimisme des eaux karstiques en étudiant la minéralisation de l'azote, l'altération pédogénétique et les apports d'engrais.

## CHAPITRE V - COMPOSITION ET EVOLUTION CHIMIQUES DES EAUX DE LA CUISANCE A LA GROTTTE DES PLANCHES

L'étude chimique des eaux des sources de la Cuisance se subdivise en trois parties :

- Suivi géochimique des eaux de la Grotte des Planches.
- Traitement statistique des résultats du suivi.
- Etude détaillée du chimisme des eaux en période de crue et en période d'étiage.

### I - SUIVI CHIMIQUE DES EAUX AU COURS DU CYCLE HYDROLOGIQUE 1983-1984

Réalisé sur une période de quatorze mois (septembre 83 à Octobre 84), il concerne dix éléments chimiques ( $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $NO_3^-$ ;  $SO_4^{--}$ ,  $PO_4^{---}$ ,  $SiO_2$ ) systématiquement analysés sur 301 échantillons dont la méthode de prélèvement est décrite dans le paragraphe précédent. Les ions  $NO_3^-$  et  $NH_4^+$  n'ont pas été pris en compte en raison de leur faible concentration.

Les figures 39 à 52 montrent l'évolution de ces différents éléments au cours du cycle hydrologique 1983-1984 (trait plein), à laquelle nous avons ajouté la courbe des débits (courbe grisée) ainsi que les proportions et périodes d'épanchages agricoles de ces éléments (caissons). Il apparaît assez nettement que certains éléments semblent étroitement liés aux débits ( $Mg^{++}$ ;  $SiO_2$ ;  $K^+$ ;  $HCO_3^-$ ;  $Ca^{++}$ ;  $Na^+$ ); d'autres plus ou moins liés à une "variation de type saisonnier" ( $NO_3^-$ ;  $Cl^-$ ) et une troisième catégorie montre peu de dépendance par rapport aux débits et aux variations saisonnières ( $SO_4^{--}$ ;  $Na^+$ ) voire une totale indépendance ( $PO_4^{---}$ ).

#### 1). ELEMENTS LIES AUX DEBITS

Au nombre de six, ils suivent l'évolution inverse des débits et donnent des coefficients de corrélation (concentration - débit) négatifs et décroissants pour les éléments suivants :  $Mg^{++}$ ,  $SiO_2$ ,  $HCO_3^-$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Na^+$  (tableau 31), coefficients dont la signification est rappelée en annexe (tableau 55 annexe II). Ceci met en évidence l'interaction de phénomènes divers comme l'importance de la dilution ou la possibilité d'apports extérieurs.

##### a). Le magnésium (fig. 39)

Sa concentration croit proportionnellement à l'intensité et à la durée des étiages elle n'est jamais inférieure à 1mg/l. Ceci donne une relation concentration-débit de type "exponentielle" avec un coefficient significatif  $r = - 0,743$  (fig. 37).

La dilution, constatée lors des crues, correspond à un apport d'eaux météoriques peu chargées en magnésium, Par contre l'augmentation de la concentration lors des étiages est due à un écoulement des eaux à caractère matriciel comme l'ont déjà remarqué de nombreux auteurs (J.J. MISEREZ 1972 ; J. MUDRY & B. BLAVOUX 1983, P. MUET 1985...). La concentration maximale obtenue pour ce cycle : 2,7 mg/l permet de penser que ce bassin d'alimentation ne comporte pas de calcaire dolomitique qui donnerait une teneur de l'ordre de 14 mg/l (D.E. WHITE 1963 dans J.J. MISEREZ 1972 ).

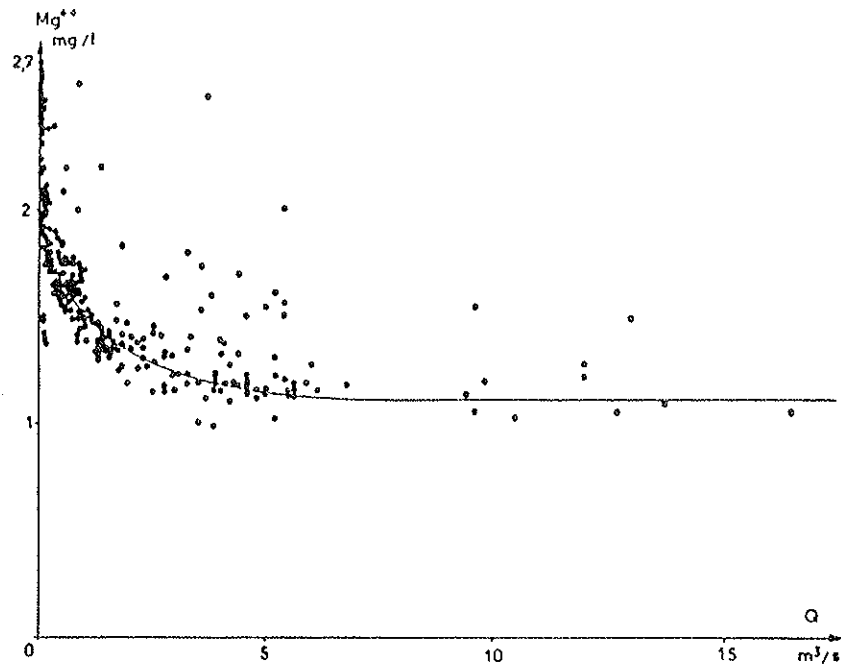


Fig. 37 - Diagramme de corrélation  $Mg^{++} = f(Q)$ , (30i valeurs)

Les apports de magnésium dûs aux eaux usées et aux précipitations sont très faibles (cf. chap. précédent), quant aux apports dûs aux épandages d'engrais, ils n'ont pas d'influence puisqu'aucune modification des débits ou des augmentations de concentrations ne se manifeste pendant ou après les périodes d'épandage (fig. 39)

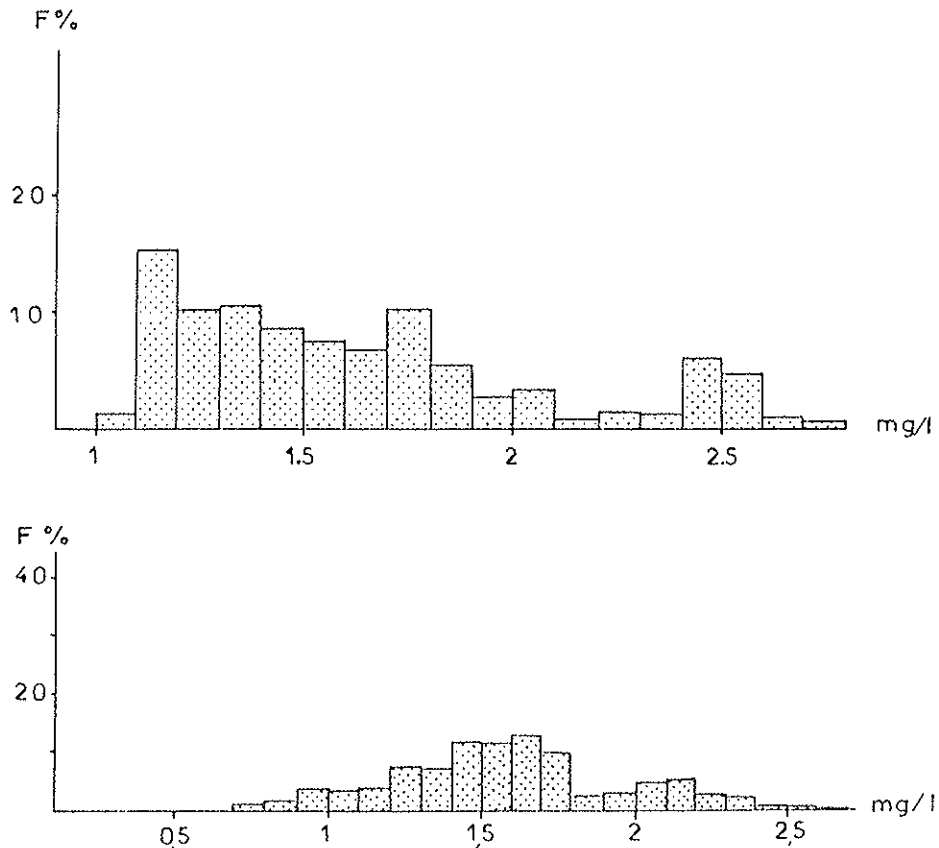


Fig. 38 - Histogrammes de fréquence de l'ion  $Mg^{++}$  en haut et de la silice en bas.

Fig. 39 - Evolution de l'ion magnésium. (301 valeurs).

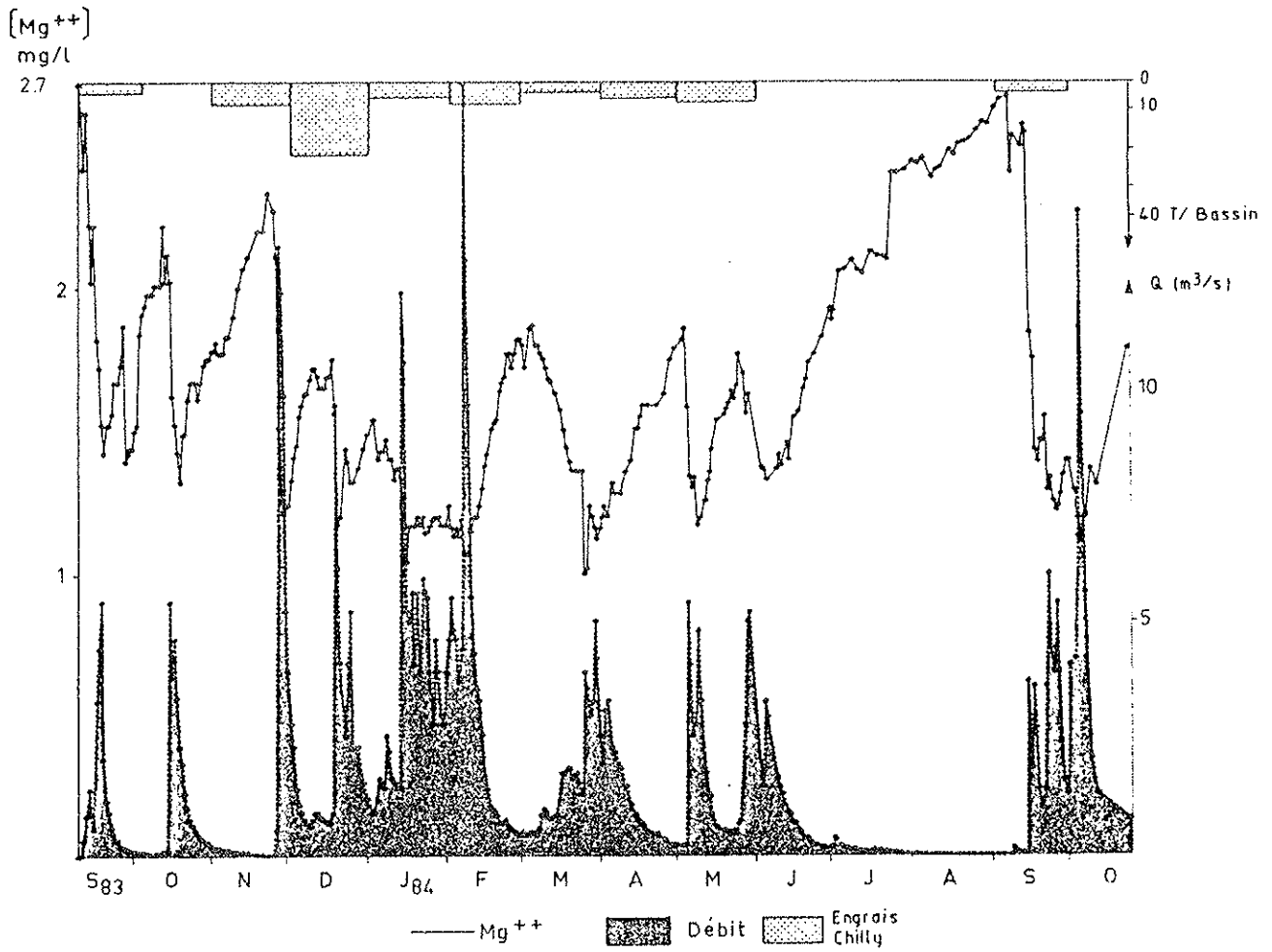
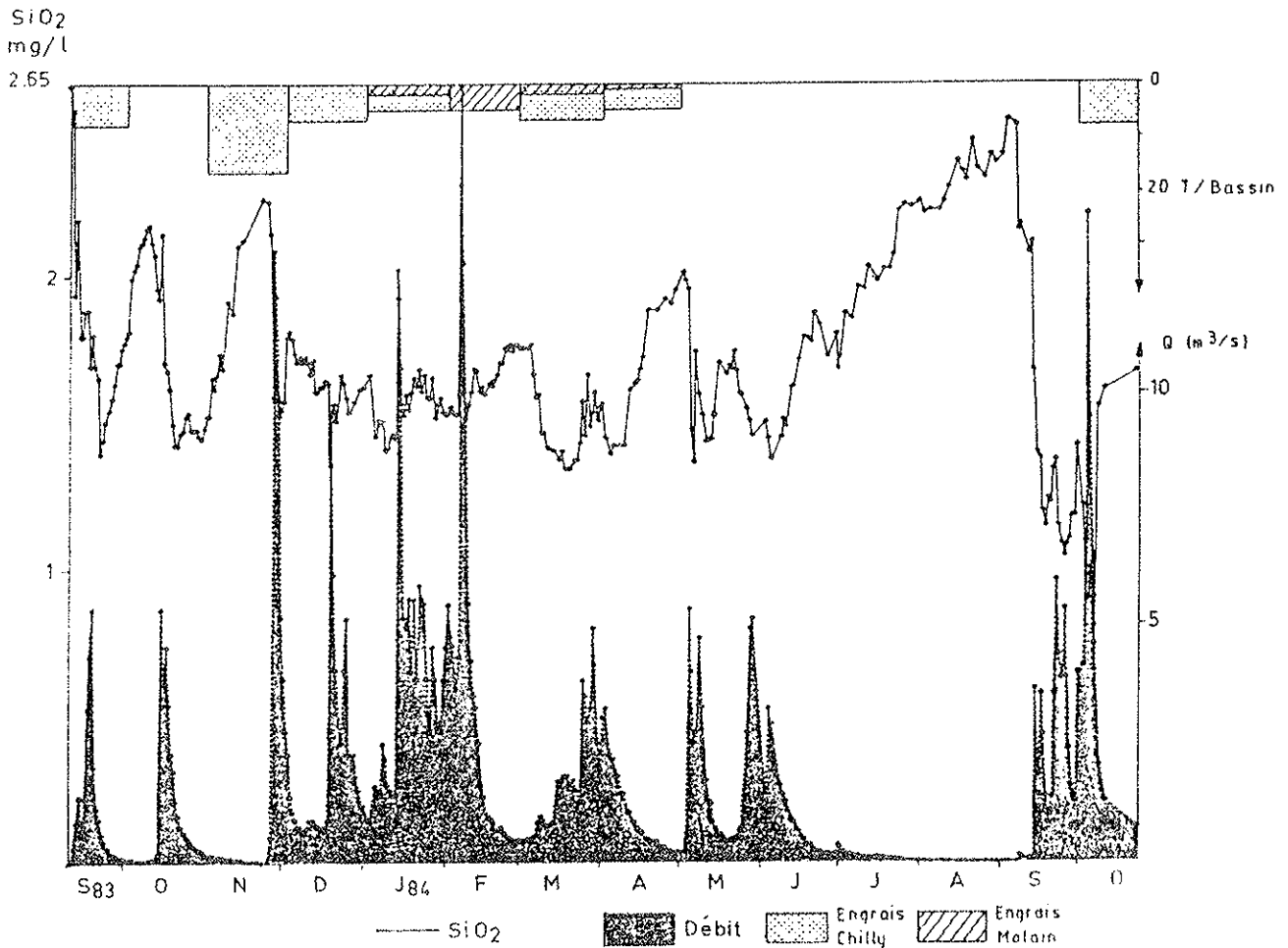


Fig.40 - Evolution de la Silice. (301 valeurs).





b). La silice (fig. 40)

Elle suit la même évolution que le magnésium avec toutefois deux différences : la première met en évidence une répartition plus étalée de l'histogramme de fréquence (fig. 38) signifiant que les dilutions sont moins accentuées que pour le magnésium ; la seconde montre que pour des crues dont les débits dépassent 10 m<sup>3</sup>/s, il y a d'abord une dilution suivie d'un pic de concentration (son importance dépend du débit), mais aussi une concentration plus importante au cours des crues successives de Mars 1984 (fig. 40) après une période d'épandage agricole, d'où un coefficient de corrélation (SiO<sub>2</sub> - Q) inférieur à celui de Mg<sup>++</sup> (r = -0,586). Ceci signifie que la silice, comme le magnésium pourrait avoir une origine matricielle à certaines périodes (présence de rognons de silex dans les calcaires, mais peu solubles) mais également une origine de lixiviation de la zone non saturée et plus particulièrement dans les sols et les argiles.

c). Les bicarbonates (fig. 42)

Ils représentent environ 70 % de la minéralisation et suivent une évolution proche du magnésium avec un coefficient de corrélation (concentration débits r = -0,443). Cependant l'augmentation de la concentration lors des étiages est faible, l'eau étant à saturation. Tandis que les dilutions pendant les crues sont beaucoup plus importantes. L'apport d'eaux d'origine météorique, entraînant de nombreuses crues pendant l'hiver 1984, provoque une diminution sensible des concentrations.

d). Le calcium (fig. 43), comme les bicarbonates, subit de fortes dilutions en période de crue et pendant l'hiver 1984. Au cours de l'étiage d'été, une certaine stabilité des concentrations apparaît accompagnée de quelques irrégularités mais nous ne retrouvons pas de croissance de la concentration comparable à celle du magnésium pour les mêmes raisons que les bicarbonates.

Les histogrammes de fréquence du calcium et des bicarbonates révèlent une répartition gaussienne nette pour le premier, dont la fréquence la plus représentée (88 à 90 mg/l) correspond aux eaux d'étiage alors que les dilutions et fortes concentrations s'équilibrent : La répartition est plus étalée pour les bicarbonates. (fig. 41).

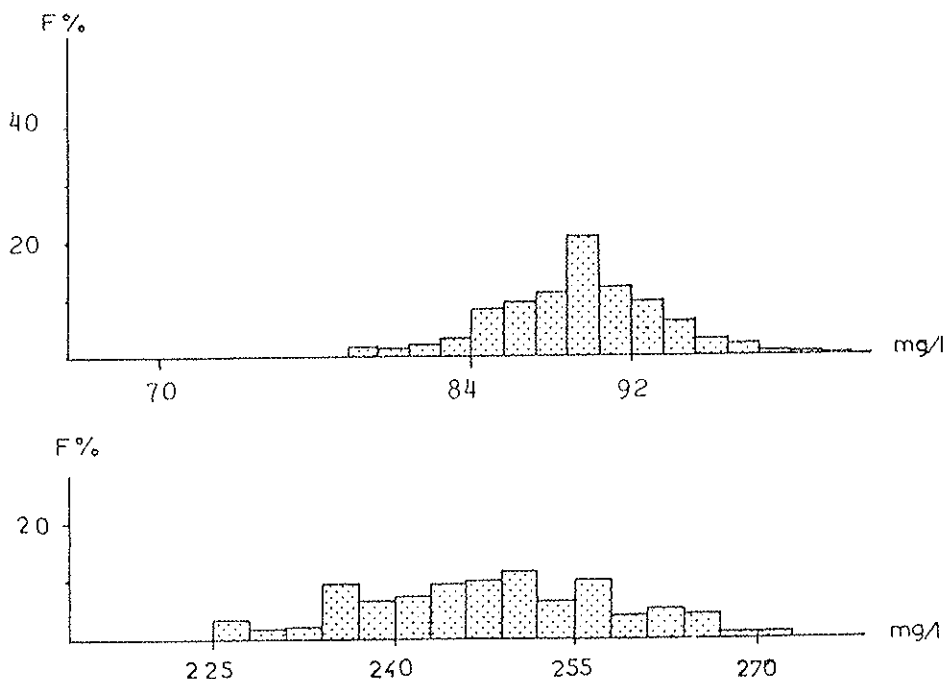


Fig. 41 - Histogrammes de fréquence des ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (en bas) et Ca<sup>++</sup> (en haut)

Fig.42 . Evolution de l'ion bicarbonate. (301 valeurs.)

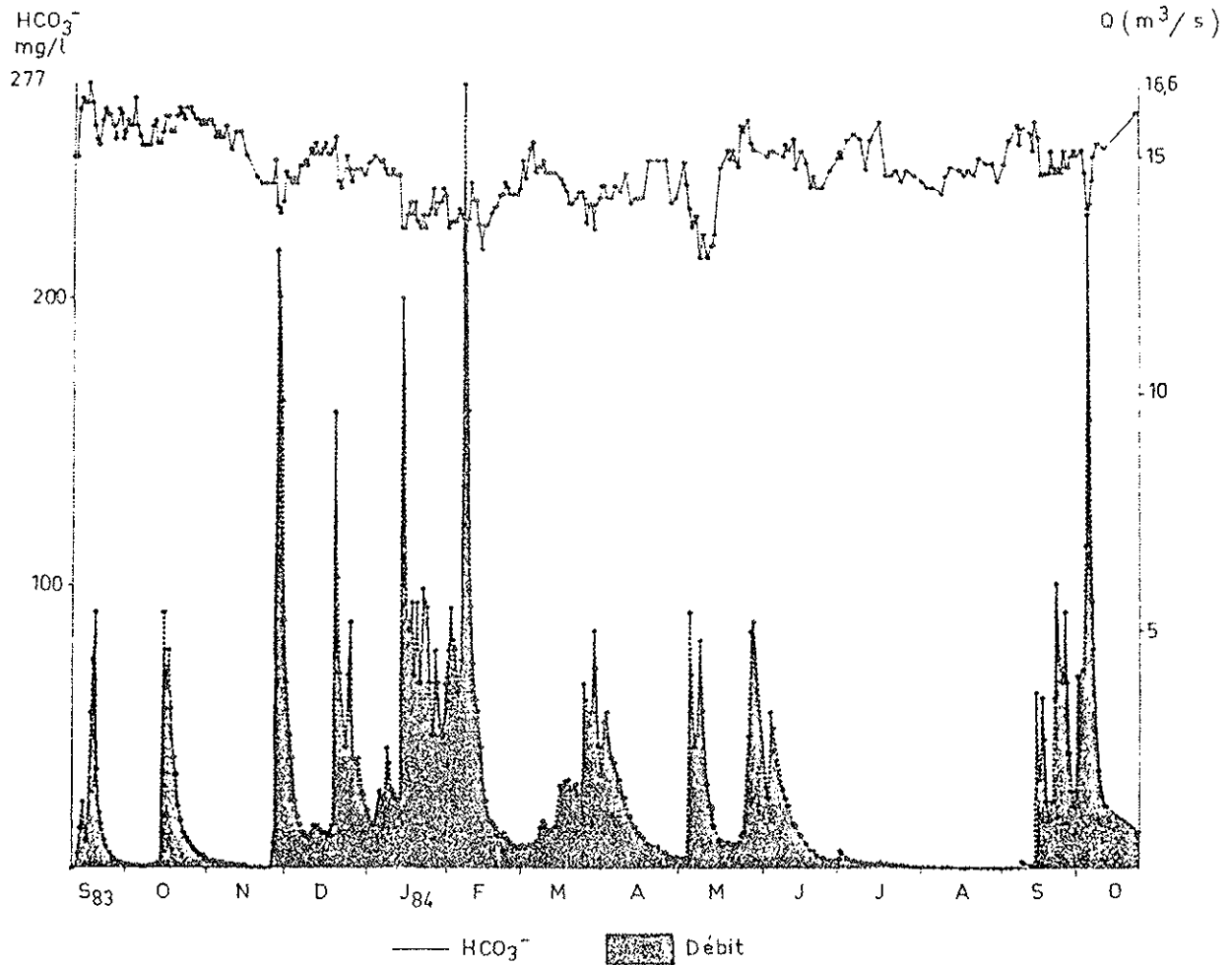
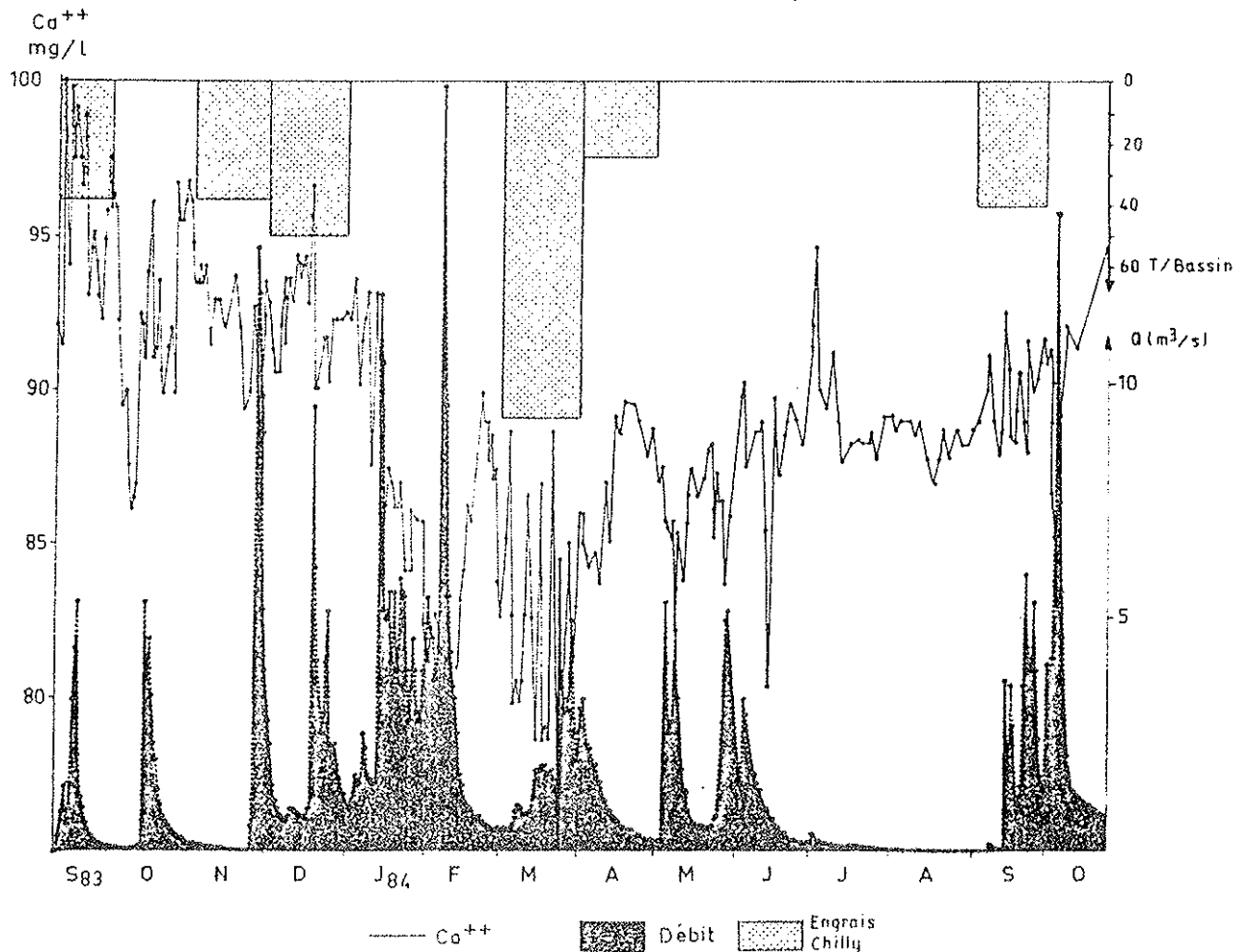


Fig.43 . Evolution de l'ion calcium. (301 valeurs.)



e) Le potassium (fig. 45)

Il présente un comportement apparemment similaire à ceux du magnésium et de la silice avec toutefois un coefficient de corrélation (concentration - débit) plus faible ( $r = -0,328$ ). En effet dans la figure 45, l'accroissement de la concentration lors de l'étiage de l'été 1984 est spectaculaire mais il dissimule une augmentation de la concentration plus faible pendant les petits tarissements. Ce qui renchérit l'histogramme des fréquences où les faibles concentrations sont largement plus nombreuses apparaissent (fig. 44).

Un certain nombre de pics apparaît aussi bien en hiver qu'en été, il est intéressant de constater qu'ils correspondent à des pics observés sur la courbe des chlorures (fig. 49) et parfois des phosphates (fig. 51).

Les épandages d'engrais riches en potassium (histogramme de la fig. 44) ne semblent pas avoir de répercussion immédiate au niveau des eaux de sources. En effet la majeure partie du potassium épandu est consommée au niveau du cycle biologique des horizons de surface, mais cet ion très soluble peut migrer et être échangé dans les minéraux argileux et la matière organique.

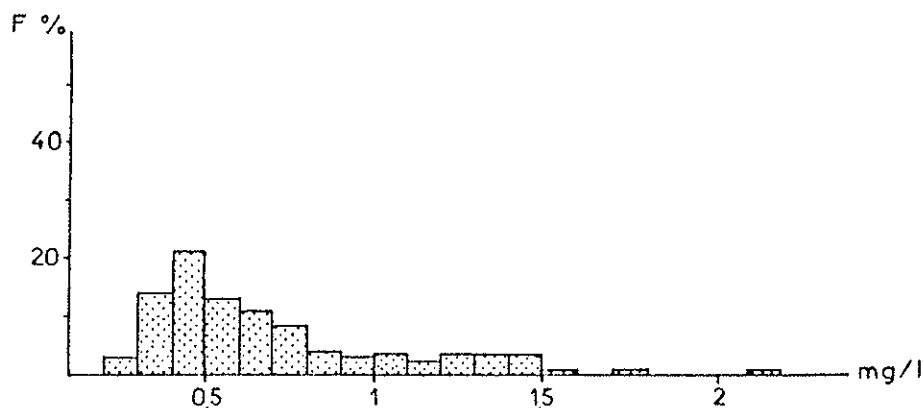


Fig. 44 - Histogramme de fréquence du potassium

f) Le sodium (fig. 46)

La tendance générale montre une diminution de la concentration après les premières crues d'automne et jusqu'à la fin du printemps. L'apparition d'un pic en Mars correspond à un pic de chlorure intervenant après un épisode neigeux sur le plateau accompagné d'un salage des routes fin février 1984. Au cours de l'étiage 1984, comme pour de nombreux éléments, on constate une augmentation régulière de la concentration sur laquelle nous reviendrons dans le paragraphe suivant.

2). ELEMENTS LIES A DES VARIATIONS SAISONNIERES

Représentés essentiellement par les nitrates et les chlorures, ils montrent des variations dépendantes des débits élevés comme la plupart des éléments chimiques ; mais surtout une évolution reproductible d'un cycle à un autre.

a). Les nitrates (fig. 48)

Ils sont l'objet de nombreuses fluctuations avec cependant une tendance générale qui met en évidence une baisse de la concentration de cet ion au

Fig.45 Evolution de l'ion potassium. (301 valeurs.)

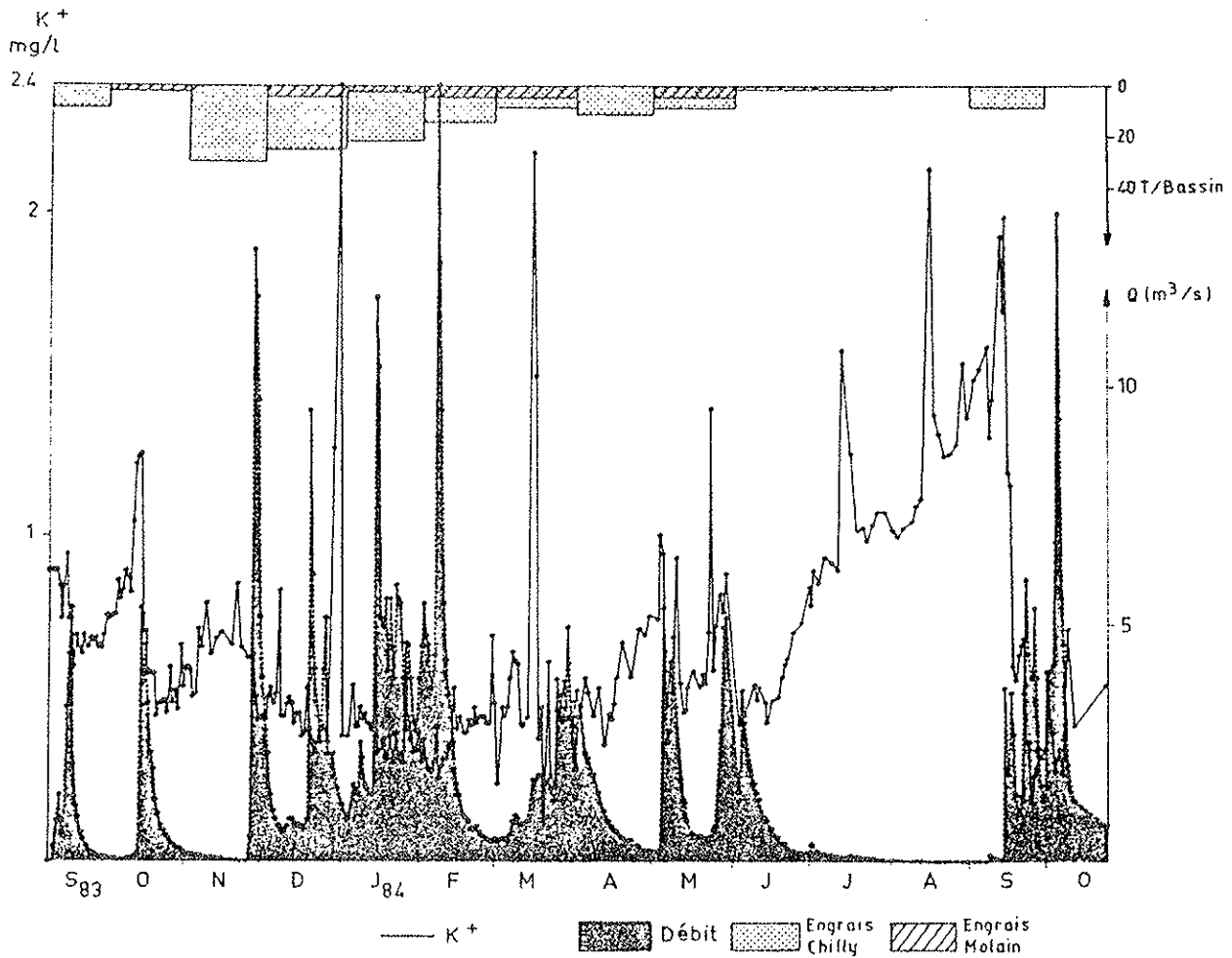
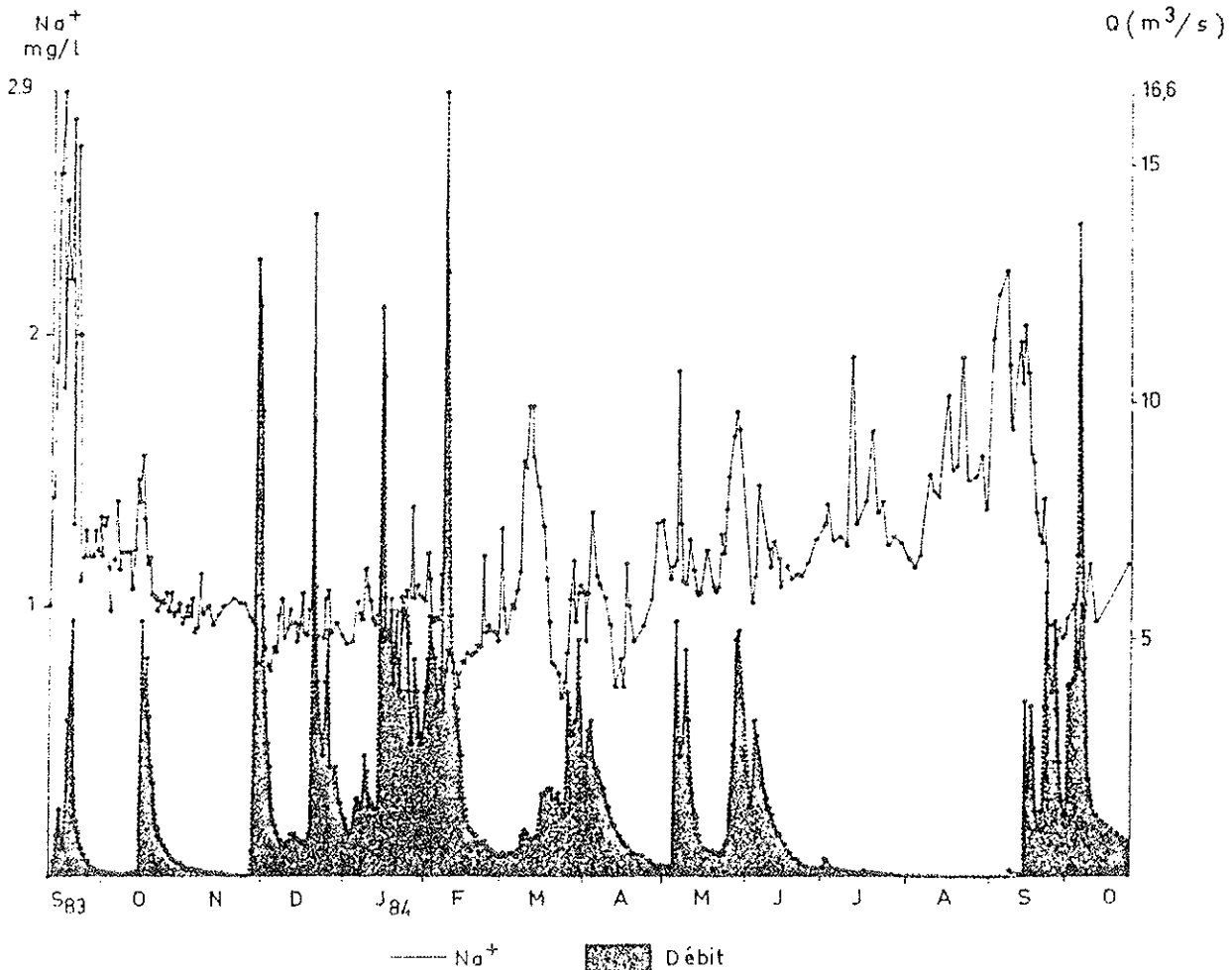


Fig. 46 Evolution de l'ion sodium. (301 valeurs.)



printemps ; une première augmentation en début d'automne avec les premières crues et une seconde en fin d'automne (Décembre). Une courbe lissée (moyenne glissante sur 9 valeurs) souligne mieux cette évolution (fig. 47) avec :

- 1 - un pic de nitrates reproductible d'un cycle à l'autre, qui intervient en fin d'été avec une augmentation progressive de la concentration ; il voit son paroxysme atteint dès la première crue.

- 2 - Un pic de nitrates (dont nous ignorons la reproductibilité) intervient en fin d'automne lors de crues importantes. Cet azote provient d'un lessivage des engrais épandus en automne et non encore utilisés par la végétation (cf. fig. 48). Il se produit à chaque crue au cours de cette période.

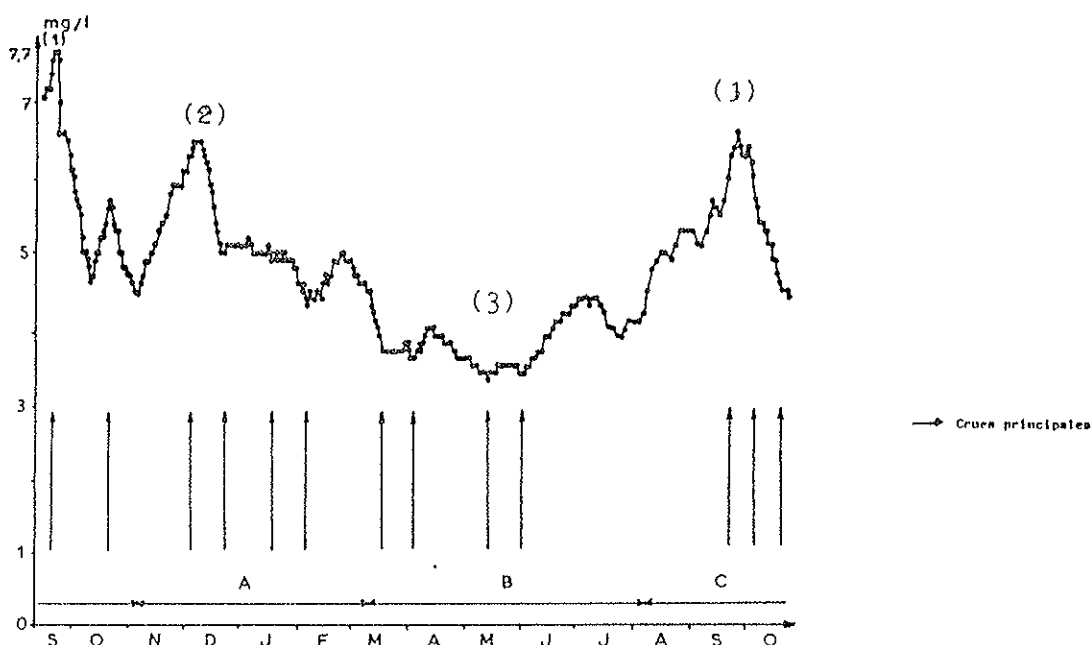


Fig. 47 - Courbe lissée de l'ion nitrate

- 3 - Une baisse sensible de la concentration s'amorce dès la fin de l'hiver et s'accroît jusqu'au printemps au cours duquel l'azote est fortement consommé par la végétation en pleine croissance. Au cours de cette période, les crues ne provoquent plus une augmentation de la concentration mais une dilution.

Les nitrates présentent donc une évolution que nous appellerons cyclique à tort car nous sommes dans l'impossibilité de reproduire ce cycle (en raison de la courte durée du suivi, hormis le début). Nous observons une période de lessivage des engrais mais également de l'azote stocké dans les sols (A), puis une consommation par les plantes (B) et enfin une nouvelle minéralisation (C) due au ralentissement de la végétation. Nous reviendrons sur cette dernière phase (C) dans le paragraphe suivant.

#### b). Les chlorures (fig. 49)

La présence de très nombreux pics, nous a contraints à établir une courbe lissée (fig. 50) qui fait ressortir quatre phases :

-1- Deux pics de chlorures apparaissent après une période d'épandages agricoles (janvier-février) et routiers bien que ces derniers soient peu abondants. L'ion chlorure étant très soluble, il se retrouve rapidement dans le karst, comme l'ont déjà montré certains auteurs (P. CHAUVÉ, J. MANIA et al. 1982 ...)

Fig. 48. Evolution de l'ion nitrate. (301 valeurs).

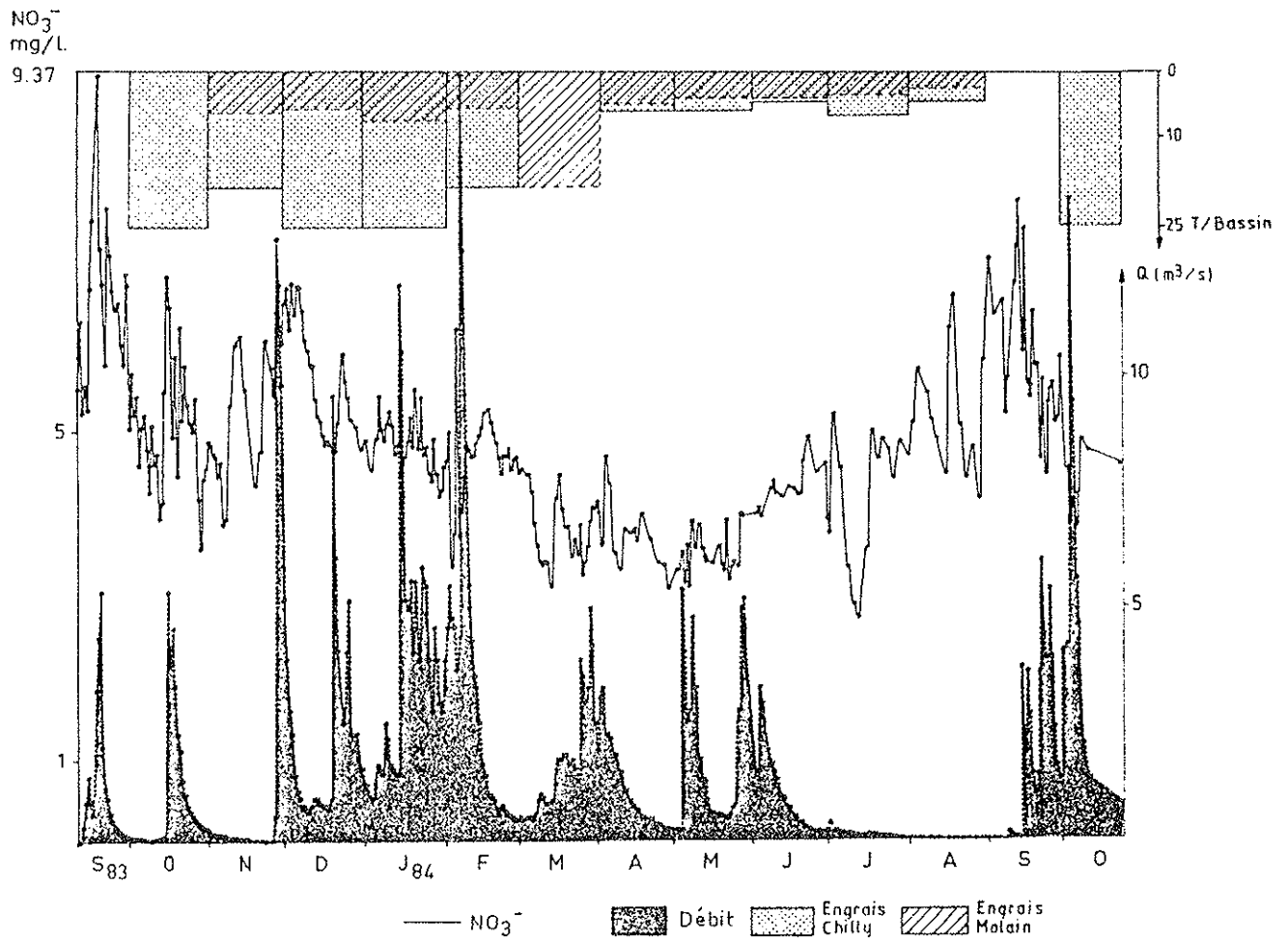
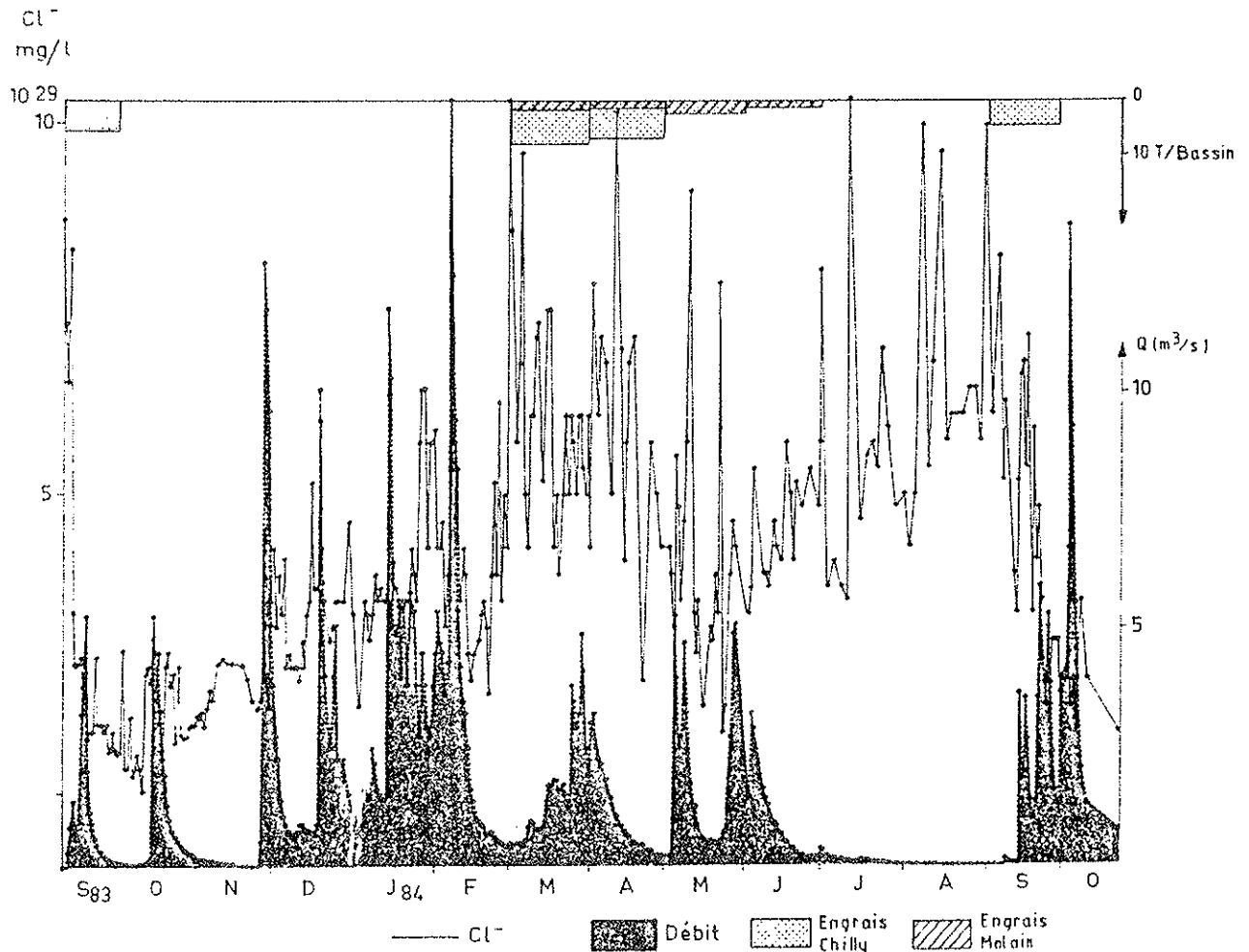


Fig. 49 - Evolution de l'ion chlorure. (301 valeurs).



-2- Un pic en septembre termine une augmentation de la concentration lors des étiages d'été, nous y reviendrons dans le paragraphe suivant.

-3- Les chlorures ayant été lessivés au cours des premières crues d'automne et aucun épandage n'ayant lieu, une dilution sensible apparaît.

-4- Le même phénomène de dilution se reproduit en automne.

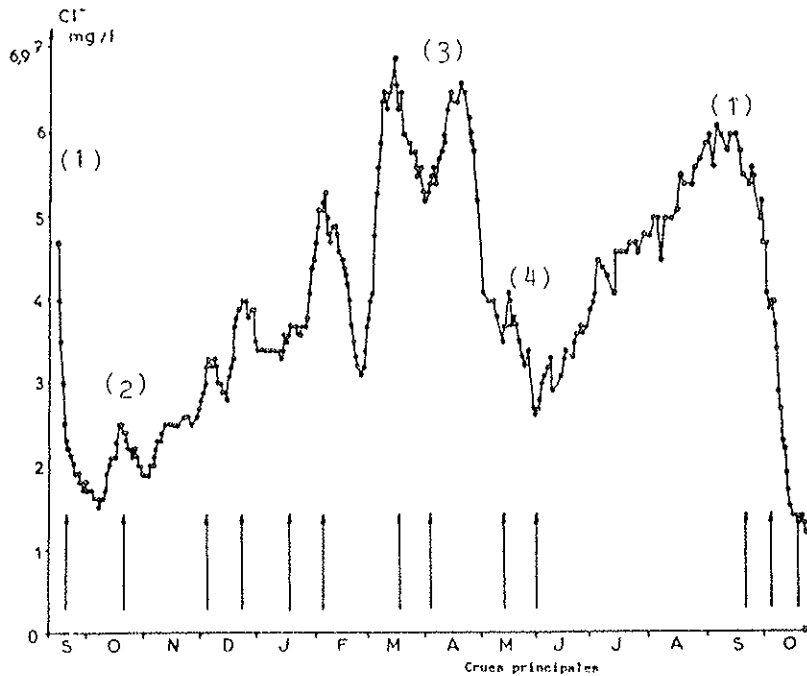


Fig. 50 - Courbe lissée de l'ion chlorure.

Nous n'interpréterons pas les dilutions ou concentrations pour chaque crue en raison de la présence de nombreuses fluctuations, gênantes pour l'interprétation.

### 3). ELEMENTS INDEPENDANTS DES DEBITS ET DES VARIATIONS SAISONNIERES

Deux éléments appartiennent à ce groupe ( $\text{PO}_4^{---}$ ,  $\text{SO}_4^{---}$ ), mais un seul présente une totale indépendance vis à vis des débits et des variations saisonnières : le phosphate .

#### a). Les phosphates : fig. 51

Evolution par pics plus ou moins irréguliers, indépendants des débits. Il faut toutefois remarquer qu'à quelques exceptions près le début des montées de crues s'accompagne d'une augmentation de concentration due probablement à un nettoyage des conduits karstiques dans lesquels passent les eaux usées. En effet ces phosphates ont pour origine essentielle les eaux usées de concentration irrégulière selon les usages (lessives par exemple) responsables des pics de concentration ; les épandages d'engrais riches en complexe argilo-humique et les périodes d'épandages.

#### b). Les sulfates : fig. 52

Présentent un accroissement de la concentration à chaque crue mais également une irrégularité pour les concentrations les plus faibles. Nous les attribuons à des erreurs d'analyses. Pour cette raison nous n'interprétons pas l'évolution

Fig.51 . Evolution de l'ion phosphate. (301 valeurs.)

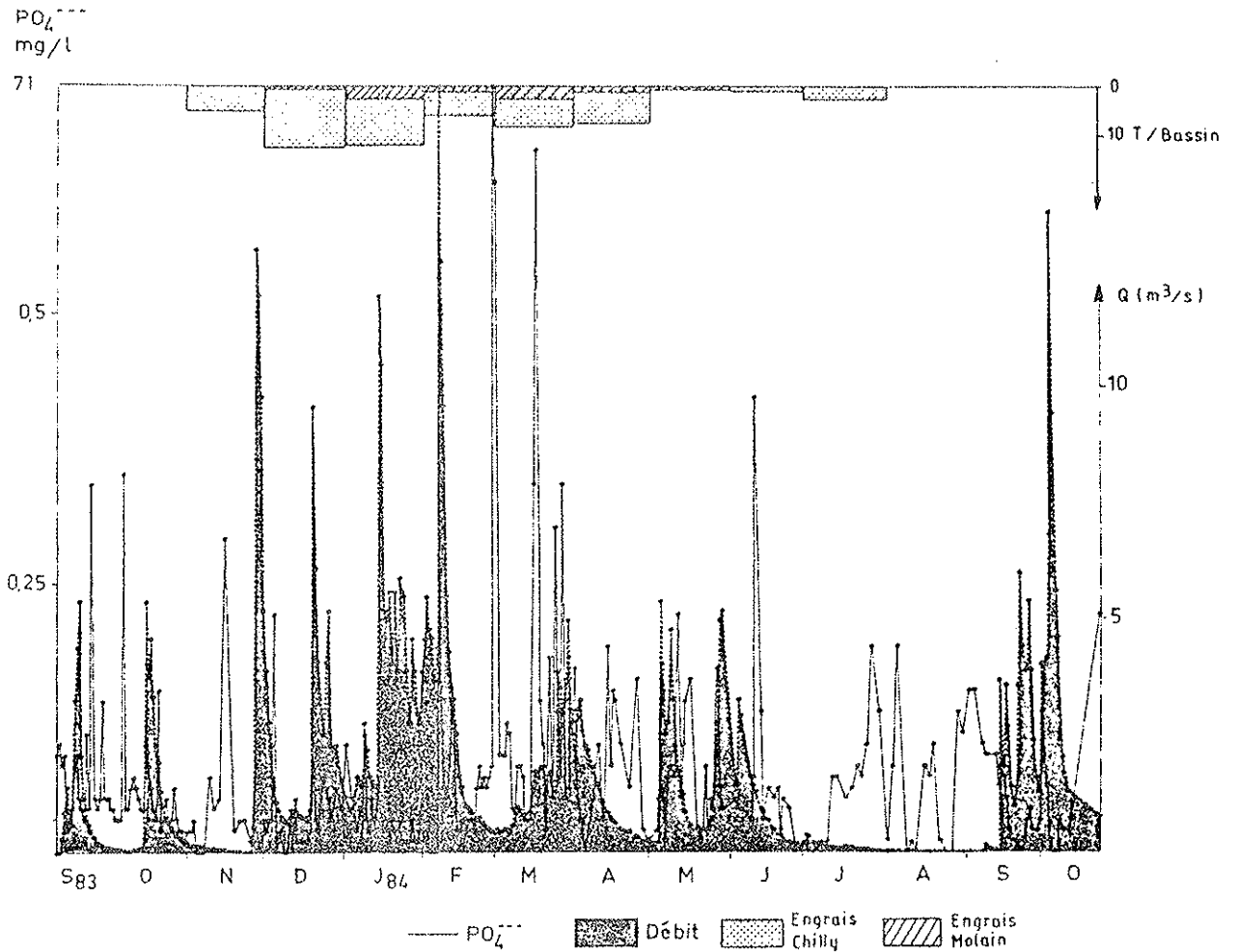
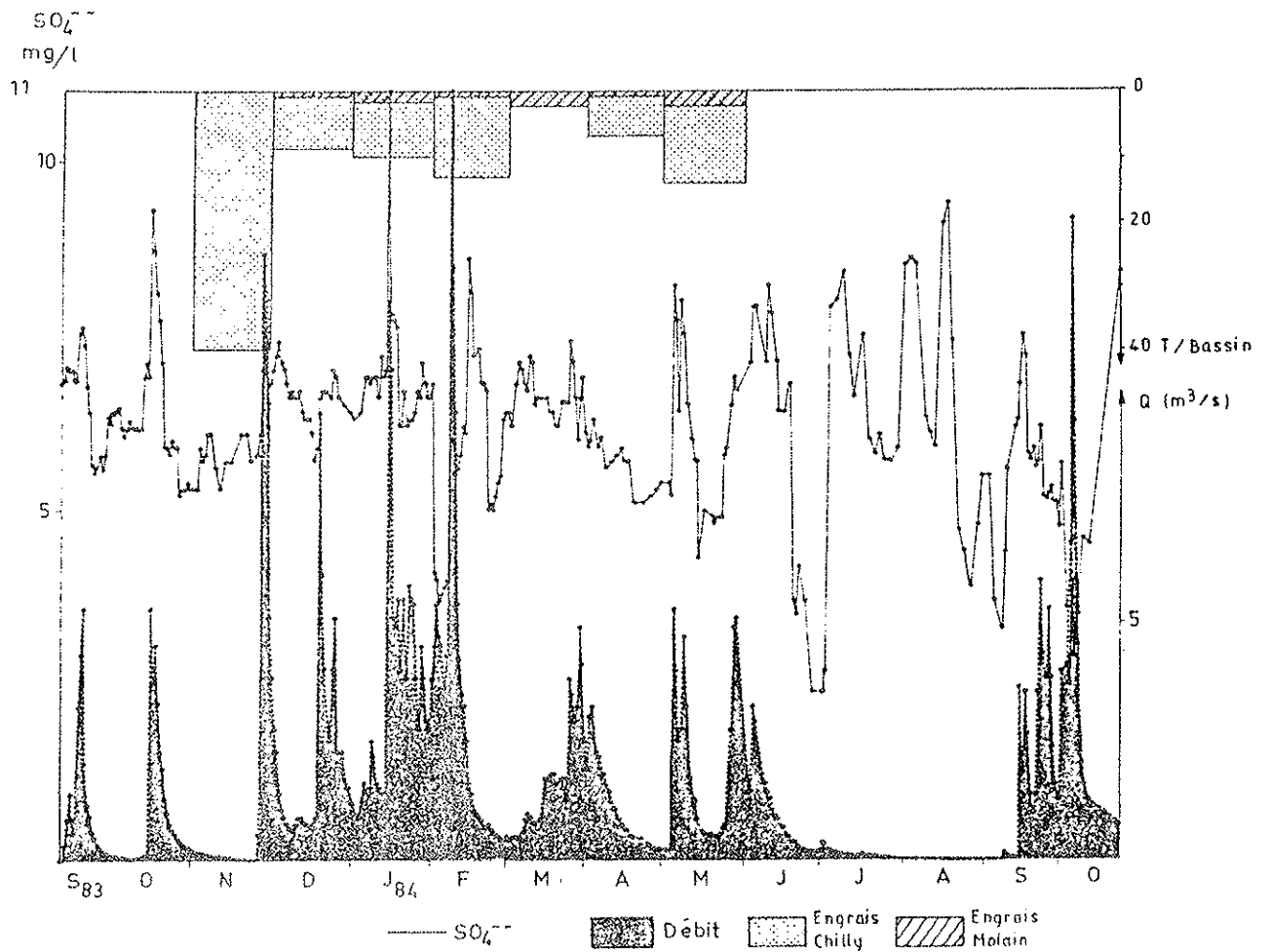


Fig.52 . Evolution de l'ion sulfate. (301 valeurs.)





des sulfates au cours de l'été 1984. Cependant il y a une légère augmentation des concentrations en hiver et au début du printemps pendant et après des périodes d'épandages.

