

THÈSE

présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES DE
L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

pour obtenir le

DIPLOME DE DOCTEUR EN SCIENCES DE LA TERRE
Mention Géologie Appliquée

par

Georges TISSOT
et
Philippe TRESSE

ÉTUDE DES SYSTÈMES KARSTIQUES
DU LISON ET DU VERNEAU
RÉGION DE NANS-SOUS-S^{TE} ANNE (DOUBS)

Université de Franche-Comté



114 676643 6

Soutenue le

D

Commission d'Examen

MM. P. CHAUVÉ, Professeur

Président

P. BROQUET, Maître de Conférences

G. CASTANY, Professeur

B. SLAVOUX, Maître Assistant

A. MANGIN, Chargé de recherches au CNRS

Examinateurs

L. BADIN, Ingénieur en chef du G.R.E.F.

Invité



TABLE DES MATIERES

	Pages
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>PREMIERE PARTIE</u>	
CONTEXTE GÉOLOGIQUE	5
LITHOLOGIE	5
- Le Lias	5
- Le Jurassique moyen	5
- Le Jurassique supérieur	7
STRUCTURE	7
- Le faisceau salinois	7
- Le plateau d'Amancey	7
- Les plateaux méridionaux	9
LES CARTES STRUCTURALES	9
- Le bassin du Verneau	9
- Le bassin du Lison	9
LA FRACTURATION	13
- Les résultats de l'étude en photos aériennes	13
CADRE GÉOLOGIQUE	15
HYDROLOGIE DE SURFACE	15
- Bassin du Verneau	15
- Bassin du Lison	15
LES SOURCES	15
- La source du Verneau	15
- La source du Lison	15
- La grotte Sarrazine	15

	Pages
LA KARSTIFICATION	17
FORMES DE SURFACE	17
LES RESEAUX SPELEOLOGIQUES	17
- Le Verneau	17
- Le Lison	18
LES DIRECTIONS DE KARSTIFICATION	19
RELATION ENTRE LA KARSTIFICATION, LES DONNEES STRUCTURALES ET LA FRACTURATION	19
CONCLUSION	21
LES TRAÇAGES	22
LE BASSIN DU VERNEAU	22
LE BASSIN DU LISON	27
LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS ..	31
ESSAI DE DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS	31
COURBE HYPSONOMETRIQUE - COEFFICIENT DE COMPACTITE .	31
CONCLUSION : CARACTÉRISATION DES BASSINS DU VERNEAU ET DU LISON	33

DEUXIEME PARTIE

AMÉNAGEMENT DU BASSIN	37
CLIMATOLOGIE	37
- Réseau préexistant	37
- Stations installées dans le cadre de cette étude	37
HYDROMETRIE	38
- Le réseau S.R.A.E. préexistant	38
- les nouvelles stations	39

	Pages
DONNÉES CLIMATOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES	41
LES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES	41
- Précipitations	41
- Résultats	41
- Analyse	41
- Estimation de la lame d'eau précipi- tée sur les bassins	45
- Températures de l'air	47
- Résultats	47
- Analyse	47
EVALUATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION	48
- Estimation de l'E.T.R. par la formule de Turc	48
- Estimation de l'E.T.P. par la formule de Thornthwaite	49
- Estimation de l'E.T.P. par la formule de Turc modifiée	50
- Estimation de l'E.T.R. par la méthode du bilan énergétique	51
LES DONNÉES HYDROLOGIQUES	53
- Les jaugeages	53
- Les courbes de tarage	53
- Les résultats	56
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	61
RELATIONS EXISTANT ENTRE LES STATIONS ET CORRELA- TION	61
- Stations Lison Source-Verneau	61
- Stations de Myon - sources du Lison, Sar- razine, Verneau	61
- Stations source du Lison - Sarrazine, May à Dournon	65
ETUDE DES DÉBITS CLASSES	67
- Principe	67
- Applications	69
COURBES DE DÉCRUE ET TARISSEMENT	77
- Principe	79
- Applications aux courbes de décrue et ta- rissement du système du Lison	79
- Applications aux courbes de décrue et ta- rissement du système du Verneau	81

	Pages
LES BILANS	85
DEFINITION DES ELEMENTS DU BILAN	85
APPLICATION AU SYSTEME DU LISON	86
APPLICATION AU SYSTEME DU VERNEAU	86
CONCLUSION	88