## II - TRAITEMENT STATISTIQUE DES RESULTATS DU SUIVI (cycle 1983-1984)

Le traitement des nombreuses données chimiques du cycle hydrologique 1983-84 a nécessité l'utilisation de méthodes statistiques. Nous en avons retenu deux : l'analyse des corrélations et l'analyse en composantes principales. Elles ne permettent pas d'interpréter des phénomènes, mais d'avancer des hypothèses, d'autant plus que nous traitons ici toutes les données. Ceci ne représente qu'une tendance et certains éléments peuvent en dissimuler d'autres.

### 1). CORRELATIONS

Etablies d'après les résultats obtenus à l'exutoire, elles sont peu significatives des espèces chimiques (ou de leurs associations) présentes dans le karst puisque de nombreux facteurs interviennent. Cependant elles laissent entrevoir les meilleures associations possibles.

Dans la matrice de corrélation (tableau 31), nous avons retenu les éléments corrélés deux à deux dont le coefficient de corrélation  $r$  est significatif ( $r = 0,2$  d'après A.MANGIN, (1974), voir tabl. 55 annexe II), mais nous avons retenu la valeur de  $0,3$  afin de nous accorder une marge de sécurité plus importante.

D'après les résultats de ces corrélations, nous pouvons proposer quelques associations préférentielles (comme l'a fait J.J. MISEREZ, 1972).

$Ca^{++}, HCO_3^-$	$r = 0,687$	$Ca^{++}, Cl^-$	$r = 0,399$
$Ca^{++}, NO_3^-$	$r = 0,509$	$Na^+, HCO_3^-$	$r = 0,39$
$Mg^{++}, HCO_3^-$	$r = 0,453$	$Na^+, Cl^-$	$r = 0,345$

La plupart des cations bien corrélés avec l'ion bicarbonate représentent probablement des associations complexes au niveau de la matrice.

La silice corrélable avec  $Mg^{++}$  ;  $K^+$  ;  $Na^+$  mais pas avec  $Ca^{++}$  peut avoir deux origines essentielles, comme nous l'avons déjà remarqué : l'apport de silice par la matrice (rogons de silex) mais elle est alors pratiquement insoluble et la présence de minéraux silicatés nombreux dans les argiles de Chilly sur Salins.

	Q	Cond	pH	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>
Q	1														
Cond	-0,177	1													
pH	0,112	-0,282	1												
Cl <sup>-</sup>	-0,02	-0,297	-0,213	1											
PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	-0,06	-0,07	0,02	0,239	1										
SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	0,09	0,05	-0,05	3,7.10 <sup>-3</sup>	0,125	1									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,483	0,342	-0,21	-0,318	-0,03	-0,01	1								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,02	0,223	0,206	-0,238	-0,06	0,159	0,34	1							
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>									1						
Ca <sup>++</sup>	-0,306	0,359	-0,206	-0,399	-0,159	3,3.10 <sup>-3</sup>	0,687	0,509		1					
Mg <sup>++</sup>	-0,743*	0,04	-0,05	0,183	0,07	-0,01	0,453	0,231		0,325	1				
Na <sup>+</sup>	-0,165	-0,162	0,05	0,345	0,02*	0,02	0,211	0,01		0,116	0,358	1			
K <sup>+</sup>	-0,328*	-0,109	0,07	0,27	0,175	0,175	0,296	0,189		0,169	0,704	0,402	1		
Fe <sub>T</sub>														1	
SiO <sub>2</sub>	-0,586*	-0,09	-0,70	0,202	0,106	0,145	0,147	0,18		0,138	0,777	0,281	0,587		1

\* Corrélation Exponentielle

Tabl. 31 - Matrice de corrélations - La Cuisance - Grotte des Planches (301 valeurs).

Coefficient significatif pour une valeur de  $r = 0,22$

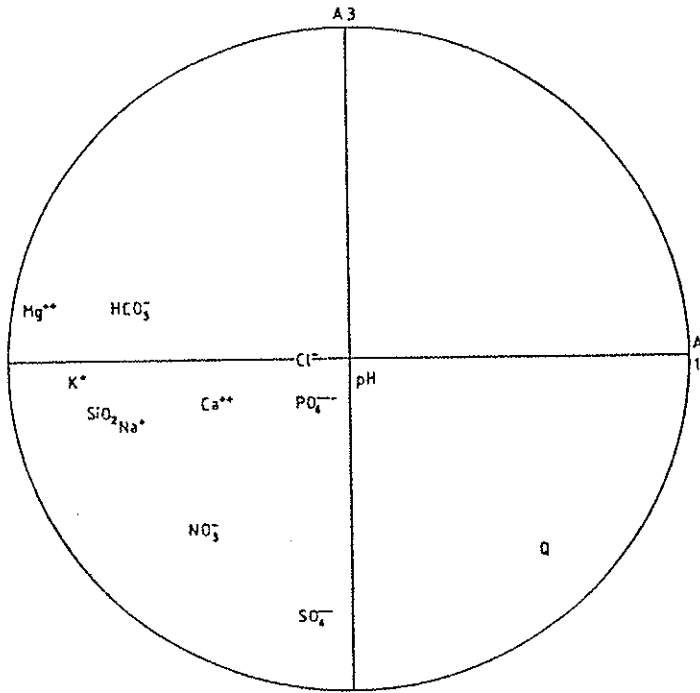


Fig. 53  
Projection des variables

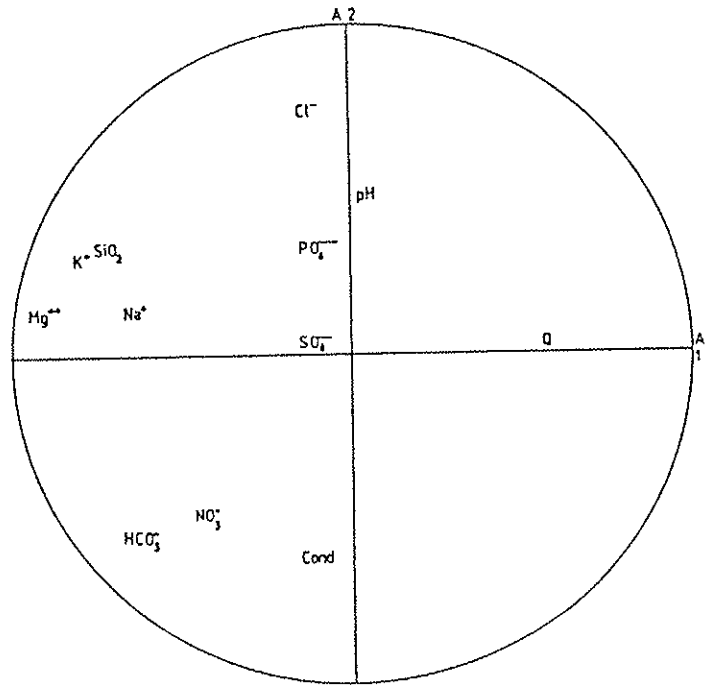


Fig. 54  
Projection des variables

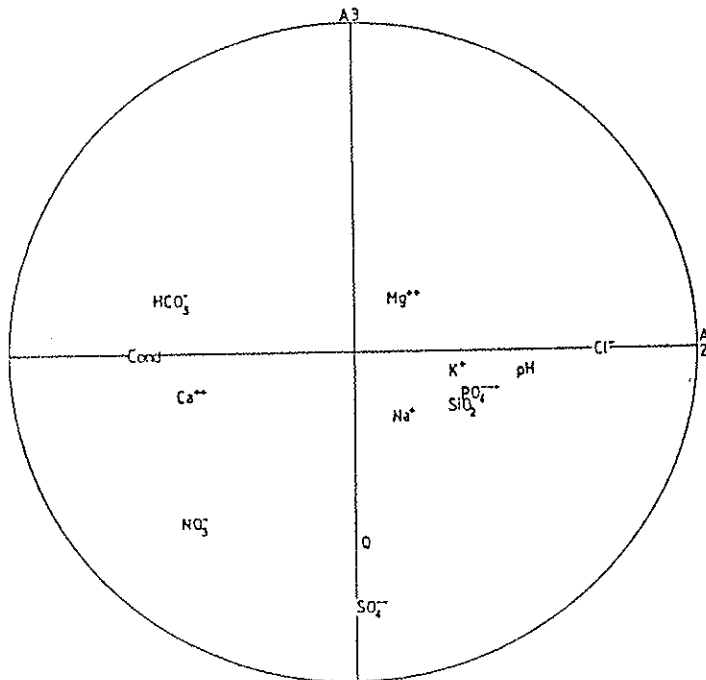


Fig. 55 - Projection des variables

Les nitrates associés au calcium peuvent également avoir plusieurs origines : un entrainement partiel de  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{NO}_3^-$  des sols, une évolution au niveau du karst noyé (J.J. MISEREZ 1972), ou un apport extérieur dû aux eaux usées par exemple.

La majeure partie du calcium appartient à la matrice puisque les eaux en sont saturées, de même pour les bicarbonates.

Le chimisme le plus rapidement acquis est, dans l'ordre décroissant :  $\text{K}^+$  ;  $\text{Na}^+$  ;  $\text{Cl}^-$  ;  $\text{SiO}_2$  et le plus lentement :  $\text{Mg}^{++}$

## 2). ANALYSE FACTORIELLE

Utilisée par de nombreux auteurs (M. BAKALOWICZ 1979, L. KIRALY et al. 1979, P. CHAUVE, J. MANIA et al 1983, P. MUET 1985...), elle synthétise le maximum d'informations mais comme précédemment ne permet que l'émission d'hypothèses.

L'analyse factorielle effectuée pour le cycle 1983-84 à la source de la Grotte des Planches, regroupe l'ensemble des valeurs. Les figures 53, 54, 55 visualisent la projection des variables dans les plans  $A_1-A_3$  ;  $A_1-A_2$  ;  $A_2-A_3$ . Le facteur  $A_1$  représente 26,4 % de la variance et oppose  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$  ;  $\text{Na}^+$  d'une part et  $\text{HCO}_3^-$  ;  $\text{NO}_3^-$  ;  $\text{Ca}^{++}$  d'autre part aux débits. La répartition des individus (fig. 56), oppose les étiages, aux crues d'hiver. Cet axe peut donc représenter le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère donc la vitesse d'acquisition du chimisme des eaux. Ainsi  $\text{Mg}^{++}$  serait acquis plus lentement que  $\text{K}^+$  ;  $\text{Na}^+$  ;  $\text{SiO}_2$  ;  $\text{NO}_3^-$  ;  $\text{SO}_4^{--}$

Le facteur  $A_2$  représente 17,3 % de la variance et oppose  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$  ; cond. (conductivité) ;  $\text{NO}_3^-$ , à  $\text{Cl}^-$  ; pH ;  $\text{PO}_4^{--}$ . La répartition des individus (fig. 56) opposerait les crues d'hiver à celles d'automne. Cet axe pourrait représenter des effets de dilution plus élevés en hiver qu'en automne.

Le facteur  $A_3$  représente 10 % de la variance et oppose  $\text{HCO}_3^-$  ;  $\text{Mg}^{++}$  à  $\text{NO}_3^-$  et au débit, il pourrait représenter l'origine des éléments chimiques vis à vis de la matrice calcaire.

Ces analyses confirment ce que nous avons déjà noté dans les paragraphes précédents. Ainsi certains éléments ont pour origine la matrice calcaire, d'autres la zone non saturée et plus particulièrement les sols, d'autres enfin des apports anthropiques.

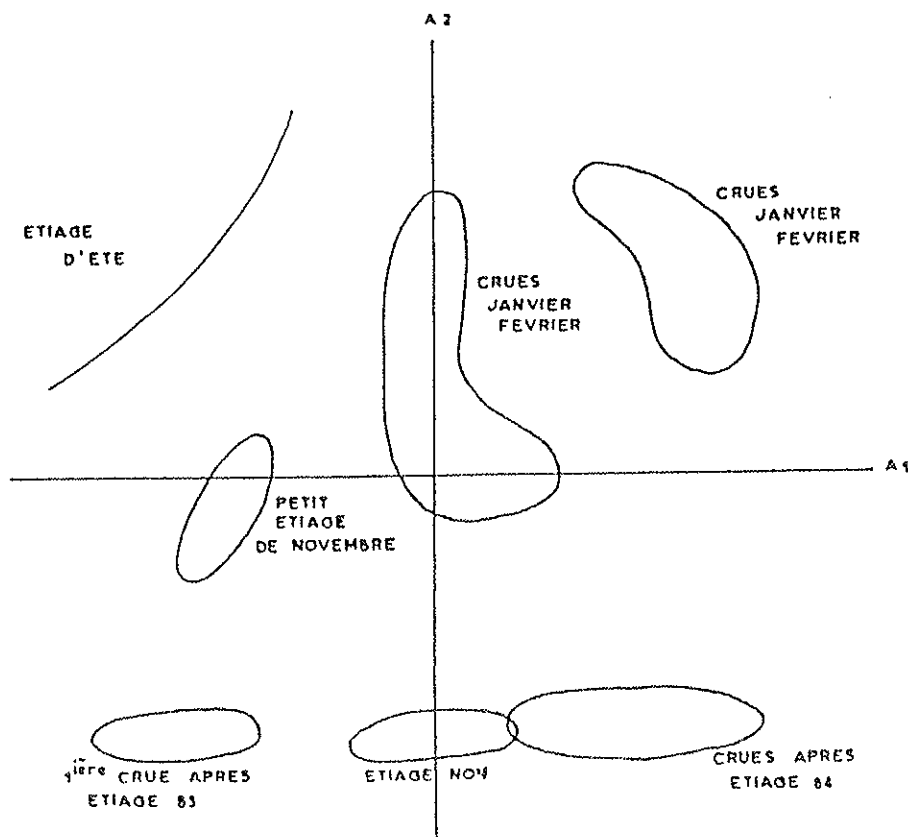


Fig. 56 - Répartition des individus à la Grotte des Planches.

### III - ETUDE DETAILLEE D'EPISODES PARTICULIERES DU CYCLE HYDROLOGIQUE 1983-1984

#### 1). ETUDE DETAILLEE DE CRUES

Nous étudierons plus particulièrement les crues qui se succèdent après l'étiage estival. Celles-ci faibles au début de cet épisode, vont atteindre des débits de l'ordre de  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la plus importante.

Nous avons suivi quatre éléments chimiques :  $\text{NO}_3^-$  ;  $\text{Mg}^{++}$  ;  $\text{SiO}_2$  et  $\text{K}^+$  pendant ces crues, les figures 57 et 58 visualisent leur comportement.

Lors de la première crue (16 Septembre 1984), les quatre éléments subissent une dilution pendant la montée de crue, suivie d'un pic de concentration qui correspond au pic de crue, et enfin d'une diminution de la concentration pendant la décrue. Ceci est confirmé par les graphes de la figure 59 (méthode utilisée par L. Kiraly et al. 1979 - B. BLAVOUX et J. MUDRY 1983) dans lesquels les points regroupés dans chaque secteur correspondent : (1) aux eaux d'étiage ; (2) à l'arrivée d'eaux météoriques à écoulement rapide qui provoque une forte dilution ; (3) au "nettoyage" des conduits karstiques, c'est le pic de crue et (4) au retour progressif à des concentrations d'étiage pendant la phase de décrue.

Les crues qui succèdent à la précédente ont un débit beaucoup plus important (fig. 58) . La montée de crue se caractérise elle aussi par une légère dilution suivie d'un pic de concentration correspondant au pic de crue mais il est moins important que précédemment en raison du "nettoyage du système" et de la quantité d'eau météorique plus abondante. Enfin la dernière crue provoque des dilutions dont l'importance est proportionnelle aux débits. Aucun pic de concentration n'est donc réellement visible.

#### 2). AUGMENTATION DE LA CONCENTRATION AU COURS DE L'ETIAGE

L'accroissement de la concentration au cours d'un étiage suffisamment prolongé a déjà fait l'objet de nombreuses recherches notamment pour le magnésium, le calcium, qui auraient pour origine une dissolution de la matrice calcaire durant un contact prolongé entre l'eau et la roche (J.J. MISEREZ 1972 ; B. BLAVOUX et J. MUDRY 1983, A. BURGER 1983).

Dans les eaux de la Cuisance, nous constatons le même phénomène pour  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  mais également pour  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , avec une amplitude propre à chaque source. Parmi les ions cités ci-dessus, l'évolution de certains d'entre eux apporte un doute quant à leur seule origine matricielle calcaire. En effet dans ce système karstique, nous avons vu que les eaux usées étaient rejetées directement dans des pertes qui alimentent les sources, de même que les sols et la végétation qu'il supporte peuvent être à l'origine d'apports plus concentrés dans des eaux à circulation lente.

##### a). Influence des eaux usées

Elles entrent dans le karst avec un débit journalier relativement constant ( $\approx 0,24 \text{ l/s}$ ), alors que le débit du cours d'eau diminue régulièrement pendant l'étiage ( $Q$  minimum  $0,70 \text{ l/s}$ ) ce qui dans l'absolu, provoque une augmentation de la concentration.

Mais est-elle suffisante pour entraîner des accroissements de la concentration tels que nous les constatons ? Nous avons donc quantifié l'influence des eaux usées pendant l'étiage (90 jours) pour les quatre éléments dont l'augmentation de la concentration est la plus sensible ( $\text{NO}_3^-$  ;  $\text{K}^+$  ;  $\text{Mg}^{++}$  ;  $\text{SiO}_2$ ), (fig. 60) . La faible concentration des eaux usées en magnésium et silice (voir paragraphe 1, deuxième partie) provoque une augmentation maximum de la concentration de l'ordre de  $0,02 \text{ mg/l}$  pour le premier et de  $0,007 \text{ mg/l}$  pour le second, ce qui n'est pas représentable sur les graphes . Quant aux nitrates et au potassium, les eaux usées en contiennent suffisamment pour provoquer

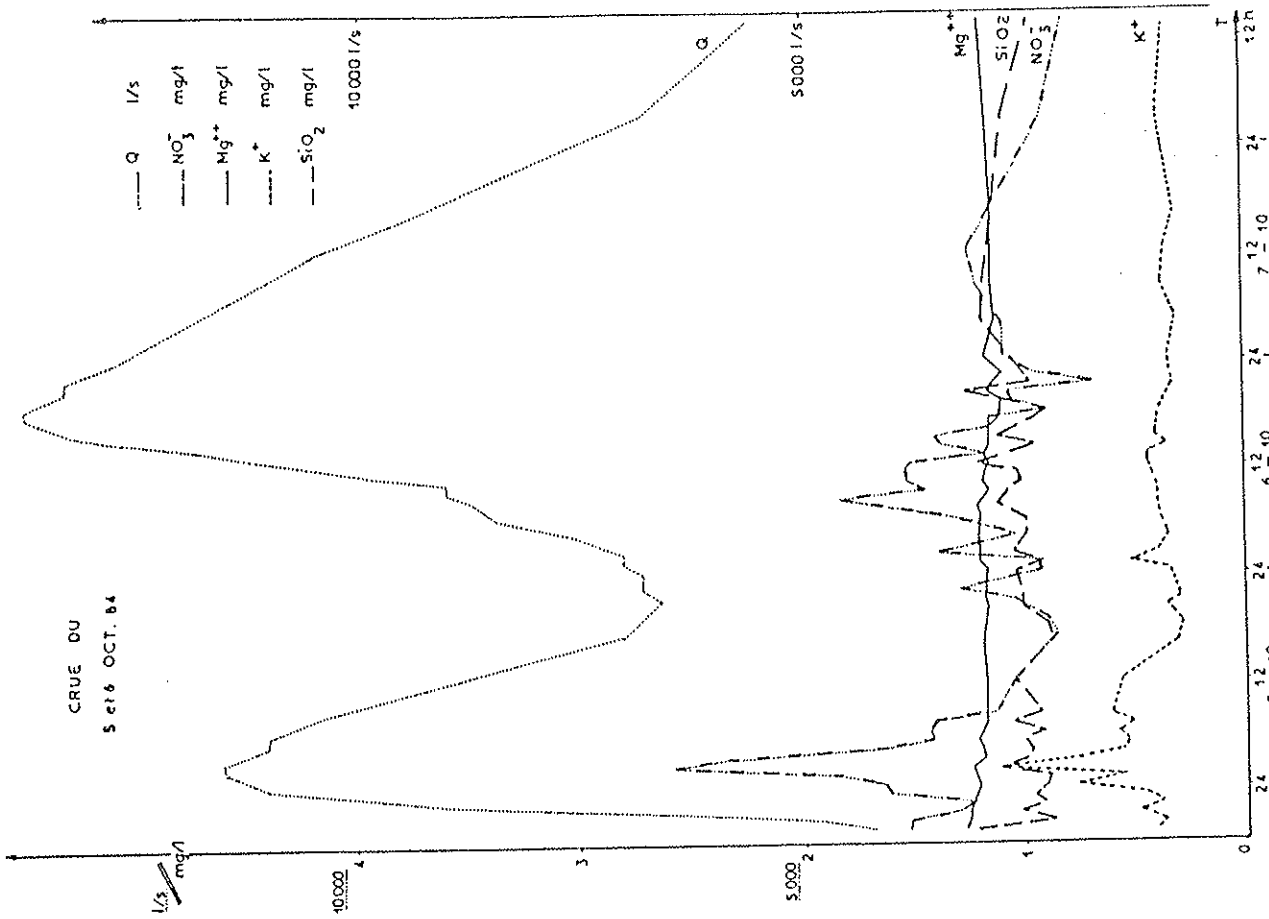


Fig. 58 - Comportement des éléments chimiques au cours de la crue du 5/10/1984 à la Grotte des Planches

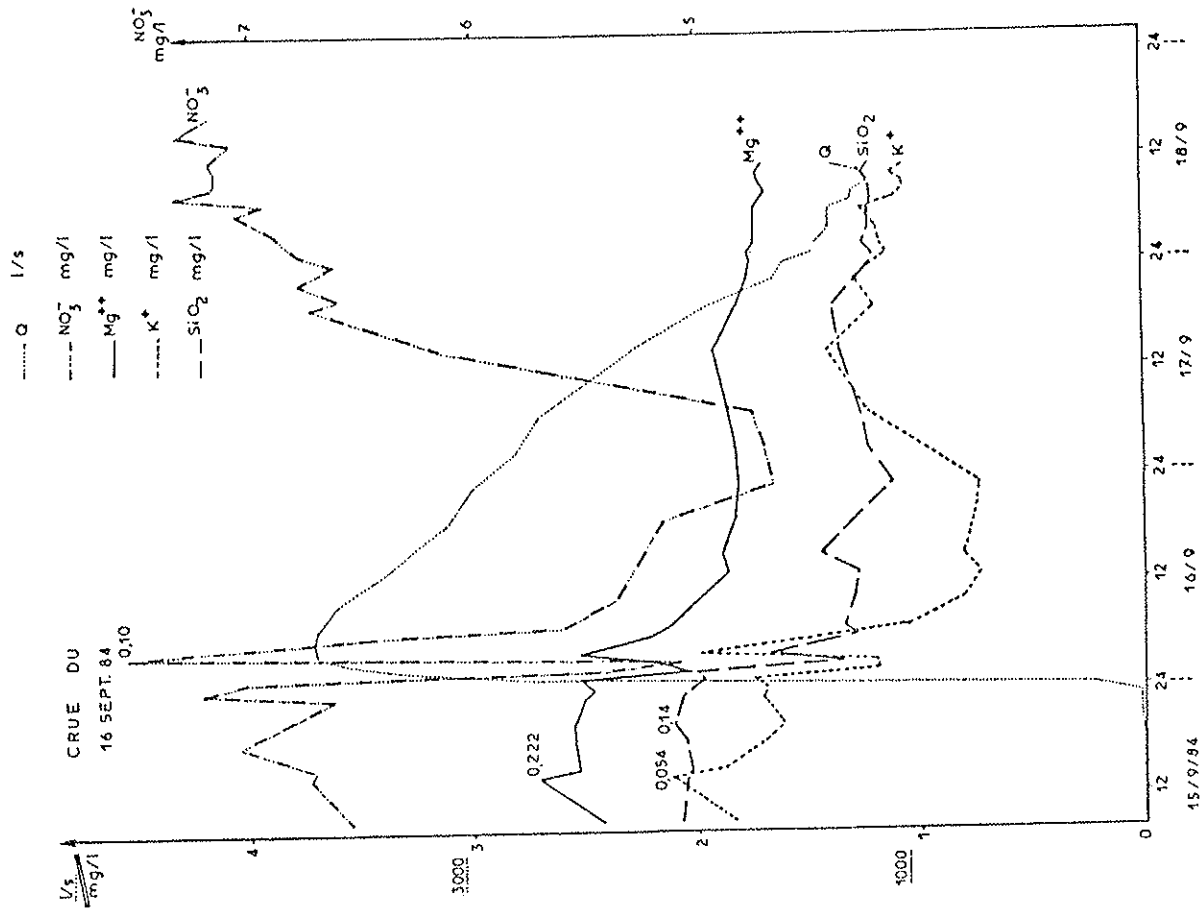


Fig. 57 - Comportement des éléments chimiques au cours de la crue du 16/9/1984 à la Grotte des Planches.

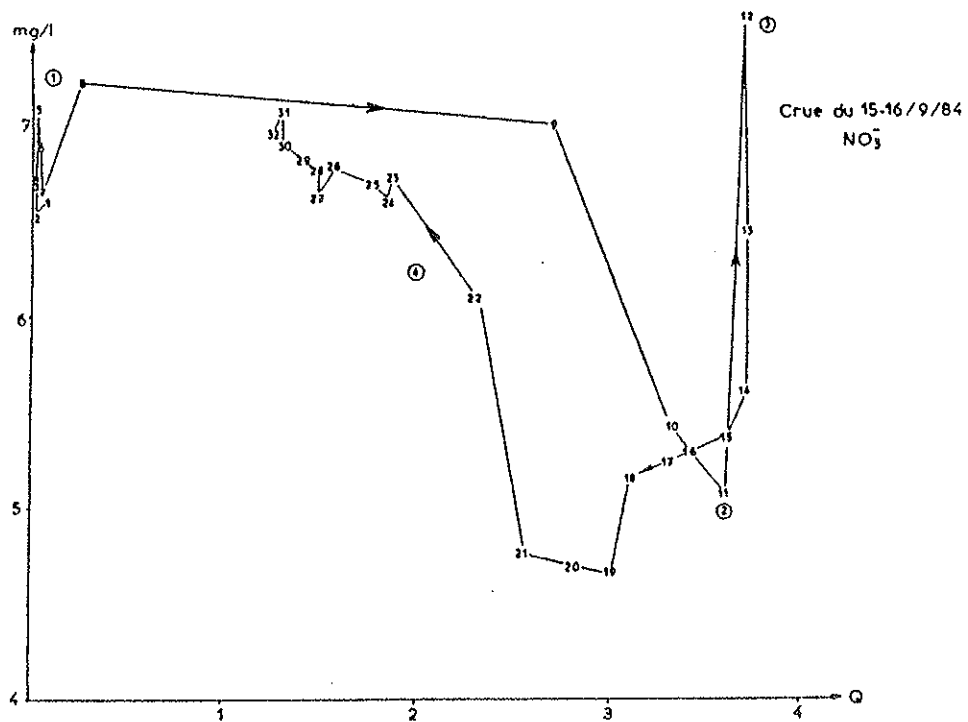
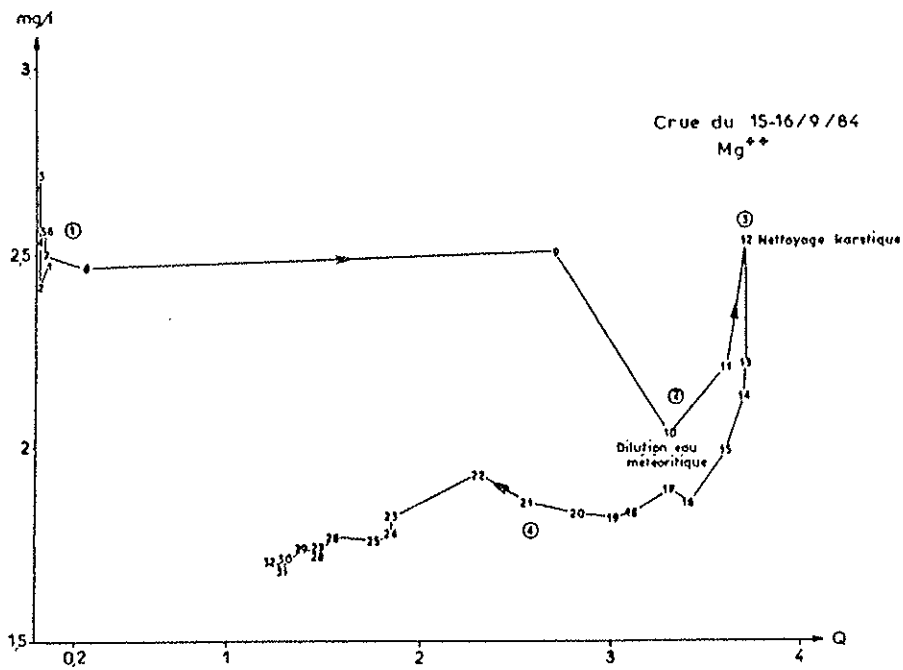
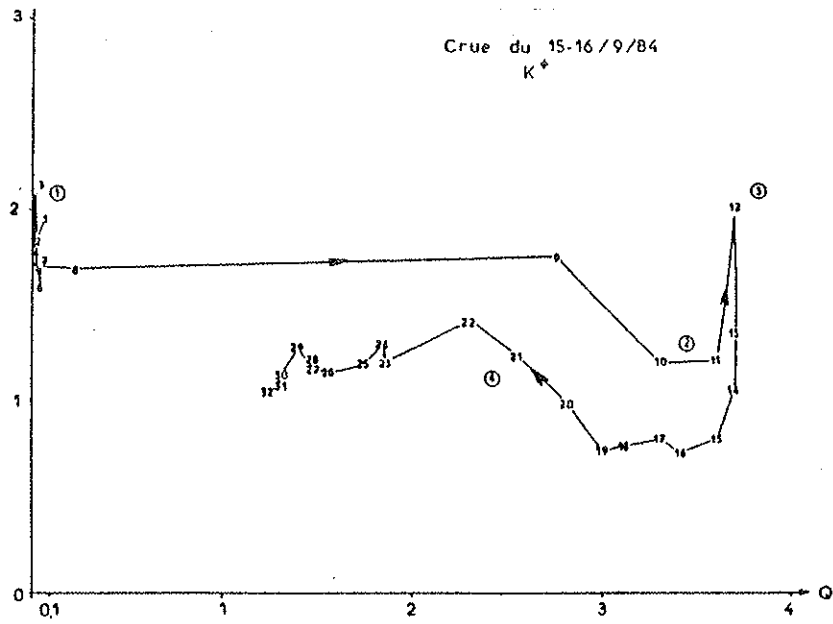


Fig. 59 - Evolution de  $K^+$ ;  $Mg^{++}$  et  $NO_3^-$  au cours d'une crue à la Grotte des Planches.

une augmentation maximale de la concentration en fin d'été, de l'ordre de 0,27 mg/l pour  $\text{NO}_3^-$  et 0,1 mg/l pour  $\text{K}^+$ . Ceci ne suffit pas à justifier la totalité de l'accroissement des concentrations.

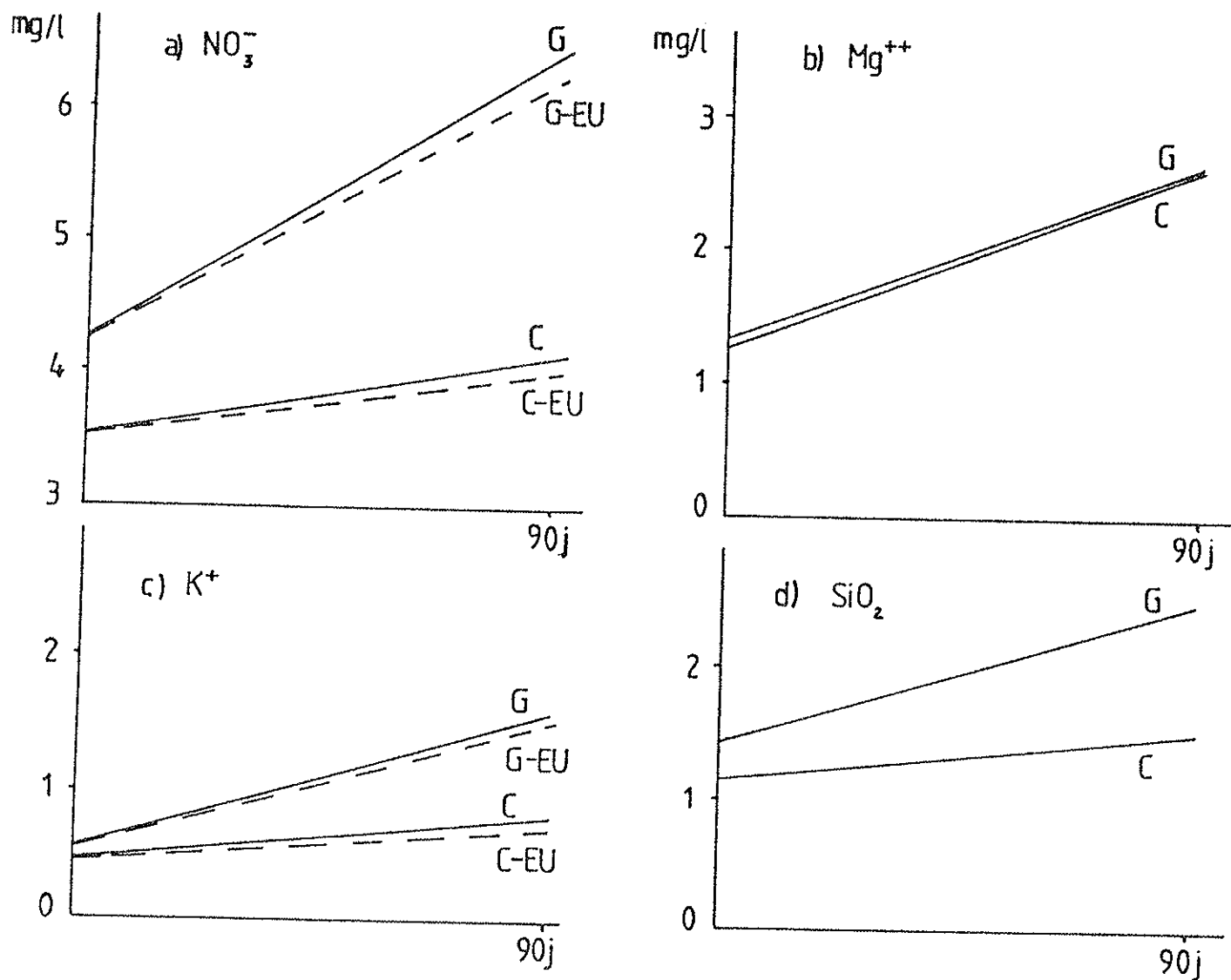


Fig.60 - Influence des eaux usées sur les eaux souterraines au cours de l'été estival 1984.

G = concentration à la grotte      C = Concentration au captage  
 EU = concentration des eaux usées      G-EU = concentration à la grotte diminuée de la concentration des eaux usées

*b). Influence de la matrice*

L'accroissement de la concentration au cours de l'été peut être dû à la composition chimique de la matrice. En effet les eaux d'été séjournent beaucoup plus longtemps au contact des calcaires et peuvent par dissolution de ces derniers, se charger d'éléments qui les composent.

Cependant si l'augmentation du magnésium peut s'expliquer par une dissolution, en revanche celle de la silice du Bajocien qui est très peu soluble ne peut être à l'origine d'une augmentation de 1 mg/l du début à la fin de l'été. Quant aux nitrates et au potassium une origine matricielle est possible

par évolution de ces éléments dans le karst (J.J. MISEREZ 1972) mais dans de faibles proportions. Aussi l'acquisition de ces derniers éléments se fait-elle probablement en surface et surtout dans les sols. Nous y reviendrons dans le chapitre suivant.

### Conclusion du cinquième chapitre

Tout au long d'un cycle hydrologique, les eaux de la Grotte restent bicarbonatées calcaïques avec des dilutions normales et importantes pendant les crues, liées aux apports météoriques.

Les variations de concentrations des éléments suivis peuvent avoir plusieurs origines et des intensités différentes comme le résume le tableau 31 bis .

Variations de concentration liées aux :	débites	Cycle biologique engrais	activités anthropiques
Mg <sup>++</sup>	++		
SiO <sub>2</sub>	++		
K <sup>+</sup>	+	+	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		++	
Cl <sup>-</sup>		+	+
PO <sub>4</sub> <sup>----</sup>	indépendants des débits des cycles biologiques		

Tableau 31 bis - Facteurs de variation des concentrations de quelques éléments à la Grotte des Planches.

En période de crue, quatre éléments ont été suivis (Mg<sup>++</sup>, SiO<sub>2</sub> ; K<sup>+</sup>, et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Ils montrent tous une dilution en montée de crue et un pic de concentration en sommet de crue avec un retour progressif à la normale. Les premières crues d'automne mettent en évidence des phénomènes plus accentués que dans les crues suivantes.

Quant à l'influence des eaux usées lors des étiages, elle est insuffisante pour provoquer un accroissement de la concentration tel que nous l'avons observé.

Ces eaux ne présentent qu'une très faible pollution chimique.



## CHAPITRE VI - COMPARAISON DU CHIMISME DES EAUX PROVENANT DES DEUX COMPARTIMENTS KARSTIQUES

### I - RAPPEL DES CARACTERISTIQUES DES DEUX BASSINS

Comme nous l'avons montré dans la première partie, le karst étudié se subdivise en deux compartiments, l'un à écoulements retardés, l'autre à écoulements accélérés. La comparaison directe du chimisme des eaux issus de ces deux compartiments n'est malheureusement pas réalisable puisque les deux résurgences qu'ils drainent reçoivent toutes deux des eaux d'une partie karstifiée commune (fig. 61).

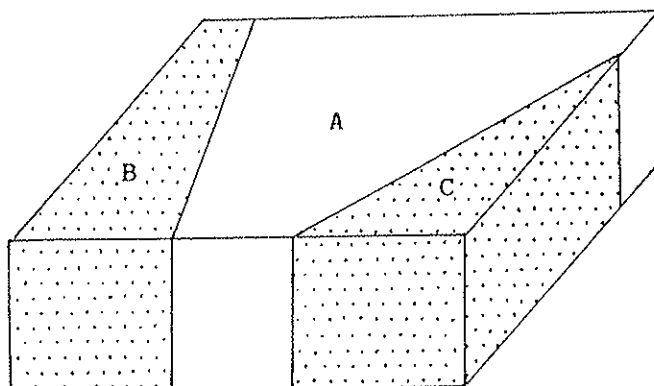


Fig. 61 - Compartiments du karst de la Cuisance.

Néanmoins nous allons pouvoir dégager plusieurs observations valables de l'analyse des eaux issues des compartiments B + A = A + C donc de  $B \approx C$  ; le compartiment A étant commun à ces deux ensembles, on peut supposer qu'il influence de la même façon l'un et l'autre. Nous aboutirons finalement, avec une certaine approximation, à comparer les secteurs B et C.

- Le secteur B drainé par la source de la Grotte des Planches se caractérise par une prédominance des prairies et des cultures avec une couverture pédologique composée de sols bruns épais sur argiles à chailles. La karstification moyennement développée et recouverte d'une formation superficielle provoque des écoulements retardés.

- le secteur C drainé par la source du Fer à Cheval se caractérise par une prédominance de la forêt associée à quelques prairies et cultures. La couverture pédologique se compose principalement de sols superficiels ou de remplissage de dolines. La karstification très développée favorise des écoulements accélérés.

### II - COMPARAISON DU CHIMISME DES EAUX DES SOURCES DE LA GROTTTE ET DU FER A CHEVAL (de juin à décembre 1984)

La comparaison du chimisme des eaux des deux sources au cours de l'été estival et des premières crues d'automne permet de distinguer deux groupes d'éléments. Le premier met en évidence un comportement similaire entre les deux résurgences pour  $\text{HCO}_3^-$  (fig. 62) ;  $\text{Ca}^{++}$  (fig. 63) ;  $\text{Mg}^{++}$  (fig. 64) ;  $\text{Fe}_T$  ;  $\text{SO}_4^-$  et  $\text{Cl}^-$  (fig. 109-110-111 annexe II). Le second montre une évolution différente d'une source à l'autre pour  $\text{K}^+$  (fig. 65) ;  $\text{SiO}_2$  (fig. 66) ;  $\text{NO}_3^-$  (fig. 67) ;  $\text{Na}^+$  (fig. 112 annexe II).

1). ANALYSE COMPAREE DES ELEMENTS  $\text{HCO}_3^-$  ;  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  A COMPORTEMENT IDENTIQUE  
(fig. 62.63;64) en été et en automne

a). Similitude et origine :

Les concentrations identiques, aux deux sources, de ces éléments confirment qu'ils proviennent de la matrice calcaire qui semble identique et sans variation latérale de faciès importante.

b). Influence des deux compartiments karstiques :

La concentration de  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{++}$  diffère légèrement d'une source à l'autre. Le karst à écoulement rapide (Fer à Cheval) semble relarguer plus de calcium et de bicarbonates que le karst à écoulement lent (Grotte des Planches). Ceci peut être en relation avec une dissolution plus importante dans le karst rapide, due à une production de  $\text{CO}_2$  plus abondante de son épikarst.

2). ANALYSE COMPAREE DES ELEMENTS A COMPORTEMENT DIFFERENT en été et en automne.

a). Les éléments d'altération et leur origine : (fig. 65-66).

Parmi les éléments qui présentent un comportement différent, le potassium et la silice peuvent provenir soit de l'altération des roches carbonatées (impuretés silicatées de la matrice karstique), soit de l'altération pédogénétique de l'épikarst.

A ce stade des recherches, nous sommes dans l'impossibilité de préciser la part revenant à chacun de ces deux processus, nous essayerons d'y parvenir dans la troisième partie. Nous pouvons néanmoins, en confrontant l'évolution de ces éléments à celle du magnésium, émettre l'hypothèse que  $\text{K}^+$  et  $\text{SiO}_2$  proviennent en plus grande partie de l'altération pédogénétique.

Dans les sols brunifiés épais et acides (pH compris entre 5 et 6), les conditions de l'attaque des édifices aluminosilicatés sont en effet réunies. L'altération par acidolyse entraîne la transformation des minéraux micacés de type illite avec l'élimination du potassium interfoliaire (M. RAZZACHE, 1974 dans M. BONNEAU et B. SOUCHIER, 1979), accompagné d'une partie de silice.

b). Les nitrates (fig. 67)

Ils sont toujours plus concentrés à la Grotte qu'au Fer à Cheval. Dans le premier secteur, ils varient beaucoup plus que dans le second. Ces valeurs plus fortes de nitrates, observées pour le karst recouvert de sols cultivés, correspondent essentiellement aux productions d'azote d'origine microbienne (nitrification de la matière organique du sol) auxquelles viennent s'ajouter en automne et en hiver des nitrates lixiviés à partir des engrais.

De nombreuses études ont déjà mis en évidence l'influence de l'activité agricole sur la qualité chimique des eaux de surface ou des nappes. Ainsi D. PIERRE (1983) a comparé trois bassins versants supportant des exploitations différentes : terres cultivées, prairies ; forêts. Il constate un lessivage des nitrates plus élevé dans les terres labourées que dans les prairies et les forêts (fig. 113 annexe II). L'évolution saisonnière des nitrates qu'il observe ressemble à celle que nous constatons aux sources de la Cuisance (fig. 67) avec une :

- augmentation de la concentration, en automne, aux premières crues et en hiver,
- diminution de la concentration jusqu'au printemps.

Fig. 62 Evolution de l'ion bicarbonate

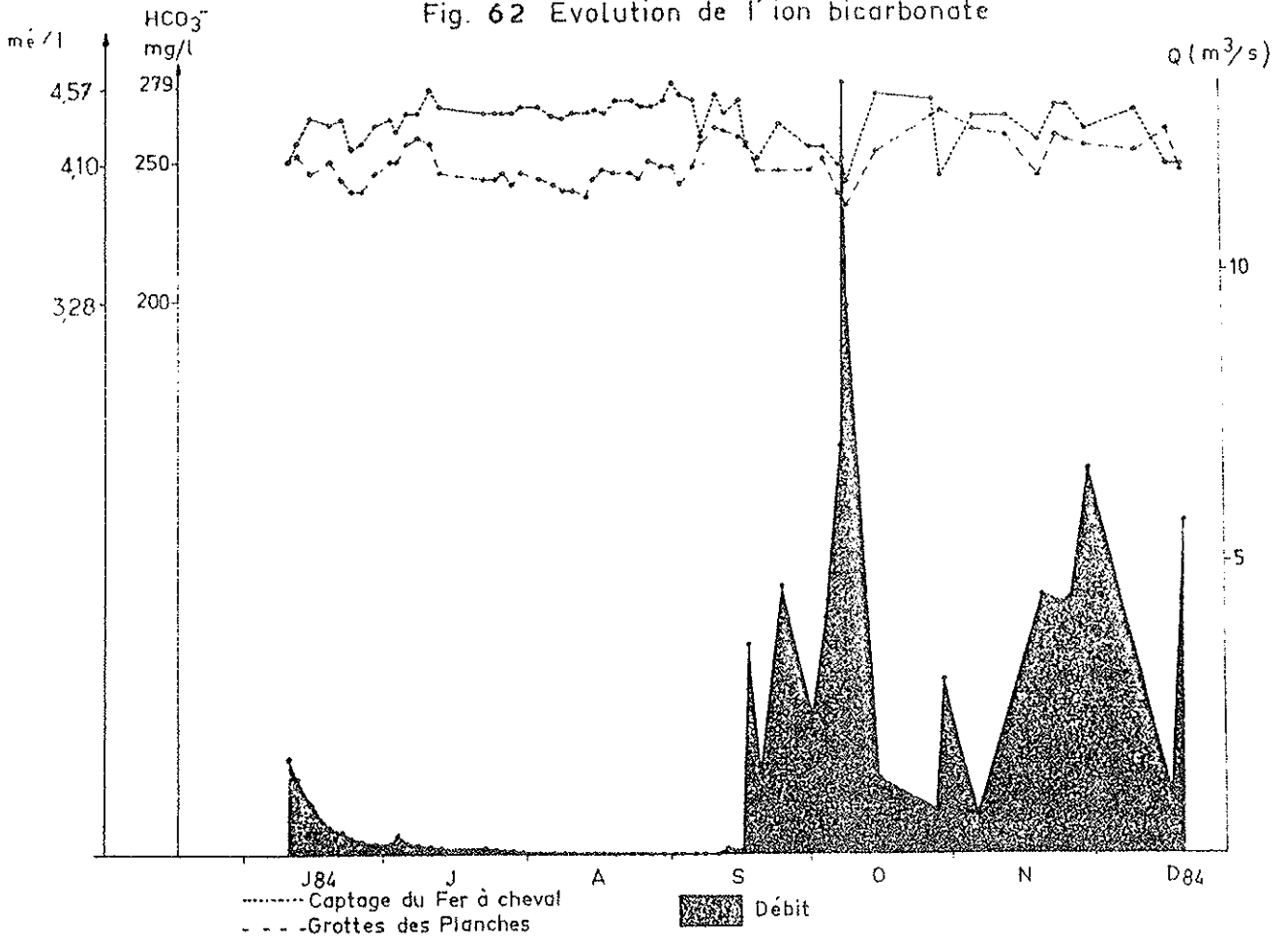


Fig. 63 Evolution de l'ion calcium

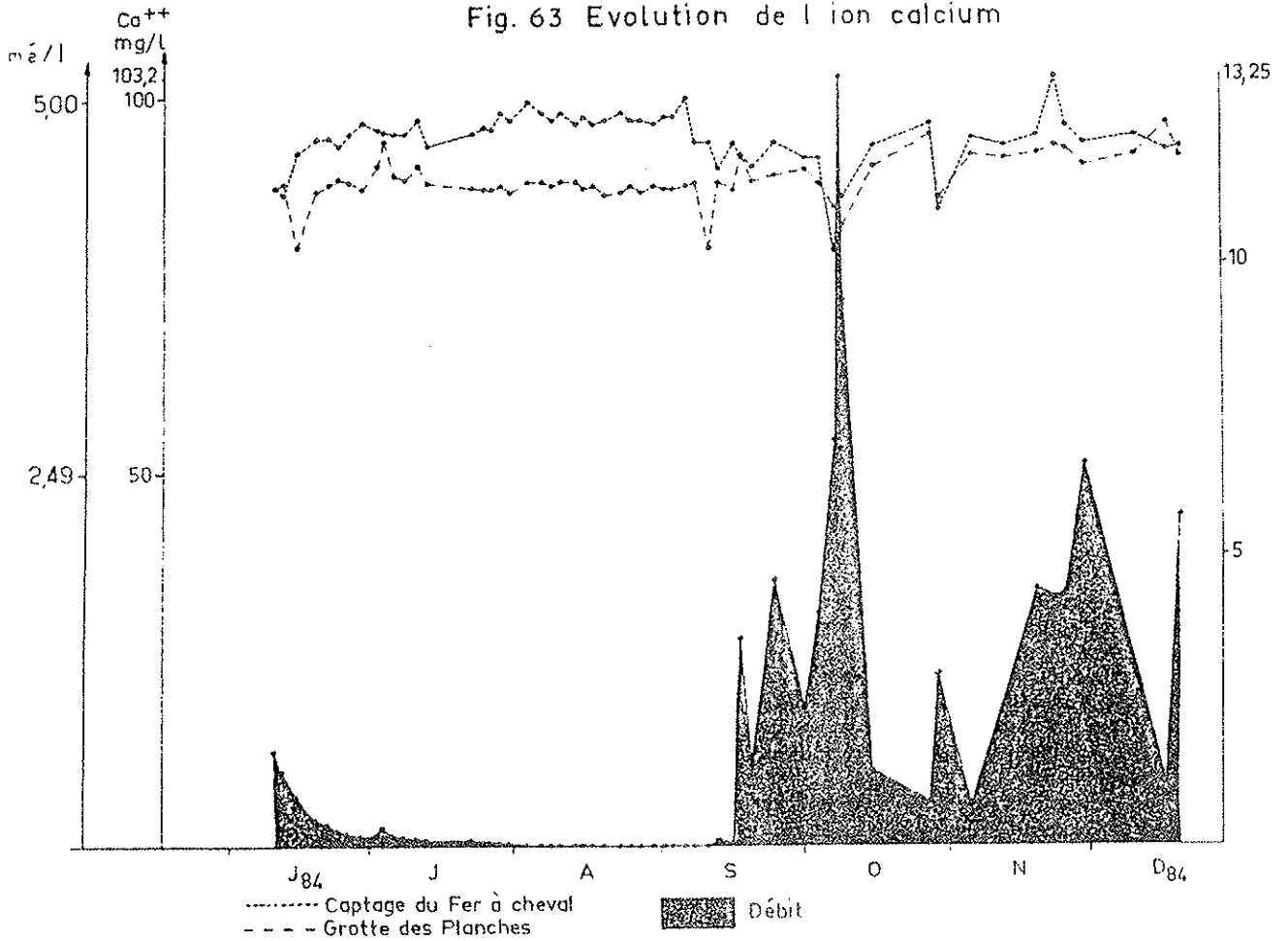


Fig. 64 Evolution de l'ion magnésium

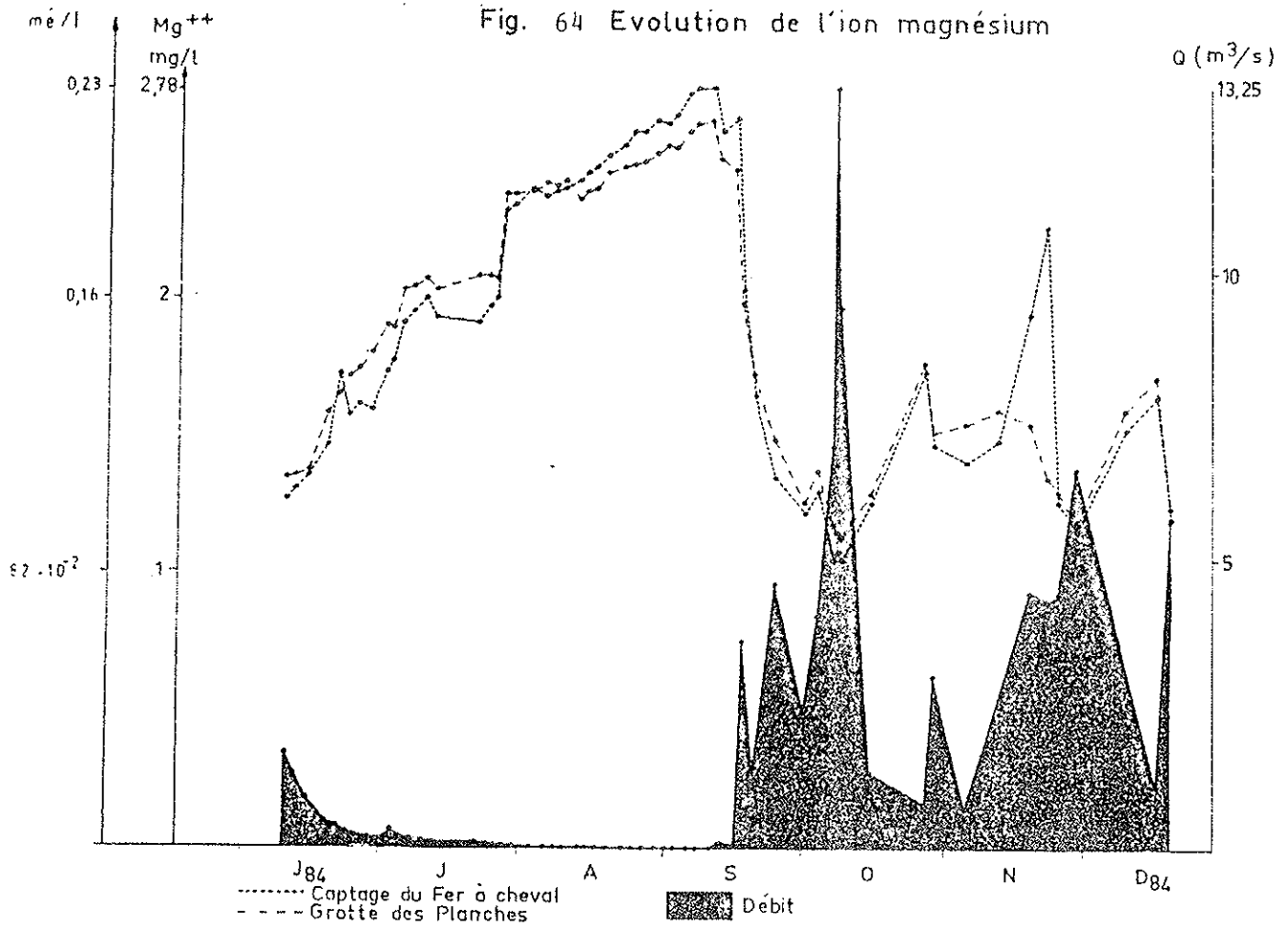


Fig. 65 Evolution de l'ion potassium

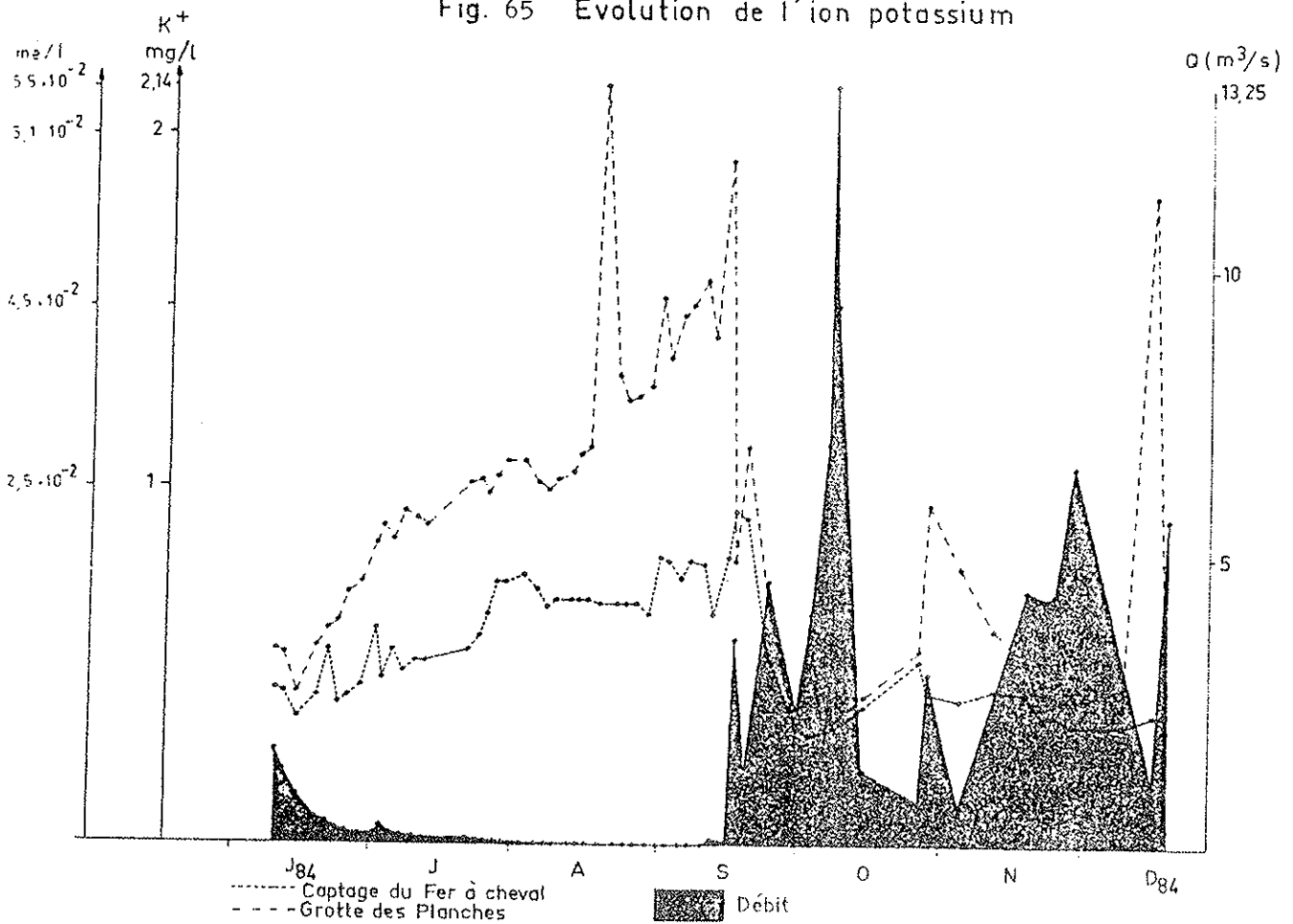


Fig. 66 Evolution de la Silice

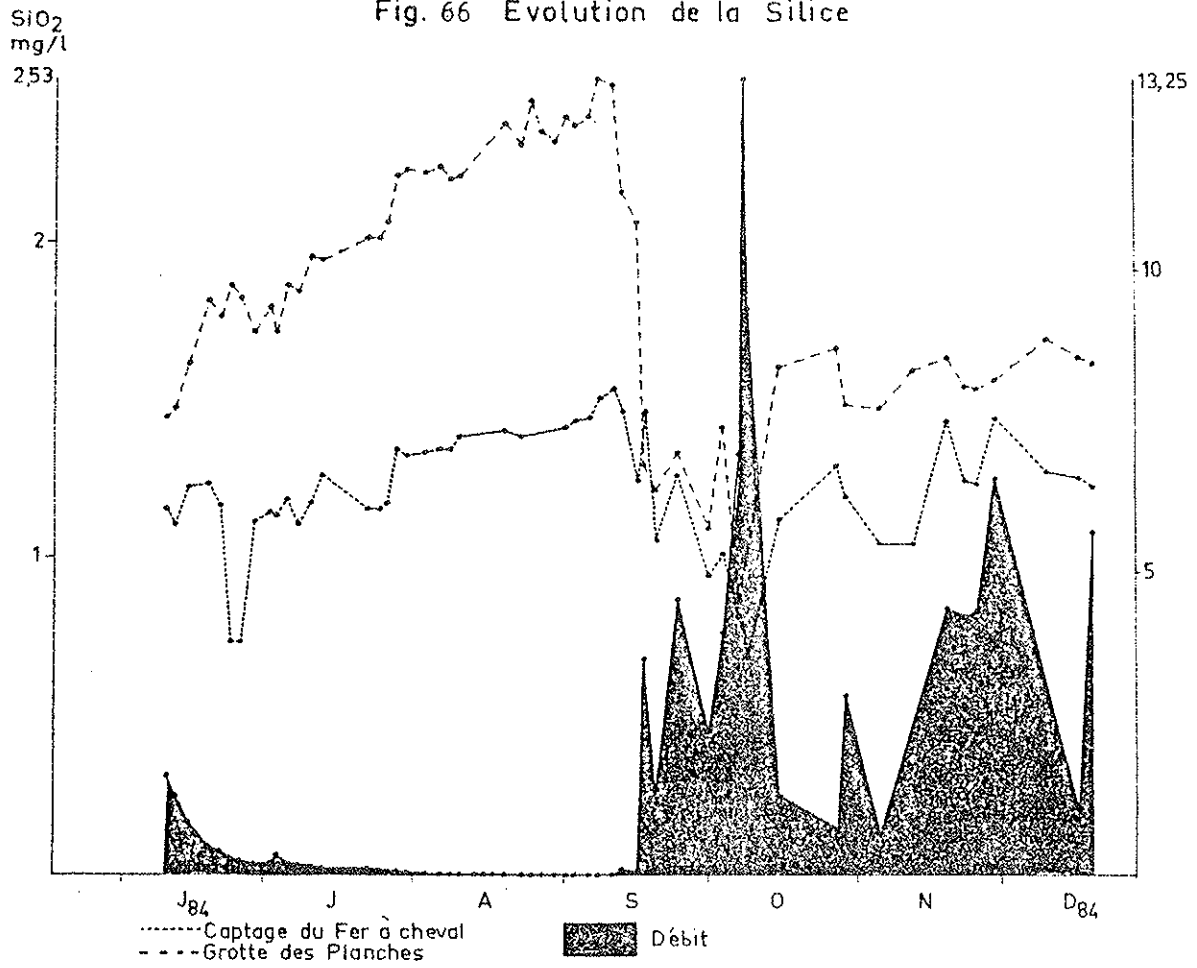
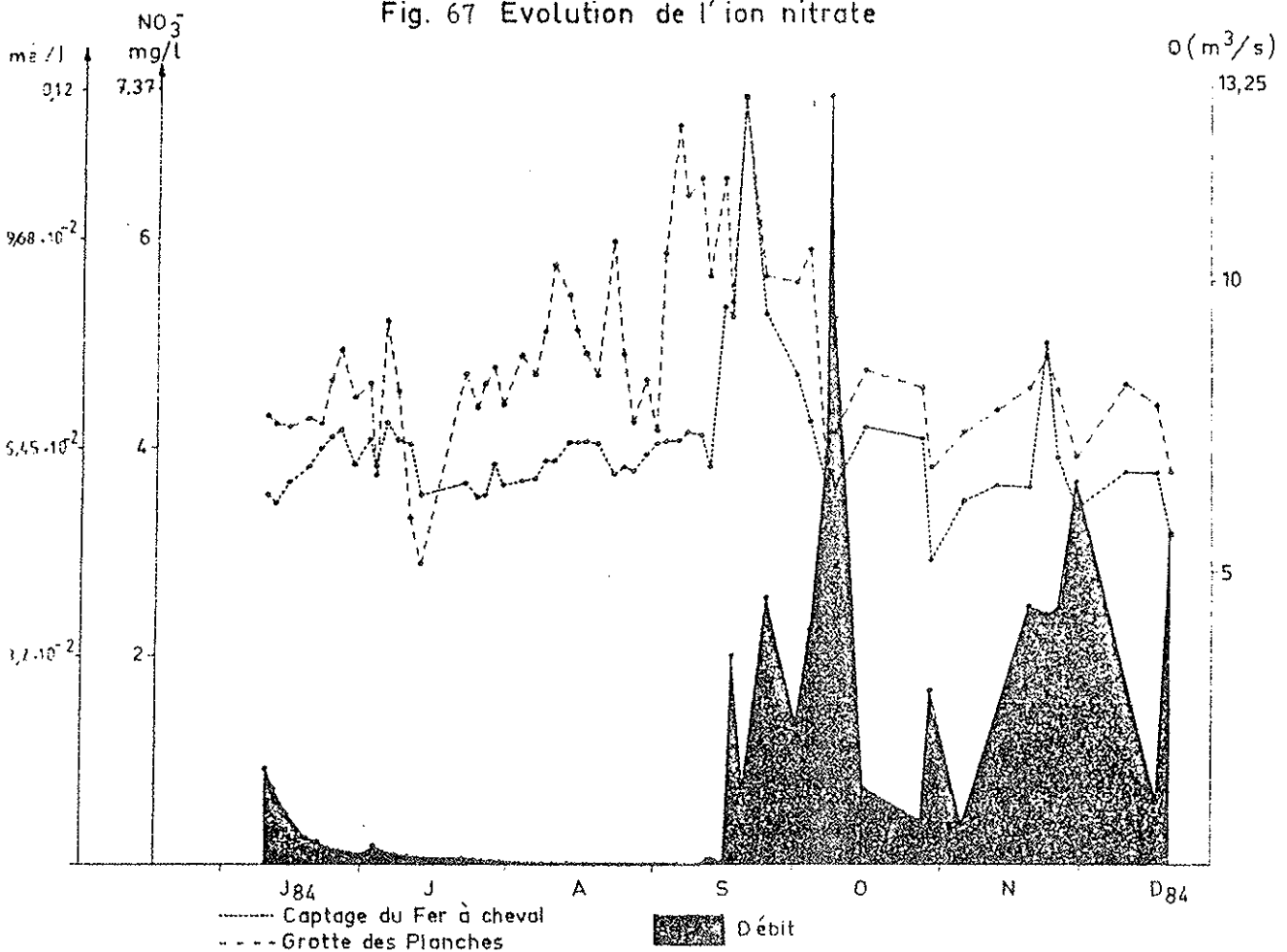


Fig. 67 Evolution de l'ion nitrate



Dans notre région karstique, on peut voir que les nitrates tendent à augmenter en période d'étiage (eaux provenant de la zone la plus cultivée) ou à varier faiblement (eaux provenant de la zone forestière). Les deux chutes de concentrations observées au cours de l'étiage à la Grotte des Planches peuvent s'expliquer par des averses, non complètement interceptées par la couverture végétale discontinue. Par contre à la source du Fer à Cheval, le retour des précipitations abondantes en septembre provoque un pic important de nitrates qui proviennent de la minéralisation de la matière organique car la production de nitrates s'est poursuivie pendant la période d'étiage, avec une accumulation d'azote minéral (par manque d'eau) et une évacuation lors des premières crues.

### 3). ANALYSE COMPAREE DE TROIS ELEMENTS EN HIVER EN EN CRUE

Les évolutions que nous venons d'analyser en étiage et en automne se poursuivent en hiver avec des comportements analogues. Nous avons reproduit les variations de  $Mg^{++}$  (fig. 68 A) ;  $SiO_2$  (fig. 68 B) ;  $NO_3^-$  (fig. 68 C). Comme précédemment nous ne constatons aucune différence de concentration du magnésium, mais des écarts pratiquement constants de la silice et des nitrates entre les deux sources.

## III - ANALYSE STATISTIQUE

L'analyse statistique, faite sur la période de Juin à Décembre 1984, concerne les deux sources de la Cuisance et nous permet de vérifier les hypothèses avancées ci-dessus. Elle se subdivise en deux parties : une analyse des matrices de corrélation, puis une analyse en composantes principales.

### 1). MATRICES DE CORRELATIONS

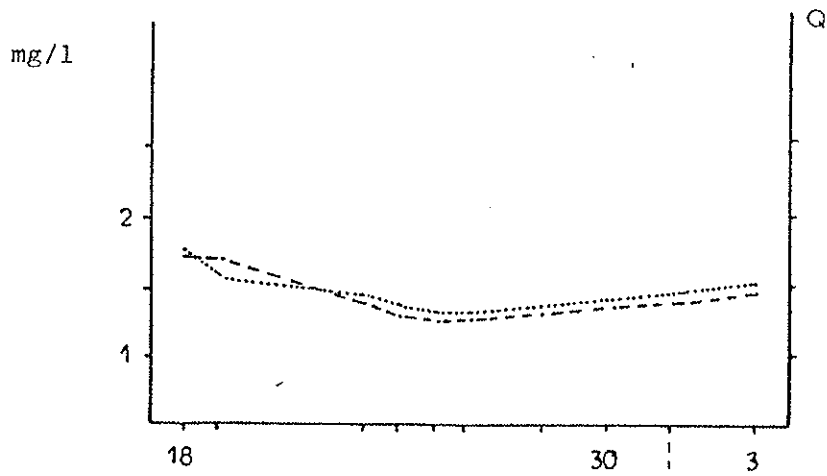
Elles traitent soixante dix échantillons pour chaque variable prise deux à deux, le coefficient de corrélation sera donc significatif pour une valeur de  $r = 0,505$  au seuil de 1 % (voir tableau 55 annexe II).

Les tableaux 32 & 33 rassemblent les coefficients de corrélations obtenus séparément sur les deux sources. Ils en ressort que certains éléments sont bien corrélés sur les deux sources, mais également que certains se corrélaient entre eux sur une seule source les éléments à corrélations spécifiques de chaque source sont :

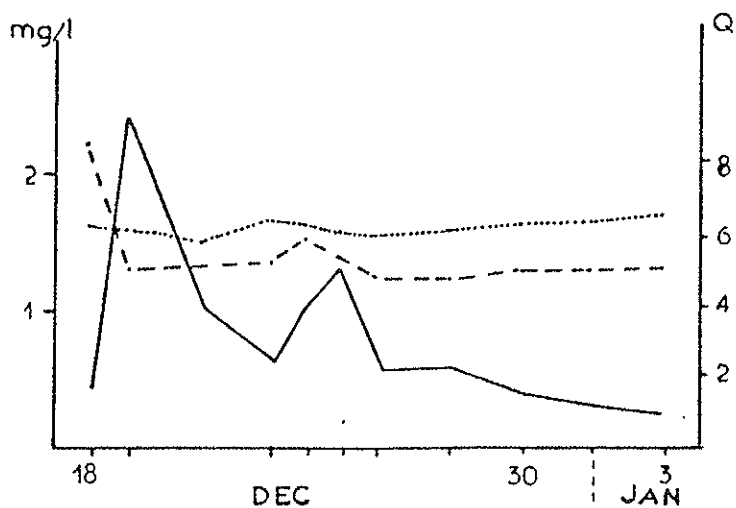
- Grotte :  $Na^+ - Cl^-$  ;  $SiO_2 - Cl^-$

- Captage :  $Ca^{++} - HCO_3^-$  ;  $Mg^{++} - HCO_3^-$ ,  $Ca^{++} - Mg^{++}$  ;  $Ca^{++} - Fe_T$ ,  $SiO_2 - HCO_3^-$

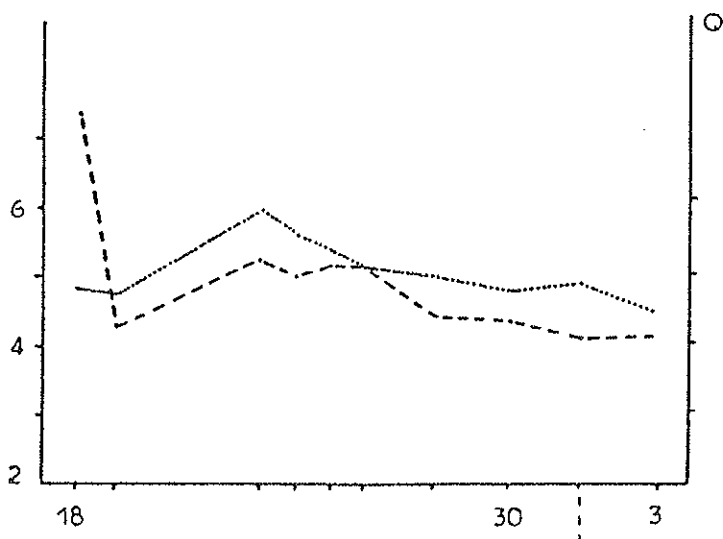
Ceci pourrait signifier que les eaux de la source captée du Fer à Cheval ont un chimisme beaucoup plus influencé par la matrice calcaire que les eaux de la source de la Grotte des Planches qui présentent de bonnes corrélations entre des éléments très solubles et principalement extérieurs au système calcaire.



A- Evolution du magnésium en crue



B - Evolution de la silice en crue.



C - Evolution des nitrates en crue

— Débit                      - - - - - Captage                      ..... Grotte

Fig. 68 - Evolution comparée de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{++}$  en hiver et en crue

	Q	Cond	pH	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>
Q	1														
Cond	0,07	1													
pH	-0,107	-0,25	1												
Cl <sup>-</sup>	-0,44	-0,08	0,109	1											
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,159	0,142	0,188	-0,03	1										
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,189	0,173	0,08	-0,07	0,408	1									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,15	0,426	-0,226	-0,193		0,22	1								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,221	0,175	0,228	0,394	0,108	4,6.10 <sup>-3</sup>	0,02	1							
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>									1						
Ca <sup>++</sup>	-0,08	0,351	-0,269	-0,126	-0,06	0,126	0,392	0,143		1					
Mg <sup>++</sup>	0,891**	-0,05	0,245	0,665	0,107	0,104	-0,07	0,412		-0,186	1				
Na <sup>+</sup>	-0,513	0,06	0,115	0,626	0,174	0,01	0,151	0,472		-0,255	0,737	1			
K <sup>+</sup>	0,59**	0,03	0,09	0,667	0,17	0,123	0,129	0,43		-0,132	0,827	0,747	1		
Fe <sub>T</sub>	0,465	0,32	-0,02	-0,338	0,139	0,247	0,07	-0,239		-0,03	-0,4	-0,318	-0,258	1	
SiO <sub>2</sub>	0,878**	-0,121	0,129	0,592	0,118	-89.10 <sup>-3</sup>	-0,18	0,223		-0,336	0,905	0,605	0,714	-0,428	1

Tableau 32 - Matrice de corrélations à la Grotte des Planches (70 valeurs)  
(Juin à Décembre 1984)

	Q	Cond	pH	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>
Q	1														
Cond		1													
pH		-0,337	1												
Cl <sup>-</sup>		-0,1	0,09	1											
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		-0,24	0,344	-0,163	1										
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		-0,02	0,287	0,162	0,305	1									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,193	-0,326	0,432	-0,114	0,1	1								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,04	-0,271	0,153	-0,08	-0,08	0,01	1							
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>									1						
Ca <sup>++</sup>		0,236	-0,27	0,46		2,9.10 <sup>-3</sup>	0,736	0,08		1					
Mg <sup>++</sup>		0,1	-0,08	0,669	-0,203	0,214	0,629	0,103		0,613	1				
Na <sup>+</sup>		0,09	-0,02	0,351	0,1	-0,08	0,361	0,242		0,285	0,776	1			
K <sup>+</sup>		-0,02	-0,05	0,592	-0,08	0,227	0,429	0,388		0,395	0,81	0,694	1		
Fe <sub>T</sub>		0,06	0,08	-0,403	-0,04	-0,08	-0,439	0,09		-0,565	-0,484	-0,189	-0,356	1	
SiO <sub>2</sub>		0,211	0,148	0,481	0,07	0,408	0,532	-0,02		0,488	0,685	0,582	0,58	-0,355	1

Tableau 33 - Matrice de corrélations à la source captée du Fer à Cheval  
(70 valeurs) (Juin à Décembre 1984)



2). ANALYSE FACTORIELLE :

a). Source de la Grotte des Planches

La figure 69 (A) exprime la projection des variables dans les plans  $A_1$  et  $A_2$ .

Le facteur  $A_1$  représente 29 % de la variance et oppose Q et  $Fe_T$  à  $Mg^{++}$ ,  $SiO_2$ ;  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ . La répartition des individus caractérise les eaux d'étiage bien minéralisées (partie négative de l'axe) aux eaux de crue, d'autant moins minéralisées qu'elles se situent dans la partie positive de l'axe et correspondent aux eaux d'influence météorique.

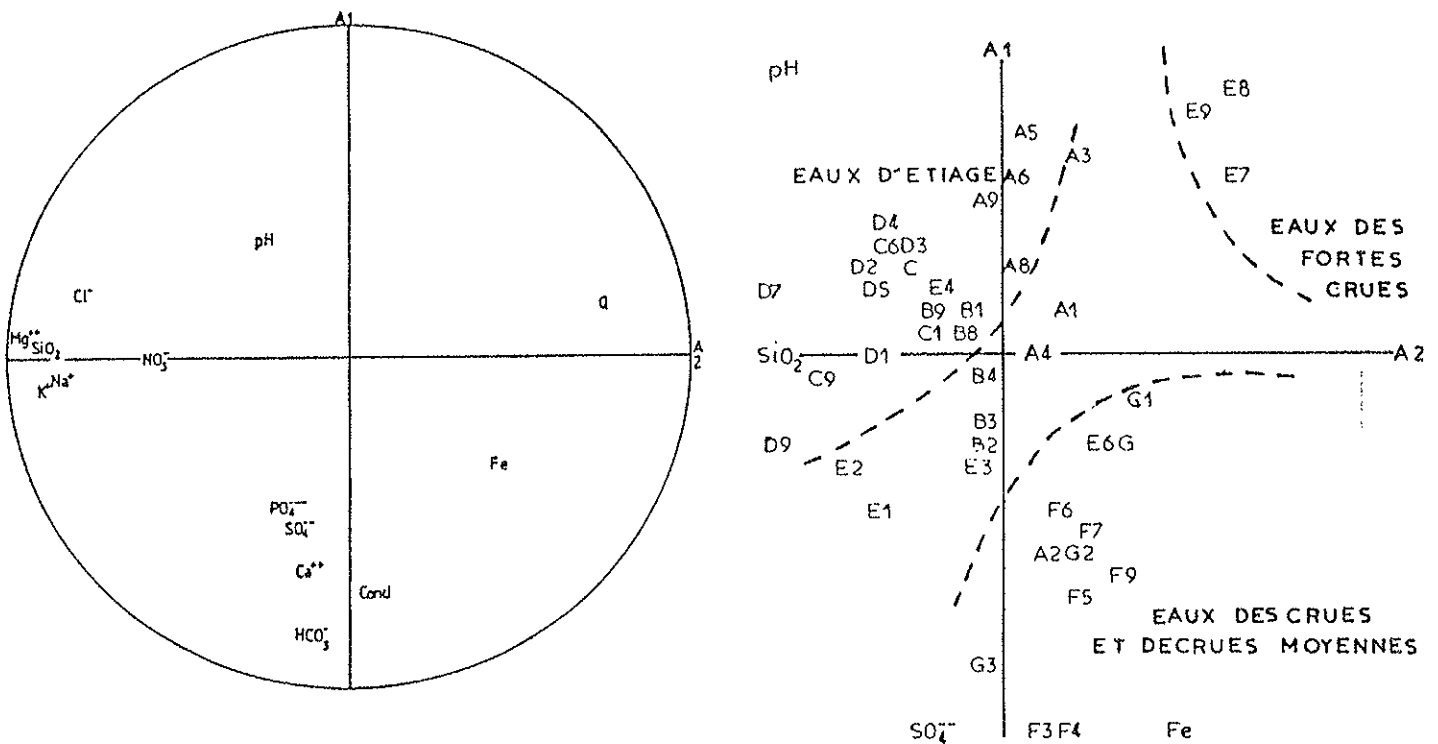


fig. 69 - Projection des variables (A)

Répartition des individus (B)

Le facteur  $A_2$  représente 15% de la variance et oppose le  $pH$   $Cl^-$  à  $PO_4^{--}$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $Ca^{++}$ ,  $HCO_3^-$  et à la conductivité. La répartition des individus montre que le chimisme des eaux se caractérise soit par des eaux au chimisme très marqué avec une forte ou une faible minéralisation (eaux d'étiage ou de forte crue, partie positive de l'axe) aux eaux apparemment intermédiaires (partie négative de l'axe) pour lesquelles l'équilibre calco-carbonique semble atteint rapidement.

L'axe  $A_1$  peut correspondre à la vitesse d'acquisition du chimisme des eaux (eaux peu minéralisées = météoriques, suivies de l'équilibre avec  $HCO_3^-$  et  $Ca^{++}$  puis avec les éléments acquis plus lentement :  $Mg^{++}$ ;  $SiO_2$ ,  $K^+$ ...). L'axe  $A_2$  semble lié à l'établissement de l'équilibre calco-carbonique en premier lieu.

### b). Source captée du Fer à Cheval

- La figure 70 exprime la projection des variables dans les plans  $A_1$  et  $A_2$ . Le facteur  $A_1$  représente 31 % de la variance et oppose le fer à  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$ ;  $HCO_3^-$ ;  $K^+$ ;  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SiO_2$ . La répartition des individus caractérise les eaux d'étiages (partie négative de l'axe 2) et les eaux de crue (partie positive de l'axe 2); les premières sont donc riches en cations alors que les secondes sont plus riches en fer issu des argiles.

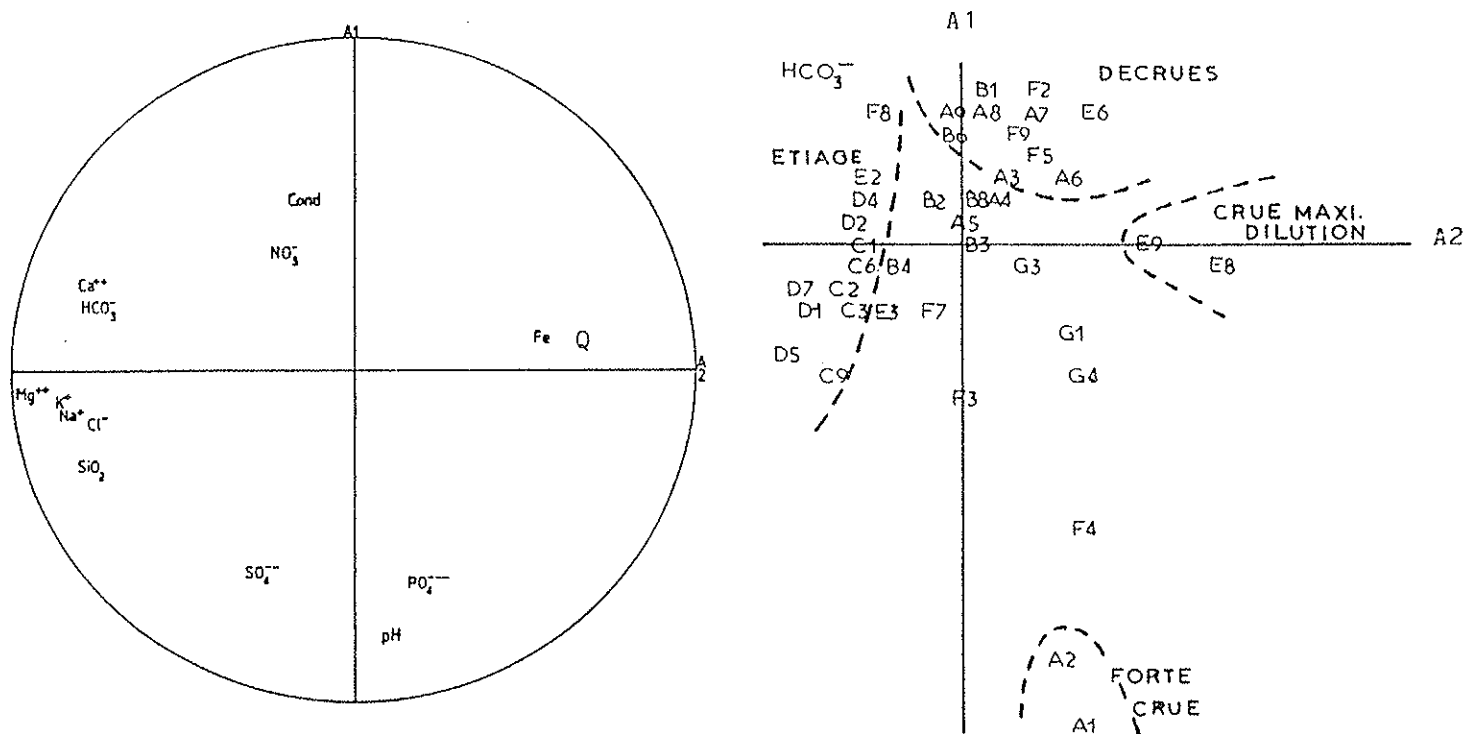


Fig. 70 (A) Projection des variables

(B) Répartition des individus

Le facteur  $A_2$  représente 16 % de la variance et oppose  $NO_3^-$  et la conductivité à  $SO_4^{--}$ ; pH;  $PO_4^{--}$ . La répartition des individus se caractérise par des eaux riches en phosphates pour la partie négative de cet axe, or ils correspondent aussi bien à des eaux d'étiage qu'à des eaux de crue, preuve d'une indépendance des phosphates vis à vis des débits. Il en est de même pour les nitrates que nous avons définis comme "saisonniers".

Le facteur  $A_1$  peut correspondre au temps de séjour alors que le facteur  $A_2$  marque l'indépendance de l'évolution de  $PO_4^{--}$ ,  $SO_4^{--}$ ; et  $NO_3^-$  vis à vis des débits.

- La figure 71 exprime la projection des variables dans les plans  $A_1$  et  $A_3$ . Le facteur  $A_1$  représente 27 % de la variance et oppose comme nous l'avons vu précédemment le fer à  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SiO_2$ .

Le facteur  $A_2$  représente 14 % de la variance avec une opposition entre " $K^+ - Na^+$ " et " $HCO_3^- - Ca^{++}$ ". La répartition des individus se caractérise par des eaux riches en nitrates durant la première crue après l'étiage estival (E2-3-4-5) ainsi que pour le potassium, contrairement à ce qui se passe à la Grotte des Planches pour ce dernier.

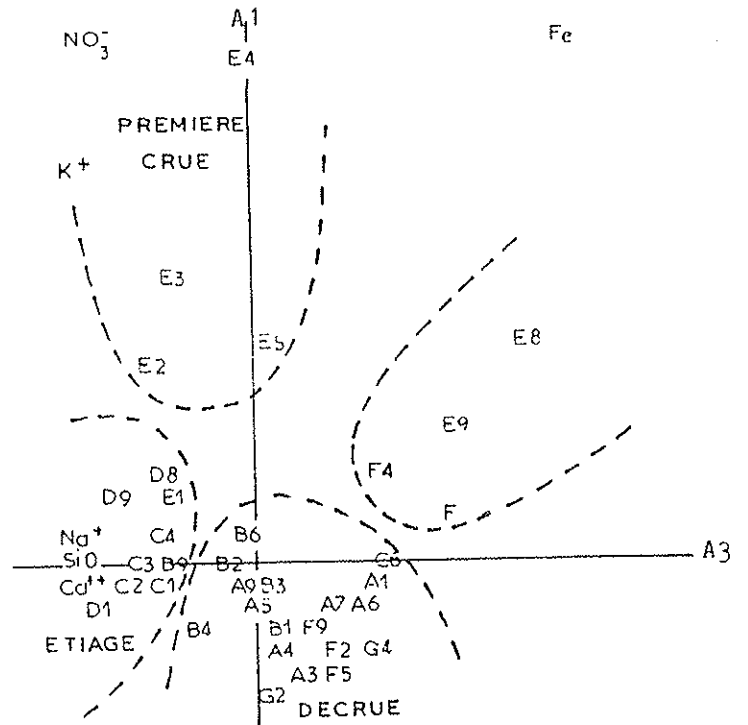
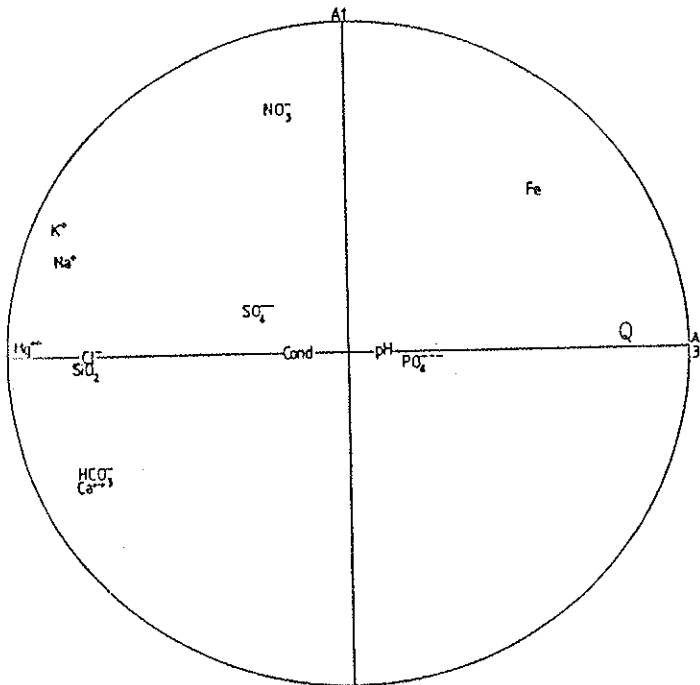


Fig. 71 - (A) Projection des variables

(B) Répartition des individus

Le facteur  $A_1$  peut donc représenter le temps de séjour alors que le facteur  $A_2$  peut correspondre à des apports d'origine superficielle pour la partie positive de cet axe, la partie négative correspond à des eaux à caractère plus proche de la matrice calcaire.

Cette étude en composantes principales montre nettement que :

- le fer se retrouve en période de crue et de décrue car le dosage effectué (Fer total) est celui du Fer contenu dans des fractions argileuses transformées lors des crues.
- l'acquisition du chimisme après l'arrivée des eaux météoriques passe d'abord par l'équilibre calco-carbonique suivi de celui de  $SiO_2$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{++}$  etc..
- le facteur le plus marquant des eaux d'étiage de la Grotte est régit par l'évolution de  $Mg^{++}$ ,  $SiO_2$ ,  $K^+$  alors qu'au Fer à Cheval ce serait plutôt  $HCO_3^-$  et  $Ca^{++}$  associés à  $Mg^{++}$  et  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $SiO_2$  comme nous l'avions remarqué dans les paragraphes précédents.

### Conclusion du sixième chapitre

La comparaison du chimisme des eaux des sources de la Cuisance, dont l'une correspond à un karst lent (Grotte) et à un épikarst à couvert cultivé, l'autre à un karst rapide (Fer à Cheval) et à un épikarst à couvert forestier. La partie commune de ces deux bassins agit de la même façon sur les deux sources.

Certains éléments auraient pour origine essentielle la matrice calcaire. Ils évoluent de façon similaire aux deux résurgences ( $Mg^{++}$ ,  $HCO_3^-$ ;  $Ca^{++}$ ).

D'autres éléments auraient en partie pour origine l'épikarst par l'intermédiaire des sols, de la nitrification et des modes cultureux. En effet le bassin qui supporte les sols les plus épais, les plus développés et les plus exploités (Grotte) montre des concentrations plus élevées en  $K^+$ ,  $SiO_2$  et  $NO_3^-$  que le bassin dont la couverture est forestière et les sols superficiels.

## CONCLUSION DE LA SECONDE PARTIE

\* Le suivi hydrochimique des eaux de la Grotte des Planches , au cours d'un cycle hydrologique complet, met en évidence trois types de comportement des ions :

- une liaison très étroite entre les débits et la concentration du magnésium, de la silice et du potassium.
- une variation de type saisonnier pour les nitrates et les chlorures.
- une indépendance plus ou moins marquée entre les débits, les concentrations et une variation de type saisonnier pour les phosphates.

\* L'analyse du bilan chimique annuel à la Grotte des Planches a nécessité l'estimation des entrées qui regroupent les éléments apportés par les précipitations (peu minéralisées) ; les eaux usées (très minéralisées) et les engrais, ainsi que l'estimation des sorties avec les éléments exportés par les eaux de la Cuisance et par la végétation. Le bilan ne peut pas être bouclé puisque le stockage des éléments du sol n'a pas été estimé.

\* L'étude comparative des eaux des deux sources de la Cuisance nous a permis d'observer des différences sensibles des concentrations de certains éléments entre la source de la Grotte et celle du Fer à Cheval.

- la silice et le potassium montrent un accroissement de la concentration plus important dans les eaux issues du bassin à écoulement retardé, recouvert de sols épais (Grotte).

- Les nitrates présentent une irrégularité plus prononcée dans les eaux de ce bassin principalement recouvert de prairies et cultures.

Certaines similitudes apparaissent également :

- le magnésium se comporte de la même façon dans les eaux des deux sources avec le même accroissement de la concentration.

- les bicarbonates et le calcium dont la concentration suit la même évolution, présentent toutefois des teneurs plus élevées dans les eaux issues du bassin à écoulements accélérés (Fer à Cheval) que dans l'autre.

\* L'ensemble de ces observations nous autorise à avancer plusieurs mécanismes d'acquisition du chimisme des eaux karstiques de la Cuisance.

- Les éléments comme le magnésium, le calcium et en partie les bicarbonates proviendraient de la matrice calcaire.

- Les éléments comme la silice, le potassium auraient une double origine : la matrice calcaire, mais aussi les sols riches en minéraux silicatés en cours d'altération par perte de potassium et de silice.

Nous essaierons d'élucider ce point dans la troisième partie de ce travail grâce à l'étude d'un petit bassin expérimental.

TROISIEME PARTIE

ACQUISITION DU CHIMISME DES EAUX  
DANS L'EPIKARST ET INFLUENCE SUR  
LES EAUX KARSTIQUES

Chapitre VII - Description et  
installation du  
bassin expérimental

Chapitre VIII- Hydrochimie du  
bassin expérimental

Conclusion de la troisième partie

## CHAPITRE VII - DESCRIPTION ET INSTALLATION DU BASSIN EXPERIMENTAL

Les paragraphes précédents nous ont permis de constater que les éléments analysés aux exutoires de la Cuisance peuvent avoir pour origine : la matrice calcaire , les eaux usées mais également les formations superficielles et les sols, associés à leurs pratiques culturales.

Nous avons entrepris d'étudier qualitativement le comportement de l'eau dans les sols et l'épikarst d'un petit bassin karstique expérimental, d'environ 70 hectares, situé à l'Ouest de Chilly sur Salins.

Les résultats obtenus au cours du cycle 1984 - 1985 (Mars à Mars) vont nous permettre de suivre l'évolution du chimisme des eaux au niveau de l'atmosphère (précipitations); des sols (lysimètres) ; de la partie superficielle de l'épikarst (ru du Bas de Prôle) puis de la comparer à celle des eaux des résurgences de la Cuisance.

### I - METHODE D'ETUDE

#### 1) DELIMITATION ET MORPHOLOGIE

Ce bassin, défini topographiquement (fig.72A), bien que nous soyons en présence d'un karst, est dans sa plus grande partie recouvert d'argiles à chailles sur lesquelles se sont développés les sols. Le ru du Bas de Prôle de faible débit, draine ce bassin expérimental puis se perd dans une doline. Un traçage à la fluorescéine montre que ses eaux aboutissent uniquement à la résurgence de la Grotte des Planches (Tableau 4).

Ce petit cours d'eau témoigne de la présence d'un ancien réseau hydrographique de surface qui entaillait le Bajocien de petites vallées.

L'ensemble de ce bassin est principalement recouvert de prairies artificielles, naturelles et de cultures de maïs, d'orge ou de seigle.

#### 2) EQUIPEMENT

Pour étudier ce bassin, nous avons installé plusieurs appareils, enregistreurs et de récupération des eaux décrits ci-dessous (fig.72A).

##### a) Un pluviographe :

Installé dans le village de Chillysur Salins, il enregistre les précipitations tombées à proximité du bassin.

##### b) Une "Chaîne d'acquisition de données" :

Elle enregistre à des pas de temps choisis (une mesure toutes les six heures) les températures et les conductivités des eaux de la source du "ru du Bas de Prôle". Cette méthode nous a posé quelques problèmes dans le suivi des résultats en raison de l'envasement des sondes de mesure et de l'instabilité des résultats enregistrés malgré l'installation de deux sondes de température et de deux sondes de conductivité.

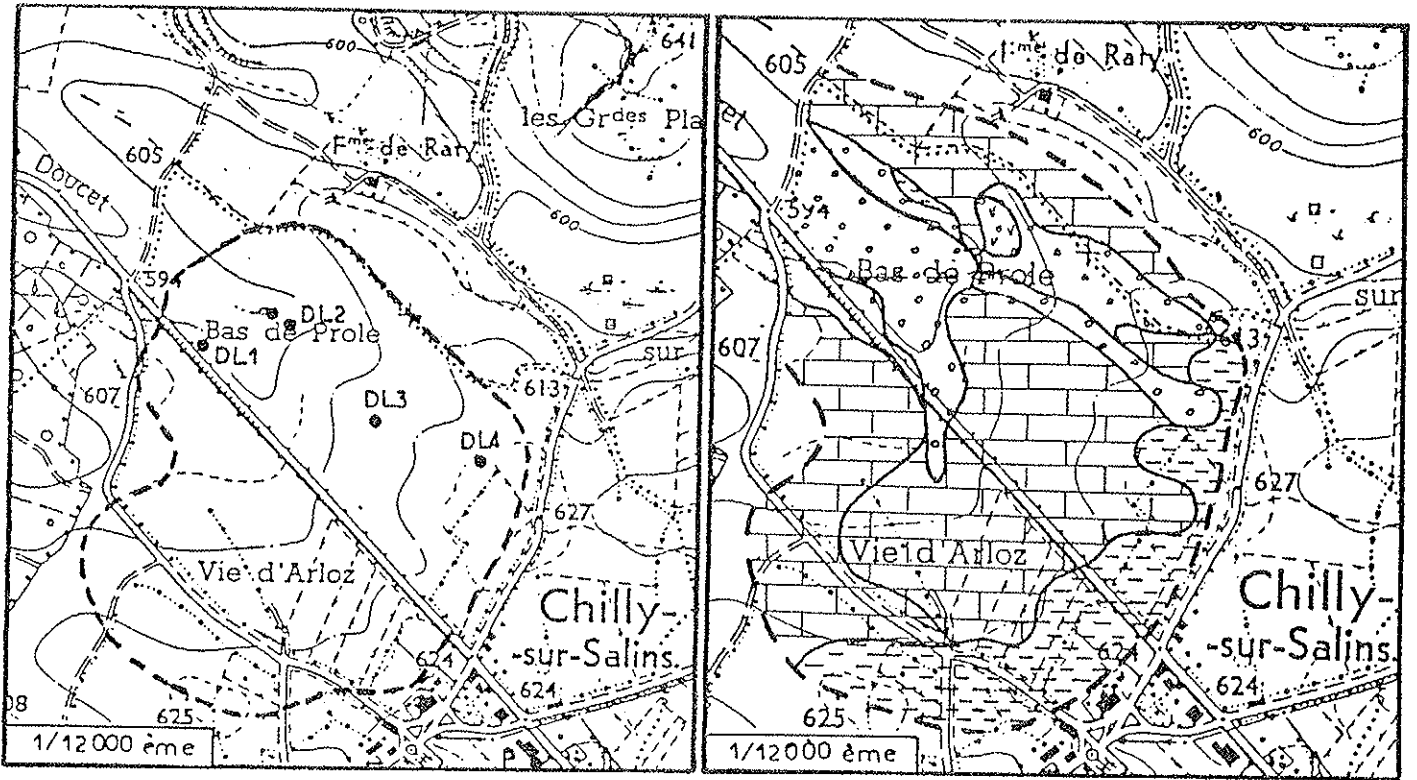





Fig. 72 (A) Limite et Equipement du Bassin - (B) Schéma de la répartition des sols

 Brun sur argiles à chailles    
  Brun calcique    
  Brun à pellicules calcaires

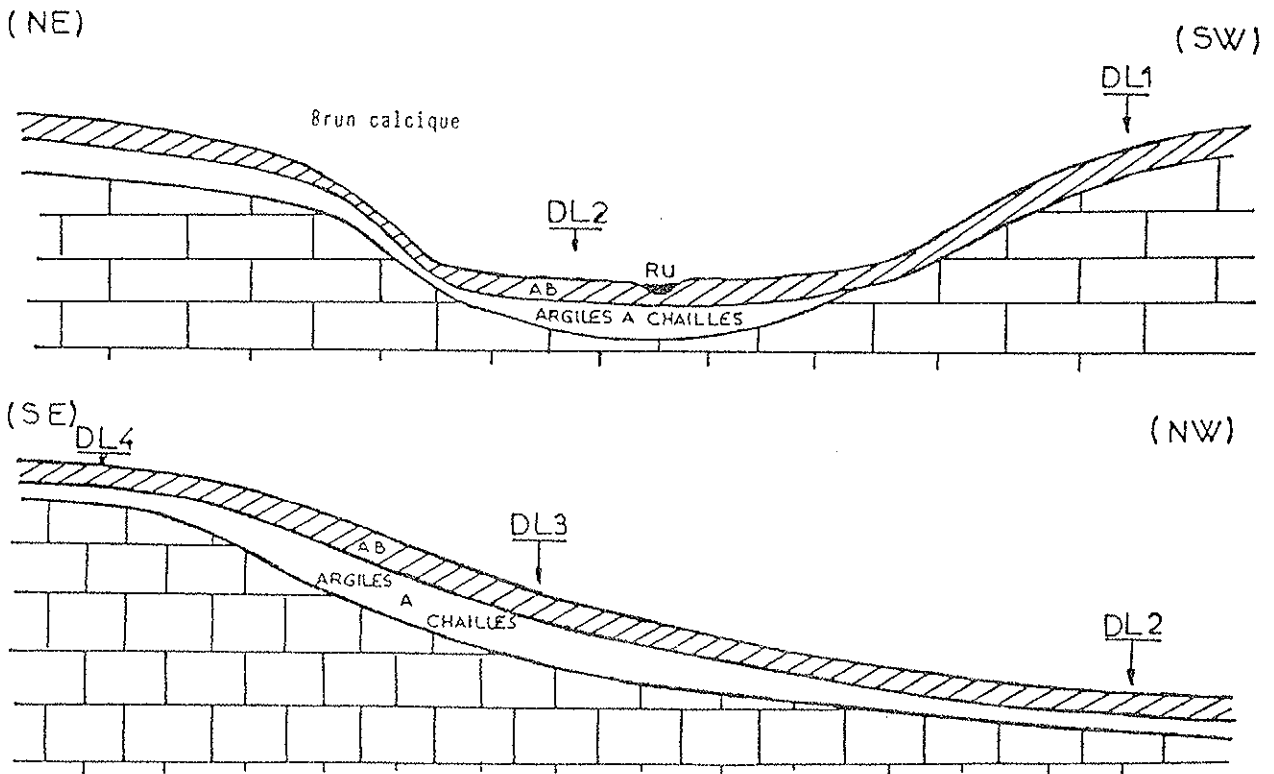


Fig. 73 - Position topographique des lysimètres

### c) Quatre lysimètres :

Ce sont des plaques lysimétriques en inox enfoncées horizontalement dans le sol en place, à environ 40 cm de profondeur (voir schéma d'installation : fig.74)

Le site d'implantation a été choisi en fonction des sols, de leur mode d'exploitation et de leur position topographique (fig.73).

- Lysimètre DL1 : installé à environ 35 cm de profondeur dans un sol brun calcique sur calcaire ; à mi-pente douce et sous culture de céréales (blé).
- Lysimètre DL2 : installé à 40 cm de profondeur dans un sol brun épais sur argile à chailles ; en amont immédiat de la source du ru du Bas de Prôle donc en bas de pente ; sous prairie naturelle.
- Lysimètre DL3 : installé à 40 cm de profondeur ; dans un sol brun épais sur argile à chailles ; à mi-pente faible ; sous prairie artificielle.
- Lysimètre DL4 : installé à 40 cm de profondeur, dans un sol brun développé sur une mince couche d'argile à chailles, elle-même sur calcaire ; à la partie sommitale d'une pente ; sous culture de céréales (orge).

### 3) METHODE DU SUIVI

Elle suivra le protocole ci-dessous :

#### a) Cartographie des sols

Réalisée à grande échelle (environ 1/10000ème), suivant la méthode décrite dans la première partie de ce travail, elle nous a permis d'inventorier, de répartir et de choisir les sols susceptibles de recevoir des plaques lysimétriques (fig.72B).

#### b) Analyse des sols

Lors de l'installation des lysimètres, un échantillon de chaque horizon des sols retenus a été prélevé pour subir une série d'analyses physiques : granulométrique, chimique, pH; matière organique ; azote ; carbone ; capacité d'échange de cations ;  $Mg^{++}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$  et une détermination des argiles aux rayons X pour un sol brun (DL3) et un sol brun calcique (DL1)

#### c) Analyse des eaux de précipitations

Les prélèvements et analyses de ces dernières ont été effectués à Chilly sur Salins, comme nous l'avons déjà mentionné dans la seconde partie de ce travail (17 échantillons au cours du cycle Mars 1984 à Mars 1985).

#### d) Analyse des eaux de percolation des lysimètres

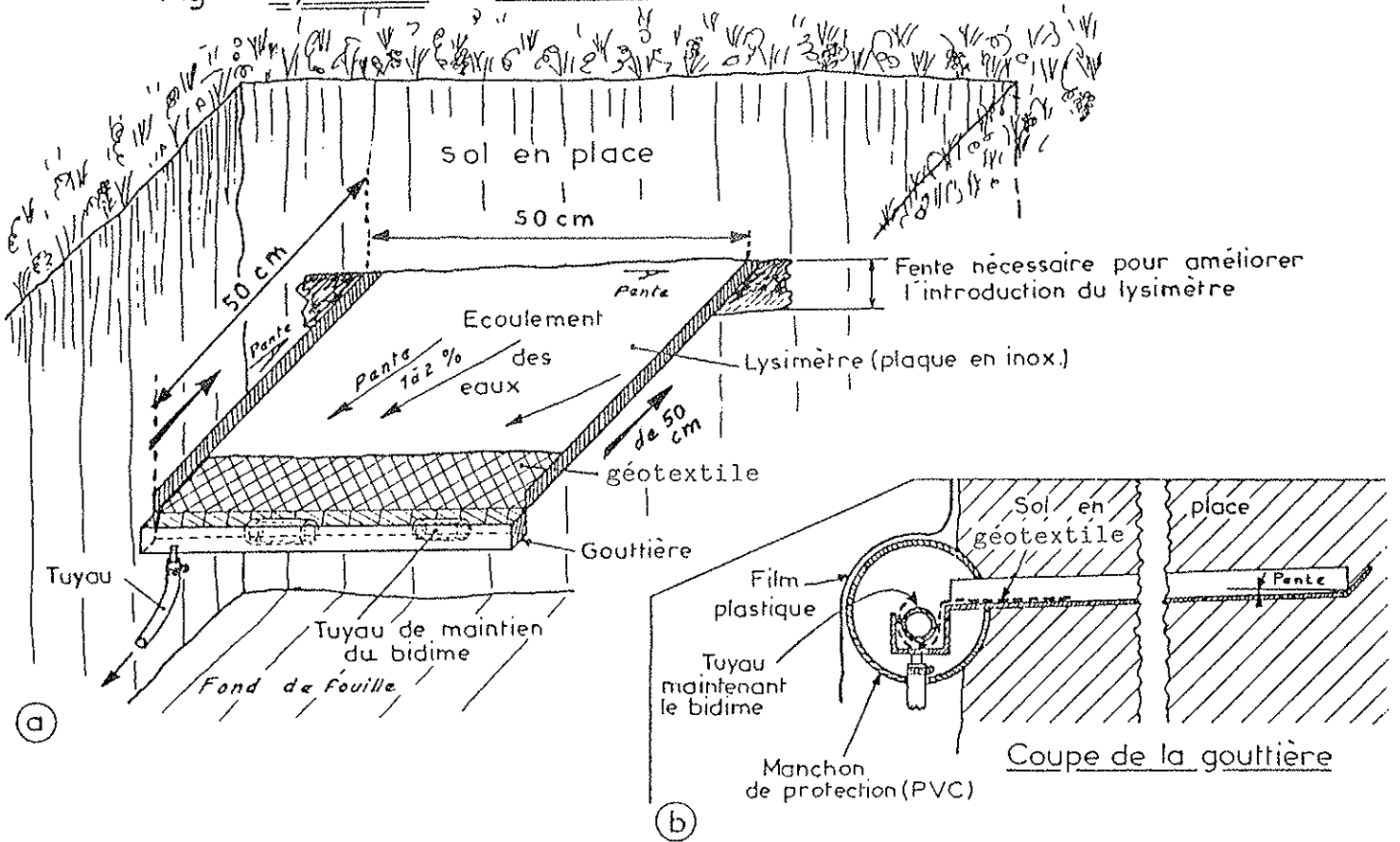
Chaque précipitation, suffisamment intense et durable, provoque une percolation des eaux à travers les sols et s'accompagne de nombreux échanges chimiques entre le sol et la solution du sol. Cette eau s'écoule dans des flacons relevés au maximum 24 heures après le début des précipitations, et est analysée (selon les méthodes décrites dans la seconde partie et annexe II, tableau 48) après avoir été filtrée sur des filtres millipores à 0,45 $\mu$ .

#### e) Analyse des eaux à la source du ru du Bas de Prôle

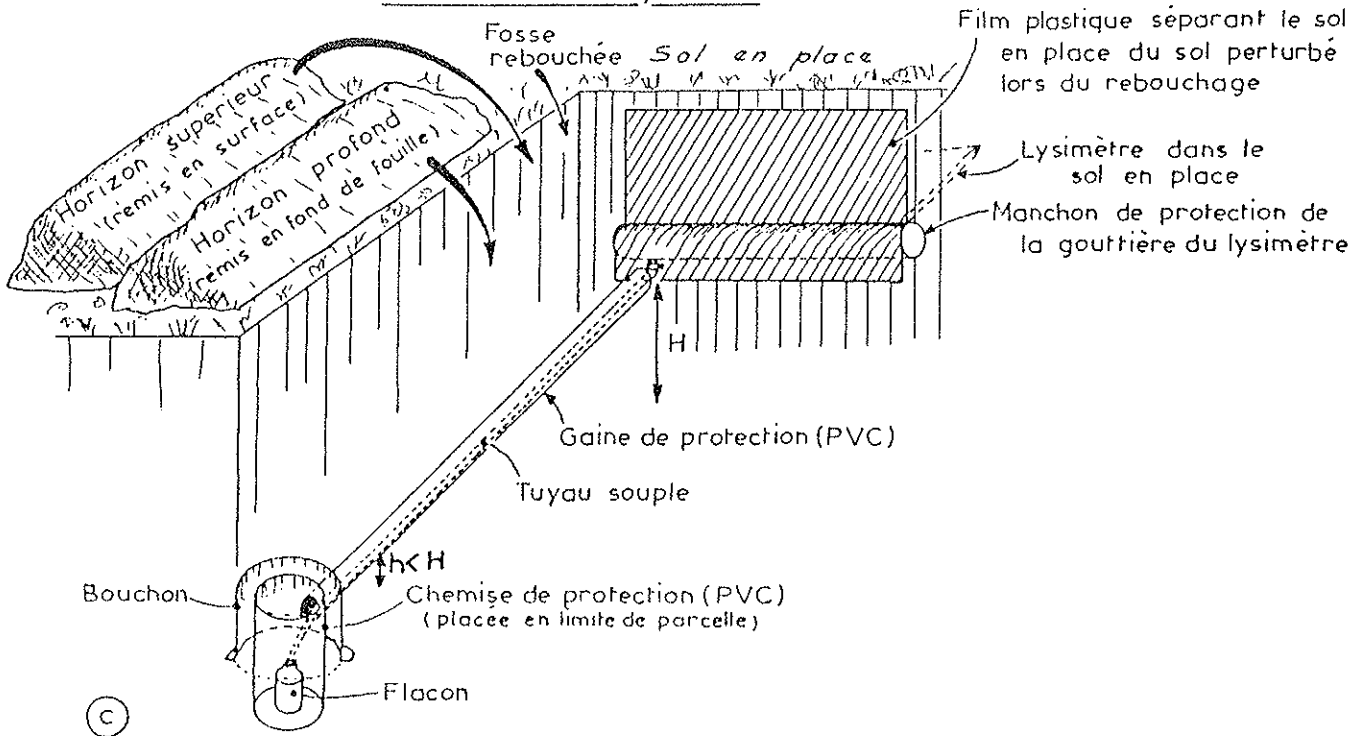
Chaque échantillon des eaux de percolation des lysimètres a été simultanément accompagné d'un prélèvement d'eau à la source du ru du Bas de Prôle puis analysé dans les conditions précédemment décrites.



Fig. 74 Lysimètre Schéma d'installation



Installation du lysimètre



### f) Enquête agricole

Une enquête agricole réalisée auprès des agriculteurs, exploitant chaque parcelle équipée d'un lysimètre, nous a permis d'obtenir une connaissance assez précise des quantités et périodes d'épandage d'engrais ainsi que les pratiques culturales. (voir fiche d'enquête en annexe II, tableau 52).

## II - MATERIAUX PEDOLOGIQUES DU BASSIN EXPERIMENTAL

Les matériaux qui composent ce bassin expérimental seront abordés de deux manières : la répartition des différents sols sur l'ensemble de ce bassin aboutissant à une carte des sols au 1/10000ème (fig.72B); les caractéristiques de chaque sol dans lesquels un lysimètre a été installé.