TROISIEME PARTIE

HYDROGÉOCHIMIE ET CHIMIE ISOTOPIQUE	91
METHODES D'ETUDE	91
- Echantillonnage	91
- Mesures de terrain	91
- Paramètres étudiés, méthodes d'analyse ..	92
RESULTATS ET INTERPRETATIONS	95
- Hydrogéochimie	97
- Relation minéralisation totale - conductivité	97
- Les crues étudiées	97
- Chimie isotopique	110
- Résultats des campagnes de prélève- ment (année 1977)	113
- Résultats des analyses isotopiques de la crue du 4.11.77 au Lison ...	113
- Interprétation des résultats	113
CONCLUSION	114
LE SYSTEME KARSTIQUE DU VERNEAU	114
LE SYSTEME KARSTIQUE DU LISON	115
THERMIQUE	117
APPAREILLAGE ET CADRE DES MESURES	117
- Appareillage	117
- Cadre des mesures	118
ANALYSE DES RESULTATS	121
- Description des variations thermiques à du Verneau	121

	Pages
INTERPRETATION	122
- Source du Verneau	122
- Sources latérales	122
CONCLUSION : APPORT DE LA THERMIQUE	123

CONCLUSION

CARACTERISTIQUES COMMUNES AUX SYSTEMES KARSTIQUES DU VERNEAU ET DU LISON	125
CARACTERISTIQUES PROPRES A CHAQUE SYSTEME	126

<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	129
----------------------------	-----

INDEX DES FIGURES
=====

Figures		Pages
1	Position dans le cadre du Jura (d'après P. CHAUME, 1975)	4
2	Coupe lithostratigraphique schématique de la région étudiée	6
3	Bassins karstiques du Lison et du Verneau	8
4	Esquisse structurale au toit de l'Oxfordien - Bassin du Verneau	10
5	Coupes géologiques du faisceau salinois et du plateau d'Amancey (d'après J. FOLTETE, 1968)	11
6	Esquisse structurale au toit du Lias - Bassin du Lison.	12
7	Histogramme des directions de fracture relevées sur photos aériennes	14
8	Réseau souterrain du Verneau. Coupe schématique (d'après S.H.A.G., 1977)	16
9	Histogramme des directions de galeries karstiques	20
10	Carte des traçages	24
11	Courbes de restitution - a. Coloration. Vieille Folle - b. Coloration. Font-à-Meuferd..	25
12	Courbes de restitution. Coloration des égouts de Déservillers	26
13	Carte du système karstique du Lison	28
14	Carte du système karstique du Verneau	30
15	Courbe hypsométrique. Bassin du Verneau	32
16	Implantation du réseau de mesures	36
17 a.	Moyennes des précipitations mensuelles de 1971 à 1977 .	40
b.	Hauteur de neige et de précipitation, en fonction de l'altitude des stations	40
18	Cartes des polygones de Thiessen	44
19 a.	Evolution des températures moyennes mensuelles - Stations de Levier et Amancey	46
b.	Corrélation entre températures moyennes mensuelles - Levier - Amancey	46
20	Courbes de tarage - Verneau. Coordonnées arithmétiques et logarithmiques	52
21	Courbes de tarage - Lison à Myon, Lison-Sce, Farrazine et Le Muy à Douvrou	54
22	Débits moyens journaliers - Verneau	57
23	" " " "	58

Figures		Pages
24	Débits moyens mensuels interannuels	60
25	Relations entre la source du Lison, et le Lison à Myon	62
26	Relation entre la source du Lison et la source de la Sarrazine	63
27	Crue du 10 Février 1977. Lison - Sarrazine - Lemuy .	64
28	Corrélations Lison source-Sarrazine	66
29	Débits classés cycle 1976-1977 : Lison source et Sarrazine	68
30	Débits classés cycle 1976-1977 : Somme Lison-Sarrazine et Lison à Myon de 1968 à 1974	70
31	Débits classés - Verneau de 1970 à 1977	72
32	Débits classés - Verneau par cycle 1969 à 1973	73
33	Débits classés - Verneau par cycle 1973 à 1977	74
34	Relation entre le débit du point de rupture de la droite des débits classés et la pluviométrie, les débits écoulés et Q_0	76
35	Tarissements 1971 et 1972 à Myon	78
36	Courbes de décrues et tarissement 1971-1972-1976 au Verneau	80
37	Etude des décrues de la source du Verneau	82
38	Classification des systèmes karstiques	84
39	Relations minéralisation totale - conductivité	96
40	Crue du 4 Novembre 1977 - Verneau. Variations des teneurs en ions	99
41	Diagrammes factoriels	100
	a. Verneau. Crue du 4.11.77	
	b. Lison . Crue du 4.11.77	
42	Crue du 1er Avril 1977 - Lison. Variations des teneurs en ions	104
43	Crue du 1er Avril 1977 - Sarrazine	105
44	Crue du 1er Avril 1977. Lison et Sarrazine	106
45	Diagrammes factoriels. Crue du 1.4.77	107
	a. Sarrazine - b. Lison	
46	Crue du 4 Novembre 1977 - Lison. Variations des teneurs en ions	109
47	Evolution des teneurs en isotopes (oxygène 18,T) - Cours de la crue du 4.11.77 au Lison	112
48	Schéma de localisation des sondes thermiques	116
49	Variations thermiques. Crue du 23 Mars 1978 - Système du Verneau	119
50	Variations thermiques. Crue du 25 et du 27 Mars 1978- Système du Verneau	120