### 1) CARTOGRAPHIE DES SOLS

Nous retrouvons les grands types de sols cités dans la carte au 1/50000ème à savoir des sols bruns à chailles ; bruns calciques ; bruns à pellicules calcaires .

Au Sud du secteur étudié, peu d'argiles à chailles recouvrent les calcaires, nous y trouvons des sols bruns à pellicules calcaires sur calcaire plus ou moins altérable ou des sols bruns à pellicules calcaires sur calcaire dur. Ailleurs l'épaisseur de ces argiles varie en fonction de la position topographique puisqu'elles glissent lentement le long des pentes pour s'accumuler dans les dolines et les dépressions.

### 2) LES SOLS DES LYSIMETRES

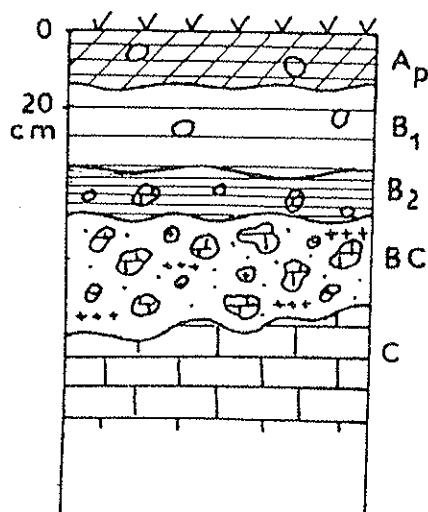
Dans le paragraphe précédent, nous avons vu la localisation cartographique et topographique nous allons maintenant aborder la description physique des sols dans lesquels des lysimètres ont été installés.

Cette description a été faite d'après les fiches STIPA de l'INRA (voir tableau 56 annexe III). Les analyses de sol suivent chaque description de profil et ont été effectuées au laboratoire d'analyses des sols de l'INRA à Arras pour : la matière organique ; le carbone ; le calcium ; le phosphore ; la capacité d'échange de cations ; le magnésium ; le potassium ; et au laboratoire de pédologie de Besançon pour : la granulométrie, le pH et l'azote. La détermination aux rayons X des huit échantillons traités a été faite au laboratoire de Géologie de Neuchâtel pour les lames normales et glycolées et au laboratoire de Minéralogie de Besançon pour les lames chauffées.

#### a). Lysimètre DLI

Localisé au Nord de la route départementale D 197, il est installé dans un sol brun calcique sur un calcaire du Bajocien inférieur ; au tiers inférieur d'une pente de 5 % environ et sous une culture de céréales (blé) ( $x = 868,56$  ;  $y = 216,92$  ;  $z = 602$ ).

Description du profil DL 1 : type génétique : SOL BRUN CALCIQUE



0-15 cm - Horizon Ap; argilo-limoneux ; structure polyédrique subanguleuse fine mélangée à une structure grumeleuse; peu compact ; de couleur 10 YR 4/4 à l'état sec ; sans tache, sans revêtement ; nombreuses racines entre les agrégats, verticales, très fines, saines; peu de pores visibles et très fins ; horizon poreux ; quelques graviers de chaille, irréguliers, non altérés, pas d'effervescence à l'HCl, matière organique bien décomposée.

15-35cm - Horizon B1 ; argilo-limoneux; structure polyédrique subanguleuse fine ; compact ; de couleur 10 YR 4/4 à l'état sec ; sans tache ; sans revêtement ; racines très peu nombreuses, développées dans la masse, fines, verticales , saines; horizon poreux à pores très fins et peu nombreux ; quelques graviers de chaille irréguliers et non altérés ; pas d'effervescence à l'HCl.

35-47cm - Horizon B2; argileux ; structure polyédrique subanguleuse grossière ; compact ; de couleur 10 YR 4/4 à l'état sec ; quelques taches ocre-jaunes, nettes, fines, irrégulières, liées aux éléments grossiers ; horizon moyennement poreux; graviers de chaille ou de calcaire et cailloux calcaires aplatis et peu altérés; pas d'effervescence à l'HCl ; transition ondulée ; nombreuses concrétions ferromanganiques.

47-60cm (au-moins) - Horizon C ; sablo-limoneux; structure polyédrique subanguleuse ; couleur à l'état sec 2,5 Y 6,5/4 ; nombreuses taches jaunes, d'altération, de taille moyenne, irrégulières, liées aux éléments grossiers.

Pas de racine ; poreux; très nombreux cailloux calcaires de formes diverses sans orientation particulière ; Horizon d'altération du calcaire ; très forte effervescence à l'HCl.

Analyses du profil DL 1 (tableau 34)

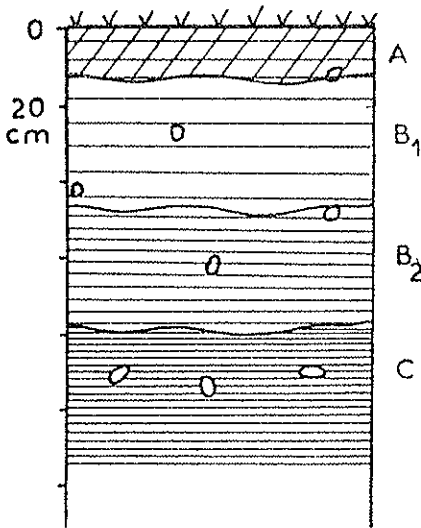
ANALYSES PHYSIQUES										
Profondeurs	GRANULOMETRIE %					MO (%)	Ca <sub>T</sub> (‰)	N (‰)	C (‰)	C/N
	A < 2μ	LF 2 à 20 μ	LG 20 à 50μ	SF 50 à 200μ	SG 200 à 2mm					
0 - 15	42.13	24.52	13.84	15.56	3.95	51.9	3	2.8	30.2	10.7
15 - 35	43.32	25.02	11.59	14.69	5.37	44.5	0	2.3	25.9	11.2
35 - 47	47.36	20.22	15.59	12.53	4.30	28.5	0	1.3	16.6	12.7
47 - 80	35.62	19.68	8.95	17.19	19.51	4.8	508	1.4	2.8	2.0

ANALYSES CHIMIQUES									
Profondeurs	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	CEC meq %	Ca <sup>++</sup> meq %	K <sup>+</sup> meq %	Mg <sup>++</sup> meq %	S meq %	S/T %
0 - 15	6.45	5.55	0.03	22.3	22.6	0.291	1.37	24.26	109
15 - 35	6.25	5.35	0.01	21.6	22.6	0.251	1.24	24.09	111
35 - 47	6.80	5.80	-	20.8	23.8	0.229	0.58	24.61	118
47 - 80	7.90	7.30	-	6.1	37.7	0.109	0.33	38.11	101

b). Lysimètre DL 2

Localisé en amont immédiat de la source du ru du Bas de Prôle (x = 868,75, y = 216,98, z = 598) dans un sol brun épais en bas de pente, sous une prairie naturelle.

Description du profil DL 2 : type génétique : SOL BRUN SUR ARGILE A CHAILLES



0 - 12cm - Horizon A ; argilo-limoneux, structure grumeleuse, fine; peu compact; de couleur 10 YR 4/4 à l'état sec; sans tache; racines nombreuses, dans les agrégats, verticales, saines; poreux ; quelques turicules ; quelques graviers de chailles, irréguliers, peu altérés ; pas d'effervescence à l'HCl ; transition régulière peu nette.

12-47cm - Horizon B<sub>1</sub> ; argilo-limoneux ; structure polyédrique subanguleuse, fine ; peu compact; de couleur 10 YR 4/4 à l'état sec ; sans tache; racines peu nombreuses à rares à la base de l'horizon, dans la masse, verticales, saines; pores peu nombreux; poreux; turicules peu nombreuses ; quelques graviers de chaille de formes diverses et irrégulières, non altérés. Pas d'effervescence à l'HCl; transition régulière peu nette.

47-77cm - Horizon B<sub>2</sub> ; argileux ; structure polyédrique subanguleuse peu nette ; compact ; couleur 10 YR 4/4 à l'état sec; quelques taches d'oxydation ocre rouges, fines, irrégulières et peu contrastées ; pas de racine ; très peu de pores ; peu poreux ; présence de graviers et cailloux de chaille non altérés; pas d'effervescence à l'HCl; transition régulière peu nette.

77-120cm - Horizon C ; "argile à chailles" ; structure continue; compact; couleur 10 YR 5/6 à l'état sec ; nombreuses taches d'oxydation et d'altération brunes, liées aux éléments grossiers pour les secondes ; pas de racine ; quelques cailloux et graviers de chailles; pas d'effervescence à l'HCl; présence du calcaire à 120 cm.

Analyses du profil DL 2 : (tableau 35)

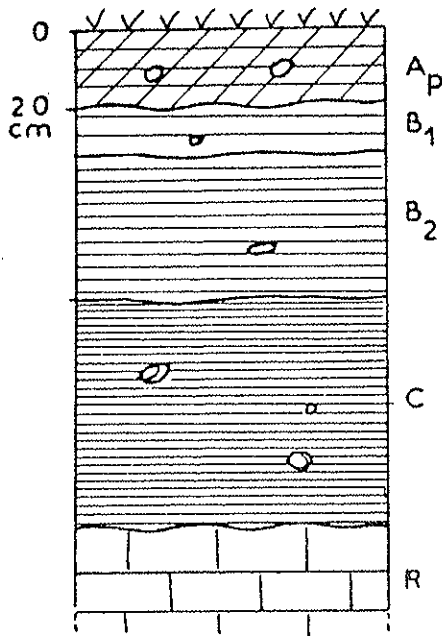
ANALYSES PHYSIQUES										
Profondeurs	GRANULOMETRIE %					MO (%)	CaT (%)	N (%)	C (%)	C/N
	A < 2μ	LF 2 à 20μ	LG 20 à 50 μ	SF 50 à 200μ	SG 200 à 2mm					
0 - 12	35.69	26.62	13.91	17.29	6.48	43.5	-	2.2	25.3	11.5
12 - 47	37.66	23.32	16.13	16.87	6.02	32.8	-	1.8	19.1	10.6
47 - 77	41.65	27.37	8.92	15.41	6.64	23.5	-	1.1	13.7	12.4
77 - 100	48.99	24.21	9.44	11.71	5.64	13.4	-	0.7	7.8	11.1

ANALYSES CHIMIQUES									
Profondeurs	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	CEC meq %	Ca <sup>++</sup> meq%	K <sup>+</sup> meq%	Mg <sup>++</sup> meq%	S meq%	S/T %
0 - 12	5.30	4.35	0.02	19.4	13.2	0.234	1.18	14.6	75
12 - 47	5.65	4.55	-	19.0	13.7	0.197	1.04	14.94	79
47 - 77	5.25	4.60	-	17.0	13.4	0.176	0.38	14.95	82
77 - 100	6.45	5.35	-	18.3	20.4	0.247	0.45	21.1	115

c) Lysimètre DL 3

Localisé à mi-pente (5 % environ) en amont du lysimètre DL2 (x = 868,95; y = 218,78; z = 615 ), il collecte les eaux qui percolent à travers un sol brun épais sur argile à chailles et sous une prairie artificielle.

Description du profil DL 3 : type génétique : SOL BRUN SUR ARGILE A CHAILLES



0-20 cm - Horizon Ap; argileux; structure grenue, fine; peu compact ; couleur 10 YR 4/4 à l'état sec; pas de tache ; racines peu nombreuses entre les agrégats, verticales, saines ; très peu de pores dans les agrégats; poreux; quelques graviers de chaille irréguliers, non altérés ; pas d'effervescence à l'HCl.

20-33 cm - Horizon B1 ; limono-argileux; structure polyédrique subanguleuse moyenne; peu compacte; couleur 10 YR 4/5 à l'état sec ; pas de tache ; racines très peu nombreuses, développées entre les agrégats, verticales; quelques graviers de chaille ; pas d'effervescence à l'HCl.

33-70 cm - Horizon B2; argileux; structure polyédrique subanguleuse; compact; couleur 10 YR 4/4 à l'état sec; pas de tache ni de revêtement; pas de racine ; nombreux pores dans les agrégats ; horizon moyennement poreux; quelques graviers et cailloux de chaille non altérés ; pas d'effervescence à l'HCl

79-130 cm - Horizon C ; "argile à chailles" structure continue; très compact; couleur 10 YR 5/6 à l'état sec ; quelques taches d'altération, jaunes, fines, peu contrastées ; pas de racine ; rares pores ; horizon très peu poreux ; quelques graviers et cailloux de chaille non altérés ; pas d'effervescence à l'HCl.

Analyses du profil DL 3 - (tableau 36)

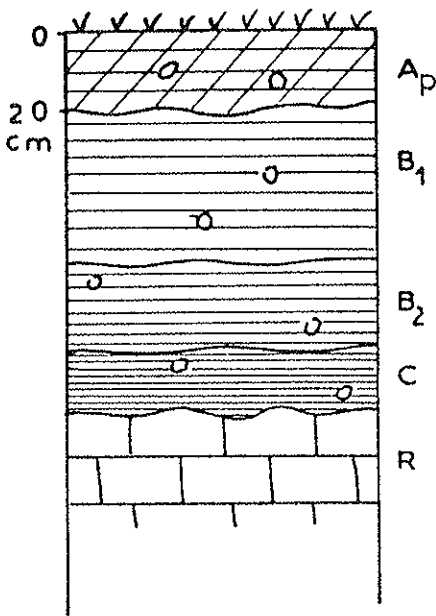
ANALYSES PHYSIQUES										
Profondeurs	GRANULOMETRIE %					MO (%)	CaT (%)	N (%)	C (%)	C/N
	A < 2 μ	LF 2 à 20μ	LG 20 à 50μ	SF 50 à 200 μ	SG 200 à 2mm					
0 - 20	40.52	25.18	12.28	16.19	5.8	51.9	-	2,6	30.2	11,5
20 - 33	37.23	23.90	10.56	14.59	13.72	38.0	-	2,1	22.1	10,5
33 - 70	43.92	23.42	13.47	13.34	5.84	23.0	-	1,0	13.4	13,4
70 - 130	43.43	27.63	10.72	11.38	6.83	10.4	-	0,34	6.1	17,9

ANALYSES CHIMIQUES									
Profondeurs	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	CEC meq%	Ca++ meq%	K+ meq%	Mg++ meq%	S meq%	S/T %
0-20	6.05	5.05	0.03	20.0	13.9	0.549	1.03	15.48	77.4
20-33	5.90	4.90	-	18.7	13.4	0.267	0.84	14.51	77.6
33-70	6.40	5.40	-	16.2	14.3	0.196	0.46	14.96	92
70-130	6.65	5.80	-	15.3	17.5	0.251	0.30	18.06	118

d) Lysimètre DL 4

Localisé au sommet d'une pente, en amont du lysimètre DL3, sur une zone relativement plate (x = 869,23, y = 217,72, z = 628) dans un sol brun sur argile à chailles dont l'épaisseur est faible puisque l'on atteint rapidement le calcaire du Bajocien inférieur; sous culture de céréales (orge).

Description du profil DL 4 : Type génétique : SOL BRUN SUR ARGILE A CHAILLES



0-22 cm - Horizon Ap ; Limono-argileux; structure grumeleuse, fine; peu compact ; couleur 10 YR 5/4 à l'état sec ; pas de tache ; nombreuses racines entre les agrégats, verticales, saines ; nombreux pores dans les agrégats ; horizon poreux ; quelques graviers de chaille; pas d'effervescence à l'HCl.

22-60cm - Horizon B1; limono-argileux; structure polyédrique subanguleuse fine; peu compact ; couleur 10 YR 4,5/6 à l'état sec; pas de taches; racines peu nombreuses entre les agrégats , verticales, très fines; nombreux pores dans les agrégats; horizon poreux; quelques graviers de chaille irréguliers, non altérés; pas d'effervescence à l'HCl, quelques concrétions ferromanganiques.

60-74 cm - Horizon B2 ; argilo-limoneux; structure polyédrique subanguleuse grossière; très compact ; plastique; couleur 10 YR 5/6 à l'état sec ; pas de tache ; pas d'effervescence à l'HCl.

74-99 cm - Horizon C; argileux (argile à chailles) ; structure polyédrique subanguleuse fine; compact ; plastique; couleur 10 YR 5/6 à l'état sec ; très nombreuses taches d'altération, jaunes, de tailles moyennes à grandes; quelques revêtements luisants, minces, sur les agrégats, de couleur ocre; pas de concrétion; pas de racine ; pores peu nombreux sur les agrégats, très fins ; horizons poreux ; quelques pierres et blocs calcaires, irréguliers, non altérés; pas d'effervescence à l'HCl.

Analyses du profil DL4 (tableau 37)

ANALYSES PHYSIQUES										
Profondeurs	GRANULOMETRIE %					MO (%)	CaT (%)	N (%)	C (%)	C/N
	A < 2µ	LF 2 à 20µ	LG 20 à 50µ	SF 50 à 200µ	SG 200 à 2mm					
0 - 22	35.45	24.22	17.72	16.57	6.04	44.7	-	2.1	26.0	12.3
22 - 60	39.42	23.89	13.74	17.10	5.85	27.0	-	1.2	15.7	13.1
60 - 74	40.39	25.75	14.05	15.06	4.74	14.2	-	0.6	8.3	13.8
74 - 93	44.04	28.77	9.98	13.15	4.06	10.3	-	0.6	6.0	10.0

ANALYSES CHIMIQUES									
Profondeurs	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	CEC meq %	Ca <sup>++</sup> meq%	K <sup>+</sup> meq%	Mg <sup>++</sup> meq%	S meq%	S/T %
0 - 22	5.55	4.65	0.02	16.1	9.6	0.313	1.03	10.94	64
22 - 60	5.60	4.75	-	13.6	7.9	0.303	0.57	8.77	67
60 - 74	5.65	4.65	-	13.3	8.6	0.246	0.40	9.25	60
74 - 99	5.80	4.87	-	17.8	13.6	0.261	0.42	14.28	80

III - CARACTERISTIQUES MINÉRALOGIQUES ET PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS EQUIPES DE LYSIMETRES

Nous sommes en présence de deux types de sol : brun et brun calcique dont les propriétés physico-chimiques varient ainsi que les caractéristiques minéralogiques.

1). Propriétés physiques

L'analyse granulométrique des horizons de chaque profil met en évidence un accroissement de la teneur en argile vers la profondeur à l'exception du sol brun calcique (tableaux 34 - 35 - 36 - 37 ) dans lequel l'horizon le plus argileux surmonte l'horizon d'altération du calcaire.

L'ensemble de ces échantillons appartient à la catégorie des textures argileuses dans le triangle des textures (fig.75 ) à l'exception de l'horizon profond du sol brun calcique.

- |                                 |                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| A <sub>10</sub> = Argile lourde | L <sub>m</sub> = limon moyen          |
| A = Argile                      | L <sub>mS</sub> = limon moyen sableux |
| AL = Argile limoneuse           | L <sub>l</sub> = limon léger          |
| AS = Argile sableuse            | L <sub>lS</sub> = limon léger sableux |
| LA = Limon argileux             | SL = sable limoneux                   |
| LAS = limon argilo-sableux      | SA = sable argileux                   |
|                                 | S = Sable                             |

= texture des échantillons de sols analysés.

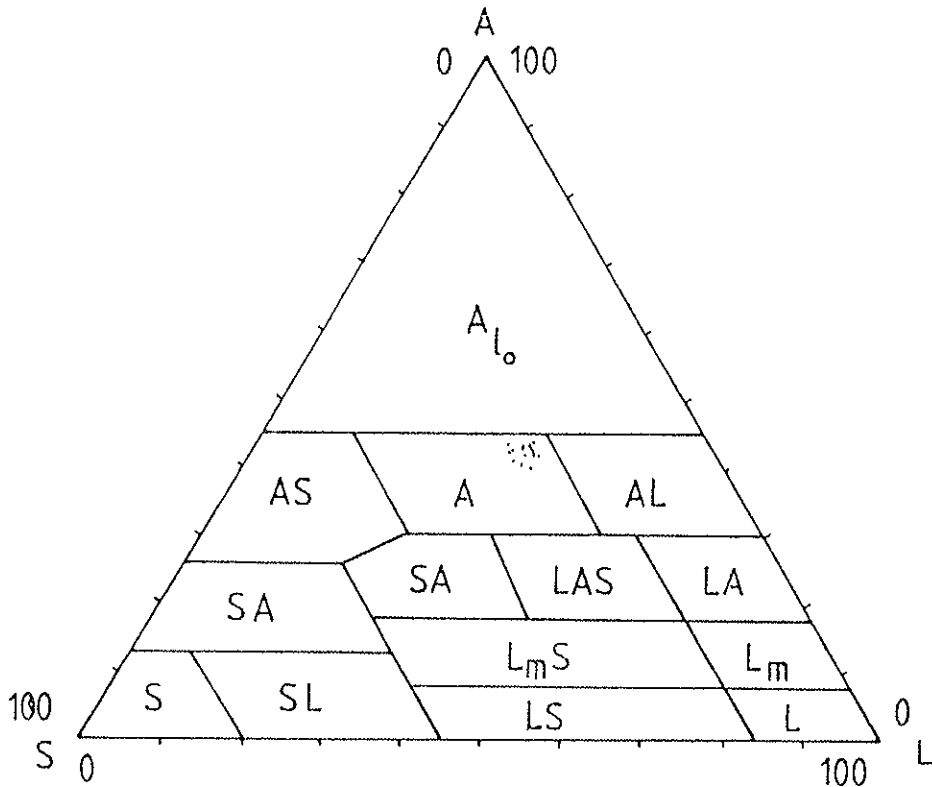


Fig. 75. - Triangle des textures d'après M. JAMAGNE 1967.

## 2). Caractéristiques minéralogiques

Si la texture nous renseigne sur le pourcentage des particules de taille différente, elle ne nous apporte pas d'information sur leur nature minéralogique. Aussi avons-nous entrepris de déterminer les principaux minéraux et plus particulièrement les minéraux argileux, qui les composent.

Cette détermination a été réalisée par une radiocristallographie aux rayons X sur les fractions inférieures à  $2\mu$  et à  $16\mu$  des horizons des profils DL1 (sol brun calcique) et DL3 (sol brun sur argile à chailles). Nous avons suivi la méthode utilisée par M. POCHON (1978) et effectué trois diffractogrammes par échantillon : normal, glicolé ; chauffé à  $500^{\circ}\text{C}$ .

Les échantillons traités dans les mêmes conditions montrent des spectres beaucoup plus marqués pour le sol brun calcique (DL 1, fig. 76) que le sol brun (DL3, fig. 77). Cette différence d'amplitude caractérise la présence de minéraux bien cristallisés dans le premier cas et de minéraux amorphisés dans le second, preuve d'une probable altération.

Les diffractogrammes de la fraction  $< 2\mu$  du sol DL1 (fig.76 ) montrent une prédominance de la kaolinite, du quartz, de l'illite et la présence de quelques interstratifiés et vermiculites. Tandis que le diffractogramme de la fraction  $< 2\mu$  du sol DL3 (fig.77 ) met en évidence une prédominance de l'illite et du quartz, les vermiculites, surtout présentes dans les horizons de surface, mais dissimulées par un bruit de fond important, notons la présence de la goethite.

Les diffractogrammes de la fraction  $< 16\mu$  du sol DL1 (fig.76 ) et du sol DL3 (fig.77 ) mettent en évidence les mêmes phénomènes, mais les interstratifiés semblent plus abondants. Le tableau 38, regroupe les principaux minéraux présents dans les horizons étudiés.

La composition minéralogique des fractions fines de ces deux sols se caractérise par une prédominance de la kaolinite dans le sol brun calcique sur calcaire et de l'illite dans le sol brun sur argiles à chailles. La kaolinite reconnue pour sa stabilité est la marque d'un facteur de détritisme ou d'héritage. Tandis que l'illite, par sa transformation progressive en vermiculite, due à un lessivage du potassium interfoliaire (M. POCHON, 1978) accompagnée d'une perte de silice est synonyme d'altération. Cette altération plus accentuée dans le sol brun (DL3) est renchérie par la présence de goethite.

## 3). Propriétés physico-chimiques

Nous venons de voir les propriétés physiques et minéralogiques de deux sols dont l'un, DL3, ressemble à DL2 et DL4. Les propriétés physico-chimiques des quatre sols supportant des lysimètres ont une importante influence sur la composition chimique des solutions du sol. Elles peuvent entraîner certains mouvements des éléments, ayant pour origine l'altération des constituants ou les apports extérieurs.

a). Deux types d'éléments sont présents dans les sols : les éléments d'altération du substratum ; les constituants du sol ; et les éléments apportés par les engrais.

- Eléments d'altération : ils proviennent de la transformation lente de minéraux primaires et phylliteux en illite et vermiculite par exemple. Cette transformation appelée brunification (en climats tempérés) se caractérise par une bisiallitisaiton ou une hydrolyse acide accompagnée d'une perte de silice, de fer, d'aluminium et de potassium par lixiviation (P. DUCHAUFOR, 1977).



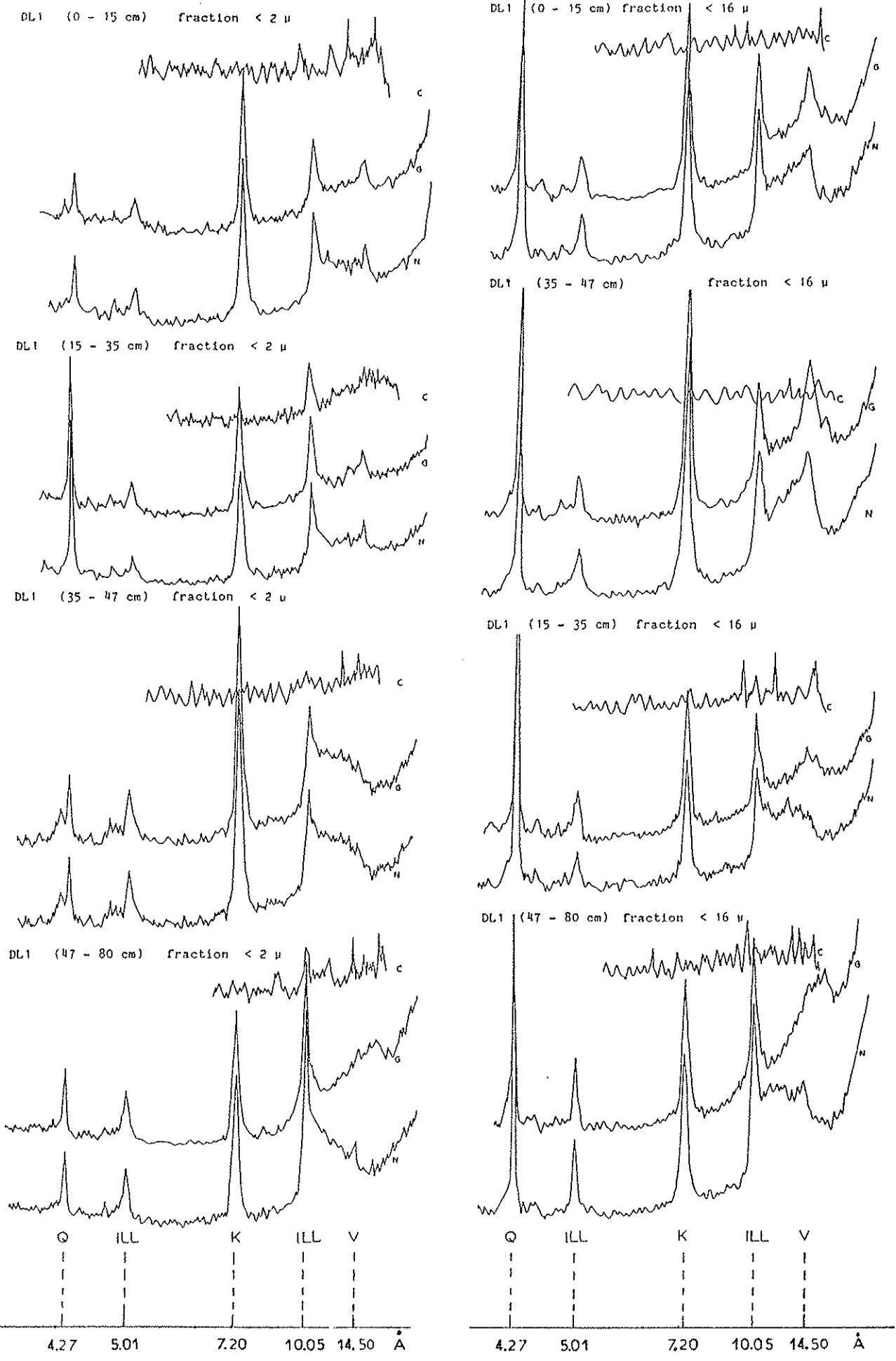
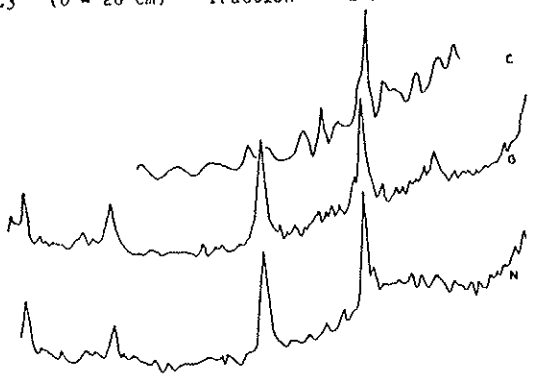


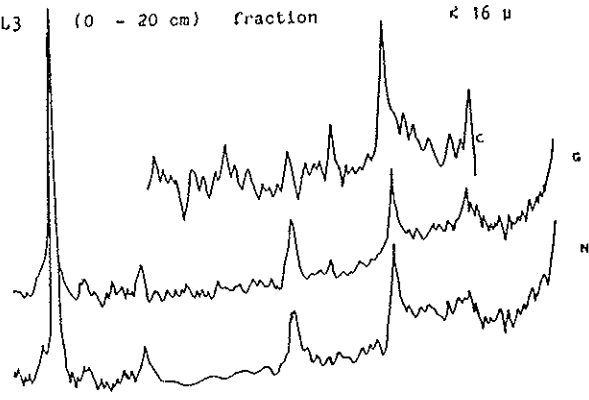
Fig. 76 - Diffractogramme du profil DL1 (sol brun calcique)

N normal  
 G glycolé  
 C chauffé

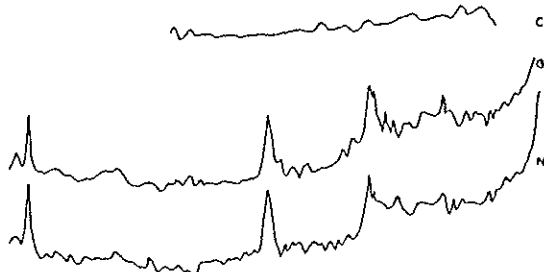
DL3 (0 - 20 cm) fraction < 2 μ



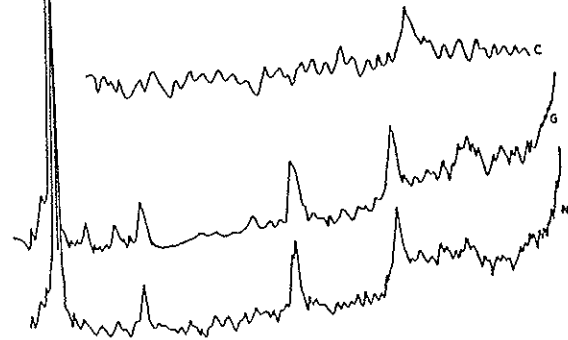
DL3 (0 - 20 cm) fraction < 16 μ



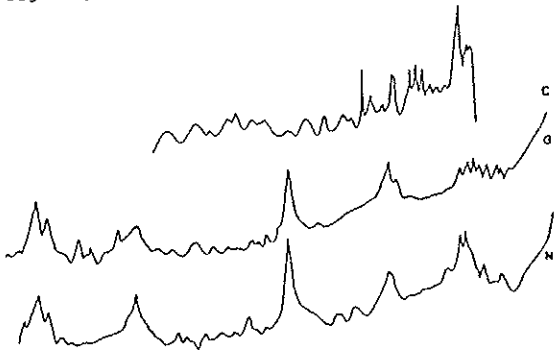
DL3 (20 - 33 cm) fraction < 2 μ



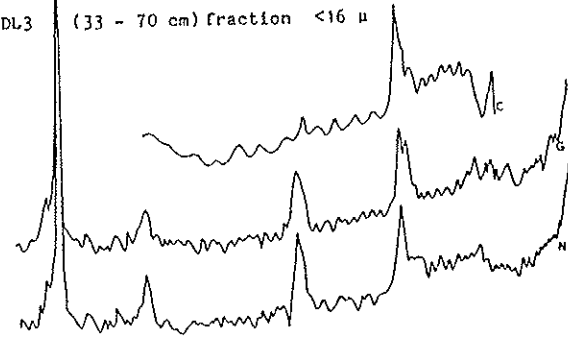
DL3 (20 - 33 cm) fraction < 16 μ



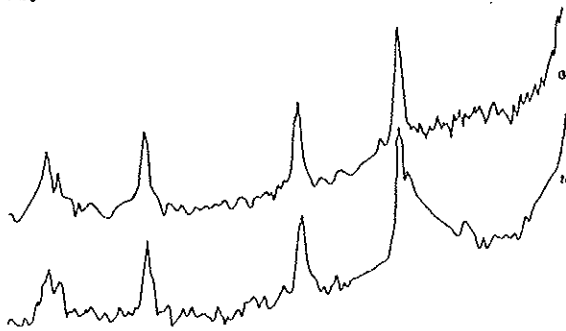
DL3 (33 - 70 cm) fraction < 2 μ



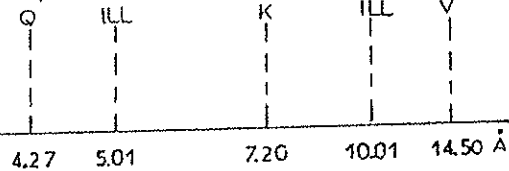
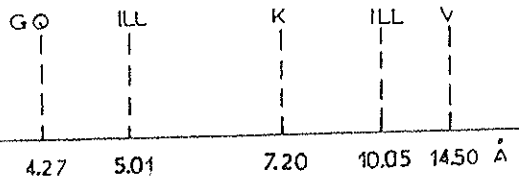
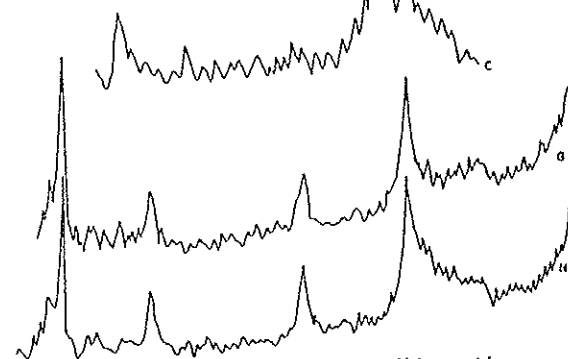
DL3 (33 - 70 cm) fraction < 16 μ



DL3 (70 - 130 cm) fraction < 2 μ



DL3 (70 - 130 cm, fraction < 16 μ



N normal  
G glycolé  
C chauffé

Fig. 77- Diffractogramme du profil DL3 (sol brun)

Echant.	Vermiculites	Chlorites	Illites	Kaolinites	Quartz	Felds. potas.	Plagio.*	Goethite	Interstrat.*	
DL1 Horizon 1	+	+	++	+++	+++	+	+		+	Fraction < 16μ
DL2 Horizon 2	+		++	+++	+++	+	+		+	
H <sub>z</sub> 3	+	+	++	+++	+++	++	++		+	
H <sub>z</sub> 4	+	+	++	+++	+++	++	++		+	
DL1 H <sub>z</sub> 1	+		+	+++	++	+	+		+	Fraction < 2μ
H <sub>z</sub> 2	+		++	+++	++	++	++		+	
H <sub>z</sub> 3	+		+	+++	+	(+)	(+)	+	+	
H <sub>z</sub> 4			++	+++	+	(+)	(+)		+	
DL3 H <sub>z</sub> 1	+		++	+	+++	++	(+)	+	+	Fraction < 16 μ
H <sub>z</sub> 2	++	(+)	++	+	+++	++	+	+	+	
H <sub>z</sub> 3	+	(+)	++	++	+++	+++	+	+		
H <sub>z</sub> 4	+		++	+	++	+	+	+	+	
DL3 H <sub>z</sub> 1	+		++	+	+	(+)		+	+	Fraction < 2μ
H <sub>z</sub> 2	+		++	+	+			+	+	
H <sub>z</sub> 3	+		++	+	+	(+)		+	+	
H <sub>z</sub> 4			++	+	+	(+)		+	+	

Tableau 38 Résultats minéralogiques aux RX

Felds. potas. = feldspaths potassiques - Plagio. = Plagioclases - Interstrat. = Interstratifiés.

(le nombre de croix symbolise l'abondance)

- Éléments dûs aux engrais : nous avons vu, dans la seconde partie de ce travail, la composition chimique des engrais (tableau 26). Nous rappellerons donc simplement les principaux éléments contenus dans ces produits : l'azote sous diverses formes est le principal élément épandu ; il est suivi du potassium et des phosphates (N, K, P) ainsi que du calcium. Ils s'accompagnent d'éléments épandus moins régulièrement tel que le magnésium, les sulfates, et d'éléments non indispensables, associés essentiellement aux phosphates et au potassium : la silice et les chlorures.

Parmi tous ces éléments, une première partie sera absorbée par les plantes tandis qu'une seconde sera immobilisée pendant des laps de temps plus ou moins longs dans le sol, enfin une troisième subira une lixiviation. Il existe donc une dynamique de ces éléments qui dépend de leur agencement. Un certain nombre de facteurs physicochimiques permet de caractériser ces sols.

### b). Facteurs physico-chimiques

Les quatre sols supportant des plaques lysimétriques révèlent quelques différences quant à leurs propriétés physico-chimiques (tableaux 34 - 35 - 36 - 37), un rappel de leur signification figure en annexe II, tableau 54.

- le taux de saturation (S/CEC) et la capacité d'échange de cations : le sol DL1 est saturé en bases échangeables et surtout en calcium (tableau 34) alors que le sol DL4 est dans l'ensemble sous saturé (tableau 37) car  $S/T < 75\%$  ; DL3 et DL4 ont un taux généralement compris entre 60 et 100 %. La "CEC" élevée dans le sol DL1 ( $< 20$  meq %) prouve que ce sol peut adsorber plus aisément les cations que les autres sols, ceci correspond à un taux d'argile plus élevé en surface que dans les sols DL 2-3-4.

- les teneurs en cations échangeables  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $K^+$  décroissent dans chaque horizon et dans cet ordre qui correspond à celui présenté par différents auteurs comme nous l'avons cité dans le second chapitre de la première partie (tableaux 34 à 37 et fig. 78).

Ces facteurs vont agir sur la dynamique des éléments constitutifs du sol.

### c). Dynamique des éléments dans le profil

L'analyse chimique et physique de chaque horizon des quatre sols étudiés met en évidence une évolution des cations ( $Mg^{++}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ), de la capacité d'échange cationique et de la composition granulométrique avec la profondeur (fig. 78: A-B-C-D). Mais ces analyses ne représentent que les valeurs des éléments compris dans les agrégats. Dans ce travail, nous nous intéresserons surtout à la solution du sol que nous analysons à la sortie des lysimètres, les éléments du sol influent donc sur cette solution.

- Cations échangeables : dans les quatre sols étudiés le magnésium diminue sensiblement avec la profondeur (fig. 78), alors que le calcium augmente ainsi que le potassium mais dans de moindres proportions sauf pour DL1. Ceci correspond également à un accroissement du taux d'argile granulométrique en profondeur dans les sols DL3 - DL4 - DL5 à l'inverse du sol DL1. Il apparaît donc des différences entre les sols DL2 - DL3 - DL4 et DL1 celles-ci peuvent constituer un argument en faveur de l'hypothèse avancée dans le chapitre quatre de la seconde partie selon laquelle le chimisme des eaux peut subir l'influence de la composition chimisme des sols pour certains éléments.

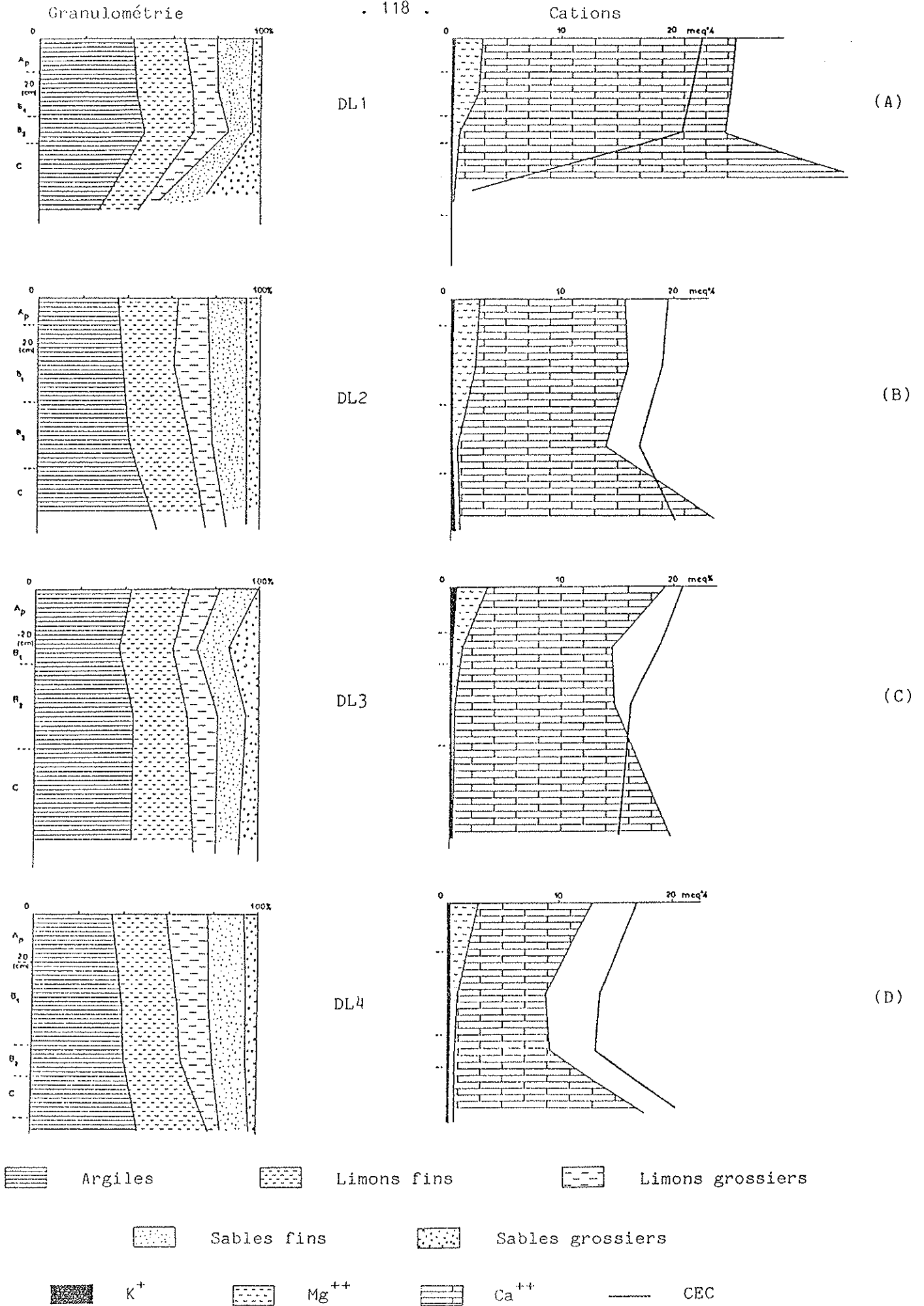


Fig. 78 - Granulométrie et dynamique des cations dans les profils DL 1-2-3-4.

- Dynamique dans la solution du sol : les éléments du complexe adsorbant après leur libération vont subir la loi de l'équilibre entre la phase aqueuse ou immobiles selon la quantité d'ions ( $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Fe}^{++}$ ) capables de les immobiliser autour du complexe adsorbant par l'intermédiaire de ponts chimiques (cas des phosphates), (annexe II, tabl.54 - comportement des éléments chimiques dans les sols). Dans notre cas la concentration en  $\text{P}_2\text{O}_5$  des sols est faible, ce qui diminue encore la possibilité d'une lixiviation de cet élément et d'en trouver abondamment dans les eaux de percolation.

En ce qui concerne le potassium la figure 78 B-C-D montre un léger accroissement vers la base du profil alors que la figure 82A, correspondant au sol DL1, laisse apparaître une diminution sensible. A la base de chaque profil et avant de s'infiltrer dans le karst, la solution du sol sera plus concentrée en potassium dans les sols bruns épais (types DL 2-3-4) que dans les sols calciques ou à tendance calcique (type DL1).

Le magnésium varie en surface grâce aux échanges et apports dûs à la décomposition des végétaux et aux engrais. En profondeur il varie très peu, quelque soit le type de sol.

Le comportement de ces deux ions ( $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{++}$ ) ainsi que celui (de  $\text{Ca}^{++}$ ) permet de penser que l'hypothèse avancée précédemment et selon laquelle le type de sol aurait une influence sur le chimisme des eaux en étiage, semble plausible.

#### IV - AZOTE ET POTENTIEL DE MINERALISATION DANS LES SOLS

Des travaux récents ont montré que dans les sols bruns calcaires, lessivés et bruns calciques, la perte d'azote par lixiviation et lessivage décroît avec la profondeur (B. DUQUET, 1985). La production d'azote minéral est proportionnelle à la quantité d'azote contenu dans le sol, mais elle se situe en deçà d'un seuil appelé "potentiel de minéralisation de l'azote" en période de décroissance de la végétation (B. MARY - J.C. REMY - 1979). Nous avons donc déterminé ce potentiel de minéralisation de l'azote en suivant la méthode établie et testée par G. STANFORD en 1974.

##### 1). DESCRIPTION DE LA METHODE DE G. STANFORD - 1974

a). Les sols : nous avons utilisé les échantillons des horizons de sols prélevés lors de l'installation des lysimètres.

b). Méthode expérimentale : nous avons suivi le mode opératoire proposé par G. STANFORD et al. en 1974. Chaque échantillon de 40g de sol a été mélangé à 40g de silice ; humidifié à 20 % de son poids ; placé dans des tubes allongés de 150 ml , 42 mm de diamètre (réalisés à cet effet), et obstrués par un bouchon de coton de verre au fond et au-dessus pour éviter toutes perturbations du sol au cours des lessivages.

L'azote minéral initialement présent dans l'échantillon est éliminé grâce à un premier lessivage réalisé avec 150 ml de  $\text{CaCl}_2$  (0.01M). Celui-ci est suivi d'un apport nutritif dépourvu d'azote et composé de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0,002 M) ;  $\text{MgSO}_4$  (0,002M) ;  $\text{CaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0,005M) et de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (0,0025 M). l'excès d'eau est extrait par une aspiration à 0,8 bar pour obtenir le poids initial de l'échantillon humide.

L'extrémité supérieure du tube est ensuite bouchée, alors que l'extrémité inférieure laisse passer suffisamment d'air pour que le système reste aérobie. L'ensemble est ensuite placé dans une étuve à 35°C durant des périodes déterminées . Cette expérience est réalisée à température et humidité constante .

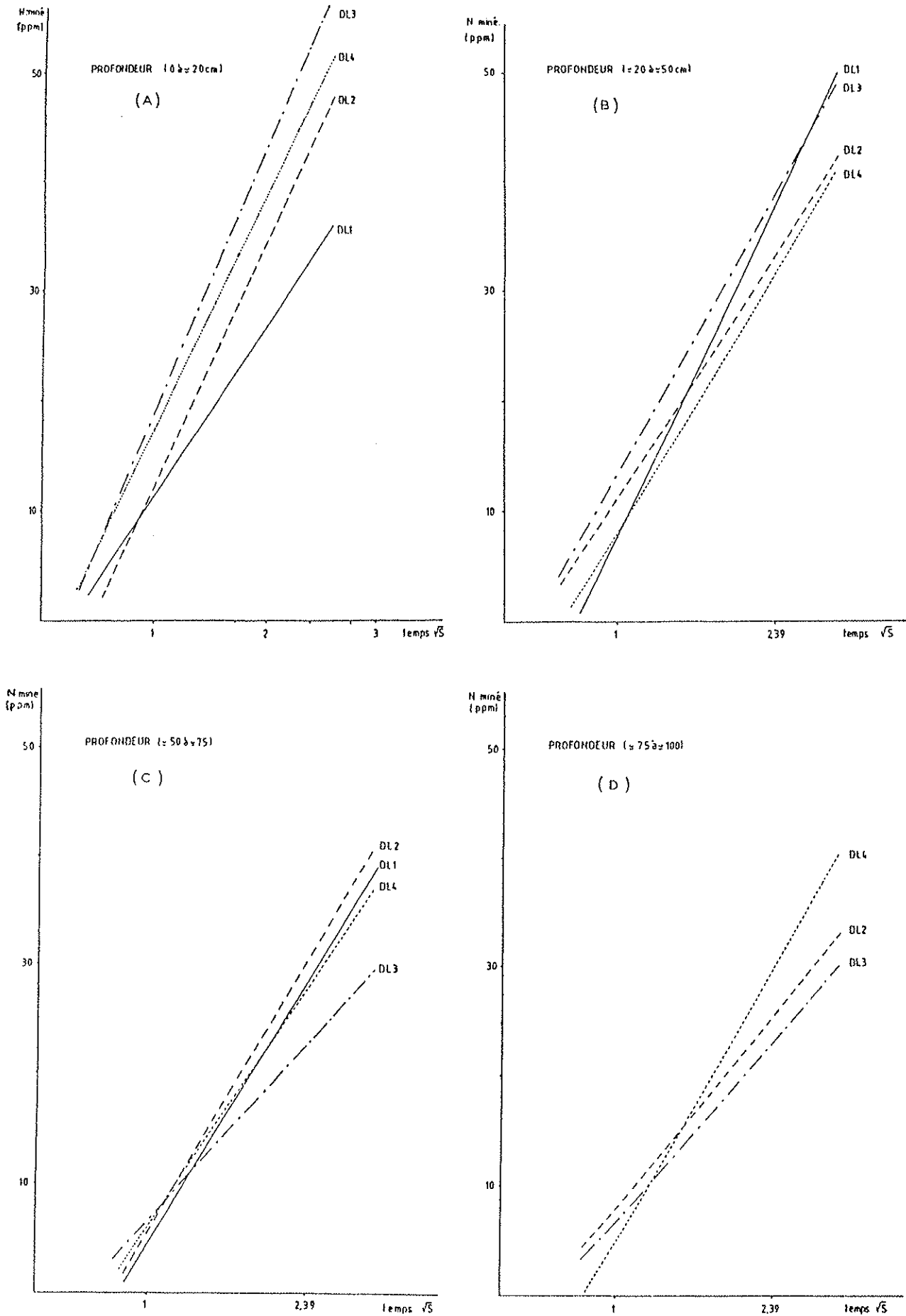


Fig. 79 - Vitesse de minéralisation de l'azote

Après chaque incubation, un nouveau lessivage est effectué avec 150 ml de CaCl<sub>2</sub> versés progressivement, auxquels sont ensuite ajoutés 15 ml de solution nutritive, avant une nouvelle incubation.

c). Détermination de l'azote minéral :

La méthode utilisée est celle de G. STANDFORD en 1972. Nous avons additionné 0,5 g d'alliage Dévarda à 2 ml de NaOH (10N) et 50 ml de filtrat placé dans des flacons Kjeldahl. Après une heure (à froid) nous avons distillé cette solution dans l'acide borique et titré à l'acide sulfurique (0,005 N).

d). Résultats et interprétations :

Plusieurs paramètres peuvent être obtenus: la vitesse de minéralisation et le potentiel de minéralisation de l'azote des horizons des quatre types de sols étudiés.

- Vitesse de minéralisation : la figure 79 représente la relation entre l'azote minéral cumulé et la racine carrée du temps (en semaine) en fonction de la profondeur. La vitesse de minéralisation est d'autant plus rapide que la pente est plus forte.

L'horizon de surface (A) met en évidence une vitesse de minéralisation plus faible dans le sol brun calcique (DL1) que dans les sols bruns (DL2 - DL3 - DL4). L'horizon sous-jacent (B) montre une vitesse de minéralisation à peine plus faible pour DL2-3-4 que précédemment et sensiblement plus élevée pour DL3. Dans les horizons profonds (C - D), cette vitesse plus homogène semble diminuer plus rapidement dans le sol brun (DL3).

La vitesse de minéralisation diminue régulièrement avec la profondeur à l'exception du sol brun calcique DL1 (tableau 39).

(cm)	Pente	N <sub>t</sub> (ppm)	No	r	k	NoK	% No/NSol
DL1 0-15	14,72	32,3	221	0,997	0.030	9.28	8
15-35	20,83	39,1	267	0,999	0.032	11.21	11.6
35-47	13,91	25,6	175	0,994	0.048	7.18	13.5
47-80	11,96	21,7	148	0,990	0.059	6.21	10
DL2 0-12	22,42	44,7	286	0,988	0.057	12.87	13
12-47	15,66	36,3	233	0,994	0.040	10.48	12.9
47-77	12,77	22,8	146	0,995	0.056	6.57	13.2
77-100	12,56	24,1	154	0,997	0.032	6.93	22
DL3 0-20	24,49	52,5	336	0,999	0.032	15.12	12.9
20-33	18,08	39,2	251	0,996	0.037	11.29	11.9
33-70	11,60	23,4	150	0,987	0.065	6.75	15.0
70-130	11,74	23,0	147	1,000	0.051	6.61	23.0
DL4 0-22	21,37	4,71	302	1,000	0.022	13.59	14
22-60	16,88	31,9	204	0,998	0.030	9.18	17
60-74	11,70	22,5	144	0,996	0.032	6.48	24
74-93	12,51	22,5	143	1,000	0.062	6.43	24

Tabl. 39 - Paramètres caractéristiques de la minéralisation de l'Azote dans les sols du bassin représentatif



- Potentiel de minéralisation : d'après G. STANDFORD et S.J. SMITH (1972), le potentiel de minéralisation s'exprime par l'équation  $dN/dt = kN$ , si l'on admet l'hypothèse que "le taux de minéralisation est proportionnel à la valeur du potentiel d'azote minéralisable". L'intégration de cette équation donne :  $\log (N_0 - N_t) = \log N_0 - k/2,303(t)$ .

$$\text{d'où } N_0 = N_t / (1 - 10^{-kt/2,303})$$

avec  $N_0$  = Potentiel de minéralisation (ppm de N -  $\text{NO}_3^-$ )

$N_t$  = Azote minéralisé - cumulé (ppm de N -  $\text{NO}_3^-$ )

t = Temps (semaine)

k = Constante de vitesse

L'expérience en laboratoire a duré 3,77 semaines, ce qui nous a permis de calculer les valeurs de k (tableau 39), dont les variations s'atténueraient pour une durée expérimentale plus longue. Néanmoins les valeurs moyennes de K pour chaque type de sol sont de :

$$\bar{k} = 0,045 \text{ pour les sols bruns (DL2 - 3 - 4)}$$

$$\bar{k} = 0,042 \text{ pour le sol brun calcique (DL 1)}$$

Le potentiel de minéralisation  $N_0$  peut donc être calculé d'après l'équation ci-dessus ainsi que le pourcentage de  $N_0$  par rapport à l'azote total du sol (tableau 39). Il en ressort que les potentiels de minéralisation sont élevés et décroissent logiquement avec la profondeur.

Bien que nous soyons en présence de sols différents, les potentiels de minéralisation semblent assez proches. Ils représentent le stock d'azote minéralisable dans le sol et k sa constante de dégradation.

Cette méthode présente des limites notamment dans le calcul de k car la durée d'incubation est courte et le calcul direct de  $kN_0$  serait plus fiable (B. MARY et J.C. REMY, 1979) (tableau 39).

### Conclusion du septième chapitre

\* Le bassin expérimental d'environ 70hectares installé à Chilly sur Salins, au Nord du bassin d'alimentation des sources de la Cuisance, va nous permettre de suivre le comportement des eaux.

- dans certains sols grâce à l'installation de plaques lysimétriques

- dans la partie supérieure de l'épikarst en comparant les eaux de percolation dans les sols à celles du "ru du Bas de Prôle" qui draine ce petit bassin.

\* les sols retenus pour l'installation des plaques lysimétriques sont de deux types et supportent quatre cultures différentes.

- le premier type est un sol brun calcique sur calcaire et sous culture de céréales, situé à mi-pente, riche en argile (> 40 %). Il est saturé en bases et a un pH compris entre 6,25 et 7,90. Les principales argiles qui le compose sont la kaolinite, l'illite. Les phyllites apparaissent très bien cristallisées.

- le deuxième type comprend trois sols bruns épais sur argiles à chailles. Ces trois sols sont riches en argile (> 35 %), à pH compris entre 5,2 et 6,0 et pratiquement désaturés en bases. DL2 est situé en bas de

penne, sous prairie naturelle ; DL3 est situé à mi-pente, sous prairie artificielle récente ; DL4 est situé sur un sommet sous culture céréalière. Les principales argiles, l'illite, la vermiculite, les interstratifiés, la kaolinite et le spectre des Rayons X d'allure floue (faible amplitude des pics) indique que ces phyllites sont en voie de transformation par acidolyse (vermiculite - interstratifié) dans un milieu légèrement confiné (caractère floue des pics et expression de la goethite).

La matière organique se minéralise facilement en azote nitrique, les potentiels de minéralisation, établis selon la méthode de G. STANDFORD (1974), sont très élevés (200 ppm) et accompagnés d'un coefficient de dégradation moyen ( $k = 0,04$ ) qui signifie que la minéralisation de l'azote est rapide. Celle-ci sert à la nutrition des plantes et des microorganismes, mais sera aisément lixiviable au cours des précipitations importantes.

## CHAPITRE VIII - HYDROCHIMIE DU BASSIN EXPERIMENTAL

Dans ce chapitre, nous allons développer le suivi hydrochimique réalisé sur le bassin expérimental. L'eau qui percole à travers les sols, jusqu'aux lysimètres (installés à 40 cm de profondeur environ), va nous apporter des informations sur les conséquences des pratiques culturales et sur le comportement chimique de ces eaux dans deux types de sols situés dans des positions topographiques différentes (voir chapitre 1, troisième partie). Quant au suivi chimique du ru du Bas de Prôle, il nous montre la réponse d'une source karstique proche de la surface.

En raison des faibles précipitations et de la sécheresse estivale, aucun échantillon n'a pu être prélevé de mi juillet au 10 septembre, ce qui perturbe la comparaison avec l'étiage de la Cuisance.

Après chaque prélèvement, une série de mesures physiques in situ (pH, T°, conductivité) a été effectuée, elle a été suivie d'un filtrage (pores à 0,45 µ). Parfois, une légère coloration de la solution recueillie subsistait. D'après M. POCHON (1978) la présence de très fines particules argileuses serait responsable de ce trouble que nous avons surtout rencontré dans les échantillons du lysimètre DL2.

Aucun appareil n'enregistrait les débits du ruisseau (un limnigraphe à bulle aurait été nécessaire en raison d'un très faible débit et d'un risque d'envasement important), aussi à chaque prélèvement une mesure "au bouchon" a tenté de combler cette lacune. Nous n'obtenons dans ce cas que l'approximation d'un débit sans connaître les pointes de crue.

### I - HYDROCHIMIE GLOBALE DU BASSIN EXPERIMENTAL

#### 1). CHIMISME GENERAL

Le tableau 40 regroupe les moyennes obtenues au cours d'un cycle végétatif (Mars 84 à Mars 85) pour les eaux qui percolent à travers les sols jusqu'au ruisseau, ou qui proviennent des précipitations.

Les eaux de percolation des lysimètres ont des valeurs plus concentrées sous culture que sous prairie, notamment en ce qui concerne l'azote; les chlorures; le calcium; en raison d'une quantité d'engrais épandus plus abondante et d'une pratique culturale différente.

Le dosage des bicarbonates n'est qu'une valeur approximative car il inclut une partie du CO<sub>2</sub> du sol.

mg/l	pH	Cond	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	FeI
DL1 culture	6,6	504	11,9	14,3	94,4	0,29	35,6	0,24	1,1	53	0,98	1,5	2,4	1,45	0,34
DL2 prairie n.*	6,16	76	4,2	12,9	29,1	0,10	4,70	0,02	0,2	11,6	0,57	0,6	0,7	3,3	0,52
DL3 prairie a.*	5,92	145	4,1	12,5	30,9	0,98	24,6	0,64	0,14	14,2	0,86	1,0	1,9	2,1	0,76
DL4 culture	6,34	291	15,0	13,3	28,0	0,28	48,3	0,22	0,21	29,5	0,75	2,3	1,98	2,15	1,18
RU	7,20	539	8,0	5,0	26,1	0,03	18,3	-	0,01	97	0,45	2,25	2,0	2,49	0,22
Précipi- tation	5,50	34	2,06	3,85	-	0,12	1,57	0,005	0,64	2,04	0,21	0,08	0,29	0,19	-
Grotte	7,25	525	4,13	6,1	24,7	0,06	4,9	-	-	88,5	0,6	1,6	1,2	1,6	-

Tableau 40 - Valeurs moyennes des eaux du bassin expérimental (Mars 84 - Mars 1985)

\* prairie n. = prairie naturelle, \* prairie a. = prairie artificielle.

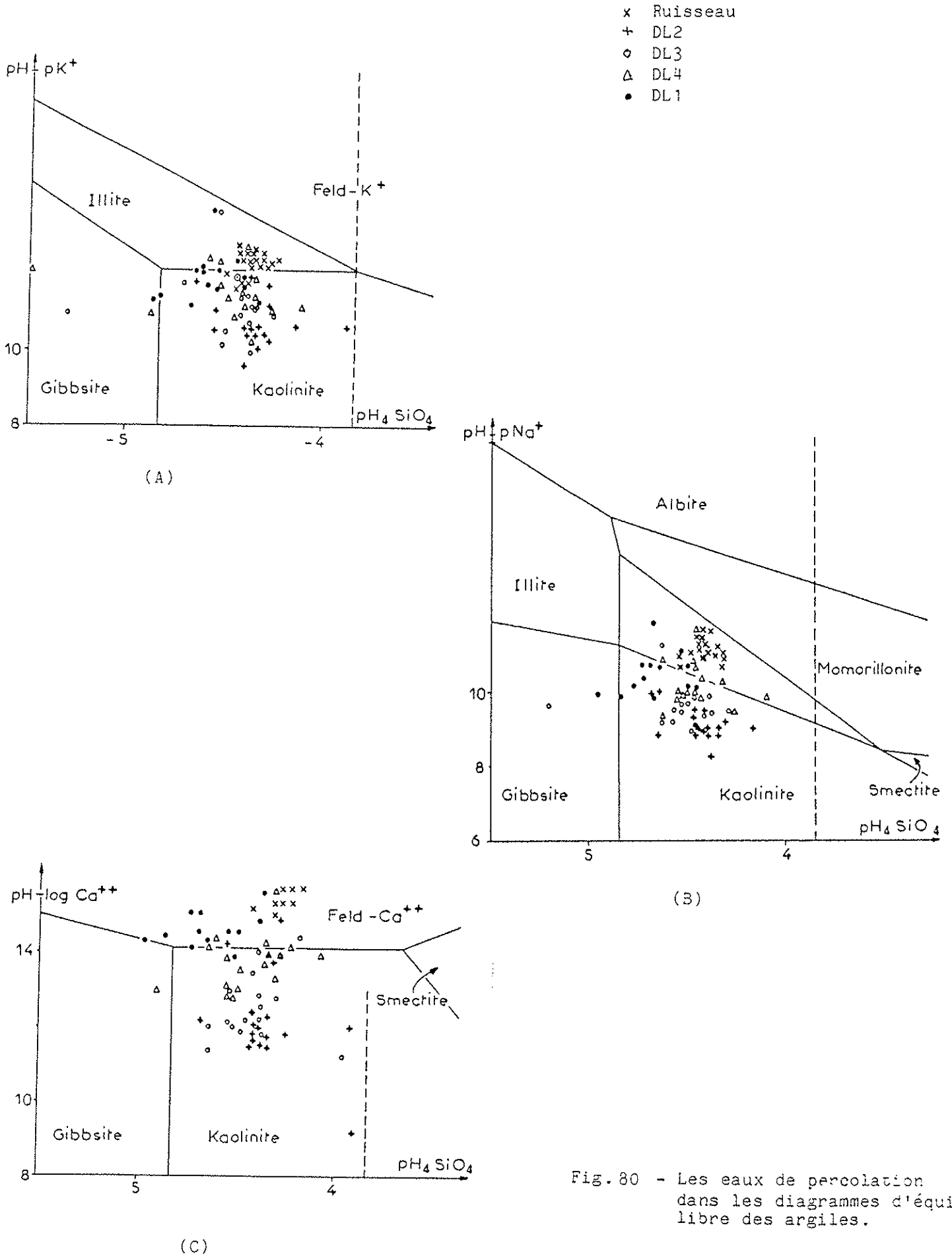


Fig. 80 - Les eaux de percolation dans les diagrammes d'équilibre des argiles.

Quelques analyses des eaux de précipitation (17 à Chilly sur Salins) font ressortir une faible concentration de la plupart des éléments (tableau 40)

La comparaison du pH des eaux de percolation de chaque lysimètre avec celui du sol correspondant (fig.81 ), mesuré sur les prélèvements de Février 84, fait apparaître une étroite relation entre DL 1 et DL 3. DL 2 et DL 4 s'écartent légèrement de la droite qui symbolise l'équilibre car le pH des eaux de percolation est plus élevé que celui des sols. L'élévation du pH des eaux de DL4 et DL1 aurait pour origine la proximité du substrat calcaire. Alors que celle de DL2 pourrait être due à la position topographique de ce lysimètre (situé en bas de pente, à l'amont immédiat de la source du ru du Bas de Prôle), puisque les eaux à circulation latérale, ayant coulé à proximité du substrat calcaire, peuvent se mêler aux eaux gravitaires et météoriques et provoquer une légère augmentation du pH.

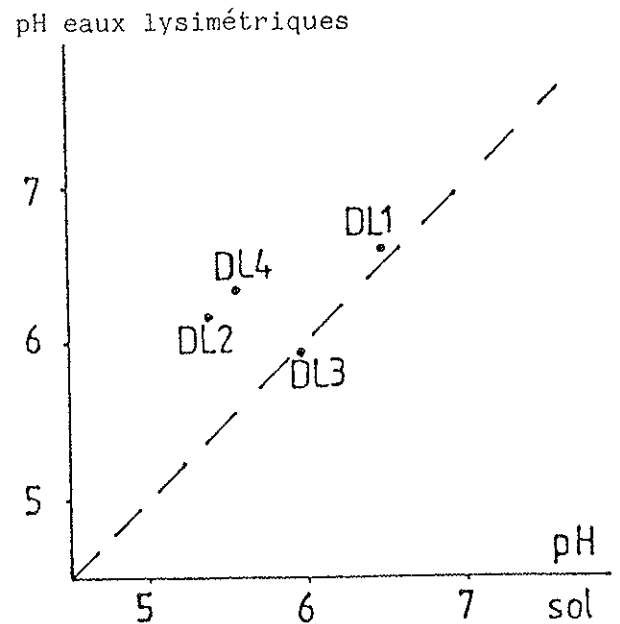


Fig. 81 - Relation entre le pH sol et le pH des eaux de percolation des lysimètres.

## 2). Les eaux de percolation dans les diagrammes d'équilibre des argiles

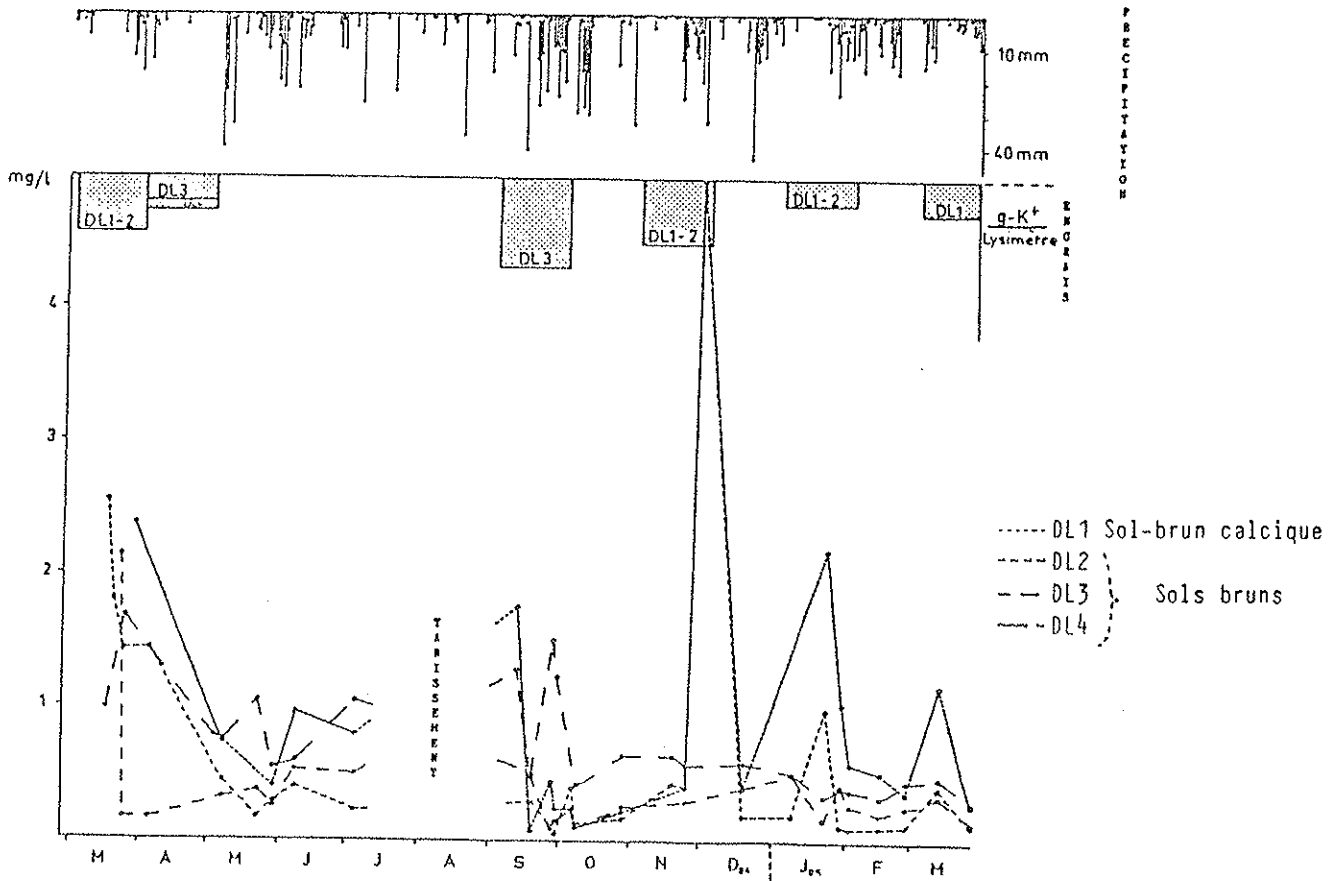
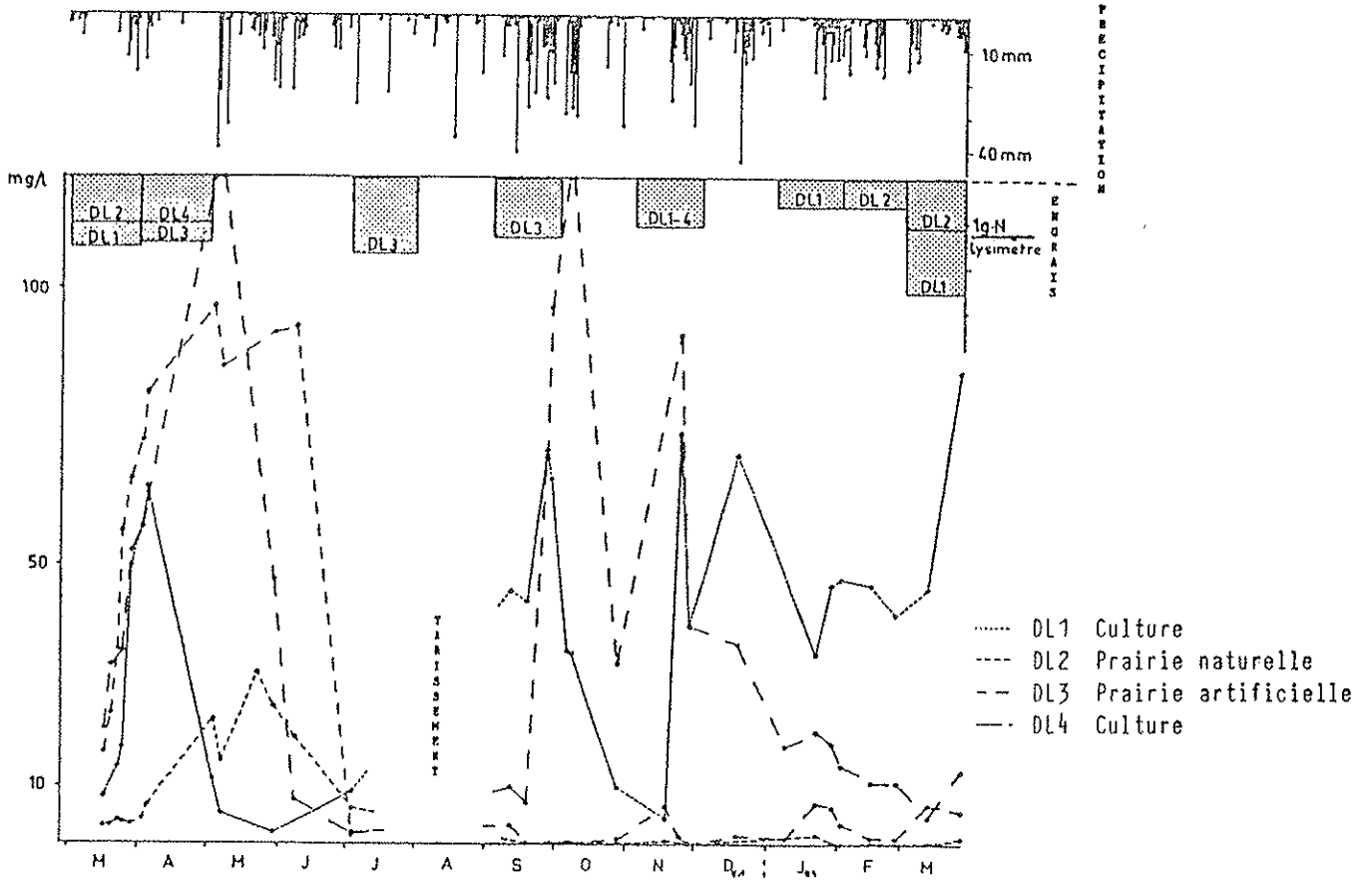
Nous avons reporté les échantillons d'eau analysés, provenant des lysimètres et du ru du Bas de Prôle, sur les diagrammes d'équilibre des argiles pour les systèmes:  $\text{Na}_2\text{O}$  ;  $\text{K}_2\text{O}$  ;  $\text{CaO}$  ;  $\text{SiO}_2$  ;  $\text{H}_2\text{O}$  (G. MILLOT, 1964, M. POCHON 1978) (Fig. 80 ).

L'ensemble des eaux se regroupe dans le domaine de stabilité de la kaolinite mais également de l'illite ; de l'albite et des feldspaths. Toutefois il convient de remarquer que les eaux du ru du Bas de Prôle sont plus proches de l'équilibre avec l'illite (fig. 80 - A) et les feldspaths  $\text{K}^+$ . Alors que les eaux de DL1 sont en équilibre à la fois avec l'illite, la kaolinite et les feldspaths. Ceci peut être dû au pH qui en ordonnées influe fortement sur la position des points, (surtout pour DL1).

Dans le diagramme (fig. 80 - B ), les eaux du ru du Bas de Prôle et du sol DL1 sont en équilibre avec les feldspaths Ca, probablement en raison de la proximité du substratum calcaire et du taux de saturation élevé dans le sol DL1 (brun calcique, riche en  $\text{Ca}^{++}$ ).

Dans le diagramme (fig.80 - C ), l'ensemble des points est en équilibre avec l'illite et la kaolinite ce qui correspond à des échanges "eaux - minéraux argileux" riches en illite et kaolinite observés sur les diffractogrammes X.

Donc certains éléments proviendraient du substratum calcaire ( $\text{Ca}^{++}$ ) alors que d'autres proviendraient également du sol ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) par lixiviation à la suite d'une acidolyse et par perte de potassium par exemple. Cependant



l'interprétation de ces diagrammes nécessite une grande prudence en raison de l'influence du pH dont les variations peuvent masquer celles des ions  $K^+$ ;  $Na^+$ ;  $Ca^{++}$ .

## II - EVOLUTION CHIMIQUE ET SAISONNIERE DES EAUX LYSIMETRIQUES

Les figures 82 à 90 rendent compte de l'évolution des différents éléments chimiques et physiques qui composent les eaux de percolation des quatre lysimètres. Nous y avons ajouté les épandages correspondant à chaque élément ainsi que les hauteurs moyennes journalières des précipitations à défaut d'une mesure des quantités d'eau récupérées (débordement des flacons récupérateurs).

### 1). L'AZOTE :

Nous avons choisi de suivre l'évolution des nitrates, éléments très solubles qui risquent de subir une lixiviation vers les eaux souterraines plus rapide que les autres.

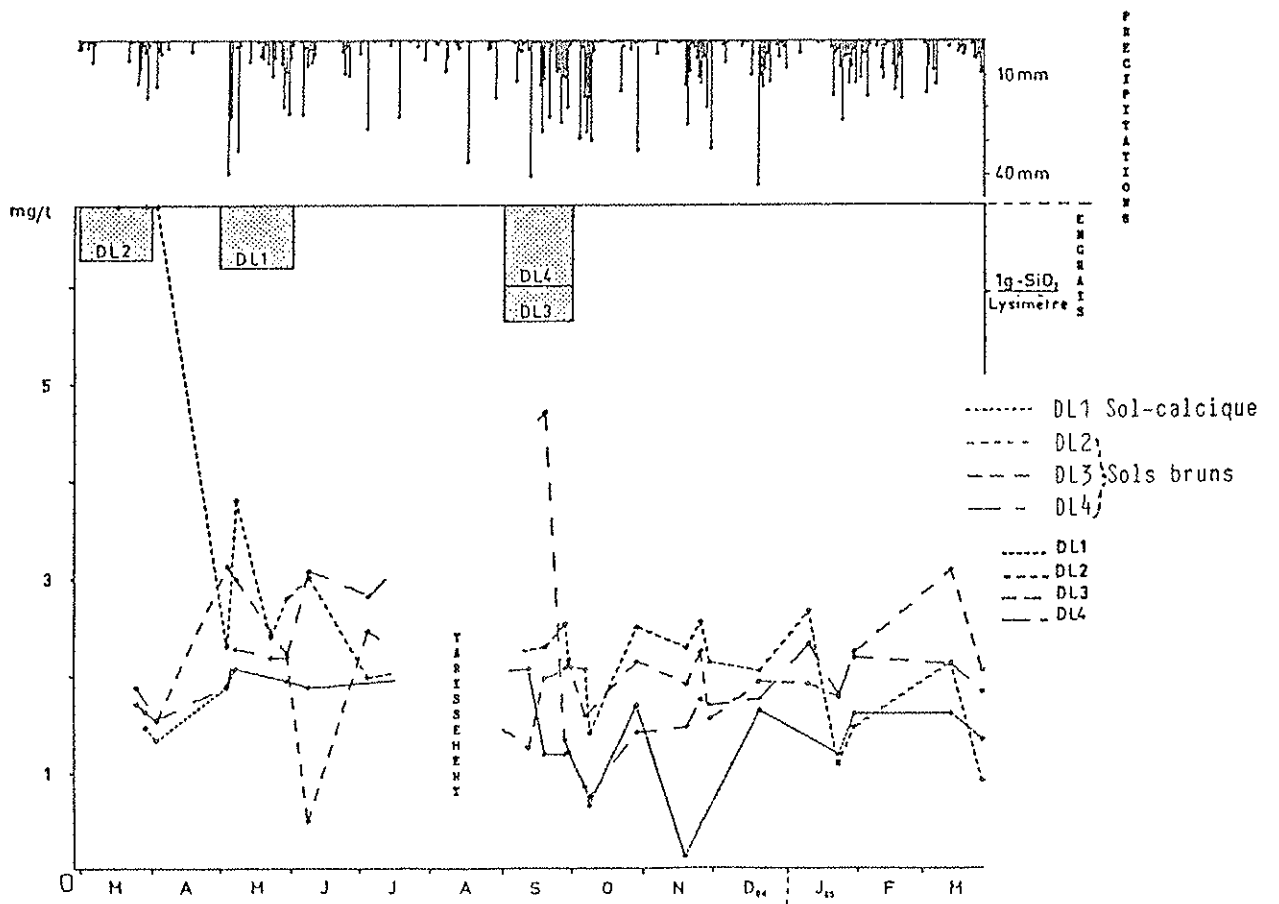
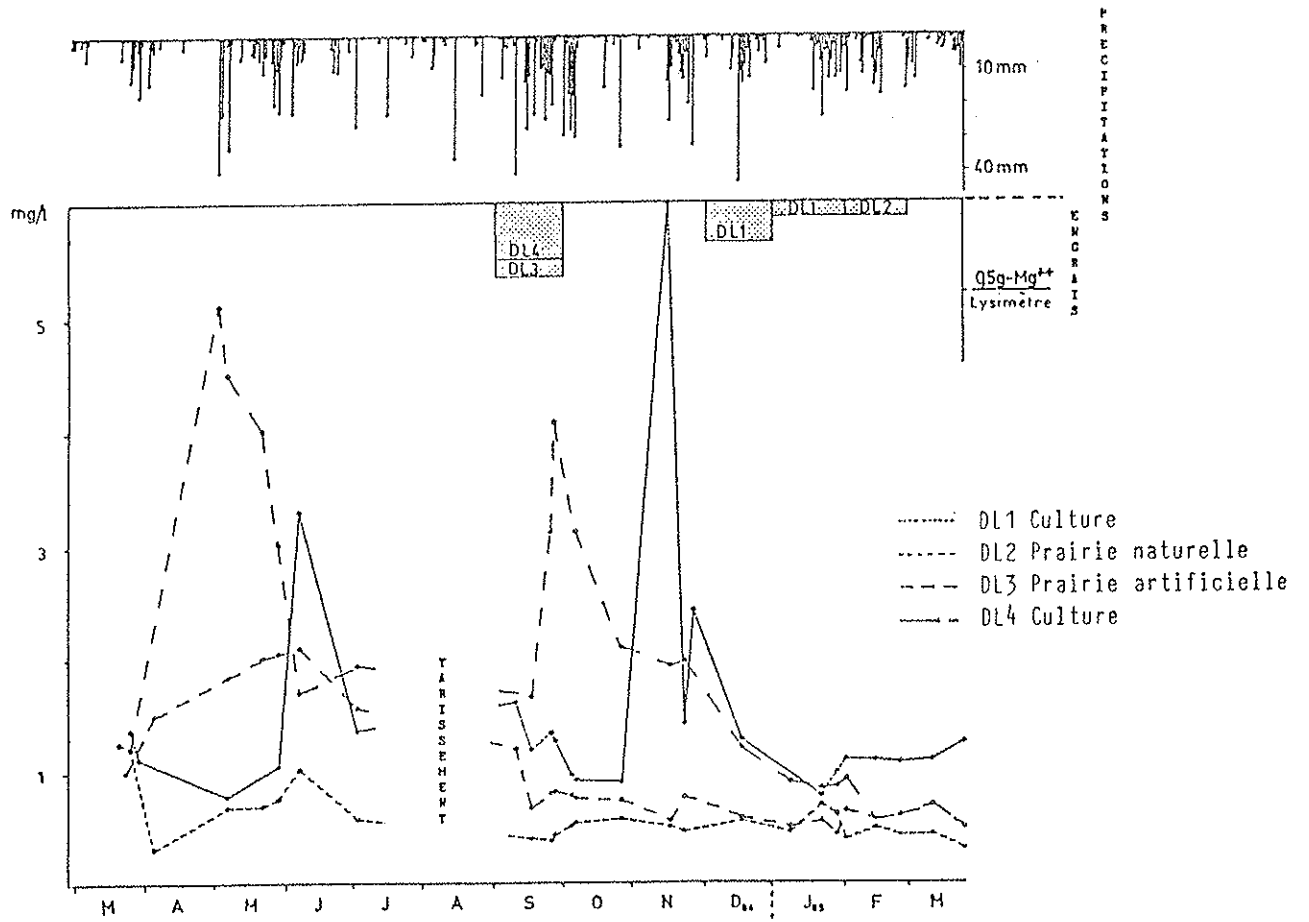
. Il apparait (fig. 82) qu'au printemps (mars 84 à juin 84) et sous prairie naturelle (DL2), la teneur en nitrate, dans les eaux de percolation est très nettement inférieure à celle de la prairie artificielle récente (DL3) ou des cultures (DL1 - DL4). Par contre, le temps de réponse de DL2 est un peu plus long après un épandage, probablement en raison de l'absence de labour, ce dernier favorisant la minéralisation de l'azote. La pratique culturale est donc directement responsable des teneurs en éléments fertilisants retrouvées dans les eaux de percolation pour des doses et des périodes d'épandage similaires.

. En automne et en hiver seuls les sols cultivés exportent une forte quantité de nitrates dans les lysimètres. A cela deux explications :

- la première : à la fin de l'été (septembre), il ne reste que des chaumes, donc la consommation en azote par les plantes est nulle alors que les micro-organismes nitrifiants continuent leur activité dans des conditions favorables. Aussi dès les premières pluies, suffisantes pour provoquer une lixiviation, les nitrates sont entraînés en profondeur. Sous prairies la consommation en azote continue, même si elle ralentit, ce qui explique les très faibles teneurs en nitrates à cette époque.

- la seconde : les sols cultivés (DL1-DL4) subissent un labour en automne (Octobre - Novembre 84) avec un enfouissement des chaumes précédé d'un épandage de fumier. Il s'accompagne d'une minéralisation de courte durée donc d'une lixiviation des nitrates. Puis la température s'abaisse et inhibe les bactéries nitrifiantes ce qui entraîne la chute des teneurs en nitrates de DL4. Par contre l'apport répété d'engrais dans la parcelle qui supporte DL1 contribue à l'augmentation de la teneur en nitrates dans les eaux de percolation plus élevée que dans les autres sols.

Si l'on compare l'évolution des trois formes d'azote analysé :  $NO_3^-$ ;  $NO_2^-$ ;  $NH_4^+$  (Fig. 114 - 115 - annexe III), on constate que la minéralisation est assez rapide (nous y reviendrons dans le dernier paragraphe de ce chapitre) puisque la lixiviation des nitrites et de l'ammonium est faible





## 2). LE POTASSIUM

Il semble réagir moins sensiblement que l'azote aux pratiques culturales ou aux espèces végétales (fig. 83 ). Les concentrations les plus élevées dans les eaux de percolation sont étroitement liées aux épandages agricoles, puisque DL1 - DL2 - DL3 présentent des pics de potassium qui correspondent aux épandages. Cependant, nous observons une baisse des concentrations au printemps dans les quatre lysimètres, elle correspond à la consommation par les plantes. En automne et en hiver, des augmentations de la teneur en  $K^+$  se distinguent des périodes d'épandages (notamment pour DL1, DL2, DL3 et résultent de la lixiviation de  $K^+$  originaire de la décomposition de la végétation annuelle (M. POCHON 1978).

L'ion  $K^+$  pourrait donc présenter deux processus de lixiviation: le premier correspondrait à un entraînement rapide par les eaux à partir des horizons supérieurs et montrerait l'influence de la croissance et de la décomposition végétale; le second nécessiterait l'action de l'acidolyse pour entraîner cet ion à partir du complexe absorbant et des argiles ce qui exigerait un séjour plus prolongé des eaux de percolation dans les sols.

## 3). LE MAGNESIUM

Très peu soluble et bien fixé par le complexe argilo-humique, son entraînement par les eaux de percolation ne semble pas subir l'influence des épandages, peu abondants (fig. 84 ). Par contre, la pratique culturale et la végétation influent sur sa lixiviation. En effet les eaux de percolation de DL2 (prairie naturelle) présentent des teneurs toujours faibles et sans grande variation, alors que les eaux de DL4 (culture très récente) montrent des teneurs plus élevées et plus irrégulières au printemps et en automne. Dans le premier cas (printemps) la décomposition de la prairie retournée en automne 1984, permet une lixiviation de l'ion  $Mg^{++}$ ; dans le second cas (automne) l'augmentation de la concentration dans les eaux de percolation intervient après un épandage de magnésium.

Le magnésium se comporte de façon similaire pour les autres lysimètres DL1 et DL3 dans de plus faibles proportions.

## 4.) LA SILICE

La figure 85 met en évidence, pour l'ensemble des valeurs, une teneur en silice plus faible dans les eaux de percolation du lysimètre DL1, installé dans un sol brun calcique plus riche en kaolinite qu'en illite et moins épais. D'autre part, après des épandages riches en silice, des pics de concentration apparaissent et témoignent d'un entraînement de celle-ci par les eaux (Mars-DL2 Sept. DL4) météoriques, ainsi que quelques colloïdes bien que nous ayons tenté de les éliminer.

Ces résultats confirmeraient l'hypothèse avancée au chapitre 3 de la seconde partie, selon laquelle les eaux à temps de séjour long se chargent plus de silice dans les sols épais à argiles à chailles que dans les sols superficiels et calciques.

## 5) LES SULFATES

Leur présence dans les eaux de percolation fait preuve d'une certaine indépendance vis à vis du type de sol ou de la végétation considérés (fig.86 ). Par contre l'influence des épandages est importante. Les pics de concentration en Mars et Avril 1984 pour DL1 et DL2 interviennent après des épandages de fumiers respectivement en Janvier et Février 1984, ainsi qu'en Novembre 1984 (DL1 et DL2) et Janvier 1985.

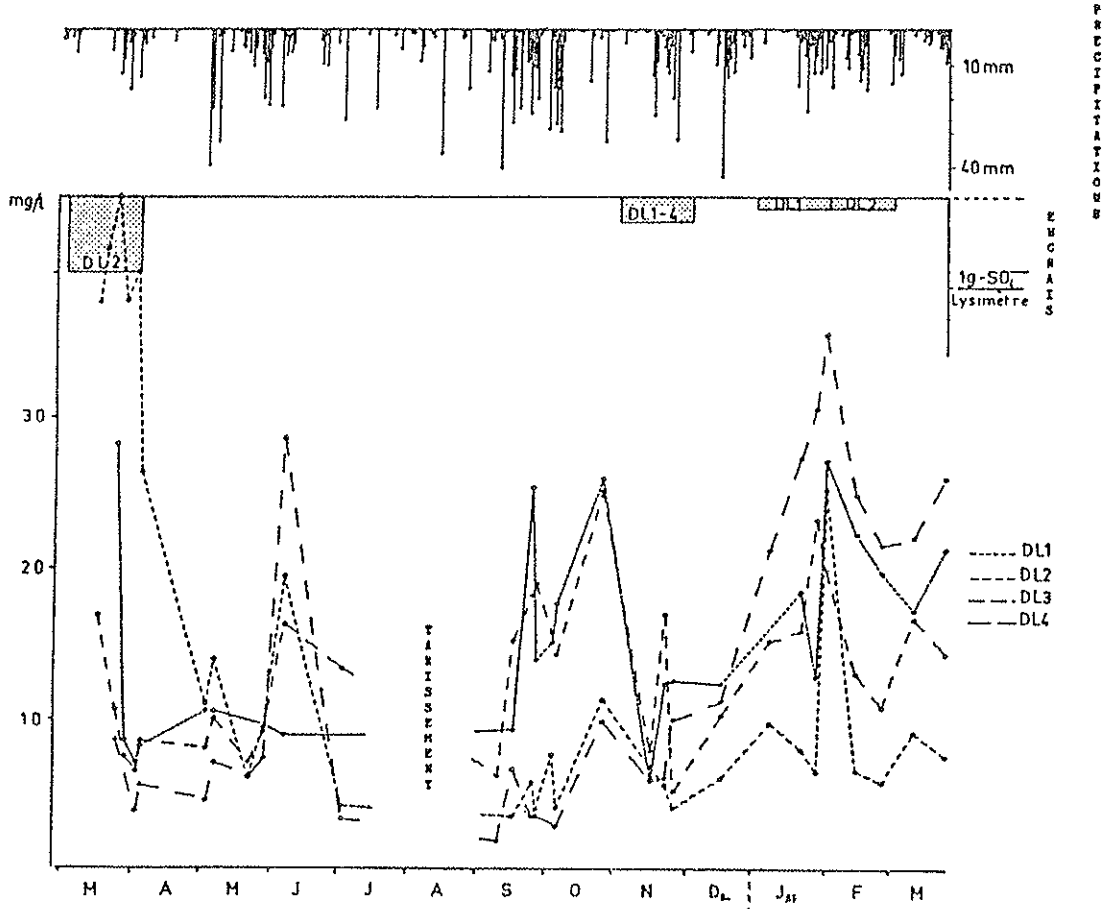


Fig. 86 EVOLUTION DE L'ION SULFATE DANS LES QUATRE LYSIMETRES

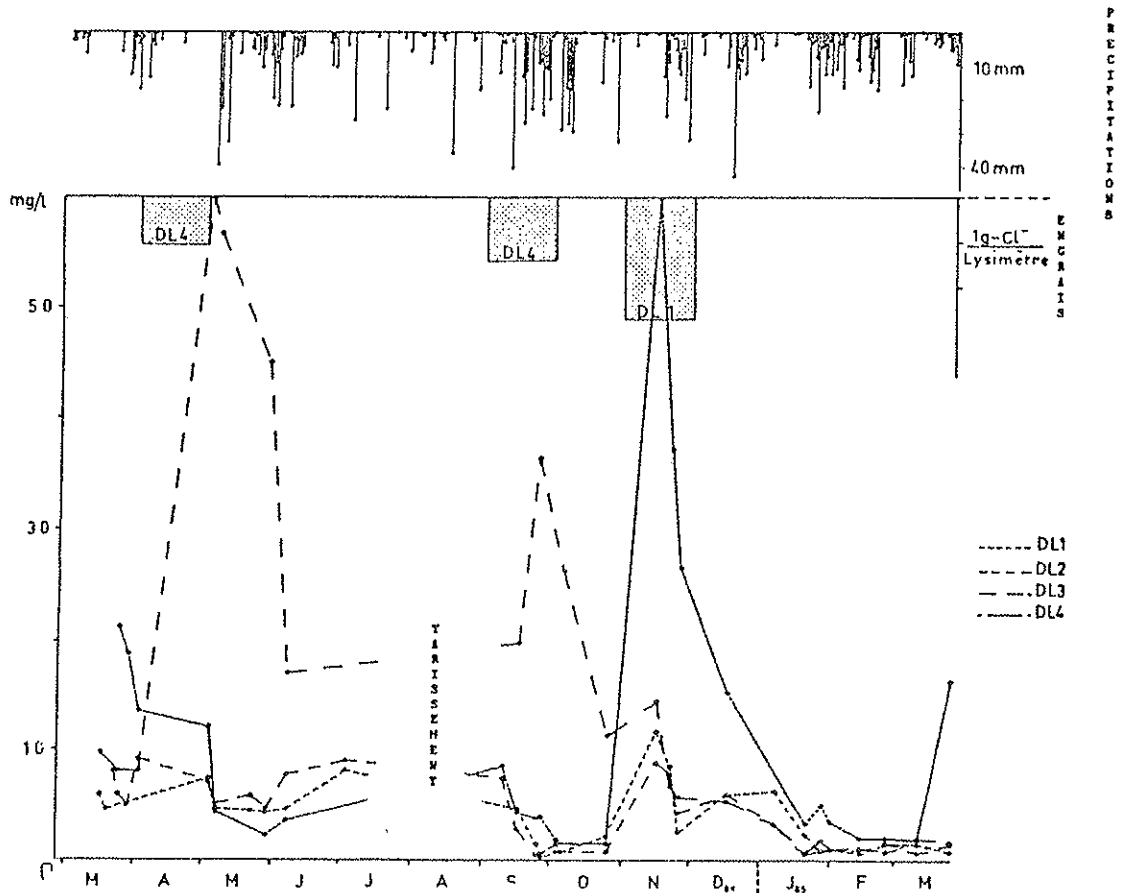


Fig. 87 EVOLUTION DE L'ION CHLORURE - DANS LES QUATRE LYSIMETRES

Quant à l'accroissement des teneurs en sulfate au cours de l'automne (1984) (Septembre, Octobre), il proviendrait tout comme le potassium d'une décomposition de la matière organique végétale qui débute dès la fin de la croissance de la végétation, en milieu d'été (M. POCHON 1978).

6). LES CHLORURES : très solubles, ils subissent une lixiviation rapide et importante qui correspond aux épandages réalisés en surface (fig. 87 ). Le pic de concentration observé pour DL1 en Novembre, s'observe également pour le magnésium et le sodium. Il correspond à un épandage de fumier sur cette parcelle, peu de temps avant un épisode pluvieux, responsable de cette lixiviation.

#### 7). LE CALCIUM ET LES BICARBONATES (fig. 88 - 89)

Le sol brun calcique (DL1) donnent des eaux de percolation plus riches en calcium et bicarbonates que les autres sols. Ceci correspond aux résultats des analyses de sol (tableau 36 chapitre 1) qui montrent un taux de saturation toujours supérieur à cent et un pourcentage du calcium échangeable plus élevé. Il est responsable de l'insolubilité des phosphates.

L'ion calcium favorise la stabilité du complexe argilo-humique (P. DUCHAUFFOUR 1977) . Le taux de matière organique devait être plus élevé dans ce sol et plus bas dans les eaux de percolation (P. POCHON 1978). Mais ces teneurs en matière organique sont beaucoup trop influencées par les épandages de fumier pour obtenir des résultats comparables à ceux de cet auteur.

Quant aux bicarbonates, leur teneur plus élevée dans le sol brun calcique que dans les autres sols peut avoir deux origines : la première serait due à la légère pente le long de laquelle est installé le lysimètre et qui peut également récupérer des eaux ayant circulé au contact du substrat calcaire en amont; la seconde serait due au sol lui-même avec un taux de  $CO_2$  plus élevé que dans les autres sols (puisque celui-ci est en partie dosé avec les "bicarbonates"). Cette teneur en bicarbonate est tout de même liée au substrat qui supporte le sol. Ceci rejoindrait l'hypothèse avancée au chapitre 3 de la seconde partie rappelée avec l'ion silice.

#### 8). LES PHOSPHATES (Fig. 90)

Leur solubilité dans les sols dépend du taux de calcium échangeable, ils devraient donc être particulièrement insolubles dans le sol brun calcique. Cependant, il apparaît quelques pics de cet ion dans DL1 en raison, probablement des nombreux épandages effectués en périodes pluvieuses. Mais les teneurs sont faibles et ont de fortes chances d'être fixées en deçà des lysimètres. Dans les eaux de percolation des autres lysimètres, les teneurs sont très faibles.

### III - ANALYSE STATISTIQUE DES EAUX DE PERCOLATION DES LYSIMETRES

#### 1). MATRICES DE CORRELATIONS

Elles traitent les éléments deux à deux pour chaque lysimètre, c'est à dire pour trente cinq valeurs les coefficients de corrélations retenus seront  $r = 0,667$  et  $r = 0,600$  au seuil de 1 et 5 %, nous les avons regroupés dans les tableaux 41-42-43-44.

Les éléments qui présentent un coefficient de corrélation significatif symbolisent plusieurs types d'associations. Ainsi  $PO_4^{---}/Na^+$  et  $Mg^{++}/Na^+$  montrent une corrélation significative dans les quatre sols étudiés, alors que  $Cl^-/Mg^{++}$  se trouvent uniquement sous les sols cultivés et  $K^+/SiO_2$  sous prairie naturelle ou artificielle. Ceci signifierait que cette deuxième catégorie d'éléments auraient pour origine la pratique culturale et plus particulièrement les types d'engrais épandus en relation directe avec la végétation ce qui rejoint les observations faites dans les figures précédentes.

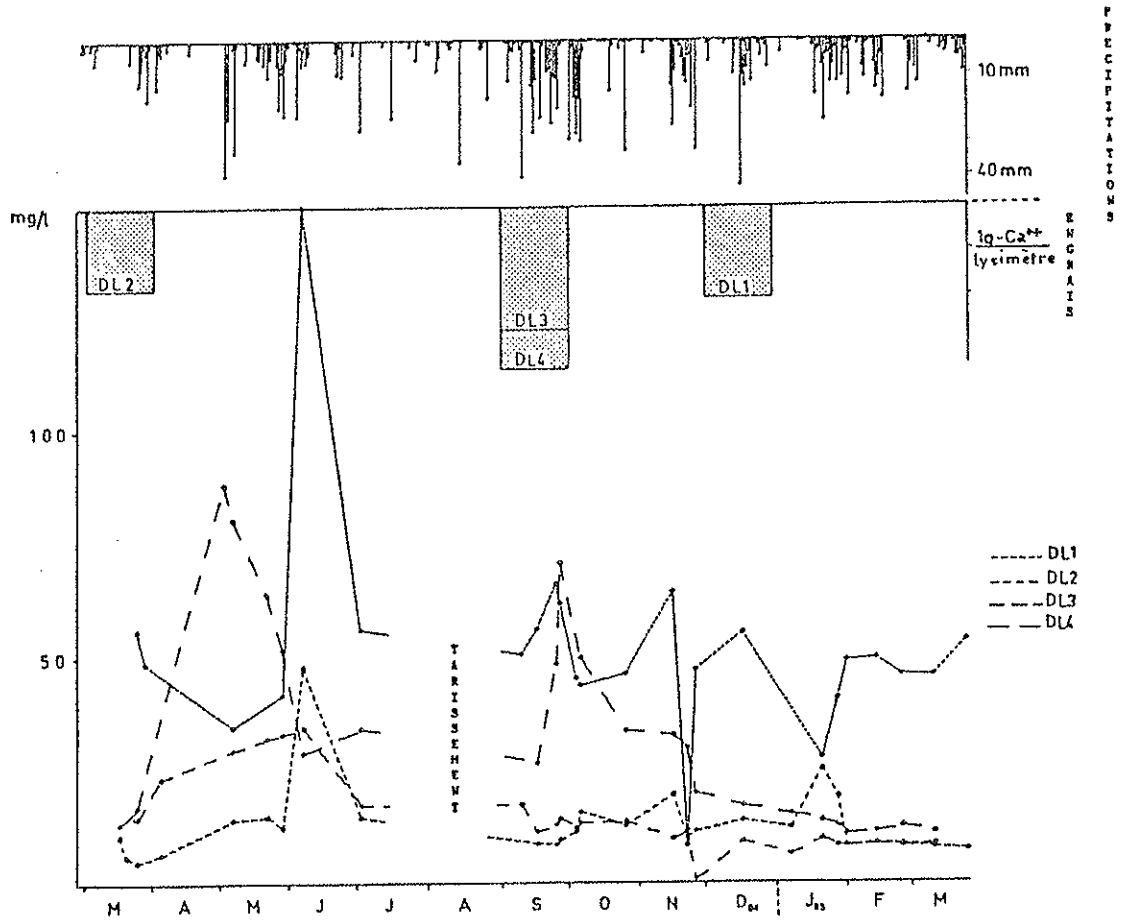


Fig. 88 EVOLUTION DE L'ION CALCIUM DANS LES QUATRE LYSIMETRES

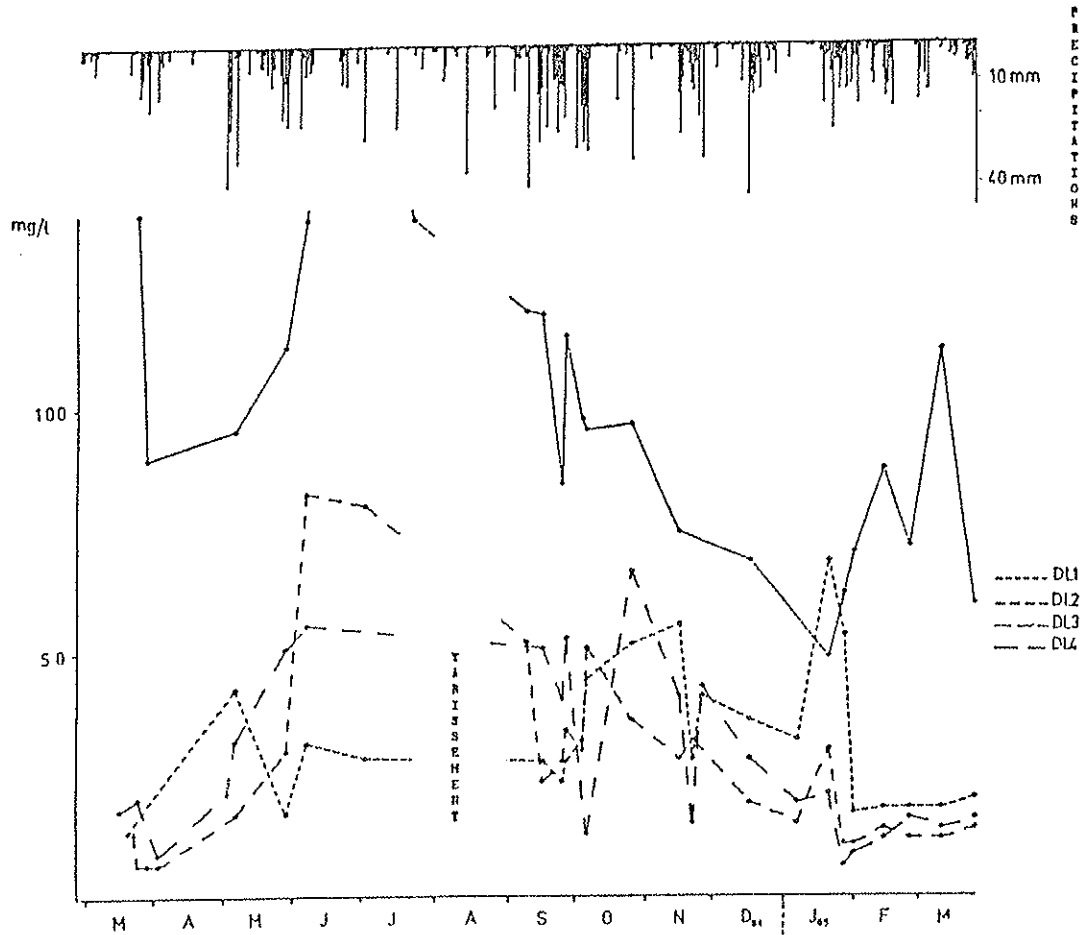


Fig. 89 EVOLUTION DE L'ION DICARBONATE DANS LES QUATRE LYSIMETRES

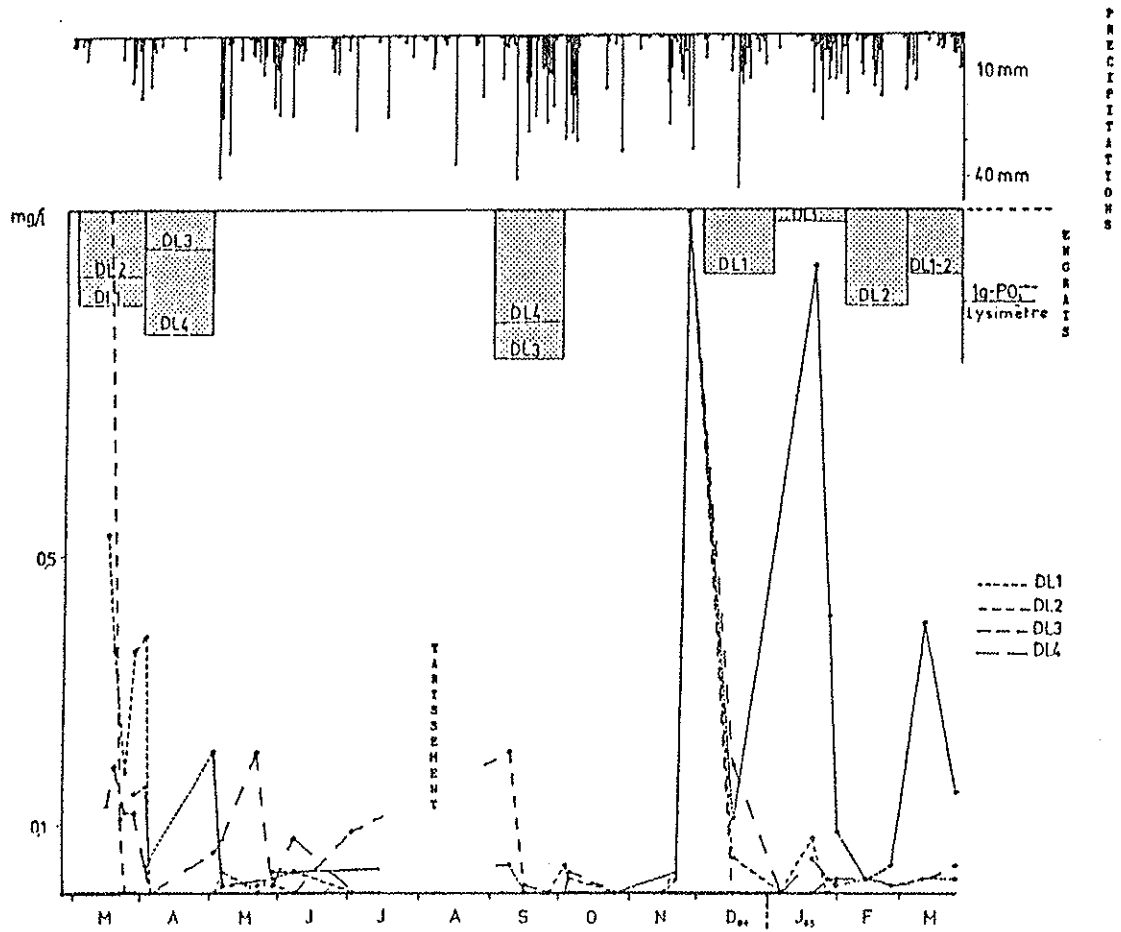


Fig. 90 EVOLUTION DE L'ION PHOSPHATE DANS LES QUATRE LYSIMETRES

	Cond	pH	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Cond	1														
pH	0,92*	1													
Cl <sup>-</sup>	0,861**	0,862**	1												
PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	0,184	0,167**	0,377	1											
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,699**	0,942**	-0,221	7,1.10 <sup>-3**</sup>	1										
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,749	0,963**	0,418*	0,02**	0,527*	1									
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,673**	0,82**	0,193*	0,05*	0,275	0,339**	1								
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,09**	0,182**	-0,08	0,07**	0,02	0,289	-0,132	1							
Ca <sup>++</sup>	0,531**	0,937**	0,10*	-0,003	0,252**	0,593**	0,131**	-0,05	1						
Mg <sup>++</sup>	0,591**	0,954**	0,858	0,392	0,212**	0,559**	-0,181	-0,11	0,308	1					
Na <sup>+</sup>	0,594**	0,942**	0,893	0,897	0,21**	0,489**	-0,185	-0,09	0,132**	0,956	1				
K <sup>+</sup>	0,53**	0,889**	0,115*	0,635	0,263**	0,501**	0,162**	0,213	0,141**	0,364**	0,808**	1			
Fe <sub>T</sub>	0,537**	0,932**	0,64	-0,08	0,335**	0,543**	-0,238	0,22*	0,173*	0,632	0,641	0,244*	1		
SiO <sub>2</sub>	0,779**	0,954**	0,334*	0,366*	0,428*	0,662	0,189**	0,391*	0,441*	0,371*	-0,309	0,43	0,41*	1	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,452	0,592**	-0,236	-0,175	0,152	0,467**	0,148**	0,581	0,121*	-0,236	-0,253	-0,17	0,101	0,533**	1

\*Corrélation Exponentielle  
\*\*Corrélation Logarithmique

Matrice de corrélations - Lysimètre DL1 (35 valeurs)

Tableau 41

	Cond	pH	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Cond	1														
pH	0,901*	1													
Cl <sup>-</sup>	0,621**	0,792**	1												
PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	-0,03*	0,07	0,04	1											
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,368**	0,839**	0,189	0,417	1										
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,727	0,915**	0,245	0,02	0,198*	1									
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,591	0,527**	0,322	-0,12	0,161**	0,177**	1								
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,115	0,255*	0,432	0,08	0,159**	0,08	-0,08	1							
Ca <sup>++</sup>	0,737**	0,90**	0,32	-0,05	0,131*	0,553	0,423	0,148	1						
Mg <sup>++</sup>	0,526**	0,914**	0,380*	0,531	0,64	0,387	0,396*	0,167*	0,411	1					
Na <sup>+</sup>	0,544**	0,873**	0,437	0,686	0,378	0,229**	0,352	0,242*	0,345	0,667	1				
K <sup>+</sup>	0,469**	0,756**	0,312	0,863	0,826	0,219**	0,167*	0,386	0,129**	0,633	0,582	1			
Fe <sub>T</sub>	0,602	0,882**	-0,09	-0,06	0,131**	0,328	0,06*	-0,192	0,129**	0,388**	0,187**	0,107*	1		
SiO <sub>2</sub>	0,518**	0,856**	0,419	0,485	0,956	0,270**	0,208*	0,166	0,194	0,658	0,526	0,826	0,624*	1	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0,125	0,124	0,199	0,457	0,941	-0,179	0,247	0,166	-0,04	0,697	0,37	0,847	0,136	0,945	1

\* Corrélation Exponentielle  
\*\* Corrélation logarithmique

Matrice de corrélations - Lysimètre DL2 (35 valeurs)

Tableau 42

	Cond	pH	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Cond	1														
pH	0,911*	1													
Cl <sup>-</sup>	0,701	0,828**	1												
PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	-0,145	0,08	0,03	1											
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	0,257*	0,913**	-0,319	-0,217	1										
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,348	0,901**	0,331	0,379	0,382**	1									
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,879	0,604**	0,504	-0,121	-0,255	0,05	1								
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,05*	0,21	0,226**	0,09*	-0,03	0,26	-0,163	1							
Ca <sup>++</sup>	0,917	0,848*	0,45	-0,278	0,335**	0,597	0,82	0,02**	1						
Mg <sup>++</sup>	0,615	0,907**	0,459	0,91*	0,255**	0,64	0,519	-0,04	0,506	1					
Na <sup>+</sup>	0,261**	0,90**	0,186	0,979	0,227**	0,7	0,04**	0,05	0,188**	0,774	1				
K <sup>+</sup>	0,26**	0,805**	0,486	0,227	0,262**	0,523	-0,09	0,214	0,180**	0,243	0,671	1			
Fe <sub>T</sub>	0,188**	0,922**	0,09	-0,08	0,401**	-0,217	-0,16	-0,215*	0,117**	0,10*	0,09*	0,132*	1		
SiO <sub>2</sub>	0,265	0,832**	0,294	0,131*	0,327**	0,434	0,123*	0,281	0,231*	0,232*	0,24*	0,818	0,467	1	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,755**	0,114**	0,451	0,08	-0,04	0,278	0,568**	-0,116	0,66	0,437	0,02*	0,102**	0,236	-0,214	1

\* Corrélation Exponentielle  
\*\* Corrélation logarithmique

Matrice de corrélations - Lysimètre DL3 (35 valeurs)

Tableau 43

	Cond	pH	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Cond	1														
pH	0,883**	1													
Cl <sup>-</sup>	0,813	0,797**	1												
PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	0,339	0,07**	-0,09	1											
SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	-0,332	0,872**	-0,483	0,202*	1										
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,443	0,918**	0,405	0,188	-0,184	1									
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,713	0,802**	0,817	-0,02	-0,412	0,169**	1								
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,122	0,311	0,114	-0,06	-0,174	0,06**	0,02*	1							
Ca <sup>++</sup>	0,866	0,892**	0,963	-0,08	-0,26	0,468	0,88	0,234	1						
Mg <sup>++</sup>	0,966	0,887**	0,915	0,152	-0,472	0,505	0,876	0,245	0,969	1					
Na <sup>+</sup>	0,817	0,912**	0,445	0,631	-0,265	0,599	0,513	0,10	0,587	0,754	1				
K <sup>+</sup>	0,434	0,918**	0,383	0,305	0,325	0,423	0,298	0,387	0,468	0,542	0,585	1			
Fe <sub>T</sub>	0,144**	0,843**	0,09	-0,1	0,298**	0,159	-0,294	-0,05	-0,169	-0,178	-0,152	-0,162	1		
SiO <sub>2</sub>	0,366*	0,927**	0,319*	0,06*	0,406	0,435	0,206*	0,204*	0,339*	0,326*	0,334*	0,358*	0,722	1	
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,338	0,518**	0,463	0,05*	-0,18	0,263**	0,464	0,227	0,424	0,446	0,375**	0,403**	-0,135	0,219**	1

\* Corrélation Exponentielle  
 \*\* Corrélation logarithmique

Matrice de corrélations - Lysimètre DL4 (35 valeurs)

Tableau 44

	Q	Cond	pH	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>
Q	1														
Cond		1													
pH		0,946	1												
Cl <sup>-</sup>		0,656**	0,927**	1											
PO <sub>4</sub> <sup>---</sup>		0,155**	0,127**	0,174**	1										
SO <sub>4</sub> <sup>---</sup>		0,609**	0,925**	0,326	0,135	1									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,848	0,956**	0,822*	0,125*	0,781*	1								
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0,679	0,952**	0,594*	0,113*	0,588*	0,889**	1							
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>									1						
Ca <sup>++</sup>		0,746	0,957**	0,714*	0,143*	0,673*	0,911	0,785*		1					
Mg <sup>++</sup>		0,641**	0,952**	0,511	0,02	0,227**	0,843**	0,51**		0,715**	1				
Na <sup>+</sup>		0,631**	0,923**	0,707	0,119*	0,438	0,80**	0,606*		0,712**	0,452	1			
K <sup>+</sup>		0,493**	0,851**	0,192**	6,5.10 <sup>-1**</sup>	0,218**	0,719**	0,453**		0,603**	0,478	0,271**	1		
Fe <sub>T</sub>		0,653**	0,936**	0,224**	0,06*	0,264**	0,771**	0,668*		0,742**	0,49**	0,322**	0,232	1	
SiO <sub>2</sub>		0,749	0,955**	0,728*	0,153*	0,729*	0,868	0,758*		0,854	0,738*	0,716*	0,66*	0,722	1

\* Corrélation Exponentielle  
 \*\* Corrélation logarithmique

Matrice de corrélations - Ru du Bas de Prée - (88 valeurs)

Tableau 45

D'après les matrices de corrélations, on constate également que dans le sol DL1 (brun calcique), le coefficient de corrélation entre la silice et les bicarbonates est significatif, alors que dans les autres sols elle serait plutôt associée au Fer et/ou au potassium. Ceci pourrait être en relation avec la matrice du sol mais une influence des épandages peut également jouer un rôle.

En ce qui concerne les autres corrélations, elles sont en relation avec les différents types d'engrais épandus notamment pour les chlorures ; les nitrates ; les nitrites et les sulfates.

2°) Analyse factorielle

a) Des eaux de percolation du lysimètre DL1

La figure 91 exprime la projection des variables dans les plans A1 et A2. Le facteur A1 représente 27 % de la variance et oppose  $Cl^-$  ;  $Na^+$  ;  $Mg^{++}$ , à  $SiO_2$  ;  $NO_2^-$  ;  $NH_4^+$ . La répartition des individus met en évidence deux groupes : le premier caractérise les échantillons riches en  $PO_4^{---}$  ;  $Cl^-$ ,  $Na^+$  ;  $Mg^{++}$  que l'on rencontre après des épandages de fumier suivis d'un épisode pluvieux donc rapidement lixivié (partie négative de l'axe) de même pour l'individu C5 ; le second représente les échantillons plus riches en potassium prélevés après des épandages d'engrais complexes à dissolution plus lente. Cet axe A1 pourrait symboliser la vitesse et d'entraînement des éléments chimiques après un épandage en fonction des précipitations. Le facteur A2 représente dix huit pour cent de la variance et oppose  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{---}$  à  $Ca^{++}$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$ ,  $SiO_2$  et  $HCO_3^-$ . La répartition des individus met en évidence les échantillons issus d'engrais naturels comme le fumier (partie positive de l'axe A2) et les échantillons issus d'engrais complexes (partie négative de l'axe) à dissolution plus lente ce qui nécessite un temps de séjour plus long des eaux dans les sols. Cet axe A2 pourrait représenter les types d'engrais épandus.

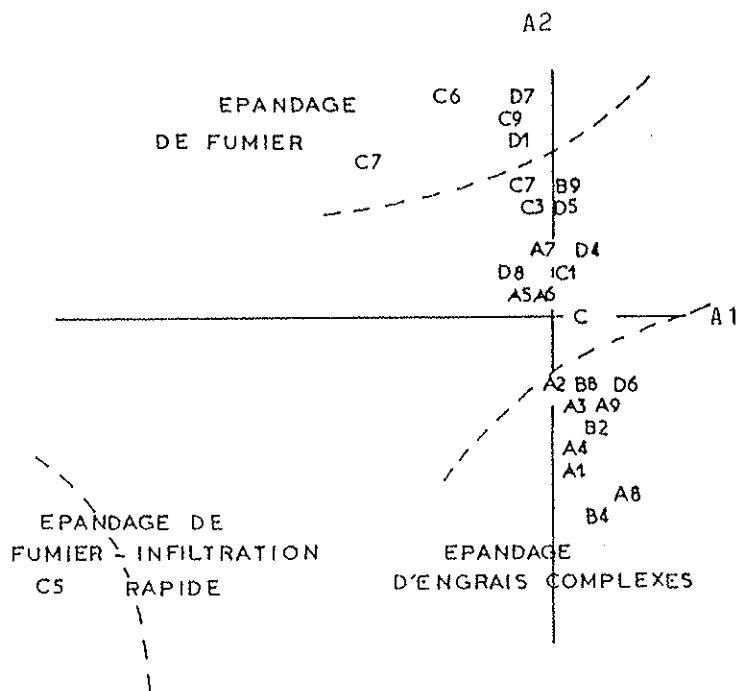
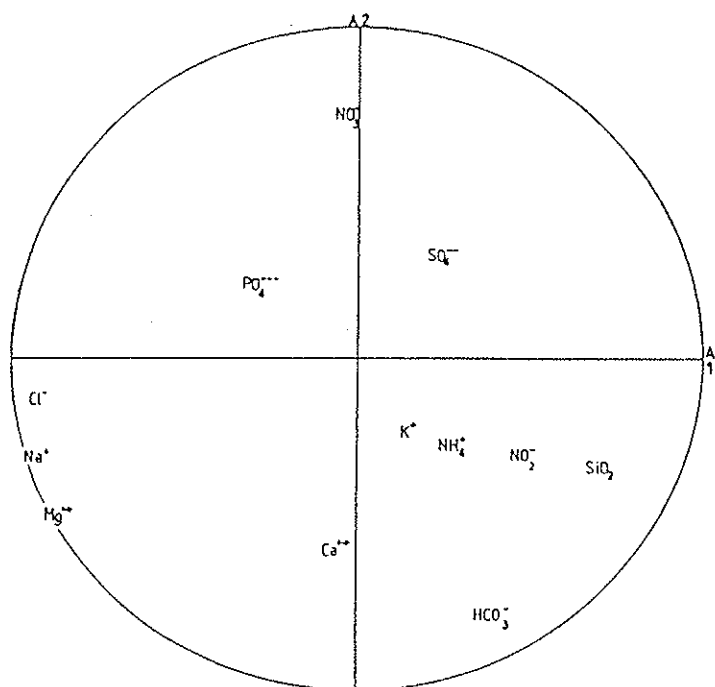


Fig. 91 (A) Projection des variables

(B) Répartition des individus



La figure 92 exprime la projection des variables dans les plans A2 et A3. Le facteur A2 représente 18 % de la variance et oppose  $\text{NO}_3^-$  ;  $\text{SO}_4^{--}$  à  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , et  $\text{HCO}_3^-$ . La répartition des individus singularise à nouveau les échantillons pauvres en nitrates et phosphates mais riches en potassium, ce qui correspond comme précédemment aux types d'engrais épandus, à savoir naturels pour la partie négative de l'axe et complexes pour la partie positive. Le facteur A3 représente 11 % de la variance et oppose les échantillons riches en ammonium individus D6-A8) à ceux mieux pourvus en silice et calcium provenant de la matrice. Cet axe A3 peut symboliser l'appartenance des éléments au milieu naturel.

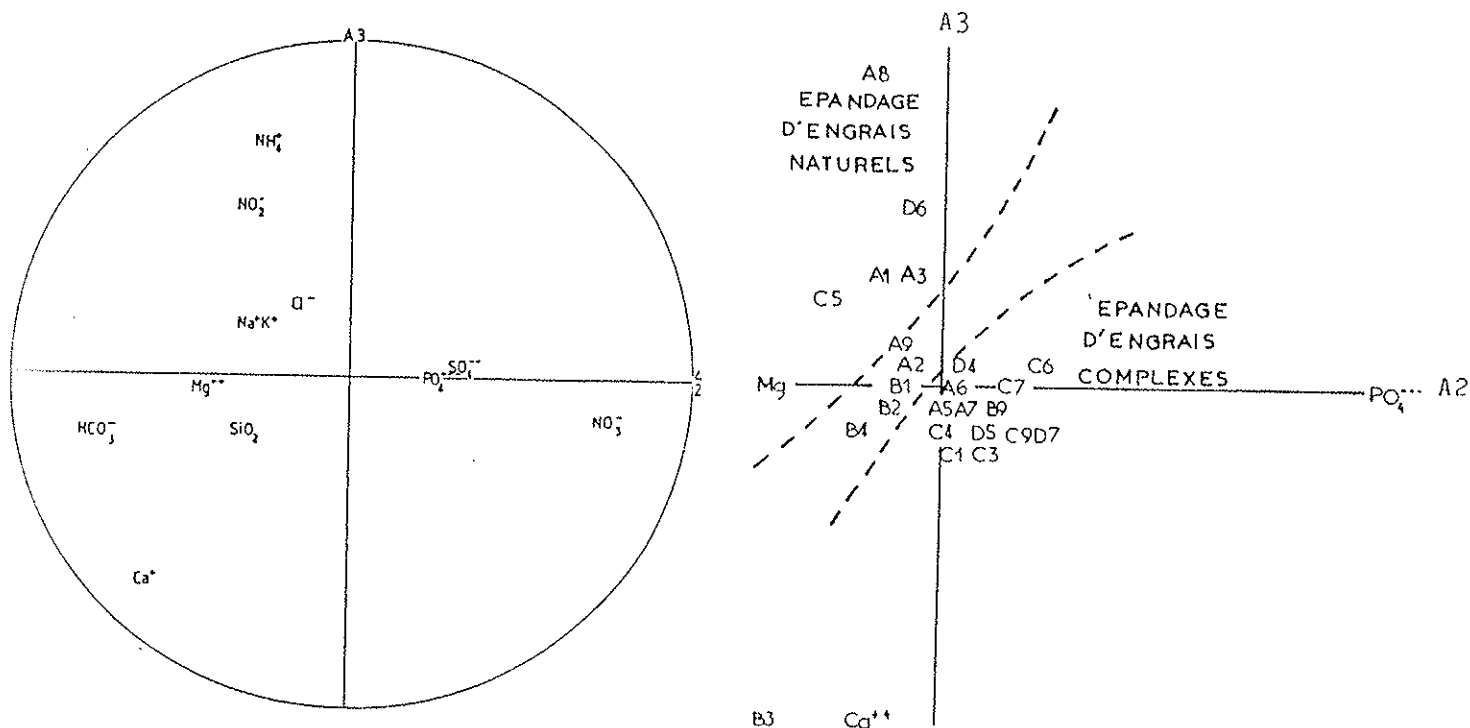


Fig. 92 (A) Projection des variables

(B) Répartition des individus

b) Des eaux de percolation du lysimètre DL2

La figure 93 exprime la projection des variables dans les plans A1 et A3. Le facteur A1 représente 42 % de la variance et oppose  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{++}$  à  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  ;  $\text{SO}_4^{--}$  ;  $\text{Mg}^{++}$ . La répartition des individus fait ressortir un groupe d'échantillons riches en silice, nitrite et potassium (partie négative de l'axe) alors que les autres échantillons montrent des teneurs plus faibles pour ces composants, mais plus élevés pour les bicarbonates. Cet axe peut donc symboliser la vitesse d'acquisition des eaux en éléments chimiques après des périodes d'épandages réalisés sur la neige. L'infiltration y est très rapide et singularise les éléments absents de l'épandage ( $\text{HCO}_3^-$  ;  $\text{Ca}^{++}$ ). Le facteur A3 représente 15 % de la variance et oppose principalement les phosphates aux chlorures puis le sodium et le magnésium aux nitrates et à l'ammonium. Cet axe peut représenter la période de fixation de ces éléments dans le sol donc au complexe absorbant. Les éléments bien fixés appartiennent à la partie positive de l'axe et les moins bien fixés à la partie négative. Si l'ammonium est absent des éléments bien fixés ceci s'explique par la répartition des individus. En

effet le groupe d'éléments  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$  correspond à une infiltration rapide d'engrais après la fonte de la couverture neigeuse.

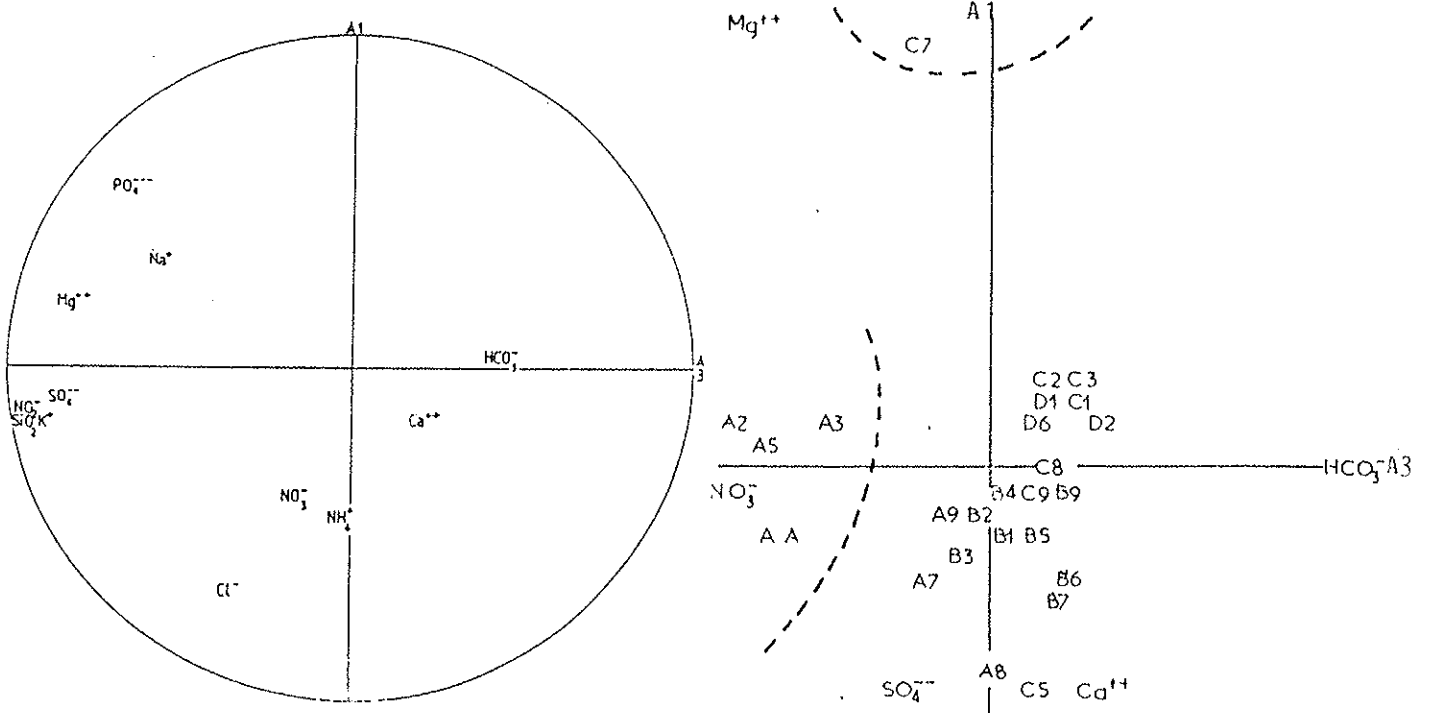


Fig. 93 (A) Projection des variables

(B) Répartition des individus

c). Des eaux de percolation du lysimètre DL3

La figure 94 exprime la projection des variables dans les plans A1 et A3. Le facteur A1 représente 27 % de la variance et oppose  $\text{SO}_4^{--}$  à  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . L'axe A1 pourrait représenter la vitesse de dégradation de la matière organique végétale qui libère beaucoup de sulfates. (partie négative de l'axe) (M. POCHON 1978) mais peu de  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$ . Le facteur A3 représente 17 % de la variance et oppose  $\text{NO}_3^-$  à  $\text{Cl}^-$ . La répartition des individus apporte peu d'information sur cet axe.

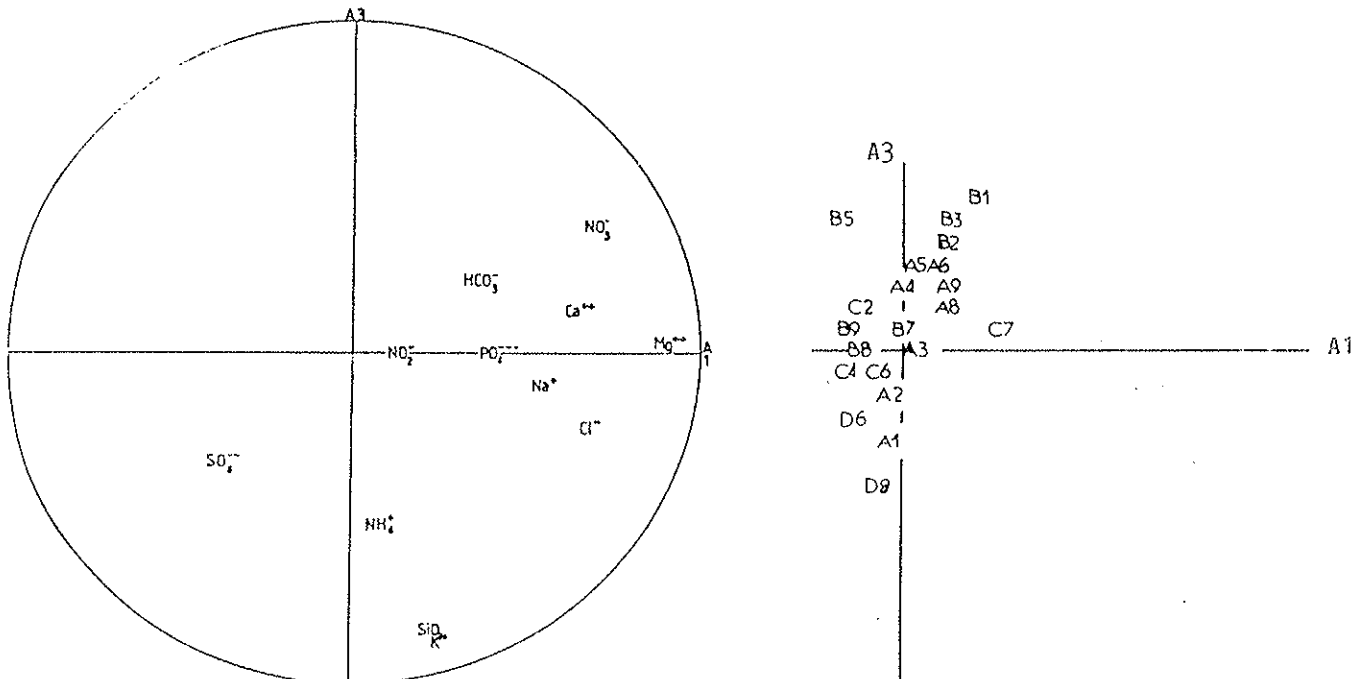


Fig. 94 - (A) Projection des variables

(B) Répartition des individus

Notons que dans les eaux de percolation des lysimètres DL2 et DL3, l'ACP montre que la silice et le potassium sont des variables toujours associées l'une à l'autre (fig. 93-94) alors que pour DL1, nous n'observons pas ce phénomène (fig. 91-92). Aussi même si expérimentalement il a été démontré que l'association des éléments constituant les argiles ne donnaient jamais de corrélation significative (G. PEDRO dans M. POCHON 1978), dans notre cas, ces corrélations apparaissent aussi bien en analyse factorielle que dans les matrices de corrélation pour les sols bruns épais sur argile à chaille.

#### IV - EVOLUTION CHIMIQUE DES EAUX DU RU DU BAS DE PROLE

Le suivi chimique de ce ruisseau a été réalisé parallèlement à celui des lysimètres. Nous allons donc comparer les mêmes éléments dans les deux cas.

Rappelons que les débits (pointillés sur les figures ci-dessus) n'ont qu'une valeur indicative en raison de l'imprécision de leur mesure, et ne nous autorise pas à raisonner en flux.

Cependant on peut remarquer que les crues ressemblent à celles de la Cuisance, surtout dans la première partie des relevés (mars à juillet 1984) qui sont plus denses.

La première crue qui apparaît (fig. 95) fait suite à la fonte de la neige jusqu'au début mars.

##### 1°) LES NITRATES (fig. 95)

De Mars à Juin 1984, chaque crue provoque une augmentation de la concentration en nitrate (pic Mars - Avril 1985). Ceci correspond aux augmentations des teneurs également observées dans les lysimètres. La lixiviation des nitrates, issus des sols, vers le ruisseau est donc très rapide en fin hiver et très concentrée en raison de la disponibilité de cet ion, non encore absorbé par les plantes à 40 cm de profondeur.

A partir du mois de Juin les crues provoquent une dilution de cet ion car au niveau du sol il est consommé par les plantes et le surplus a déjà été entraîné dans le karst. Par contre lors de la première crue d'automne un pic de concentration apparaît, suivi d'une dilution, ce même phénomène a déjà été observé aux deux sources de la Cuisance. C'est pourquoi nous pouvons supposer qu'un accroissement des nitrates s'est accumulé dans le sol, à la suite d'une minéralisation et d'une baisse de consommation par les plantes.

Pendant l'hiver les concentrations semblent croître mais les crues peu abondantes rendent ces observations délicates.

L'importance et l'intensité des précipitations semblent primordiales pour la lixiviation des nitrates dans les sols puis vers les eaux souterraines ilssubissent un entrainement massif en fin d'hiver suivant l'importance des crues.

##### 2°) LE POTASSIUM (fig. 96)

En dehors des pics importants, cet élément semble subir lui aussi l'influence directe des épandages, puisque les pics de concentration du ruisseau correspondent à ceux des lysimètres.

Il faut noter également que pendant les étiages, de courte durée dans notre cas en raison du tarissement estival, la concentration de cet ion paraît croître légèrement. Ce phénomène se produirait également à la source de la Grotte qui draine les eaux provenant du secteur de Chilly sur Salins donc du ru du Bas de Prôle. Ceci pourrait confirmer l'hypothèse selon laquelle le potassium proviendrait partiellement des sols.

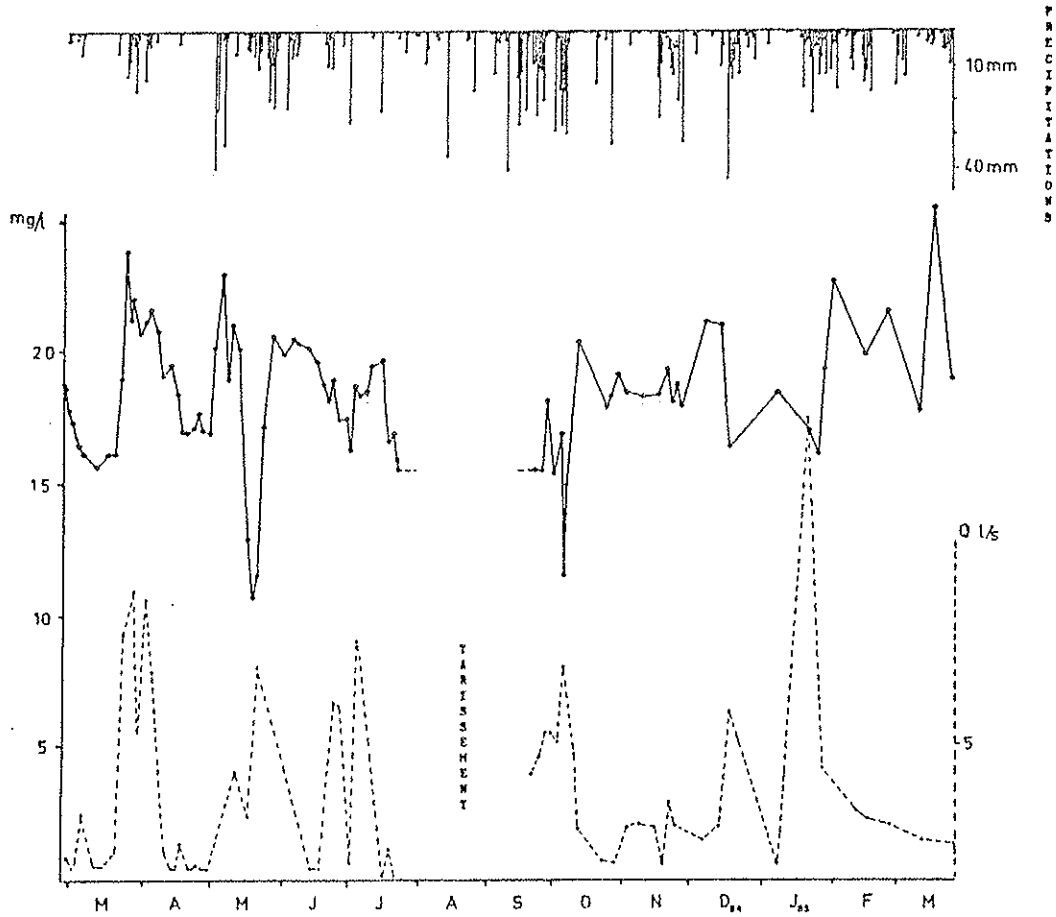


Fig. 95 EVOLUTION DE L'ION NITRATE - RU DU BAS DE PROLE

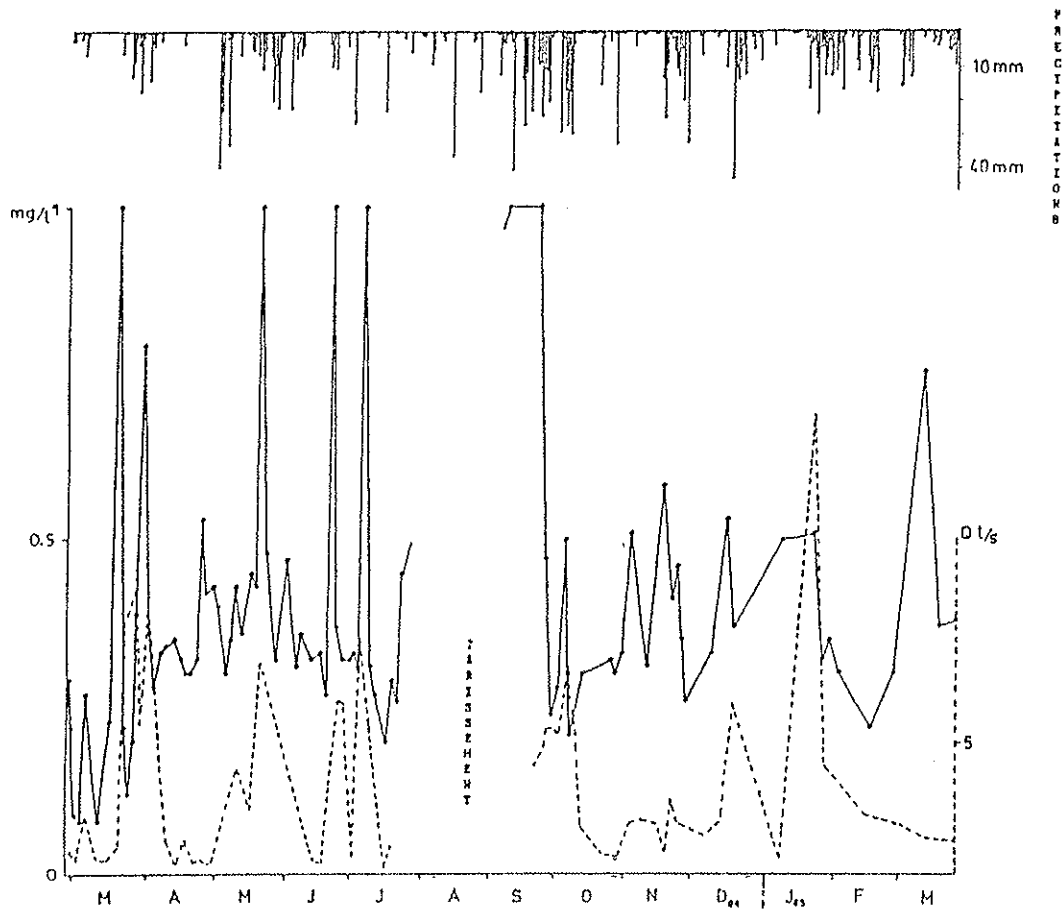


Fig. 96 EVOLUTION DE L'ION POTASSIUM - RU DU BAS DE PROLE

### 3) LE MAGNESIUM (fig. 97)

Il semble ne pas subir l'influence sensible des épandages, effectués en faible quantité. Par contre, il suit la même évolution que dans la Cuisance mais de façon moins marquée, avec un accroissement de la concentration proportionnel à la durée de l'étiage. Malheureusement la sécheresse estivale ne nous permet pas de la confirmer ni de montrer que cet élément provient bien de la matrice calcaire. Cependant nous pouvons remarquer qu'entre le début et la fin du tarissement les concentrations diminuent contrairement aux eaux de la source de la Grotte des Planches à la même période.

### 4) LA SILICE (fig. 98)

Là encore, cet élément suit une évolution semblable à celle de la Cuisance. Mais l'influence des épandages d'engrais apparaît en fin d'hiver avec une augmentation de la concentration pendant les crues. De la même façon que le potassium, la concentration semble croître entre le début et la fin du tarissement. Ce fait avait également été constaté à la Grotte des Planches.

### 5) LES SULFATES (fig. 99)

L'augmentation de leur concentration est parallèle à celle des épandages et à celle du chimisme des eaux du ruisseau.

### 6) LES CHLORURES (Fig. 100)

Éléments très solubles, ils suivent la même évolution dans le ru du Bas de Prôle et dans la Cuisance. De plus, l'augmentation de leur concentration au début du printemps 1984 correspond exactement aux périodes d'épandages agricoles.

### 7) LES BICARBONATES ET LE CALCIUM (fig. 101-102)

Les eaux du ruisseau, comme celles de la Cuisance, sont saturées en bicarbonates de calcium en raison du milieu calcaire traversé avant la résurgence.

## V - ANALYSE STATISTIQUE DES EAUX DU RU DE BAS DE PROLE

### ANALYSE FACTORIELLE

La figure 103 exprime la projection des variables dans les plans A1 et A2. Le facteur A1 représente 28 % de la variance et oppose  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ , à  $\text{K}^+$ , et  $\text{SO}_4^{--}$ . Cet axe pourrait représenter l'origine des éléments chimiques : matricielle pour  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et organique pour  $\text{K}^+$  et  $\text{SO}_4^{--}$  si l'on considère (ce que nous avons vu précédemment) que la lixiviation du potassium intervient pendant la décomposition des végétaux. Le facteur A2 représente 19 % de la variance et oppose  $\text{HCO}_3^-$ ;  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ; à  $\text{NO}_3^-$ ;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ . Cet axe oppose encore des éléments d'origine matricielle ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) aux éléments issus d'épandages d'engrais ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ), de plus ils sont très solubles et à acquisition rapide contrairement aux précédents. L'axe A2 pourrait signifier la vitesse d'acquisition chimique des eaux.

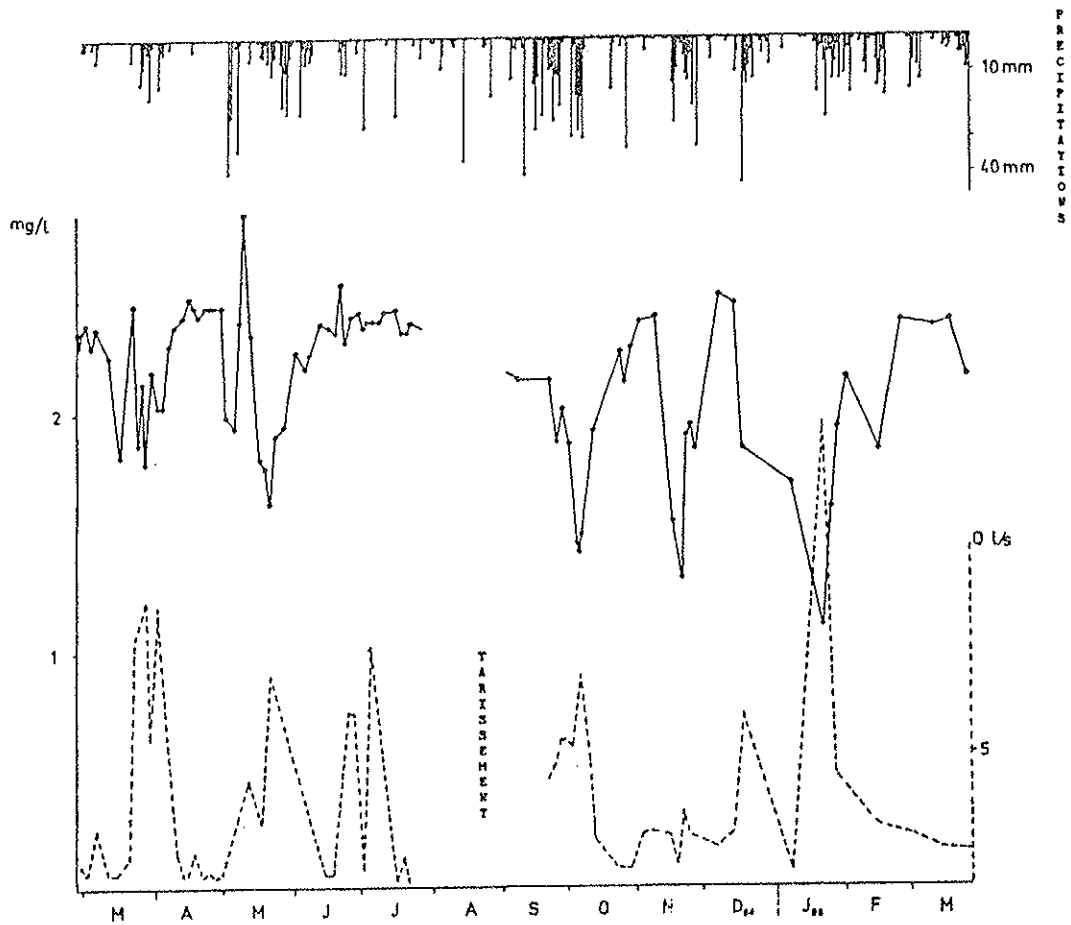


Fig. 97 EVOLUTION DE L'ION MAGNESIUM - RU DU BAS DE PROLE

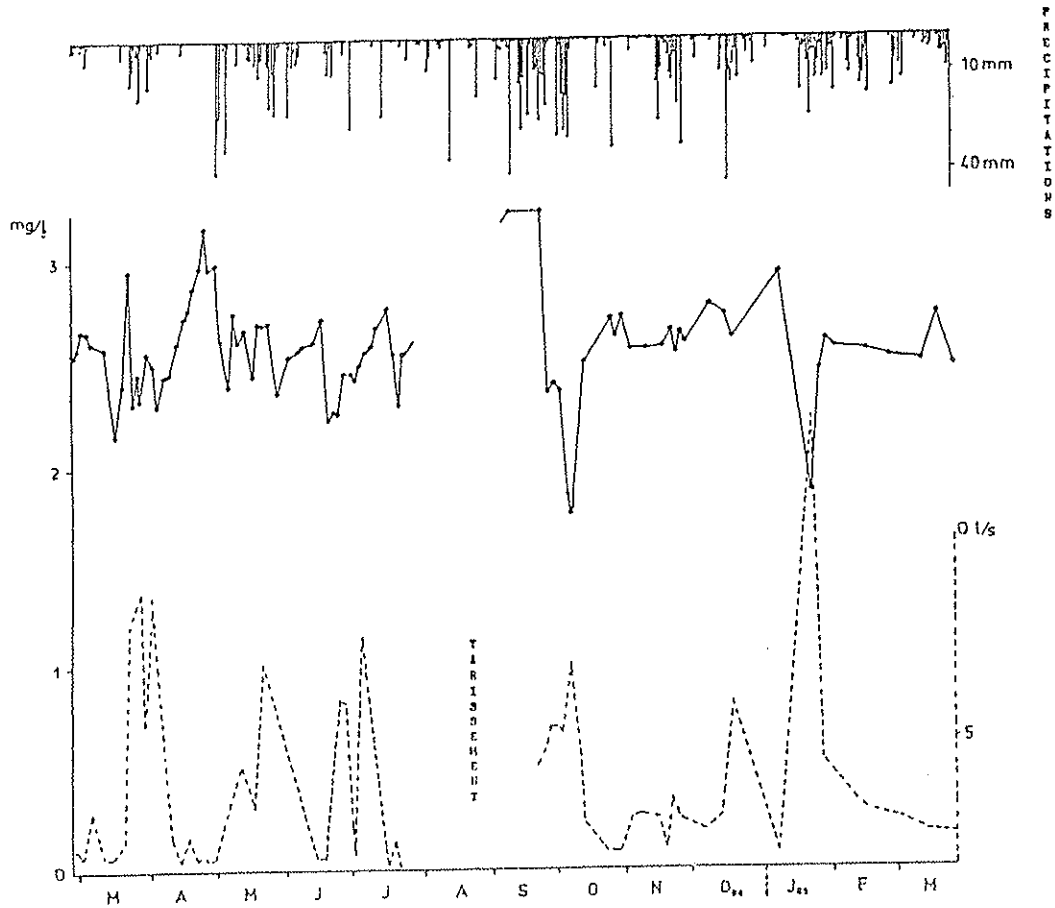


Fig. 98 EVOLUTION DE LA SILICE - RU DU BAS DE PROLE

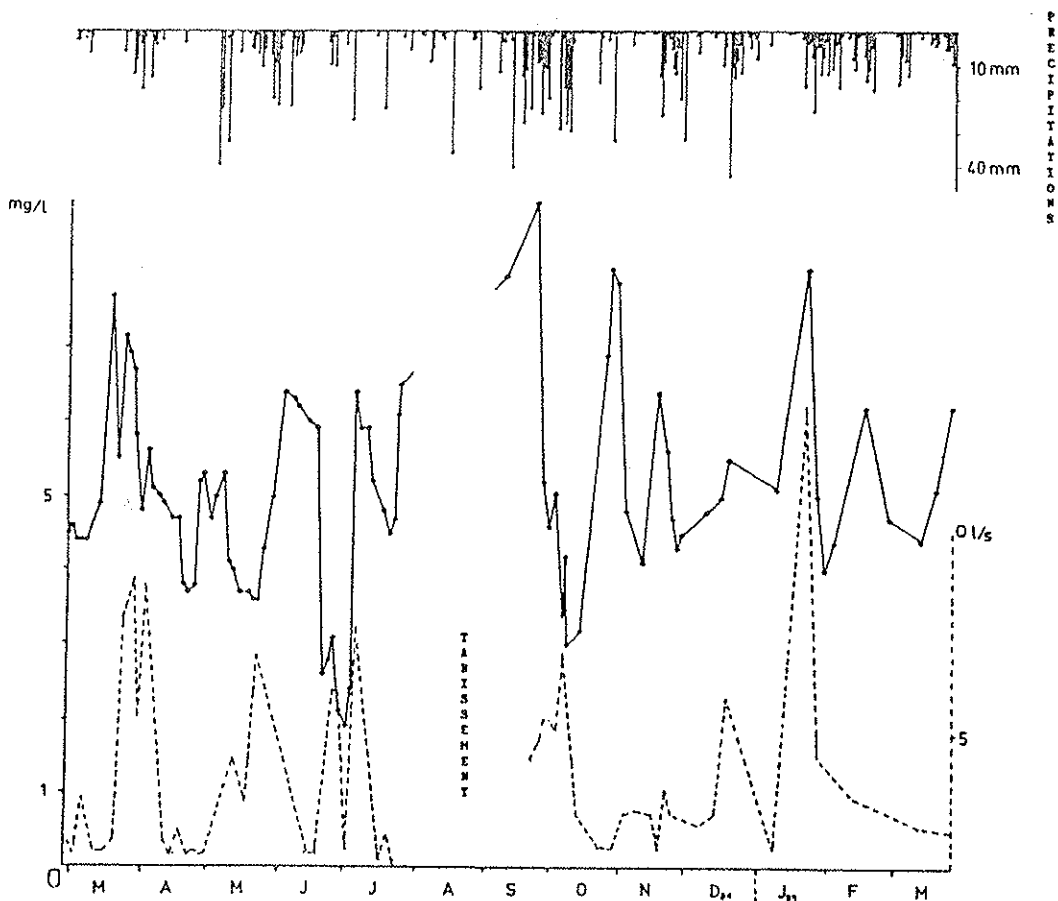


Fig. 99 EVOLUTION DE L'ION SULFATE - RU DU BAS DE PROLE

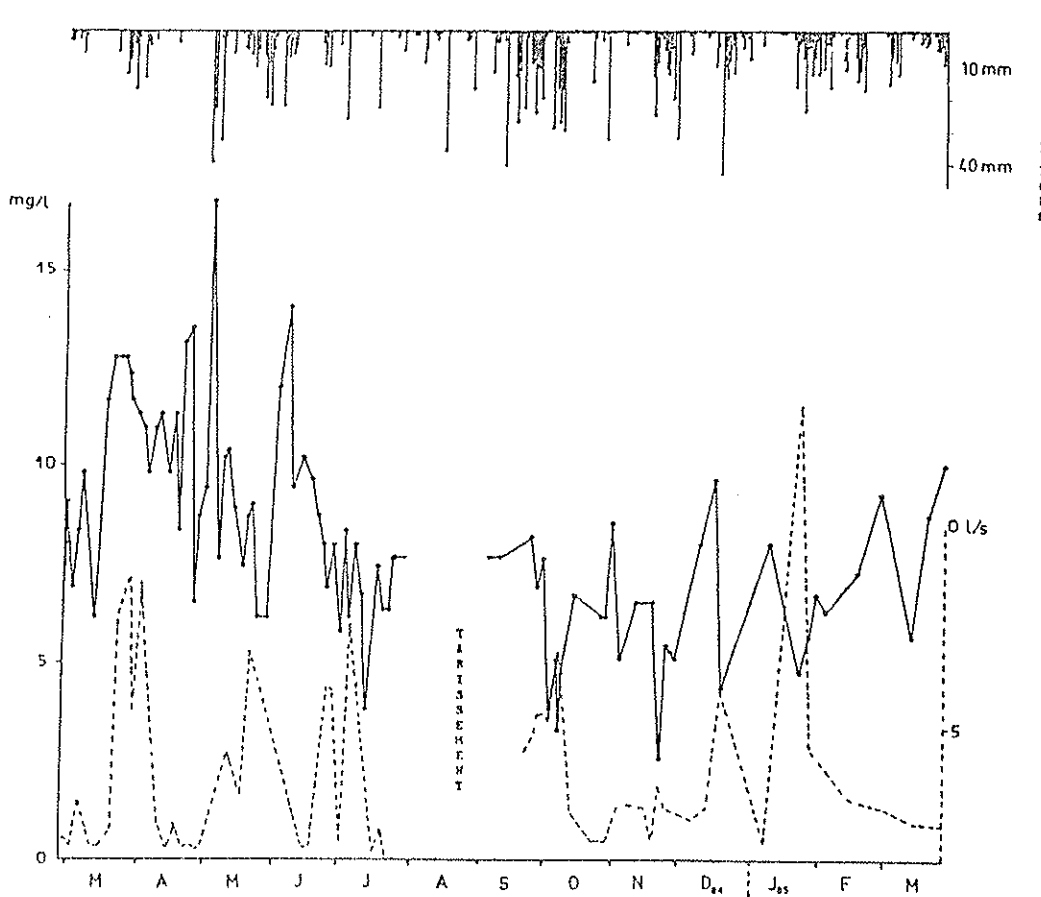


Fig.100 EVOLUTION DE L'ION CHLORURE - RU DU BAS DE PROLE.

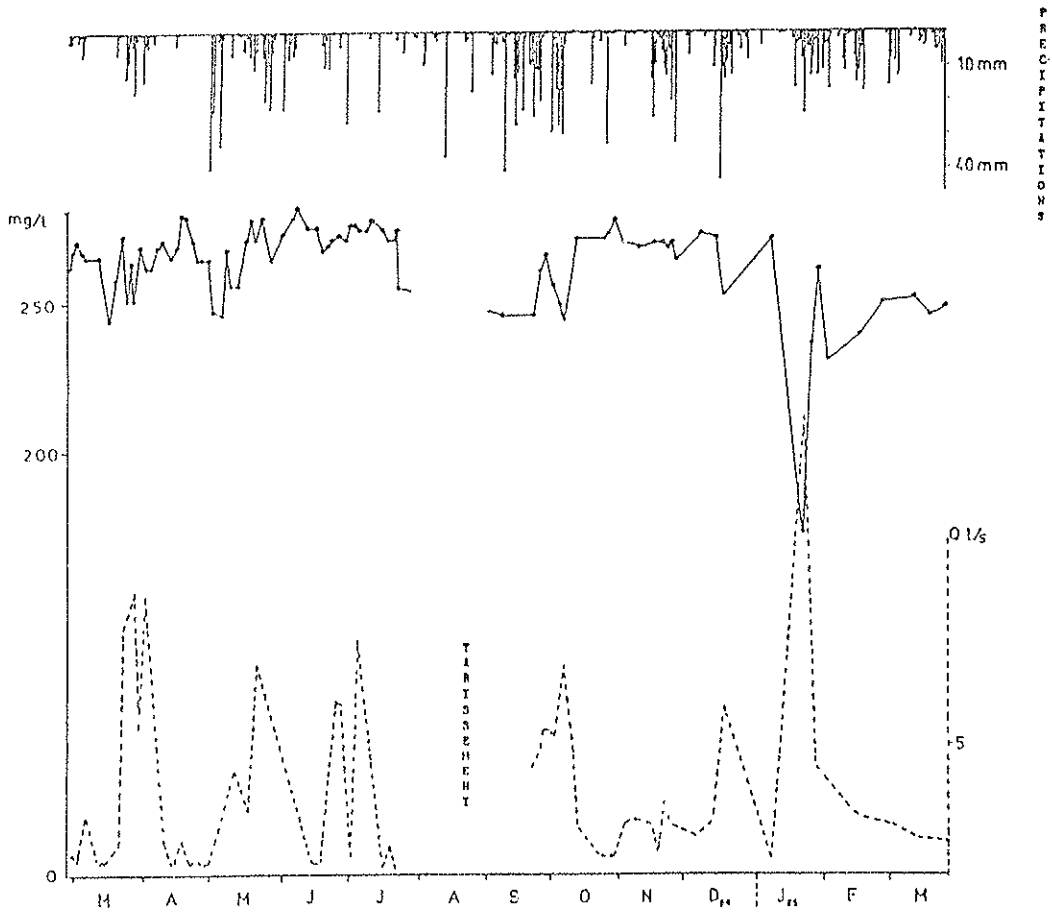


Fig. 101 - EVOLUTION DE L'ION BICARBONATE - RU DU BAS DE PROLE

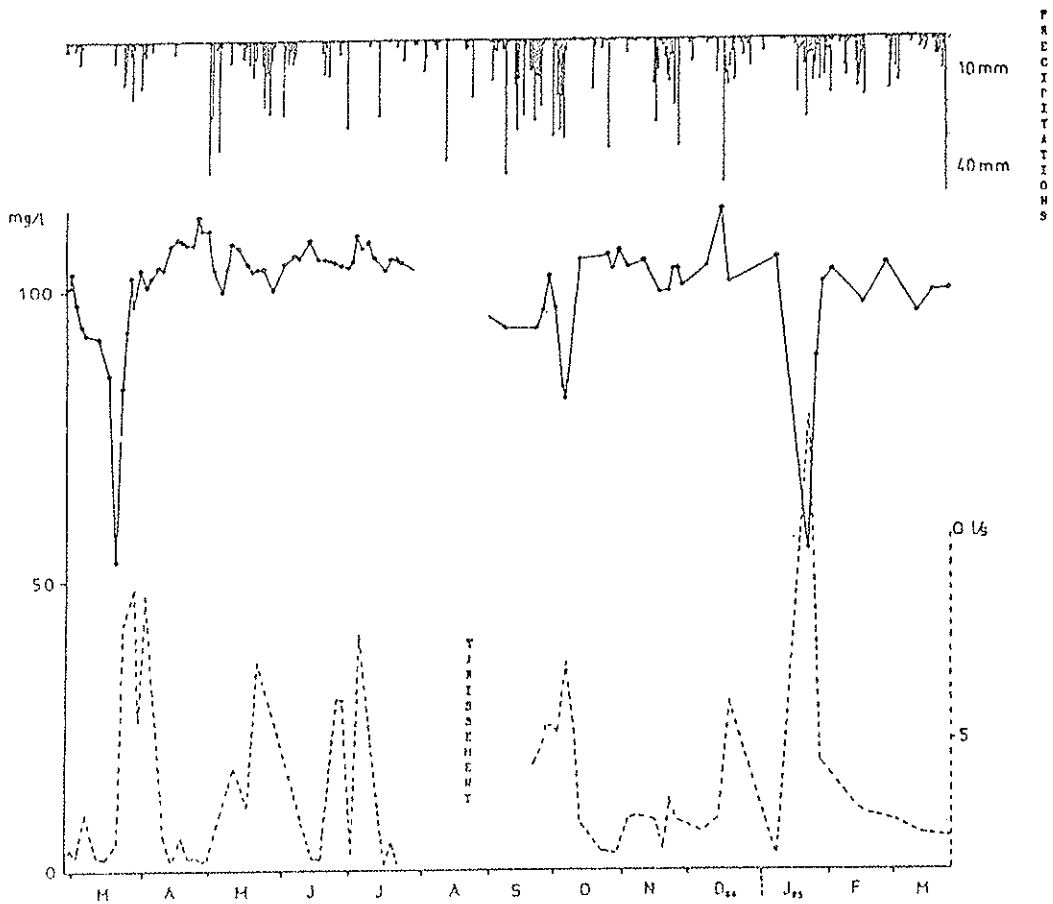


Fig. 102 - EVOLUTION DE L'ION CALCIUM - RU DU BAS DE PROLE



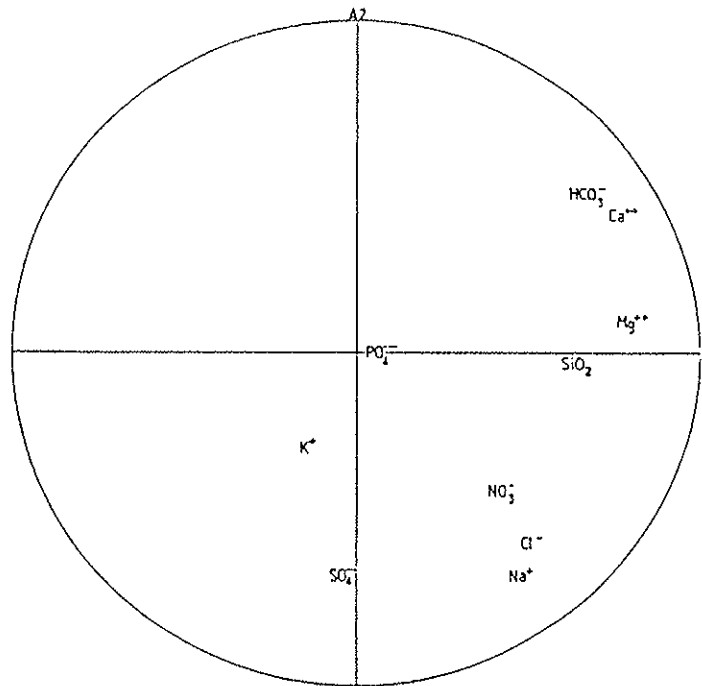


Fig. 103-ACP ru du Bas de Prôle - Projection des variables

## VI - COMPARAISON DU CHIMISME DES EAUX DU RU DU BAS DE PROLE ET DE LA GROTTÉ AU COURS DE L'ÉTIAGE ESTIVAL DE 1984

Nous avons effectué une série de prélèvements tout au long de cet étiage à la Grotte des Planches. Par contre, le tarissement du ruisseau ne nous a pas permis d'effectuer tous les prélèvements souhaités. Une extrapolation a été nécessaire dans ce dernier cas, puisque nous ne possédons d'informations qu'au début et à la fin de cette période.

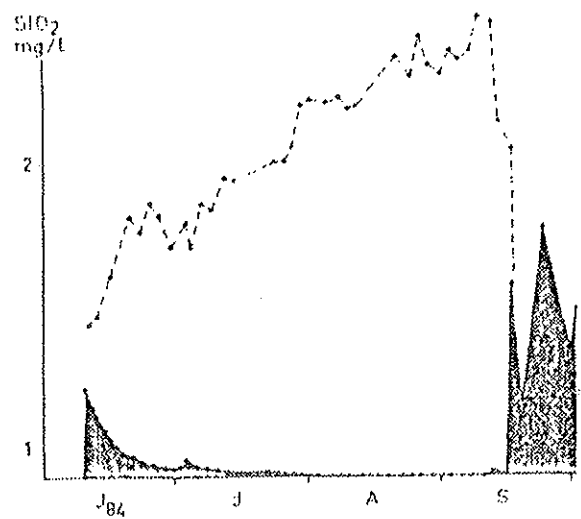
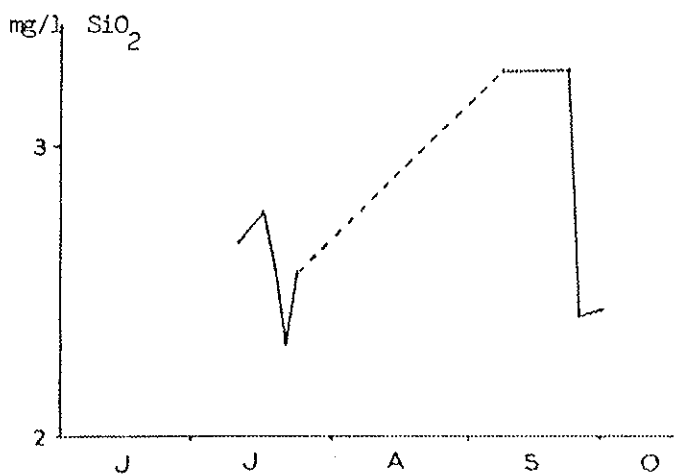
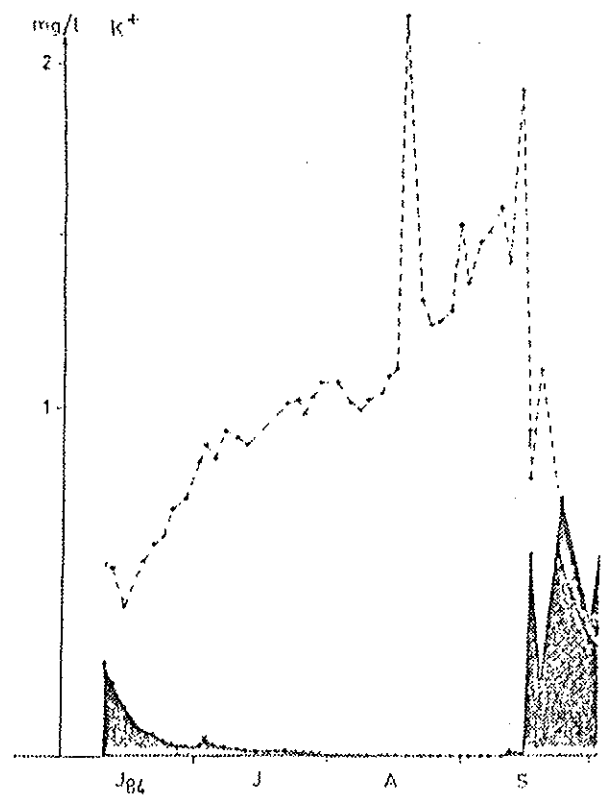
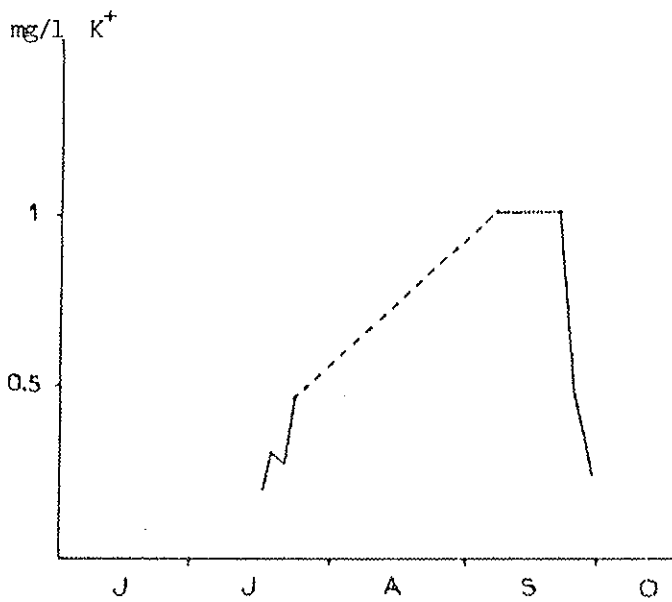
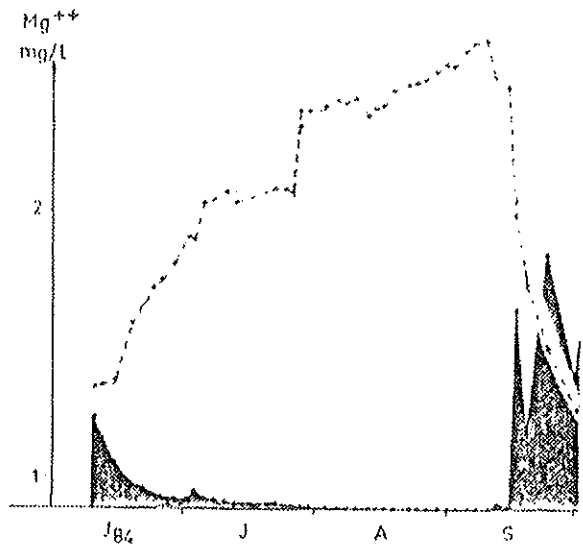
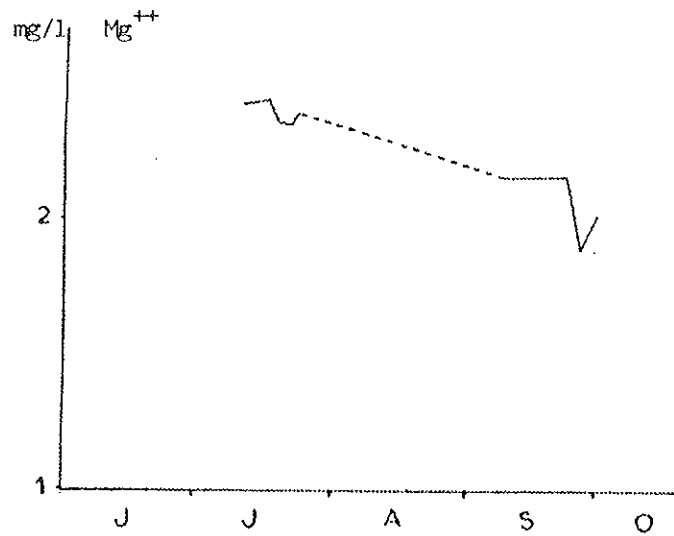
La comparaison de trois éléments : le magnésium, le potassium et la silice fait ressortir une différence mais aussi une similitude.

1) Une différence est visible pour le magnésium (fig.104A). Celui-ci montre un accroissement très net de sa concentration à la Grotte des Planches, alors qu'une légère diminution apparaît dans le ruisseau. Ceci met bien en évidence l'origine matricielle de cet élément, puisque cette dernière peu abondante au niveau du ruisseau ne provoque pas d'augmentation de sa concentration.

2) Une similitude concerne le potassium (fig.104 B) et la silice (fig. 104 C). En effet la concentration de ces deux éléments croit de façon identique dans les eaux de la Grotte et du ruisseau. Ceci renchérit les explications précédemment avancées, selon lesquelles l'acquisition de ces deux éléments se fait au niveau des sols.

Ru du Bas de Prôle

Cuisance - Grotte



Concentration — — — —

débit

Fig. 104 - Evolution comparée des éléments :  $Mg^{++}$  ;  $K^+$  ;  $SiO_2$  en étiage à la Grotte et au ru du Bas de Prôle.

### Conclusion du huitième chapitre

Les eaux lysimétriques et celles du ru du Bas de Prôle nous ont permis d'obtenir :

#### \*La comparaison chimique moyenne

- Dans les sols, nous observons une opposition significative entre le sol brun calcique (DL1) et les sols bruns. Le premier donne des eaux bicarbonatées calciques alors que les autres donnent des eaux acides plus faiblement minéralisées. Ces dernières sont plus riches en calcium, deux fois plus pauvres en silice et avec des teneurs équivalentes en potassium.

- Les eaux du ruisseau acquièrent un chimisme proche de celui des eaux de la Cuisance avec un caractère bicarbonaté calcique légèrement plus prononcé. Par rapport aux eaux lysimétriques, la teneur en calcium, magnésium est nettement plus élevée, tandis que les teneurs en nitrate et potassium sont plus faibles.

- La composition chimique des eaux lysimétriques et du ruisseau est en équilibre avec les minéraux phylliteux : l'illite et la kaolinite.

\* Le suivi saisonnier des eaux lysimétriques et l'analyse statistique des résultats, démontrent l'influence des types de sol sur la solubilisation des éléments issus de l'altération des minéraux.

Nous constatons que le sol brun calcique, dans lequel les minéraux phylliteux paraissent le mieux cristallisés et les plus sains, donnent des eaux de percolation moins riches en silice que les eaux des sols bruns dans lesquels nous avons remarqué l'altération des argiles.

Sur le plan appliqué, l'hydrochimie des eaux karstiques met en évidence

- L'influence des engrais épandus est très nette pour l'azote, les chlorures et le potassium. Après des épandages et des précipitations suffisantes, ces éléments se retrouvent dans les eaux lysimétriques d'autant plus rapidement que ces deux événements sont rapprochés. L'analyse statistique le confirme et permet de distinguer les types d'engrais utilisés et la vitesse de fixation de chacun d'eux.

- L'influence du mode cultural apparaît évidente pour les nitrates qui résultent du bilan entre la minéralisation de la matière organique et le prélèvement par les plantes. Ainsi sous cultures les nitrates recueillis dans les eaux de percolation sont abondants au printemps et en automne, la minéralisation l'emportant sur les prélèvements par les plantes. Sous prairies artificielles leur abondance n'apparaît qu'au printemps, par contre sous prairies naturelles ils sont rares tout l'azote minéralisé étant dissout.

- L'influence du type de sol se retrouve dans le suivi et dans l'analyse statistique. Ainsi nous constatons que la silice est en relation avec les types de sol puisque le sol brun calcique fournit des eaux plus pauvres en silice mais aussi plus riches en calcium et bicarbonates.

\* Le suivi saisonnier des eaux du ruisseau montre aussi l'influence des épandages d'engrais mais dans des proportions moindres. Nous observons également une augmentation de la concentration des nitrates à chaque crue hivernale. Des phénomènes analogues se produisent pour les chlorures.

Comme nous l'avons fait pour la Cuisance, il est intéressant de comparer les concentrations de certains éléments mesurés au début et à la fin de chaque période de tarissement. Nous constatons, en effet, que la teneur en magnésium ne varie pas, contrairement à ce que nous avons observé dans la Cuisance. Ceci s'explique très bien par le fait, que dans le ruisseau, la source de magnésium est insuffisante (matrice calcaire du karst). Par contre, nous observons un accroissement de la concentration en silice et en potassium, ces deux éléments proviendraient bien ici de l'altération par acidolyse des minéraux phylliteux.

## CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

L'étude du petit bassin expérimental de Chilly sur Salins nous a permis de suivre et de comparer l'évolution chimique des eaux :

- de percolation dans les sols, grâce à l'installation de plaques lysimétriques et au suivi chimique des eaux recueillies par drainage naturel dans deux types de sol (brun sur argiles à chailles et brun calcique), et sous trois types de culture : (culture de céréales, prairies artificielles, prairies naturelles).

- de l'épikarst, drainé par le ru du Bas de Prôle dont certains épisodes ont été comparés à ceux de la Cuisance.

Le chimisme des eaux de ce bassin est soumis à plusieurs influences.

### I - INFLUENCE DES TYPES DE SOL

Elle est surtout sensible par sa teneur en silice, toujours plus concentrées dans les eaux des sols bruns. Or ces derniers se composent de minéraux argileux comme l'illite, la vermiculite en cours de dégradation par acidolyse, accompagnés d'une perte de silice et de potassium. Celui-ci ne montre pas un comportement semblable à celui de la silice car l'apport d'engrais modifie fortement sa concentration.

Le calcium et les bicarbonates varient aussi en fonction des types de sols puisqu'ils sont toujours plus concentrés dans les eaux issues du sol brun calcique que dans les autres, ce qui se retrouve dans les analyses de ce sol saturé en bases.

L'ensemble de ces sols présentent un potentiel de minéralisation de l'azote élevé donc un risque de lixiviation important.

### II - COMPARAISON DES EAUX DE L'EPIKARST ET DE LA CUISANCE

Les eaux bicarbonatées calciques du ru du Bas de Prôle, le sont plus légèrement que celles de la Cuisance (tableau 40, p. 125 et 23 p. 59) ayant à leur disposition une matrice calcaire plus altérée en surface. Par contre, nous constatons qu'elles subissent l'influence des sols puisque leurs concentrations notamment en silice, sont plus proches de celles des sols bruns que de celles du sol brun calcique.

La comparaison de l'étiage estival du ru du Bas de Prôle et de la Cuisance (Grotte) montre que la concentration en silice et en potassium croît dans les deux cours d'eau. Tandis que le magnésium décroît dans le ruisseau et croît dans la Cuisance. Ceci permet de penser que le potassium et la silice à la Grotte des Planches pourrait subir partiellement l'influence des sols bruns (prédominants dans le secteur de Chilly sur Salins) comme nous l'avons avancé dans la seconde partie de ce travail.

SYNTHESE ET CONCLUSION

## SYNTHESE ET CONCLUSION

L'étude du bassin d'alimentation des sources de la Cuisance a eu pour objectif de définir l'acquisition du chimisme des eaux karstiques et d'estimer l'impact des activités humaines (agricoles ou domestiques) sur leurs comportements. Pour ce faire, il nous a fallu :

- rechercher les limites du bassin et déterminer ses critères géologiques, morphologiques, pédologiques, végétaux et hydrologiques.

- Suivre le comportement chimique des eaux karstiques de la source Nord au cours d'un cycle hydrologique complet et comparer certains épisodes sur les deux résurgences

- Caractériser l'influence des sols et des modes culturaux sur les eaux épikarstiques et karstiques, grâce à l'étude d'un petit bassin expérimental équipé de plaques lysimétriques.

Après avoir rappelé les caractéristiques du karst étudié, cette synthèse reprendra l'ensemble des résultats obtenus en suivant le chemin logique des écoulements, c'est-à-dire des précipitations vers les résurgences.

### I - CARACTERISTIQUES DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA CUISANCE

\* La complexité de ce bassin, d'environ 100 km<sup>2</sup>, situé sur le plateau lédonien, a été démontrée grâce aux études hydrologiques, géologiques et à un certain nombre de traçages à la fluorescéine. Nous constatons que ce bassin se subdivise en trois compartiments imbriqués les uns dans les autres.

- Un compartiment commun, assez vaste et central, caractérisé par les secteurs des communes de Besain, Molain et La Chatelaine.

- Deux compartiments spécifiques à chaque résurgence. Celui de Chilly sur Salins alimente la source de la Grotte-des-Planches au Nord alors que celui de la forêt de Poligny-Arbois alimente la source captée du Fer à Cheval au Sud.

\* Dans son ensemble, ce bassin d'alimentation se caractérise également par des bancs calcaires subhorizontaux du Bathonien et du Bajocien avec :

- Un karst très développé au Sud, constitué de bancs calcaires très fragmentés, résulte d'un processus de dissolution intense. Des sols superficiels s'y sont développés et entretiennent ce phénomène grâce à une production de CO<sub>2</sub> élevée et rapidement entraînée vers le substratum en raison de la faible épaisseur du sol, de son excellent drainage et d'abondantes précipitations. Les eaux auront donc un temps de séjour bref dans l'épikarst et le karst de ce secteur. La couverture végétale se compose surtout de forêts et de prairies naturelles peu ou pas amendées.

- Un karst moins visible au Nord, en raison d'une fissuration peu développée qui a permis l'installation d'une formation superficielle appelée argiles à chailles, sur laquelle se sont développés des sols bruns épais. Cette faible fissuration provoque un effet retardateur à l'écoulement des eaux, accentué par l'épaisseur de la couverture pédologique. La végétation est constituée de cultures, de prairies artificielles surtout dans la région de Chilly sur Salins, de forêts et de quelques prairies naturelles.

## II - LES EAUX EPIKARSTIQUES

Les eaux météoriques, très peu minéralisées, arrivent à l'épikarst dans lequel elles acquièrent une partie de leur chimisme. C'est pourquoi, nous avons installé au Nord de Chilly sur Salins, un petit bassin expérimental de quelques hectares, équipé de plaques lysimétriques récoltant les eaux qui percolent à travers les sols. Ces dernières ont été comparées aux eaux de la base de cet épikarst issues du ruisseau qui draine ce bassin expérimental.

Nous avons constaté que le chimisme des eaux de percolation subit l'influence :

- du type de sol, puisque dans les sols bruns calciques, la concentration en silice est toujours plus faible que dans les sols bruns en raison d'un degré de dégradation des minéraux phylliteux plus avancé dans ces derniers et accompagné d'une perte en silice et potassium. De même la concentration plus élevée en calcium dans les eaux provenant du sol calcique est en relation avec son taux de saturation en bases.

- des pratiques culturales. En effet, dans les sols bruns, sous cultures la concentration moyenne en nitrates (de l'ordre de 50 mg/l) est supérieure à celle rencontrée sous prairies artificielles (de l'ordre de 25 mg/l) surtout en automne et sous prairies naturelles tout au long de l'année (de l'ordre de 5 mg/l). De plus ces nitrates abondent au printemps et en automne, puisque la minéralisation l'emporte sur les prélèvements par les plantes. L'influence des épandages se constate nettement pour l'azote, les chlorures, et le potassium, dont les concentrations montrent des pics proportionnels aux quantités épandues et à l'intensité des précipitations. Ces engrais révèlent une répartition quelque peu différente entre le Nord et le Sud du bassin. Ainsi les phosphates, les sulfates et le calcium sont plus abondamment épandus au Nord, tandis que l'azote, épandu des mois de Novembre à Février et d'Avril à Août, l'est sur l'ensemble des terres exploitées.

Les eaux du ruisseau suivent la même évolution que celles des eaux lysimétriques mais avec des concentrations moindres, notamment pour les nitrates (de l'ordre de 20 mg/l).

## III - LES EAUX KARSTIQUES

\* L'hydrochimie des eaux karstiques, bicarbonatées calciques de la résurgence de la Grotte des Planches (au Nord du bassin), suivie au cours d'un cycle hydrologique complet fait ressortir le comportement de certains éléments étudiés et les variations de leurs concentrations :

- liés aux débits pour le magnésium, la silice et le potassium,
- liés aux cycles biologiques et aux épandages pour les nitrates, les chlorures et le potassium.
- indépendants des débits, des cycles biologiques et des épandages pour les phosphates.

Les crues successives à un étiage de longue durée montrent des concentrations élevées pour la plupart des éléments lors de la première crue (automnale) suivie d'un retour progressif à des valeurs plus faibles.

\* Nous avons eu la possibilité de séparer, bien qu'imparfaitement,



deux sous-bassins karstiques distincts par leurs caractéristiques intrinsèques. De ce fait, les eaux bicarbonatées calciques de ces deux systèmes se sont trouvées modifiées, de façon significativement différente d'un bassin à l'autre, avec des accroissements de la concentration de certains éléments plus importants, à la résurgence de la Grotte-des-Planches (silice, potassium, nitrates), qu'à celle du Fer à Cheval. Cependant certains éléments, comme le magnésium, montrent une grande similitude aux deux sources.

- le bassin Nord drainé par la source de la Grotte des Planches produit des eaux pourvues d'éléments minéraux issus de la matrice calcaire tel que le calcium, le magnésium, la silice et le potassium. Mais certains d'entre eux proviennent surtout de l'altération pédogénétique (potassium, silice) comme l'ont mis en évidence les résultats obtenus dans les eaux lysimétriques, avec une charge en silice plus élevée dans les sols épais dans lesquels la dégradation des minéraux phylliteux est plus avancée. Les nitrates, quant à eux, résultent en grande partie des activités agricoles.

- le bassin Sud, drainé par la source captée du Fer à Cheval fournit des eaux plus pauvres en éléments minéraux d'altération pédogénétique ou d'origine agricole puisque ce bassin possède un épikarst différent du précédent (sols superficiels à minéraux argileux peu dégradés et essentiellement recouverts de forêts).

#### IV - CONCLUSION

Le suivi hydrochimique des deux résurgences de la Cuisance montre l'influence des milieux traversés et des apports extérieurs.

##### \* Les apports extérieurs

- les eaux météoriques, peu minéralisées, alimentent le bassin et provoquent, lors des crues, une dilution des éléments chimiques proportionnelle à l'intensité et à la durée des précipitations.

- les eaux usées, très minéralisées et rejetées directement dans le système karstique par l'intermédiaire de pertes, ne provoquent pas d'effets spectaculaires sur le chimisme des eaux. Cependant un stockage des effluents peut se produire au cours des périodes sèches, puis ils sont entraînés dès la première crue d'automne.

- les épandages hivernaux de sel entraînent une réaction très nette, mais brève, sur le chimisme des eaux karstiques et plus particulièrement des chlorures.

- les épandages d'engrais influent directement sur les eaux épikarstiques. L'étude des eaux lysimétriques et du ru du Bas de Prôle montrent très nettement cette influence pour l'azote (surtout sous forme de nitrates), les chlorures, le potassium etc... Cette influence reste très sensible dans les eaux karstiques pour les nitrates et les chlorures ce qui explique en partie les variations de "type saisonnier".

##### \* Les milieux traversés

- les facteurs pédologiques les plus marquants semblent être dûs d'une part à des degrés plus ou moins avancés de l'altération des minéraux phylliteux, associés à des pertes de silice et de potassium que nous avons pu observer dans les eaux lysimétriques et karstiques, lors de la comparaison des deux résurgences, d'autre part à l'épaisseur du sol qui a pour conséquence un excellent drainage et une arrivée rapide du CO<sub>2</sub> au substrat calcaire entraînant sa dissolution.

- Les facteurs géologiques et plus particulièrement la matrice calcaire joue un rôle important dans la composition chimique des eaux par sa dissolution, plus ou moins rapide selon l'apport de  $\text{CO}_2$ . Nous avons pu le constater très nettement pour le magnésium, le calcium et les bicarbonates au cours d'un cycle hydrologique sur une résurgence et en comparant l'évolution chimique de certains éléments aux deux sources.

## BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

- - - - -

- AUBERT D. (1965) - Calotte glaciaire et morphologie jurassienne. *Eclo. Géol. Helv.* vol. 58.
- AUBERT D. (1969) - "Phénomènes et formes du karst jurassien". *Eclôgae Géologicae Helveticae.* vol. 62-2
- ASTIER J.L. (1971) - Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. *Edit. MASSON*
- BAILLAUD (1954) - Climatologie Comtoise et Jurassienne. *Ann. Sc. Univ. Besançon,* fasc. 1-2-3.
- BALEK J. - MOLDAN D. - PACES T. - SKOREPA J. (1978) - Hydrological and geochemical mass balance in small forested and agricultural basin. *Proceeding of the Baden Symposium, sept. 78.*
- BAKALOWICZ M. (1976) - Géochimie des eaux karstiques. Une méthode d'étude de l'organisation des écoulements souterrains". *Ann. Sc. Univ. Besançon.* Fasc. 25, 3ème série.
- BAKALOWICZ M. (1979) - L'anhydride carbonique dans la karstogénèse. *Actes du Symposium intern. sur l'érosion karstique U.I.S. Aix en Provence - Marseille - Nimes.* p. 41-48.
- BAKALOWICZ M. (1979) - Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. *Thèse d'Etat. Univ. P. et M. Curie Paris VI.*
- BAKALOWICZ M. - FLEYFEL M. (1980) - Etude géochimique et isotopique du carbone minéral dans un aquifère karstique. *Coll. Soc. Géol. Fr., Soc. France Miner. Cristal et Ass.*
- BAKALOWICZ M. (1981) - Les eaux d'infiltration dans l'aquifère karstique. *Internat. Cong. Spéléo. Bowling Green, Ky, U.S.A., 2, p. 710-713*
- BEAUFILS T. (1983) - Typologie des stations forestières du plateau ledonien et de la Côte de l'Heute. *Labo. de taxonomie exp. et de Phytol. Fac. Sc. Besançon.*
- BEAUFILS T. (1984) - Catalogue des types de stations forestières du plateau ledonien et de la Côte de l'Heute. *Lab. Tax. Exp. et de Phyt. Fac. Sc. Besançon.*
- BERGER G. - BOSCH B. - DESPREZ N. - LETOLLE R. - MARCE A. - MARIOTTI A. - MEGNIEN Cl. (1970) - La minéralisation des eaux souterraines de la Beauce et le renouvellement de la nappe : application des marquages isotopiques ( $3H$ ,  $15_N$ ,  $34_S$ ).
- BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVE P., MUDRY J. (1979) - Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. *Revue Géol. Dyn. Géog. Phys.* vol. 21, fasc. 4.
- 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. *Ann. Sc. de l'Univ. Besançon, Troisième colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire, n° 1*
- BLAVOUX B. - MUDRY J. (1983) - Séparation des composantes de l'écoulement d'un exutoire karstique à l'aide des méthodes physico-chimiques. *Hydrogéologie Géologie de l'Ingénieur n° 4.*

- BONNEAU M., SOUCHIER B. (1979) - Pédologie.  
T.2 - Constituants et propriétés du sol. *Edit. Masson.*
- BRUCKERT S., TOUTAIN F., TCHICAYA J., JACQUIN F. (1971) - Influence des pluviollessivats de hêtre et de pin sylvestre sur les processus d'humidification  
*Ecol. Plant. Edit. Gauthier-Villars.*
- BRUCKERT S., GAIFFE M. (1980) - Analyse des facteurs de formation et distribution des sols en pays calcaire, glaciaire ou karstique. Plaine de Frasne-Bonnevaux et montagne du Laveron. *Jura Central. Ann. Sc. Univ. Besançon, fasc. 1.*
- BRIJ L. SAWHNEY (1977) - Interstratification in layer solicates. The Connecticut Agricultural Experiment Station, New Haven, Connecticut. *Minerals in Soil Environnement.*
- BULLETIN Annuel de la Commission météorologique départementale. Doubs - Jura  
Année 78 - 79 - 80 - 81.
- BURGER A. (1979) - Recherche de critères pour la protection des eaux souterraines karstiques contre la pollution. Application au Jura suisse. *Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchatel. n° 3.*
- BURGER A. (1983) - Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. *Gaz, Eaux, Eaux Usées, n° 9. p. 533-583.*
- BURGER A. (1983) - Résultats des méthodes d'investigations indirectes dans aquifères calcaires. *Gaz, Eaux, Eaux usées, n° 5*
- BURGER A. - J. MULLER - U. SCHOTTERER - U. SIEGENTHALER (1983) - Résultats des méthodes d'investigations indirectes dans les aquifères calcaires.  
*Gaz, Eaux, Eaux usées, n° 9, p. 501-515.*
- CAIRE A. (1951) - Etude géologique de la région salinoise. *Thèse Doctorat-Université Besançon*
- CAIRE A. (1967) - Carte géologique de Salins les Bains.
- CALLOT G. (1978) - Analyse des litho systèmes carbonatés. Rôle du substratum calcaire dans la pédogénèse. *Doc. SES, n°484, INRA Montpellier.*
- CAMPBELL C.A. - READ D.W.L. - BIEDERBECK V.O. - WINKLEMAN G.E. (1983) - The first 12 years of a long-term crop rotation study in southwestern saskatchewan. Nitrate - N, distribution in soil and N uptake by the plant.  
*Canadian Journal of Soil Science- Aout 1983.*
- CAMPY M. (1982) - Le Quaternaire Franc-Comtois. Essai chronologique et paléoclimatique. *Thèse d'Etat - Fac. Sc. et Techn. Univ. Franche-Comté.*
- CASTANY G. - Traité pratique des eaux souterraines
- CHAMBOLLE T. (1983) - Agriculture et qualité des eaux. *La Lettre de l'Eau Pure. n° 68-69.*
- CHAUVE P. (1971) - Rôle des failles dans les circulations souterraines du Jura. Exemples et applications. *Colloque d'Hydrologie en Pays calcaire, Besançon.*
- CHAUVE P. (1975) - Guides géologiques régionaux - Jura. *Edit. Masson*
- CHAUVE P., PEGUENET J., TISSOT G., TRESSE Ph. (1979) - Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçages en Franche-Comté. *SRAE de Franche-Comté et Labo. de Géol. Struc. Appl. Atlas.*
- CHAUVE P., BLAVOUX B., MIGNOT C., MUDRY J. (1982) - Les éléments chimiques extérieurs au système karstique indicateurs de la qualité des eaux des réserves des calcaires jurassiens. *Ann. Sc. Univ. de Besançon, Troisième colloque d'hydrogéologie en Pays calcaire, n° 1.*

- CHAUVE P., MANIA J., MORRE-BIOT N., REMY F. (1982) - Evolution physico-chimique des eaux souterraines contaminées à travers un milieu calcaire fissuré dans la région de Baume les Dames (Doubs). *Ann. Sc. Univ. Besançon. Troisième Colloque d'Hydrogéologie en Pays calcaire*, n° 1
- CHAUVE P., MUDRY J. (1983) - Premières reconnaissances des sources de la haute vallée du Doubs. *26ème congrès géologique international*.
- COLLIN J.J. - DREYFUSS M. - LIENHARDT G. (1967) - Premier plateau du Jura. Piège hydrologique important. *Bull. B.R.G.M.*, n° 4, p. 81-84
- COMMISSION PERMANENTE D'ETUDE ET DE PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES (1980) - Pollution des eaux souterraines du karst et conséquences en Franche-Comté. *Coll. Int. sur la Prot. des eaux souterraines karstiques à Besançon*.
- COSANDEY C.M. (1980) + Calcul à posteriori de la réserve en eau du sol utilisée par la végétation durant l'été : une approche de l'ETR. *Recherches Géog. à Strasbourg*, n° 13-14.
- DELAROZIERE G. (1968) - Contribution à l'étude du Bassin du Doubs : climatologie, hydrologie et déficit d'écoulement rapportés aux unités géologiques. *Thèse BRGM*, 68 SGL 162 JAL<sup>3</sup>.
- DUCHAUFOR P. (1977) - Pédogenèse et classification. *Masson édit.* t. 1
- DUPRAZ C.. (1984) - Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins-versants comparatifs à végétations contrastées (Mont-Lozère, France) *Thèse Docteur Ingénieur - Univ. D'Orléans*.
- DUQUET B. (1985) - Etude comparée de l'humification d'une paille marquée à l'azote 15 dans différents sols du plateau calcaire de Besançon. *Thèse de 3ème cycle. Univ. de Nancy I.*
- DURAND R. (1979) - La pédogenèse en pays calcaire dans le Nord-Est de la France. *Univ. Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de Géologie*, n° 55.
- ERHART H. (1975) - Itinéraires géochimiques et cycle géologique du silicium *Doin édit.*
- FALLOT J.P. (1983) - Contribution à l'étude du comportement d'un milieu poreux calcaire vis à vis des anions nitrates et phosphates. *D.E.S.S. "Eaux Continentales" Besançon n° 40*.
- FAURIE G. (1980) - Devenir de l'Ammonium en sol calcaire. Nitrification et volatisation de l'Ammoniac. *Thèse d'Etat. Université Claude Bernard Lyon*.
- FRACHON J.C. - OUTHIER M. (1974) - Plan de la Grotte des Planches près d'Arbois. *Inédit*.
- FRACHON J.C. (1969) - Les reculées du Jura ledonien. *DES de Géographie - Université de Besançon*
- FRITZ B. (1975) - Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions - Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. *Bull. Sc. Géol.* n° 41.
- GAIFFE M. et BRUCKERT S. (1985) - Analyse des transports de matières et des processus pédogénétiques impliqués dans les chaînes de sols du karst jurassien. *Soils and Géomorphology. Caténa, Supl. 6*.
- GARD J. (1950) - Recherches géologiques sur les faisceaux externes du Jura entre Salins, Arbois et Poligny (Jura). *Thèse Fac. Sc. Besançon*.
- GOUGOUSSIS-DELPY C. (1982) - Assainissement individuel et aptitude des sols à l'élimination et à l'épuration des effluents domestiques. *Thèse 3ème cycle Inst. Nation. Polytec. de Lorraine - Nancy*.

- GROS A. (1979) - Engrais - Guide pratique de la fertilisation (*La Maison Rustique*)  
7ème édition.
- GUILLAUME S. - GUILLAUME A. (1965) - Carte géologique de Champagnole.
- HENIN S. (1981) - Le cycle de l'azote. Les problèmes de fertilisation et de  
pollution. *C.R. Acad. Agri. Française*. 10-846-858.
- ITCF (1980) - La culture du blé. Perspectives agricoles. (Mars 1981).
- JACQUIN F. (1983) - Transfert de nitrates dans deux sols lorrain drainés  
*Acad. d'Agric. de France* (Pros. Verb. 8/6/83).
- JACQUEMIN P. (1984) - Réponses hydrodynamiques des hauts bassins du Doubs et  
de la Loue. *Thèse 3ème cycle n° 442 - Fac. Sc. Tech. Univ. Franche-Comté*.
- JAMAGNE M. (1967) - Base technique d'une cartographie des sols. *Ann. Agro.*  
1967, vol. 18, n° H.S.
- KERRIEN Y. (1981) - Carte géologique de Poligny.
- KIRALY L. (1968) - Eléments structuraux et alignement des phénomènes karstiques  
*Bull. Soc. Neuch. des Sc. Nat.* t. 91.
- KIRALY L., MULLER I. (1979) - Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation  
dans le karst. Effet sur la variation du chimisme des sources karstiques.  
*Bull. du Centre Hydro*, n° 3, Université Neuchatel.
- LABORDE J.P. (1976) - Notion d'indice de pente. Approche par le calcul automatique  
*Thèse 3ème cycle. Inst. Poly. de Lorraine*.
- LAJOT J. (1966) - Coupe stratigraphique de la falaise de Grotte des Planches.  
Inédit.
- LAROCHE P.F. (1984) - Azote dans les eaux d'Arcier. *Thèse 3ème cycle. Univ.*  
*de Franche-Comté*.
- LEPILLER M. (1980) - Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du  
comportement hydrogéologique des massifs calcaires. Etude de  
quelques systèmes karstiques du massif de semnoz et de la région  
d'Annecy. *Thèse 3ème cycle - Université*.
- Mac GREGOR J.M. - BLAKE G.R. - EVANS S.D. (1974) - Mineral Nitrogen into subsoils  
Following Continued annual fertilisation fer Corn. *Soil Sci. Soc. Amer.*  
*Proc.* vol. 38.
- MAILLET E. (1905) - Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. *Hermannn,*  
*Paris*.
- MALOT A., VIAUX P. (1981) - Le reliquat d'azote à la sortie de l'hiver.  
*Perspective agricole ITCF*, n° 46.
- MANGIN A. (1974) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques  
*Ann. Spéléo.* 1974, t. 29, fasc. 3.
- MANIA J., FOCQUEBOEY-NIEMCZYK E., RAMON S., VERBEKE B. (1982) - Caractérisation  
de la réponse des diverses unités hydrologiques calcaires du Nord de  
la France. *Ann. Sc. Univ. Franche-Comté*.
- MARIOTTI A. (1982) - Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle  
de l'azote. *Thèse d'Etat. Univ. P. et M. Curie, Paris VI*.
- MARY B., REMY J.C. (1979) - Capacité de minéralisation de l'azote du sol.  
*Annales agronomiques.* 1979 p. 514 - 527.
- MATHIEU P. (1976) - Influence des apports atmosphériques et du pluviollessivage  
forestier sur la qualité des eaux de deux bassins versants en Côte d'Ivoire.  
*Cahier ORSTOM, série Géol.*, vol. VIII, n° 1.

- MATHIS M. (1973) - La Chaîne de l'Heute (Jura). *Thèse Univ. Besançon.*
- MEMENTO TECHNIQUE DE L'EAU. HUITIÈME ÉDITION. Degremont 1978.
- MILLOT G. (1964) - Géologie des argiles. *Edit. Masson.*
- MISEREZ J.J. (1972) - Géochimie des eaux du karst jurassien. *Thèse Fac. Sc. Univ. Neuchâtel.*
- MOLINARI J. (1976) - Perspectives offertes par l'utilisation rationnelle des traceurs naturels et artificiels en hydrologie karstique. *Ann. Sci. Univ. Besançon*, fas. 25, 3ème série.
- MORISOT A. (1978) - Evolution de l'azote minéral après épandage de boues de vinasses de lies. *Ex. P.V. séance du 8 Mars 1978.*
- MORISOT A. (1980) - Déplacement avec mélange des nitrates dans un matériau de porosité bimodale. *Ann. Agron.* 31 (1). 1-17.
- MORISOT A. (1980) - Entrainement des éléments fertilisants dans les cultures sous serres florales. *Coll. Franco-Israélien "Les phénomènes de transport de l'eau et des solutés et l'irrigation."*
- HUDRY J. - ROSENTHAL P. (1976) - Role de la structure et de la microstructure dans le drainage karstique des zones synclinales de la haute-Chaîne jurassienne. *Ann. Sci. Univ. Besançon.* fas. 25 - 3ème série.
- HUDRY J., KIRALY L., MULLER I. (1979) - Analyses multivariées du chimisme de quelques sources karstiques du Jura suisse et Franc-Comtois. *Bull. Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel*, n° 3.
- MOET P. (1985) - Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du Nord du Causse de Martel (Corrèze). *Thèse 3ème cycle Univ. d'Orléans.*
- NEILSEN G.H. - STEVENSON D.S. (1983) - "Leaching of soils (calcium, Magnesium, and Potassium in irrigated Orchard Lysimeters" *Soil Sci An. J.*, vol. 47.
- ORBERT D. (1969) - Etude géologique de la région d'Arbois. *Thèse 3ème cycle Paris.*
- PACES T. (1976) - "Kinetics of natural water system". *Inter. Atomic energy Vienna.*
- PACES T. (1983) - Rate constants of dissolution derived from the measurements of mass balance in hydrological catchments. *Geochimia et Cosmochimica. Acta*, vol. 47, p. 1855-1863.
- PACES T. (1980) - Natural and Anthro-pagenic flux of major elements from Central Europe. *Ambio*, vol 11, n° 4, *Geological Survey of Prague.*
- PARANDIER A.N. (1897) - Etude agronomique des sols en région montagneuse jurassienne. *Bull. Ste de Nre et Hre d'Arbois.* n° 4.
- PASQUIER C. (1975) - Contribution à l'étude des bassins karstiques de la région de Champlive. *Fac. Sc. et Techn. de l'Univ. de Besançon.*
- PEDRO G. (1968) - Contribution expérimentale à l'étude du rôle du calcaire dans l'évolution géochimique des sols. 9ème Congrès. *Transactions International Congress of Soil Science.*
- PEDRO G. (1984) - La genèse des argiles pédologiques. Ses implications minéralogiques physico-chimiques et hydriques. *Bull. Sc. Géol.* T. 37, fasc. 4.
- PEGUY Ch. P. (1961) - Précis de climatologie. *Edit. Masson.*
- PEIROLO J. (1979) - Les composants de l'écoulement d'un bassin versant en fonction de l'humidité d'une toposéquence. *Thèse de 3ème cycle. Univ. P. et M. Curie. Paris VI.*



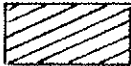

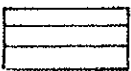
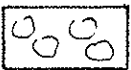

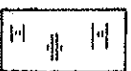
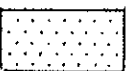

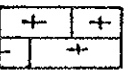
- PELLETIER R. (1947) - Les grottes des Planches près d'Arbois (Jura).  
*Bull. Ass. Spéleo. de l'Est*, n° 7, p. 5-25.
- PICARD J. (1983) - La protection des captages d'eau potable contre la pollution.  
*Génie Rural*.
- PIERRE D. (1979) - Variation de l'abondance naturelle de l'isotope  $^{15}\text{N}$  dans le sol au cours de l'humification de la matière organique. *Thèse de 3ème cycle Univ. P. et M. Curie - Paris VI*.
- PIERRE D. (1983) - Impact de l'agriculture du Sud-Ouest sur la qualité des eaux. Fertilisants et agriculture n° 85
- POCHON M. - SIMEONI J.P. (1976) - Comportement hydrodynamique, nature et rôle traceur des troubles argileux dans deux sources karstiques. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, fasc. 25, 3ème série.
- POCHON M. (1978) - Origine et évolution des sols du Haut Jura Suisse. *Thèse Fac. Sc. Univ. Neuchatel*.
- RAMPON A. (1971) - Contribution à l'étude des facteurs du bilan de l'eau. Les bassins versants élémentaires représentatifs du Blavet. *CTGREF Antony* t. 1 - 2.
- RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL ACTIVITES AGRICOLES ET QUALITE DES EAUX (1982) - Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement. T. I - II.
- REMIERAS G. (1960) - L'hydrologie de l'ingénieur. *Edit. Eyrolles*
- REMY J.C., HEBERT J. (1977) - Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C.R. Acad. Agri. Française*. 11-700 - 710.
- RISQUEZ A. (1982) - Etude de l'adsorption des anions nitrates, phosphates, sulfates par le milieu naturel. *D.E.A. Univ. de Franche-Comté*.
- RODIER J. (1980) - L'analyse de l'eau. 6ème édit. *Edit. Dunod*.
- ROOSE E. (1980) - Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. *Thèse d'état - Univ. d'Orléans*.
- ROQUES H. (1961) - Eléments pour une cinétique des phénomènes karstochimiques. *Ann. Spéleo.*, XVI, fac. 4.
- ROQUES H. (1962) - Considérations théoriques sur le chimisme des carbonates 1er et 2ème mémoire. *Ann. Spéleo* n° 17, fasc. 1-2
- ROQUES H. (1964) - Contribution à l'étude statistique et cinétique des systèmes gaz carbonique - eau - carbonate. *Ann. Spéleo.*, n° 19, 2, p. 255-484.
- ROQUES H. (1972) - Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux naturelles. *Ann. Spéleo.* n° 27-1, p. 79-92
- ROSSIER Y. - SANDMEIER N. (1983) - Etude hydrogéologique d'un massif granitique fissuré. *THèse 3ème cycle*, n° 416 - 416 bis. *Fac. Sc. Tech. Univ. Franche-Comté*.
- SALETTE M. (1981) INRA. Cultivar - Special fourrages - Mai 1981
- STANDFORD G. - SMITH S.J. (1972) - Nitrogen mineralisation potentials of soils *Soil. Sci. soc. Amer. proc.* vol. 36. p. 465-472.
- STANFORD G. - FRERE M.H. - SCHWANINGER D.H. (1972) - Température coefficient of soil nitrogen mineralisation. *Soil. Sci.*, vol. 115.

- STANFORD G. - LEGG J.O. - SMITH S.J. (1973) - Soil nitrogen availability evaluations based on nitrogen minéralisation potentials of soils and uptake of labeled and unlabeled nitrogen by plants. *Plant and Soil* 39, p. 113-124.
- STANDFORD G. - EPSTEIN E. (1974) - Nitrogen minéralization - Water relations in soils. *Soil. Sci. Soc. Amér. Proc.* vol. 38
- STANDFORD G. - CARTER J.N. - SMITH S. J. (1974) - Soil fertility and plant nutrition *Soil Scien. Soc. Amer. Proc.* vol. 38. p 99-102
- SCHWERTMANN Udo Reginald M. Taylor Csiro (1977) - Technische Universität Munchen, Freising, Weihenslephan, West Germany. *Giten Osmond, South Australia. Minerals in soil Environnement.*
- THEOBALD N. (1957) - Pertes et résurgences, entonnoirs de dissolution et entonnoirs d'ablation. Données nouvelles sur la circulation des eaux souterraines dans le Jura et dans les régions voisines. *Ann. Sc. Un. Besançon*, 2ème sér. Géol. Fasc. 7.
- THORNTHWAITE C.W. (1954) - The measurement of potentiel evapotranspiration. *J.P. Mather - Seabrook - New Jersey.*
- TISSOT G., TRESSE P. (1978) - Etude des systèmes karstiques du Lison et du Verneau. Région de Nans sous St Anne (Doubs). *THèse 3ème cycle - Université de Besançon.*
- TURC L. (1953) - Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement. . *THèse Sciences, Paris.*
- WESTERMAN R.L. - KURTZ L.T. (1974) - Isotopic and Nonisotopic estimation of fertilizer nitrogen uptake by sudangrass in field experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 38.

## ANNEXES

ANNEXE I

Tableau 46 : Symboles utilisés dans les schémas de sol .

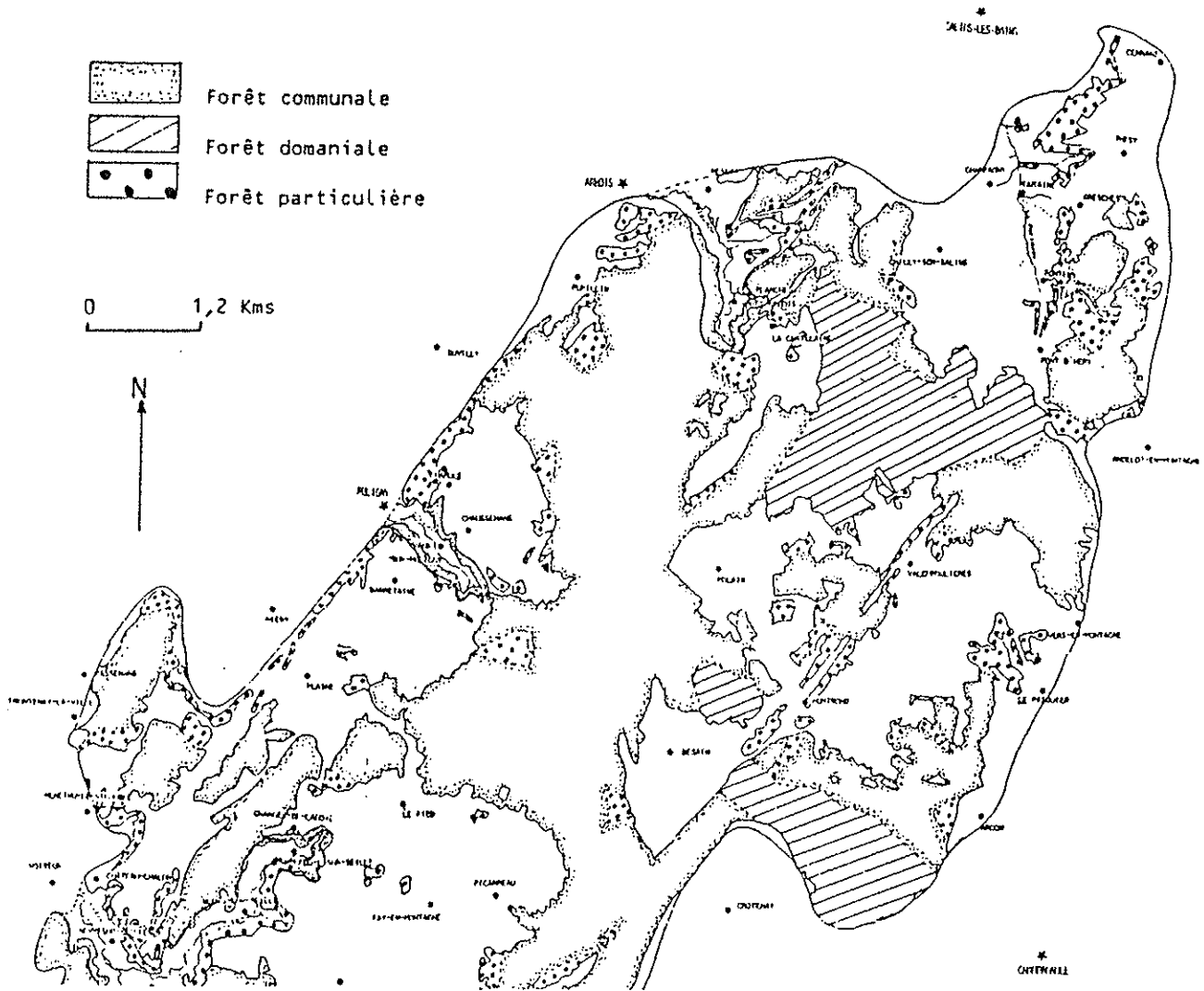
	Horizon humifère
	Carbonate de chaux
	Argile (2/1 - 1/1)
	Cailloux et graviers de chailles
	Cailloux et graviers calcaires
	Précipitations localisées de fer ferreux et ferrique
	Horizon sableux
	Calcaire
	Marne

L'abondance des différents éléments est schématisée par une densité plus ou moins grandes des figurés.

(D'après P. DUCHAUFOR - 1977).

ANNEXE I

Fig.105 : Carte des massifs forestiers (T. BEAUFILS - 1983)



ANNEXE I

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
$\bar{M}$ 10ans	13,4	9,3	4,1	1,3	0,5	1,8	4,7	6,4	10,4	14,4	16,7	15,6
Minimum	11,2 (77)	7,3 (75)	3,2 (80)	-1,8 (80)	-6,3 (85)	-1,5 (81)	2,3 (84)	5,1 (78)	8,7 (84)	13,1 (78)	14,3 (80)	14,3 (78)
Maximum	15,3 (82)	11,4 (77)	7,7 (84)	3,6 (78)	3,9 (82)	5,0 (77)	7,6 (81)	8,2 (81)	12,0 (76)	16,4 (76)	21,1 (83)	17,5 (83)
$\Delta$	4,1	4,1	4,5	5,4	10,2	6,5	5,3	1,8	3,3	3,3	6,8	3,2

Tableau 47 - Ecart des températures à Besain sur 10 ans.

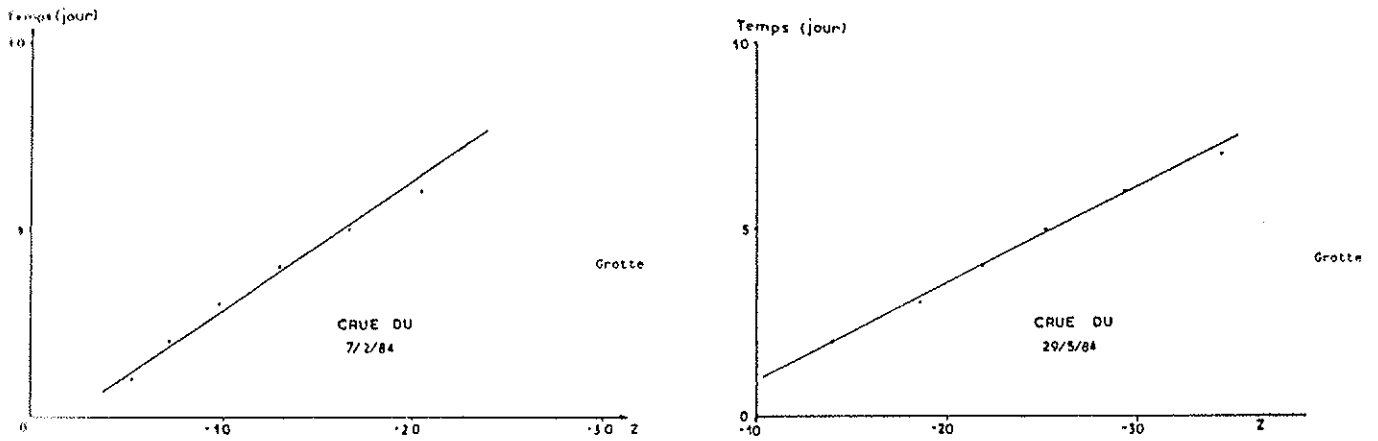


Fig.106 Courbe Z à la Grotte des Planches.

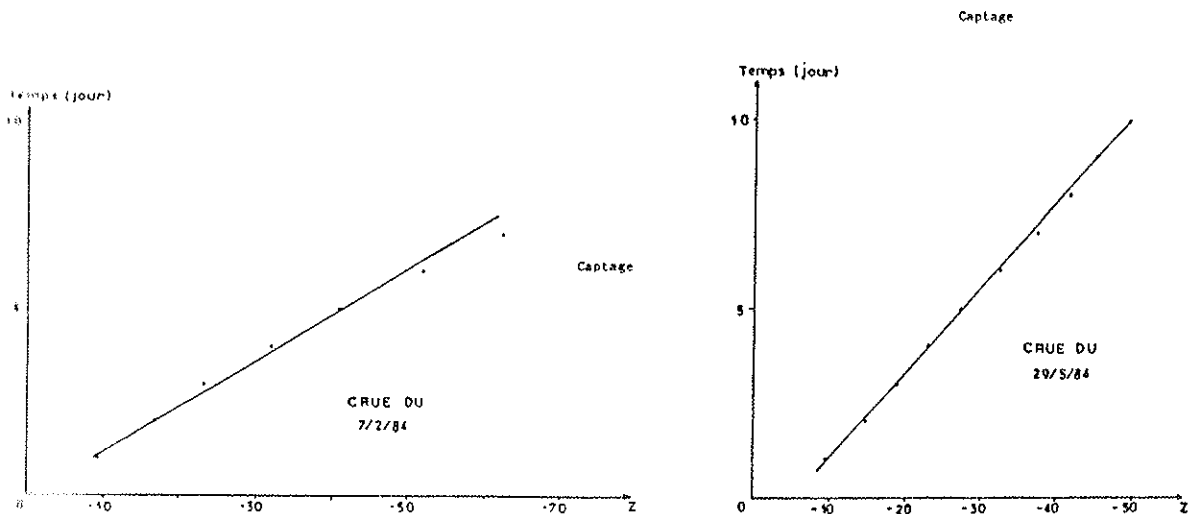


Fig 107 Courbe Z au captage du Fer à Cheval.

ANNEXE II

Méthodes d'analyses des éléments chimiques	Précision des méthodes d'analyse
1) Dosages colorimétriques	1) Dosages colorimétriques
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : méthode au bleu d'indophénol	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ± 0,03 mg/l
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> : méthode à la sulfanilamide	SiO <sub>2</sub> ± 0,02 mg/l
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : méthode au salicylate de sodium	2) Spectromètre d'absorption atomique
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : méthode au chlorure de sodium	K <sup>+</sup> : ± 0,04 mg/l
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : méthode turbidimétrique	Mg <sup>++</sup> : ± 0,007 mg/l
SiO <sub>2</sub> : méthode au molybdate d'ammonium	Na <sup>+</sup> : ± 0,015 mg/l
2) Dosages volumétriques	Ca <sup>++</sup> : ± 0,08 mg/l
Cl <sup>-</sup> : méthode au nitrate mercurique	Fe : ± 0,12 mg/l
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : méthode à l'acide sulfurique	

Tableau 48 - Méthodes d'analyses chimiques utilisées.

B = 1,6 % avec Σ anions = 4,312 et Σ cations = 4,458

	Minéral.	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>++</sup>
mg/l	345,99	6,03	4,14	5,90	240,7	85,5
meq/l	-	0,17	0,067	0,12	3,94	4,27
%	-	2	1	2	69	25

Tableau 49 - Exemple de pourcentages de chaque élément dans la balance ionique.

ANNEXE II

Constantes d'équilibres relatives à la dissociation d'espèces aqueuses.		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ⇌ CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + H <sup>+</sup>	- 10,33
NaCl	NaCl ⇌ Na <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup>	+ 0,85
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ⇌ 2Na <sup>+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	- 0,68
NaHCO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub> ⇌ Na <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+ 0,25
KCl	KCl ⇌ K <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup>	+ 2 à + 1,58
KSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	KSO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ⇌ K <sup>+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	- 0,84
MgCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub> ⇌ Mg <sup>2+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	- 3,4
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> ⇌ Mg <sup>2+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 1
CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub> ⇌ Ca <sup>2+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	- 3,2 à -4,48
CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> ⇌ Ca <sup>2+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- 0,86 à -1,26
CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> ⇌ Ca <sup>2+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + H <sup>+</sup>	-11,19 à -11,68
CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub> ⇌ Ca <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	- 2,31

D'après B. Fritz - 1975

Tableau 50 - Constantes d'équilibres relatives à la dissociation d'espèces aqueuses.

Minéraux	Equation de dissolution	Log K <sub>298,15°K</sub>
Calcite CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub> ⇌ Ca <sup>2+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	- 8,37
Magnésite MgCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub> ⇌ Mg <sup>2+</sup> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	- 8,04
Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ⇌ Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> + 2(CO <sub>3</sub> ) <sup>2-</sup>	-17,2
Gypse CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O ⇌ Ca <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 2H <sub>2</sub> O	- 4,85
Halite NaCl	NaCl ⇌ Na <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup>	+ 1,58
Gibbsite Al(OH) <sub>3</sub>	Al(OH) <sub>3</sub> ⇌ Al <sup>3+</sup> + 3(OH <sup>-</sup> )	-33,77
Goethite FeO(OH)	FeO(OH) + H <sub>2</sub> O ⇌ Fe <sup>3+</sup> + 3(OH <sup>-</sup> )	-42,81
<u>Silicate</u>		
Quartz	SiO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O ⇌ H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	- 4,00
Silice amorphe	SiO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O ⇌ H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	- 2,71
Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> + 6H <sup>+</sup> ⇌ 2Al <sup>3+</sup> + 2H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	7,41
Muscovite	Si <sub>3</sub> Al <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> H + 10H <sup>+</sup> ⇌ H <sup>+</sup> + 3Al <sup>3+</sup> + 3H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	17,05

Tableau 51 - Constantes d'équilibres relatives à l'hydrolyse de différents minéraux non silicates d'après B. Fritz - 1975



ANNEXE II

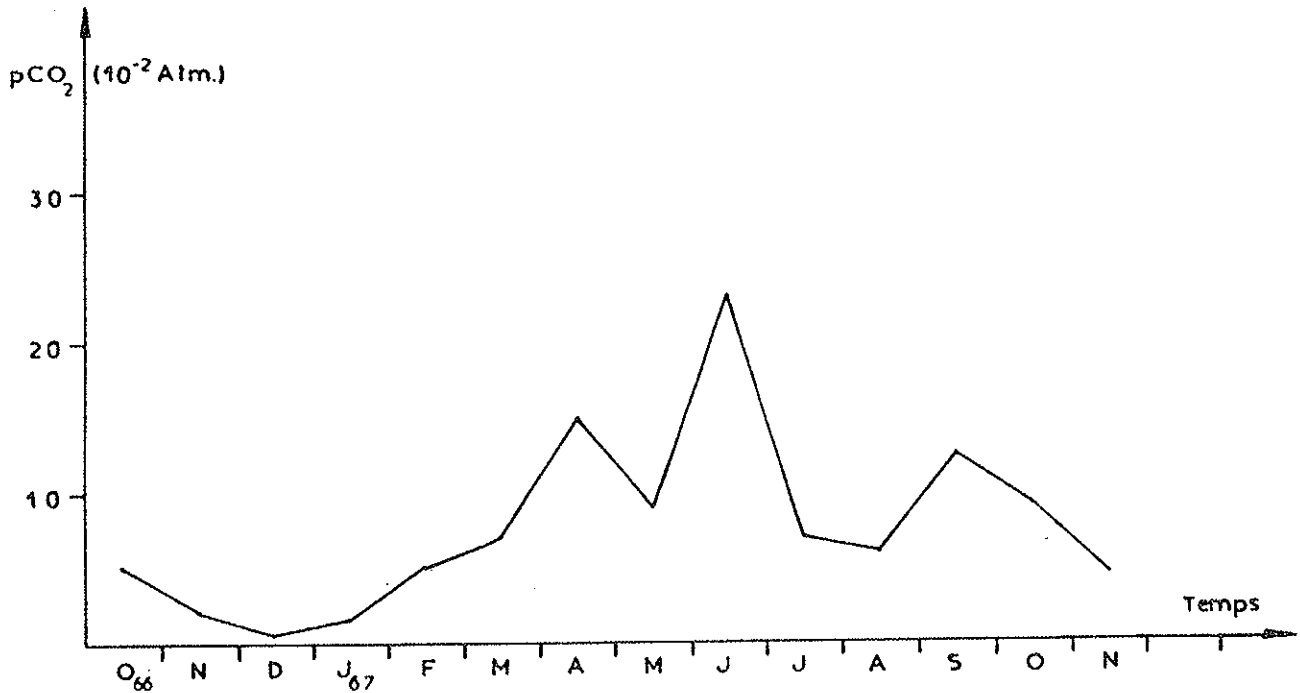


Fig. 108 - Production de CO<sub>2</sub> dans le sol (d'après G. BACHELIER 1968 dans M. BAKALOWICZ, 1979).

Nom

PARCELLE N° :

COMMUNE :

LIEU DIT :

SURFACE

	ASSOLEMENT SUR CETTE PARCELLE			ENGRAIS CHIMIQUES		
	Culture	rendement	avenir	nature et dose	quantité kg/ha	date
année 85						
année 84						
année 83						
année 82						
année 81						

	ENGRAIS NATURELS			ENGRAIS VERTS			AMENDEMENTS		
	nature et dose	kg/ha	date	nature et dose	kg/ha	date	nature et dose	kg/ha	date
année 85									
année 84									
année 83									
année 82									
année 81									

Tableau 52 - Fiche d'enquête agricole.

ANNEXE II

Tabl. 53- Exportations annuelles par les plantes

Prairies

Rendement : TMS/an/ha	7	10
Kg/ha/an		
N	120	250
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	40	90
K <sub>2</sub> O	120	230
Ca	25	60
Mg	10	22
S	12	20

Plantes entières

	Blé	Orge-Avoine	Mais grain
N	3,22	2,80	3,88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,60	1,54	1,40
K <sub>2</sub> O	2,52	2,94	2,38
MgO	0,35	0,35	0,63
SO <sub>3</sub>	1,47	1,47	0,98
CaO	0,56	0,56	0,70

D'après Salette INRA 1975 dans Cultivar spécial Fourrages - Mai 1981 -

Prairie

Production annuelle T/MS		5	8	12	15
en Kg/ha/an	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	23-30	40-50	75-100	110-140
	K <sub>2</sub> O	80-150	200-250	300-400	400-500
	CaO	18-25	35-50	65-90	80-140
	MgO	8-12	14-23	26-35	35-60
	S	7-12	14-20	18-30	28-45
	N	80-90	140-150	300-330	420

D'après SCPA Alsace

kg/ha/an	Prairie naturelle non amendée	Prairie permanente fauchée	Prairie artificielle	Culture kg/q/ha
N	45	120	250	1,12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18	40	90	0,60
K <sub>2</sub> O	50	120	230	1,16
Ca <sup>++</sup>	10	25	60	0,14
Mg <sup>++</sup>	4	10	22	0,60
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	5	12	20	0,24

Exportation par les plantes

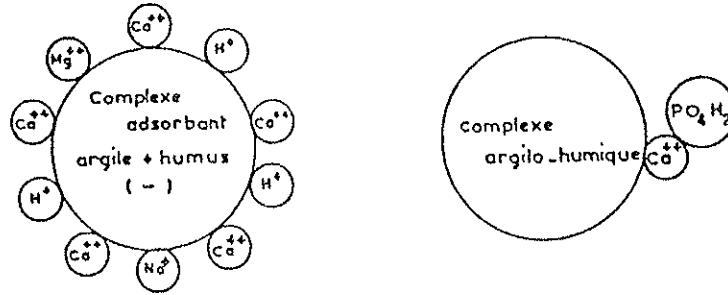
Exportation par la totalité des secteurs	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	S
Molain kg	29298	11705	32528	6549	2609	3254
La Chatelaine	17257	6938	19269	3858	1539	1927
Valemboulières	950	380	1055	211	85	105
Chilly	21976	15436	42998	8602	3638	4345
Total	93463	44200	122922	24670	10042	12339

Tableau 53 bis - Exportation par les plantes pour le bassin de la Cuisance.

RAPPEL-COMPORTEMENT DES CONSTITUANTS CHIMIQUES DES SOLS (IN DUCHAUF0UR 1977)

1). COMPLEXE ADSORBANT

Les argiles sont des cristallites dont les défauts de structures laissent apparaître des charges électriques extérieures. De par leur finesse, elles forment des colloïdes dont l'association avec les composés humiques est à l'origine du complexe adsorbant. Il influe sur les propriétés physiques et chimiques des sols. De charges négatives, il possède donc un pouvoir d'adsorption des cations (ou bases), appelé "complexe adsorbant". Ces cations sont retenus préférentiellement dans l'ordre suivant :  $H^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ . Quant aux anions, ils ne sont pas retenus, à l'exception de  $PO_4^{--}$  qui bénéficie d'un pont avec le calcium cette liaison est plus forte que celle de  $K^+$ .



La fixation d'un cation sur le complexe argilo-humique s'accompagne du départ d'un autre cation (généralement le calcium). Aussi le contact d'une solution de sol avec ce complexe entraîne des échanges de bases jusqu'à l'obtention de l'équilibre entre les deux milieux. Lors de l'utilisation des engrais, on peut retenir que  $PO_4^{--}$  ne subira pratiquement pas de lixiviation alors que  $NO_3^-$  migrera rapidement si son absorption par les plantes n'est pas rapide.

La Capacité d'Echange de Cations (CEC) est la quantité maximale de cations qui peuvent être retenus pour 100g de sol.

2). ACIDITE DES SOLS

Elle est déterminée par la concentration en ions  $H^+$  continue dans la solution aqueuse et qui sont eux mêmes en équilibre avec les cations non fixés sur le complexe adsorbant.

pH	4,5 à 5,5	sol fortement acide
	5,5 à 6,5	sol acide
	6,5 à 6,8	sol légèrement acide
	6,8 à 7,2	sol neutre
	7,2 à 7,5	sol légèrement alcalin
	7,5 à 8,5	sol alcalin

Le pH exerce une influence très marquée sur l'assimilation des éléments chimiques du sol par les plantes. Ainsi selon M. COPPENET (in DUCHAUF0UR, 1977) les pH les plus favorables à l'assimilation de ces éléments nutritifs sont :

N	pH 6,8
$P_2O_5^-$	pH 6,25 à 7
$K^+$	pH 6 à 8,5
$Ca^{++}$ , $Mg^{++}$	pH 7 à 8,5
Fe, Mn	pH 4,5 à 6

3). COMPORTEMENT DES ELEMENTS NUTRITIFS DU SOL

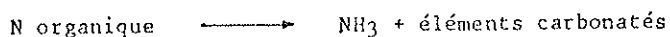
- Le calcium existe sous de nombreuses formes dans le sol. Les carbonates de calcium deviennent solubles dans l'eau en présence de gaz carbonique (produit racinaire ou de décomposition) et leur transfert se trouve lié à la présence de  $HCO_3^-$ ,  $NO_3^-$  ou  $SO_4^{--}$ . Si la concentration de ces ions diminue, il y a re-précipitation. Le calcium échangeable a un rôle stabilisateur pour la structure et régulateur du pH. Dans le secteur de Chilly, les sols bruns sont saturés en calcium, à 70% et les bruns calciques à 100%.

ANNEXE II

- Le magnésium indispensable à l'activité chlorophyllienne, se trouve en quantité suffisante dans les sols mais sous forme insoluble, dans les silicates. Sa forme échangeable (environ 2 à 10%), qui est beaucoup plus lixiviable que le calcium, ne doit pas être inférieure à 0,04%. La lixiviation du magnésium peut être d'autant plus importante que le sol est acide ou riche en  $K^+$  et  $Ca^{++}$ .

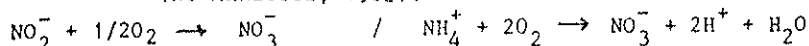
- Le potassium, lui aussi présent sous diverses formes, est indispensable à la nutrition des plantes et insoluble dans la roche mère (sous forme de silice). Dans le réseau cristallin des argiles, son assimilation est difficile car il ne se situe pas toujours à l'extérieur du feuillet (bien qu'un échange soit possible) les plantes se nourrissent donc principalement au niveau de la solution de sol et par échange entre cette solution et le complexe argilo-humique.

- L'azote suit un cycle complexe. Lorsqu'il revient au sol sous forme d'azote organique (résidus de végétaux ou animaux), il subit un processus appelé humification qui crée une liaison stable entre l'azote organique et la fraction minérale du sol. Puis il y a ammonification ou minéralisation par transformation de l'azote organique en azote minérale sous l'action de microorganismes.



Vient ensuite la phase de nitrification, elle-même décomposée en deux processus sous l'action de microorganismes aérobies : la nitrification qui résulte de l'action de bactériennes nitreuses (*Nitrosospira*, *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*) ;  
 $NH_4^+ + 3/2O_2 \longrightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$  /  $13NH_4^+ + 10CO_2 \longrightarrow 10NO_2^- + 3C_5H_7N_2 + 4CO_3+2$

et la nitrification par oxydation de l'ion nitreux sous l'action de bactéries (nitro-backer) dont la croissance est supérieure à celle de *Nitrosomonas*, ce qui favorise cette réaction : (A. MARIOTTI, 1982).



Cette dernière forme ( $NO_3^-$ ) est la plus facilement assimilable par les plantes mais elle est également la plus facilement lessivable vers la profondeur. La forme  $NH_4^+$  peut s'associer au complexe argilo-humique au même titre que les autres cations, ou à l'intérieur des feuillets argileux.

Dans la réalité, cela se complique : par les processus de réorganisation qui évoluent dans le sens inverse de la nitrification en raison de la concurrence des microorganismes. Certains processus conduisent à un véritable stockage jusqu'à la libération d'azote minérale le printemps suivant.

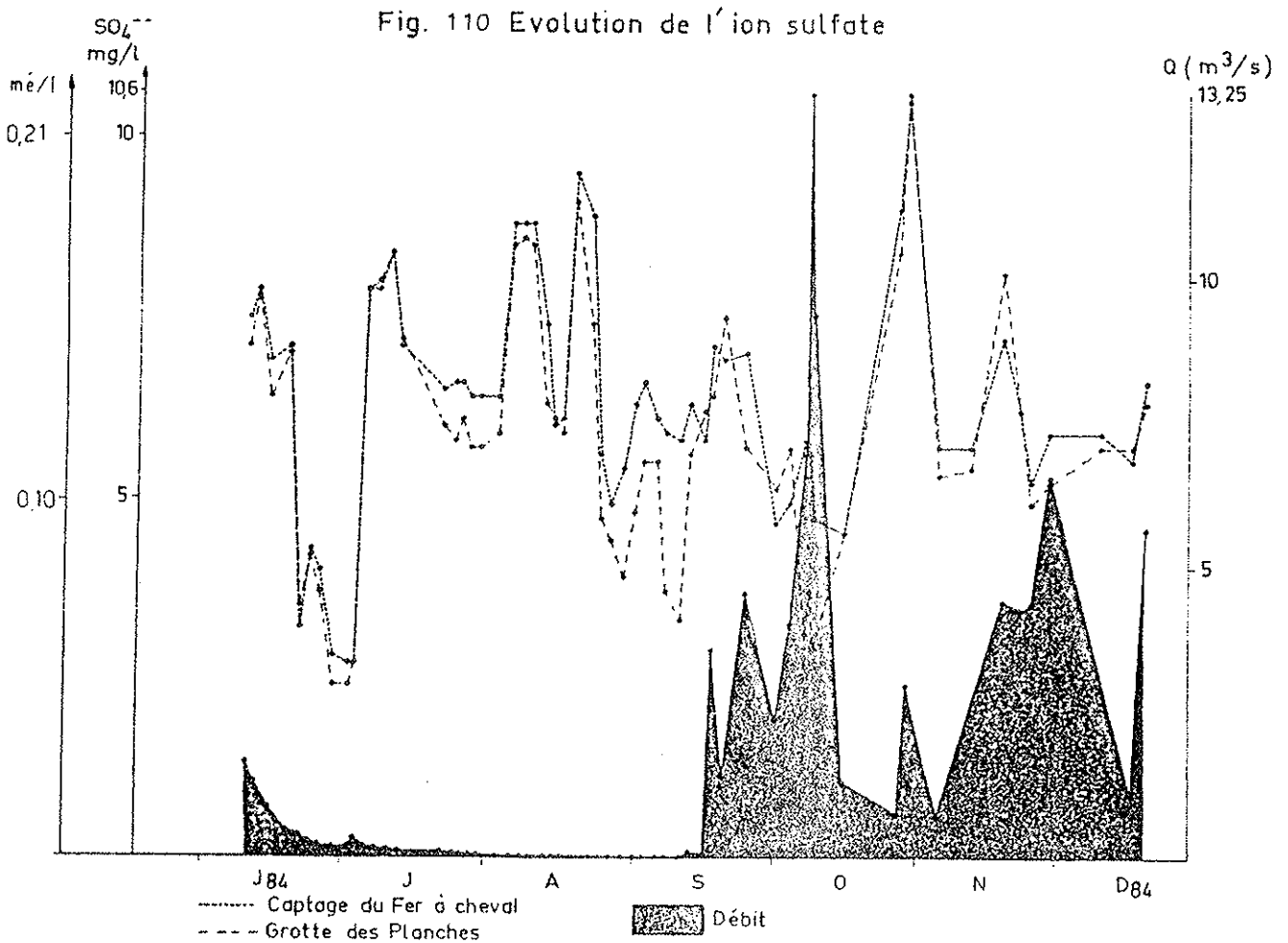
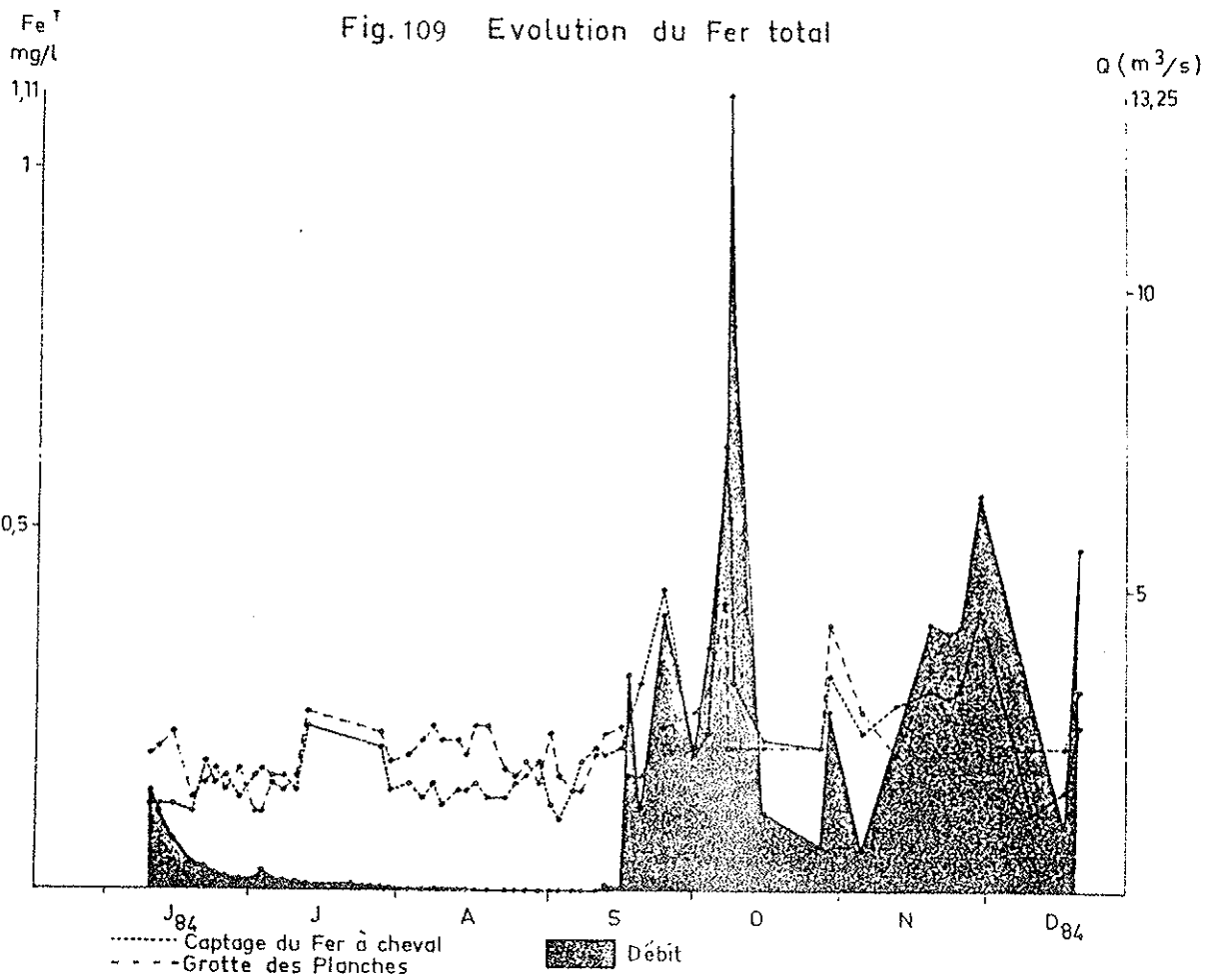
ANNEXE II

Tableau 55 - Valeurs critiques du coefficient de corrélation  
(avec un coefficient de sécurité de 95 % sur r).

n	au seuil de 5 %	au seuil de 1 %
5	0,992	0,997
6	0,979	0,991
7	0,961	0,981
8	0,943	0,969
9	0,926	0,955
10	0,903	0,941
11	0,883	0,926
12	0,864	0,912
13	0,846	0,898
14	0,828	0,883
15	0,811	0,869
16	0,797	0,854
17	0,782	0,843
18	0,766	0,828
19	0,754	0,818
20	0,741	0,804
25	0,684	0,750
30	0,638	0,705
35	0,600	0,667
40	0,568	0,634
45	0,541	0,606
50	0,518	0,580
60	0,477	0,539
70	0,445	0,505
80	0,419	0,476
90	0,397	0,449
100	0,378	0,429
125	0,341	0,391
150	0,313	0,359
200	0,272	0,314
250	0,244	0,290
300	0,223	0,258

(dans A. MANGIN 1974)

ANNEXE II



ANNEXE II

Fig.111 Evolution de l'ion chlorure

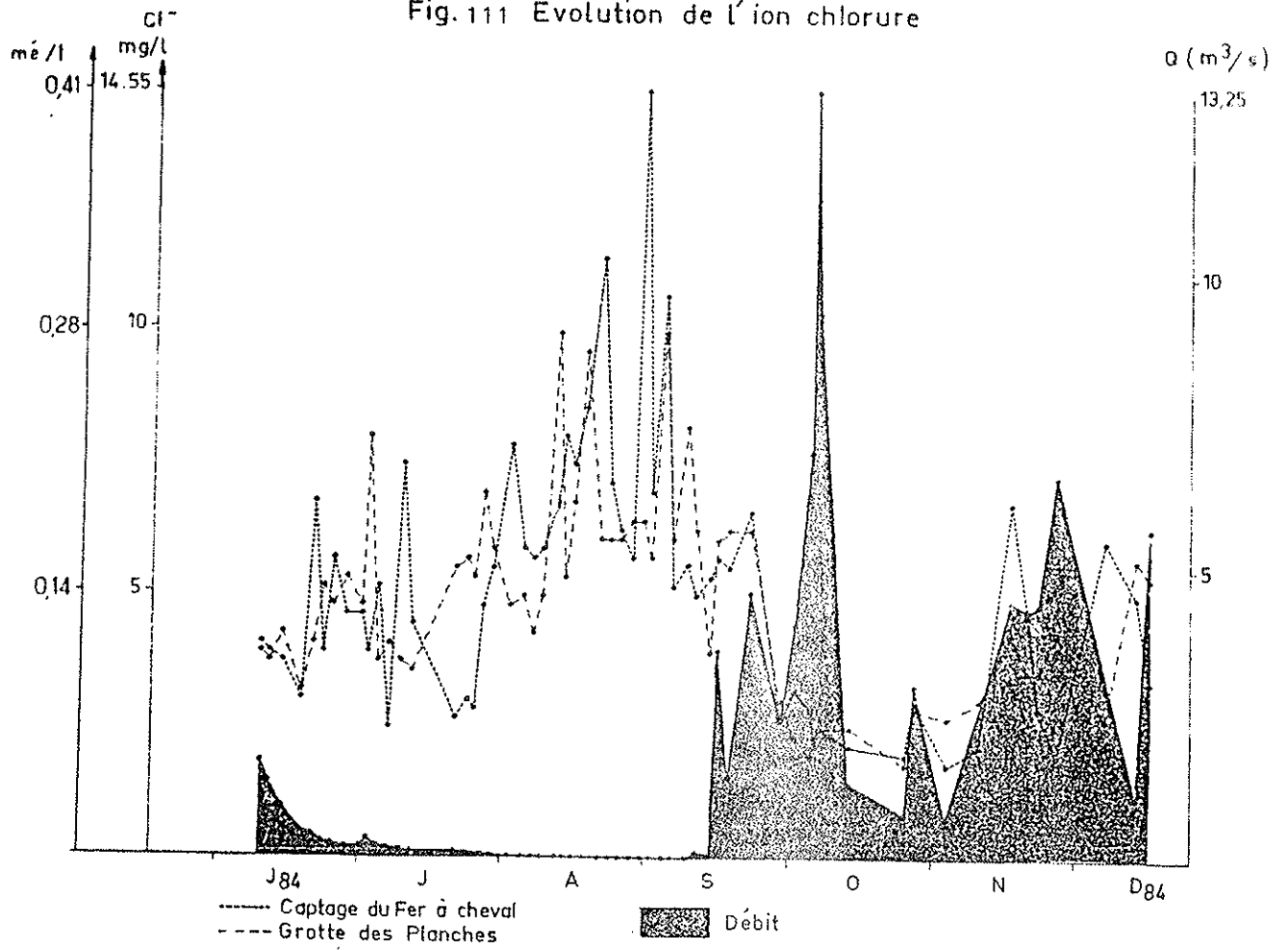
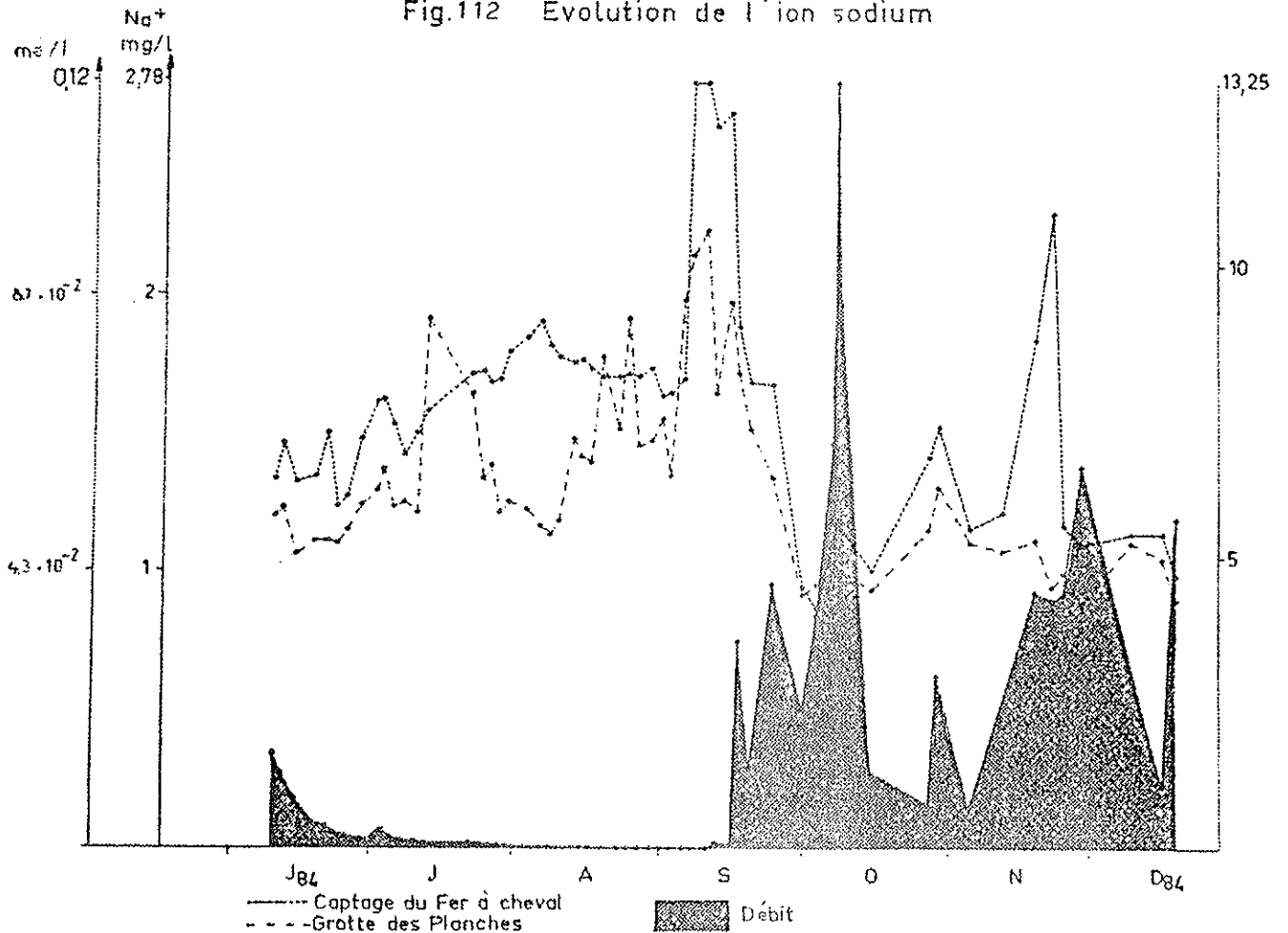


Fig.112 Evolution de l'ion sodium



ANNEXE II

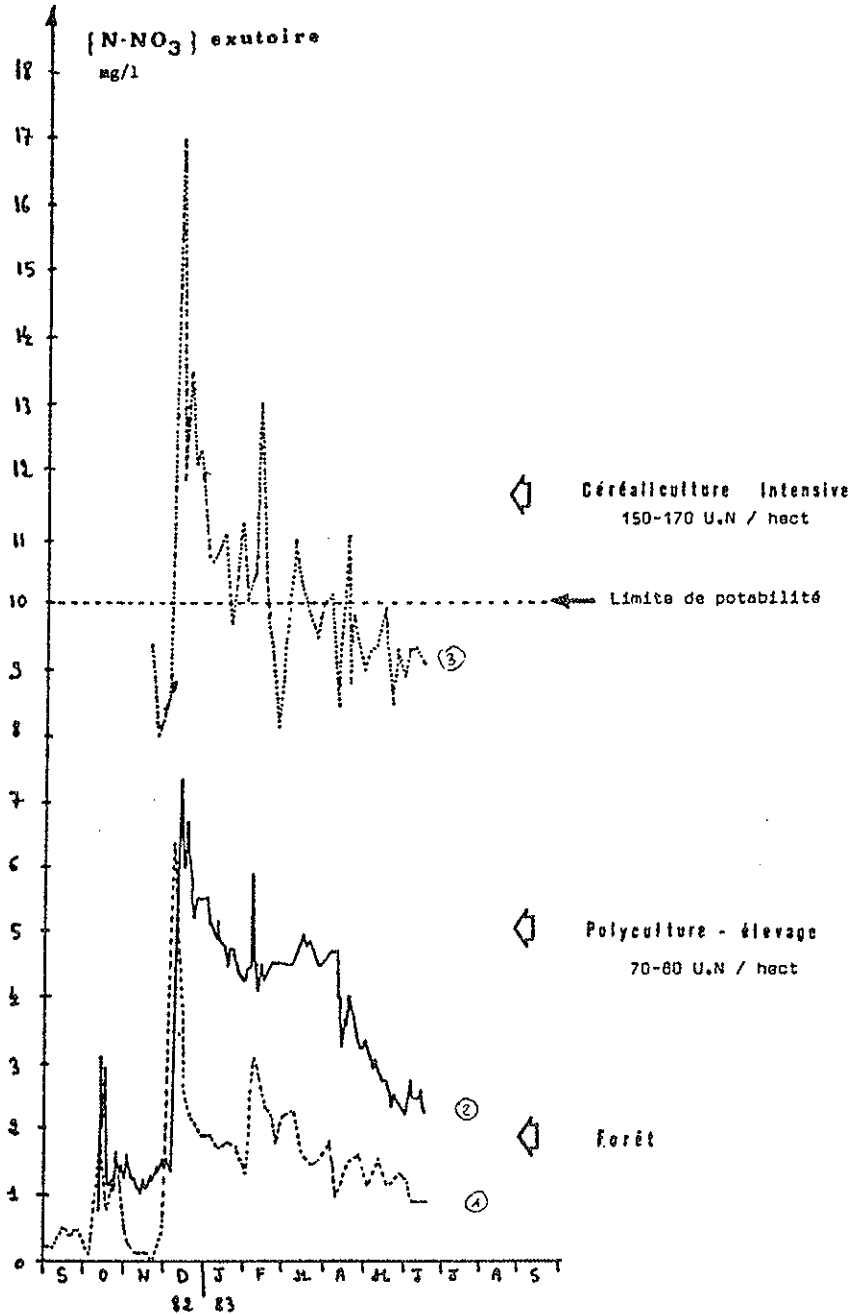


Fig. 113 - Evolution comparée des concentrations  $N-NO_3$  à l'exutoire de 3 bassins versants sur coteaux molassiques où l'utilisation du sol diffère (région de Toulouse) (d'après D. PIERRE - 1983)





ANNEXE III

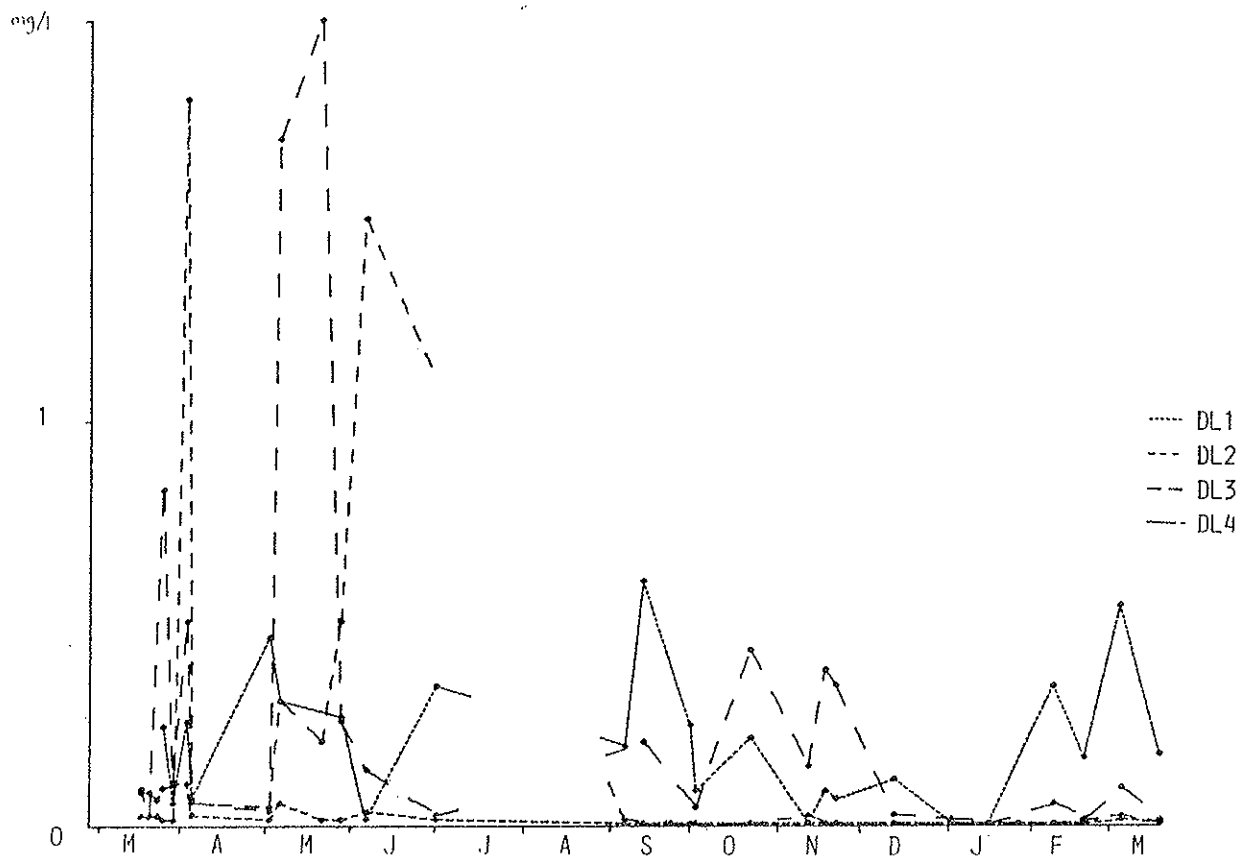


Fig. 114- Evolution de l'ion nitrite dans les quatre lysimètres

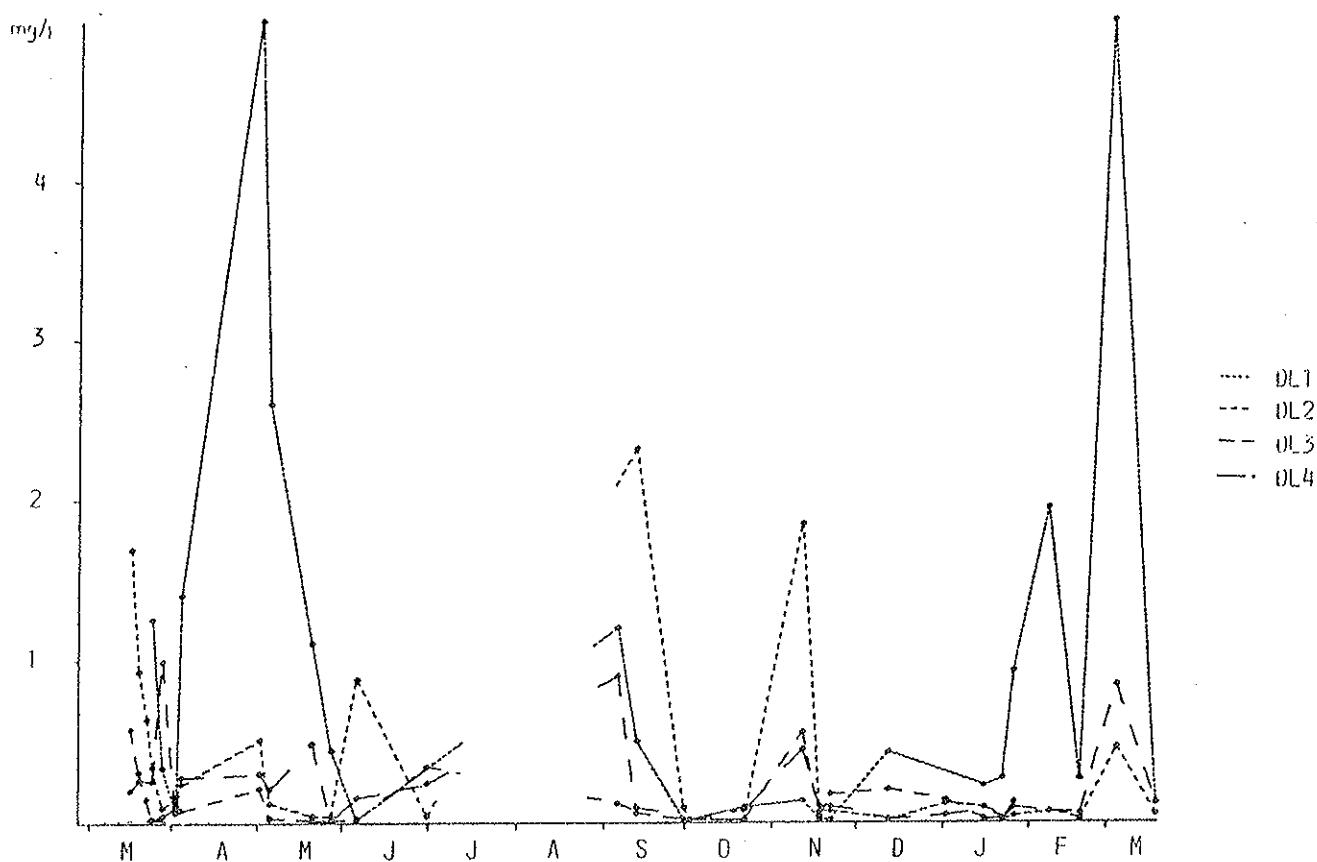


Fig. 115 - Evolution de l'ion ammonium dans les quatre lysimètres.

**TABLE DES MATIERES**

	page
<b>AVANT PROPOS</b> .....	1
<b>INTRODUCTION</b> .....	3
<b>PREMIERE PARTIE - ETUDE DU SYSTEME KARSTIQUE ET DE SON FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE</b>	
<b>INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE</b> .....	5
<b>CHAPITRE I - STRUCTURE, GEOMETRIE ET ACTIVITE DU KARST ETUDIE</b> .....	7
I - SCHEMATISATION D'UN SYSTEME KARSTIQUE.....	7
II - DELIMITATION DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA CUISANCE	8
1 - Traçages réalisés sur le bassin étudié.....	8
2 - Résultats et interprétations.....	8
a- Limites externes.....	8
b- Limites internes.....	11
III - STRUCTURE, FRACTURATION, FISSURATION, ACTIVITE DU KARST	12
1 - Géologie.....	12
a- Stratigraphie.....	12
b- Fracturation.....	15
2 - Géomorphologie.....	15
a- Secteur de Chilly sur Salins.....	15
b- Secteur de Molain.....	15
c- Secteur de Besain et du Bief de Corne.....	16
d- Secteur forestier des Moidons et de Poligny-Arbois.....	16
e- Aspect du karst souterrain.....	16
IV - L'EPIKARST.....	17
1 - Couverture pédologique.....	17
a- Démarche méthodologique.....	17
b- Description des sols.....	19
c- Analyses des sols.....	23
d- Distribution des sols.....	23
2 - Couverture végétale du bassin.....	24
a- Les secteurs forestiers.....	24
b- Les secteurs cultivés.....	24
c- Les prairies permanentes.....	24
<b>CONCLUSION DU PREMIER CHAPITRE</b> .....	26

<b>CHAPITRE II - BILAN CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE.....</b>	<b>27</b>
I - EQUIPEMENT DU BASSIN D'ALIMENTATION DES SOURCES DE LA CUISANCE.....	27
1 - Limnigraphes.....	27
2 - Pluviographes.....	27
II - DONNEES CLIMATIQUES.....	27
1 - Précipitations.....	27
2 - Températures.....	28
III - L'EVAPOTRANSPIRATION.....	30
1 - Evapotranspiration potentielle ETP.....	30
2 - Evapotranspiration réelle ETR.....	31
IV - ESSAI DE BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA CUISANCE.....	33
1 - Bilan de l'ensemble du bassin d'alimentation.....	34
2 - Recherche de la superficie du bassin d'alimentation de la source de la Grotte.....	35
3 - Recherche de la superficie du bassin d'alimentation de la source captée du Fer à Cheval.....	35
V - PROSPECTION ISOTOPIQUE.....	36
CONCLUSION DU DEUXIEME CHAPITRE.....	37
<b>CHAPITRE III - FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE.....</b>	<b>39</b>
I - ETUDE DE DECRUE ET TARISSEMENT.....	39
1 - Rappel de la schématisation d'un système karstique	39
2 - Décrue et tarissement : rappel de la "méthode Mangin"	41
3 - Application à la source de la Grotte.....	42
4 - Application à la source captée du Fer à Cheval....	45
5 - Classification du système karstique étudié.....	47
II - ETUDE DES DEBITS CLASSES.....	47
1 - Application à la Grotte des Planches.....	47
2 - Application au captage du Fer à Cheval.....	49
III - ETUDE DE CRUES PARTICULIERES.....	49
1 - Orage du 19 Août 1983 .....	51
2 - Orage du 14 Août 1984.....	52
CONCLUSION DU TROISIEME CHAPITRE.....	52
<b>CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....</b>	<b>53</b>

## SECONDE PARTIE - ACQUISITION DU CHIMISME DES EAUX KARSTIQUES

<b>CHAPITRE IV - MECANISMES D'ACQUISITION DU CHIMISME DES EAUX ET APPORTS EXTERIEURS DU BASSIN D'ALIMENTATION DE LA CUISANCE</b>	55
I - PROTOCOLE D'ETUDE.....	55
1 - Suivi géochimique.....	55
2 - Mesures physiques et analyses chimiques.....	55
II - EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE, ANHYDRIDE CARBONIQUE.....	56
1 - Equilibre calco-carbonique.....	56
2 - Anhydride carbonique.....	57
III - CHIMISME MOYEN ANNUEL DES EAUX DE LA SOURCE DE LA GROTT DES PLANCHES.....	59
1 - Bilan chimique.....	59
2 - Minéralisation .....	60
IV - LES APPORTS D'ORIGINES DIVERSES ET LEUR INFLUENCE SUR LE CHIMISME DES EAUX.....	62
1 - Apports dûs aux précipitations.....	62
2 - Apports dûs aux eaux usées.....	63
3 - Apports dûs aux épandages d'engrais.....	63
a- Principaux types d'engrais utilisés.....	64
b- Eléments exportés par les plantes.....	66
V - BILAN GLOBAL ANNUEL DES ELEMENTS ENTRES ET SORTIS DU KARST	66
CONCLUSION DU QUATRIEME CHAPITRE.....	67
<b>CHAPITRE V - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE LA CUISANCE A LA GROTT   DES PLANCHES .....</b>	69
I - SUIVI CHIMIQUE DES EAUX AU COURS DU CYCLE HYDROLOGIQUE 1983-1984.....	69
1 - Eléments liés au débit.....	69
a- le magnésium.....	69
b- La silice.....	72
c- Les bicarbonates.....	72
d- Le calcium.....	72
e- Le potassium.....	74
f- Le sodium.....	74
2 - Eléments liés à des variations saisonnières.....	74
a- Les nitrates .....	74
b- Les chlorures.....	76
3 - Eléments indépendants des débits et des variations saisonniers.....	78
a- Les phosphates.....	78
b- Les sulfates.....	78

II - TRAITEMENT STATISTIQUE DES RESULTATS DU SUIVI.....	80
1 - Corrélations .....	80
2 - Analyse factorielle.....	82
III - ETUDE DETAILLEE D'EPISODES PARTICULIERS DU CYCLE HYDROLOGIQUE 1983-1984.....	83
1 - Etude détaillée de crues.....	83
2 - Augmentation de la concentration au cours de l'étiage	83
a- Influence des eaux usées.....	83
b- Influence de la matrice.....	86
CONCLUSION DU CINQUIEME CHAPITRE.....	87
CHAPITRE VI - COMPARAISON DU CHIMISME DES EAUX PROVENANT DES DEUX COMPARTIMENTS KARSTIQUES.....	89
I - RAPPEL DES CARACTERISTIQUES DES DEUX BASSINS.....	89
II - COMPARAISON DU CHIMISME DES EAUX DES SOURCES DE LA GROTT ET DU FER A CHEVAL.....	89
1 - Analyse comparée des éléments $\text{HCO}_3^-$ ; $\text{Ca}^{++}$ et $\text{Mg}^{++}$ à comportement identique.....	90
a- Similitude et origine.....	90
b- Influence des deux compartiments karstiques....	90
2 - Analyse comparée des éléments à comportement différent	90
a- Les éléments d'altération et leur origine.....	90
b- Les nitrates.....	90
3 - Analyse comparée des trois éléments en hiver et en crue	94
III - ANALYSE STATISTIQUE.....	94
1 - Matrices de corrélations .....	94
2 - Analyse factorielle.....	97
a- Source de la Grotte des Planches.....	97
b- Source captée du Fer à Cheval.....	98
CONCLUSION DU SIXIEME CHAPITRE.....	99
CONCLUSION DE LA SECONDE PARTIE.....	101
TROISIEME PARTIE - ACQUISITION DU CHIMISME DES EAUX DANS L'EPIKARST ET INFLUENCE SUR LES EAUX KARSTIQUES	
CHPITRE VII - DESCRIPTION ET INSTALLATION DU BASSIN EXPERIMENTAL....	103
I - METHODE D'ETUDE.....	103
1 - Délimitation et morphologie.....	103
2 - Equipement .....	103
a- un pluviographe.....	103
b- une chaine d'acquisition de données.....	103
c- quatre lysimètres.....	105

3 - Méthode du suivi.....	105
a- Cartographie des sols.....	105
b- Analyse des sols.....	105
c- Analyse des eaux de précipitation.....	105
d- Analyse des eaux de percolation des lysimètres	105
e- Analyses des eaux à la source du ru du Bas de	
Prôle.....	105
f- Enquête agricole.....	107
II - MATÉRIAUX PEDOLOGIQUES DU BASSIN EXPERIMENTAL	107
1 - Cartographie des sols.....	107
2 - Les sols des lysimètres .....	107
a- Lysimètre DL1.....	107
b- Lysimètre DL2.....	109
c- Lysimètre DL2.....	110
d- Lysimètre DL4.....	111
III - CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES ET PROPRIETES PHYSICO- CHIMIQUES DES SOLS EQUIPES DE LYSIMETRES.....	112
1 - Propriétés physiques .....	112
2 - Caractéristiques minéralogiques.....	113
3 - Propriétés physico-chimiques.....	113
a- Deux types d'éléments.....	113
b- Facteurs physico-chimiques.....	117
c- Dynamiques des éléments dans le profil.....	117
IV - AZOTE ET POTENTIEL DE MINERALISATION DANS LES SOLS.....	119
1 - Description de la méthode de G. Standford 1974...	119
a- Les sols.....	119
b- Méthode expérimentale.....	119
c- Détermination de l'azote minéral.....	121
d- Résultats et interprétations.....	121
CONCLUSION DU SEPTIEME CHAPITRE.....	122
CHAPITRE VIII - HYDROCHIMIE DU BASSIN EXPERIMENTAL.....	125
I - HYDROCHIMIE GLOBALE DU BASSIN EXPERIMENTAL.....	125
1 - Chimisme général.....	125
2 - Les eaux de percolation dans les diagrammes d'équilibre des argiles.....	127
II - EVOLUTION CHIMIQUE ET SAISONNIERE DES EAUX LYSIMETRIQUES	129
1 - L'azote.....	129
2 - Le potassium.....	131
3 - Le magnésium.....	131
4 - La silice .....	131
5 - Les sulfates.....	131
6 - Les chlorures.....	133
7 - Le calcium et les bicarbonates.....	133
8 - Les phosphates .....	133

III - ANALYSE STATISTIQUE DES EAUX DE PERCOLATION DES LYSIMETRES.....	133
1 - Matrices de corrélations.....	133
2 - Analyse factorielle.....	138
a- des eaux de percolation du lysimètre DL1	138
b- des eaux de percolation du lysimètre DL2	139
c- des eaux de percolation du lysimètre DL3	140
VI - EVOLUTION CHIMIQUE DES EAUX DU RU DU BAS DE PROLE....	141
1 - Les nitrates.....	141
2 - Le potassium .....	141
3 - Le magnésium.....	143
4 - La silice .....	143
5 - Les sulfates.....	143
6 - Les chlorures.....	143
7 - Les bicarbonates et les calcium.....	143
V - ANALYSES STATISTIQUES DES EAUX DU BAS DE PROLE.....	143
ANALYSE FACTORIELLE .....	143
VI - COMPARAISON DU CHIMISME DES EAUX DU RU DU BAS DE PROLE ET DE LA GROTTTE AU COURS DE L'ETIAGE ESTIVAL DE 1984.....	147
CONCLUSION DU HUITIEME CHAPITRE.....	149
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE.....	151
SYNTHESE ET CONCLUSION.....	153
I - CARACTERISTIQUES DU BASSIN DE LA CUISANCE.....	153
II - ACQUISITION DU CHIMISME DES EAUX KARSTIQUES.....	153
III - IMPACT DES ACTIVITES HUMAINES.....	154

**ANNEXES**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTES DES TABLEAUX**



## LISTE DES FIGURES

-----

Figures

pages

### PREMIERE PARTIE

-----

1 -	Localisation des sources de la Cuisance.....	5
1 <sup>bis</sup> -	Carte topographique de la région étudiée.....	6
2 -	Schématisation d'un système karstique.....	7
3 -	Traçages à la fluorescéine.....	10
4 -	Schématisation du compartimentage du karst étudié.....	10
5 -	Le bassin d'alimentation de la Cuisance.....	12
6 -	Carte géologique schématique.....	13
7 -	Schéma structural et fissuration.....	13
8 -	Coupe stratigraphique.....	14
9 -	Plan de la Grotte des Planches.....	16
10 -	Répartition schématique des sols.....	18
11 -	Répartition topographique des sols bruns à chailles.....	19
12 -	Répartition des sols dans le paysage.....	21
13 -	Couverture végétale du bassin d'alimentation de la Cuisance..	25
14 -	Courbes des précipitations.....	29
15 -	Températures à Besain.....	29
16 -	Bilan des précipitations et de l'évapotranspiration à Besain.	30
17 -	Evapotranspiration potentielle et bilan hydrique (1983-1984).	32
18 -	Carte des teneurs en Oxygène 18.....	37
19 -	Carte des teneurs en tritium.....	37
20 -	Schématisation d'un système karstique.....	39
21 -	Précipitations - débits cycle 1983-1984.....	40
22 -	Essai de classification des systèmes karstiques.....	42
23 -	Courbes de tarissement.....	43
24 -	Courbes de décrue.....	44
25 -	Débits classés et polygones de fréquence (Grotte).....	48
26 -	Courbes des fréquences cumulées des débits classés (Grotte)..	48
27 -	Courbes des fréquences cumulées des débits classés (Grotte)..	48
28 -	Débits classés et polygones de fréquence (captage).....	50
29 -	Courbes de fréquences cumulées des débits classés (Captage)..	50
30 -	Courbes de fréquences cumulées des débits classés (Captage)..	50
31 -	Episode pluvio-orageux du 19 Août 1983 .....	51
32 -	Episode pluvio-orageux du 14 Août 1984.....	52

### DEUXIEME PARTIE

-----

33 -	Synthèse des trois chaînes de réactions.....	56
34 -	Diagramme de Schoeller.....	60
35 -	Catalogue de distribution de fréquences de la conductivité...	61
36 -	Minéralisation de la Cuisance.....	61
37 -	Diagramme de corrélation du magnésium.....	70
38 -	Histogrammes de fréquence du magnésium.....	70
39 -	Evolution de l'ion magnésium.....	71

40 - Evolution de la silice .....	71
41 - Histogrammes de fréquence des bicarbonates et du calcium.....	72
42 - Evolution de l'ion bicarbonate.....	73
43 - Evolution de l'ion calcium.....	73
44 - Histogramme de fréquence du potassium.....	74
45 - Evolution de l'ion potassium.....	75
46 - Evolution de l'ion sodium.....	75
47 - Courbe lissée de l'ion nitrate .....	76
48 - Evolution de l'ion nitrate.....	77
49 - Evolution de l'ion chlorure.....	77
50 - Courbe lissée de l'ion chlorure.....	78
51 - Evolution de l'ion phosphate.....	79
52 - Evolution de l'ion sulfate.....	79
53 - Projection des variables ACP.....	81
54 - Projection des variables ACP.....	81
55 - Projection des variables ACP.....	81
56 - Répartition des individus (Grotte).....	82
57 - Comportement des éléments chimiques - Crue du 16 Septembre 84	84
58 - Comportement des éléments chimiques - Crue du 5 Octobre 84...	84
59 - Evolution de $K^+$ , $Mg^{++}$ , $NO_3^-$ en crue.....	85
60 - Influence des eaux usées sur les eaux souterraines.....	86
61 - Compartiments du karst de la Cuisance.....	89
62 - Evolution de l'ion bicarbonate.....	91
63 - Evolution de l'ion calcium.....	91
64 - Evolution de l'ion magnésium.....	92
65 - Evolution de l'ion potassium .....	92
66 - Evolution de la silice.....	93
67 - Evolution de l'ion nitrate.....	93
68 - Evolution comparée de $SiO_2$ , $Mg^{++}$ , $NO_3^-$ .....	95
69 - Projection des variables, répartition des individus (Grotte).	97
70 - Projection des variables, répartition des individus (Captage)	98
71 - Projection des variables, répartition des individus (Captage)	99

### TROISIEME PARTIE

-----

72 - Limite et équipement du bassin.....	104
73 - Position topographique des lysimètres.....	104
74 - Schéma d'installation des lysimètres.....	106
75 - Triangle des textures.....	112
76 - Diffractogramme du profil DL1.....	114
77 - Diffractogramme du profil DL3.....	115
78 - Granulométrie et dynamique des cations dans les profils.....	118
79 - Vitesse de minéralisation de l'azote.....	111
80 - Les eaux de percolation dans les diagrammes d'équilibre des argiles.....	126
81 - Relation entre le pH du sol et des eaux lysimétriques.....	127
82 - Evolution de l'ion nitrate dans les lysimètres.....	128
83 - Evolution de l'ion potassium dans les lysimètres.....	128
84 - Evolution de l'ion magnésium dans les lysimètres.....	130
85 - Evolution de la silice dans les lysimètres.....	130
86 - Evolution de l'ion sulfate dans les lysimètres.....	132
87 - Evolution de l'ion chlorure dans les lysimètres.....	132
88 - Evolution de l'ion calcium dans les lysimètres.....	134

89 - Evolution de l'ion bicarbonate dans les lysimètres.....	134
90 - Evolution de l'ion phosphates dans les lysimètres.....	135
91 - Projection des variables et répartition des individus ACP DL1	138
92 - Projection des variables et répartition des individus ACP DL1	139
93 - Projection des variables et répartition des individus ACP DL2	140
94 - Projection des variables et répartition des individus ACP DL3	140
95 - Evolution de l'ion nitrate dans le ruisseau.....	142
96 - Evolution de l'ion potasssium dans le ruisseau.....	142
97 - Evolution de l'ion magnésium dans le ruisseau.....	144
98 - Evolution de la silice dans le ruisseau.....	144
99 - Evolution de l'ion sulfate dans le ruisseau.....	145
100 - Evolution de l'ion chlorure dans le ruisseau .....	145
101 - Evolution de l'ion bicarbonate dans le ruisseau.....	146
102 - Evolution de l'ion calcium dans le ruisseau.....	146
103 - Projection de variables - ACP - Ruisseau.....	147
104 - Evolution comparée des éléments : $Mg^{++}$ , $K^+$ ; $SiO_2$ en étiage à la Grotte et dans le ruisseau.....	148

### ANNEXES

-----

105 - Carte des massifs forestiers.....	II
106 - Courbe Z à la Grotte.....	III
107 - Courbe Z au captage.....	III
108 - Production de $CO_2$ dans le sol.....	VI
109 - Evolution du fer <sub>2</sub> aux deux sources.....	XI
110 - Evolution de l'ion sulfate aux deux sources .....	XI
111 - Evolution de l'ion chlorure aux deux sources.....	XII
112 - Evolution de l'ion sodium aux deux sources.....	XII
113 - Evolution comparée de concentration N- $NO_3$ à l'exutoire de trois bassins versants.....	XIII
114 - Evolution de l'ion nitrite dans les quatre lysimètres.....	XV
115 - Evolution de l'ion ammonium dans les quatre lysimètres.....	XV

### TROISIEME PARTIE

34 - Analyses du profil DL1.....	108
35 - Analyses du profil DL2.....	109
36 - Analyses du profil DL3.....	110
37 - Analyses du profil DL4.....	111
38 - Résultats minéralogiques aux PK.....	116
39 - Paramètres caractéristiques de la minéralisation de l'azote...	121
40 - Valeurs moyennes des eaux du bassin expérimental.....	125
41 - Matrice de corrélations - lysimètre DL1.....	136
42 - Matrice de corrélations - lysimètre DL2.....	136
43 - Matrice de corrélations - lysimètre DL3.....	136
44 - Matrice de corrélations - lysimètre DL4.....	137
45 - Matrice de corrélation du ruisseau.....	137

### ANNEXES

46 - Symboles utilisés dans les schémas de sols.....	I
47 - Ecart des températures à Bassin.....	III
48 - Méthodes chimiques utilisées.....	IV
49 - Exemple de balance ionique.....	IV
50 - Constantes d'équilibres relatives à la dissociation des espèces aqueuses.....	V
51 - Constantes d'équilibre relatives à l'hydrolyse des minéraux non silicatés.....	V
52 - Fiche d'enquête agricole.....	VI
53 - EXportations annuelle par les plantes.....	VII
53 bis - Exportation par les plantes - bassin de la Culaance.....	VII
54 - Comportement des constituants chimiques des sols.....	VIII
55 - Valeurs critiques du coefficient de corrélation.....	X
56 - Fiche STIPA.....	XI

**LISTE DES TABLEAUX**

-----

Tableaux

pages

**PREMIERE PARTIE**

-----

1 - Traçages à la fluorescéine.....	9
2 - Analyses de sols.....	23
3 - Essences forestières.....	24
4 - Précipitations minimales maximales à Besain.....	28
5 - Précipitations 1983-1984.....	28
6 - ETP à Besain.....	31
7 - ETP - ETR à Besain.....	33
8 - Rapport des précipitations.....	33
9 - Paramètres climatiques et hydrologiques.....	34
10 - Comparaison des volumes infiltrés et écoulés .....	35
11 - Calcul de la superficie du bassin de la Grotte.....	35
12 - Calcul de la superficie du bassin du captage.....	36
13 - Tritium des sources karstiques du Jura .....	36
14 - Caractéristiques de l'aquifère principal à la Grotte.....	44
15 - Caractéristiques des aquifères du karst (Grotte).....	45
16 - Caractéristiques de l'aquifère principal au Captage.....	46
17 - Caractéristiques de l'aquifère du karst au captage.....	46
18 - Débits caractéristiques à la Grotte.....	47
19 - Débits caractéristiques au captage.....	49
20 - Caractéristiques de l'orage du 19 Août 1983.....	51
21 - Caractéristiques de l'orage du 14 Août 1984.....	52

**DEUXIEME PARTIE**

-----

22 - Réactions présentes dans l'équilibre calco-carbonique.....	58
23 - Caractéristiques chimiques des eaux de la Cuisance (Grotte)...	59
24 - Caractéristiques chimiques et physiques des eaux de précipitation	62
25 - Caractéristiques physiques et chimiques des eaux de captage...	63
26 - Principaux composants chimiques des engrais.....	64
27 - Périodes et quantités d'éléments chimiques épandus.....	65
28 - Répartition des surfaces agricoles.....	66
29 - Exportation par les plantes.....	66
30 - Bilan entrée et sortie à la Grotte.....	66
31 - Matrice de corrélations de la Cuisance (Grotte).....	80
31 bis - Facteurs de variations de concentrations à la Grotte.....	87
32 - Matrice de corrélations à la Grotte (étiage).....	93
33 - Matrice de corrélations au Captage (étiage).....	96

## R E S U M E

L'acquisition et l'estimation de l'impact des activités humaines sur le chimisme des eaux karstiques ont été étudiés sur le bassin d'alimentation des sources de la Cuisance, en amont d'Arbois, dans le Jura. Ce bassin se subdivise en trois compartiments imbriqués les uns dans les autres. Il se caractérise également par un karst très développé au Sud à bancs calcaires subhorizontaux, surmontés de sols superficiels qui entretiennent cette karstification ; au Nord une formation superficielle, appelée argile à chailles, supporte des sols bruns épais dont l'exploitation agricole nécessite des amendements fréquents.

Le suivi hydrochimique des eaux karstiques montre que l'évolution de la concentration est étroitement liée d'une part aux débits pour le magnésium, la silice et le potassium, d'autre part aux cycles biologiques et aux épandages pour les nitrates et les chlorures, ou pour les phosphates indépendante des débits et des variations de type saisonnier. La comparaison du chimisme des eaux des deux résurgences montre qu'un grand nombre d'éléments provient de la matrice calcaire ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ) mais que certains d'entre eux ( $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ) sont également issus de l'altération pédogénétique. Quant aux nitrates, ils résultent des activités agricoles et biologiques.

Ceci a été confirmé par l'étude d'un petit bassin expérimental équipé de plaques lysimétriques recueillant les eaux de percolation des sols. Ainsi les sols bruns épais sont plus riches en silice que les sols calcaires et superficiels en raison d'un degré de dégradation des minéraux phylliteux moins avancé alors que la concentration en éléments azotés est fonction des pratiques culturales et du cycle biologique.

## A B S T R A C T

The estimation of the impact of human activities upon the chemical composition of karstic waters were studied within the basin that feeds the springhead of the Cuisance, above Arbois, in the Jura. This basin is subdivided into three areas each overlapping the other. It is also characterized by a highly developed karst to the South with subhorizontal limestone beds, covered by superficial soils that maintain this karstification ; while to the North a superficial formation known as "Chailles clay" supports thick, brown soils whose agricultural exploitation demands frequent applications of fertilizer.

The hydrochemical flow of the karstic water shows that the evolution of the concentration of the following elements is closely linked : to the rate of water flow for the magnesium, the silica and the potassium ; to biological cycles and the spreading of fertilizer for the nitrates and the chlorides ; independent of waterflow and seasonal variations for the phosphates. The comparison of the chemical composition of water taken from the two resurgences shows that a great number of the elements originate in the limestone matrix ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ) but that some of them ( $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ) could equally come from pedogenic alterations. As concerns the nitrates, they result from agricultural activities.

This has been confirmed by a study of a small experimental basin equipped with lysimetric plates, necessary for observing the percolation of the water through the different soils. Thus, the thick brown soils are richer in silica than the limestone and superficial soils, due to a less advanced degree of alteration of the clay minerals while the concentration of nitrogen elements varies according to agricultural practices and biological cycles.

## M O T S - C L E S

Bassin d'alimentation - Cuisance - Epikarst - Karts -  
Hydrochimie - Eaux lysimétriques - Dissolution - Altération