INDEX DES TABLEAUX

Tableaux		Pages
1	Résultats des traçages entrepris sur le secteur étudié	23
2	Caractéristiques de l'enneigement - Année 1977	41
3	Caractéristiques des corrélations et des droites de régression, entre hauteurs de précipitations décennales	42
4	Températures moyennes des années civiles et des cycles hydrologiques	47
5	Débits moyens mensuels, annuels et débits spécifiques (de 1970 à 1977) - Verneau	59
6	Teneurs en oxygène 18 et en tritium aux exutoires des sources de la région de Nans-sous-Ste-Anne	111

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE I :

Précipitations mensuelles (stations Anancey, Tarmy, Levier, Ste-Anne, Villeneuve-d'Armont, Villers-sous-Chalamont).

ANNEXE II :

Programme de calcul des débits moyens journaliers.

ANNEXE III :

Débits moyens journaliers (Lison, Sarrazine, Myon, Verneau).

ANNEXE IV :

Résultats des analyses chimiques et isotopiques.

ANNEXE V :

Matrices de corrélation et matrices factorielles des quatre crues étudiées.

INTRODUCTION

Les Sources du Lison, de la Sarrazine, du Gyps et du Verneau qui sont étudiées dans ce travail sont situées à l'Est de Salins sur le territoire de la commune de Nans-sous-Sainte-Anne (25), à la limite des départements du Doubs et du Jura.

Les trois premières qui alimentent le Lison sortent au Sud de la dépression qui court de Salins à Montsaloux et proviennent du plateau calcaire qui se développe vers le Sud en direction de Champagnole, et qui est entaillé à l'Ouest par les reculées du Jura externe. Il faut d'ailleurs signaler que le Lison a aussi creusé une petite reculée, en amont de la dépression salinoise, de direction sensiblement méridienne.

La source du Verneau sort des reliefs calcaires du Nord de la dépression, le ruisseau qu'elle alimente se jette dans le Lison au village même de Nans, en amont des gorges creusées par le Lison dans le plateau septentrional.

Cette région correspond à une zone de moyenne altitude avec des reliefs qui atteignent ou dépassent 700 m et des fonds de vallées ne dépassant pas 400 m.

Les résultats de l'étude que nous avons faite de ce secteur, sont regroupés en trois parties :

- La première partie correspond à un essai de caractérisation des bassins versants.

Cette caractérisation sera tentée, tant à partir du contexte géologique (lithologie, structure, fracturation), du cadre hydrogéologique et des divers aspects de la karstification, qu'à partir des résultats des différents traçages mis en oeuvre dans cette région.

- La seconde partie, retrace les grandes lignes de l'aménagement du bassin et de l'acquisition des données, suivies d'une analyse de ces données, et de leur interprétation, au moyen de méthodes classiques, puisées dans la littérature.

- La troisième partie, correspond à l'apport de l'étude des paramètres physicochimiques des eaux, à la connaissance de la structure, et du fonctionnement de ces aquifères "karstiques".

L'intérêt d'aborder l'étude du karst sous divers aspects, est, entre autre, de pouvoir confronter ensuite les résultats obtenus par l'intermédiaire d'une méthode, à ceux obtenus par ailleurs.

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

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

LITHOLOGIE

STRUCTURE

LES CARTES STRUCTURALES

LA FRACTURATION

CADRE HYDROGÉOLOGIQUE

HYDROLOGIE DE SURFACE

LES SOURCES

LA KARSTIFICATION

FORMES DE SURFACE

LES RESEAUX SPELEOLOGIQUES

LES DIRECTIONS DE KARSTIFICATION

RELATIONS ENTRE LA KARSTIFICATION, LES DONNEES

STRUCTURALES ET LA FRACTURATION

CONCLUSION

LES TRACAGES

LE BASSIN DU VERNEAU

LE BASSIN DU LISON

LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS

ESSAI DE DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS

COURBE HYPSOMETRIQUE - COEFFICIENT DE COMPACTITE

CONCLUSION :

CARACTÉRISATION DES BASSINS DU VERNEAU ET DU LISON

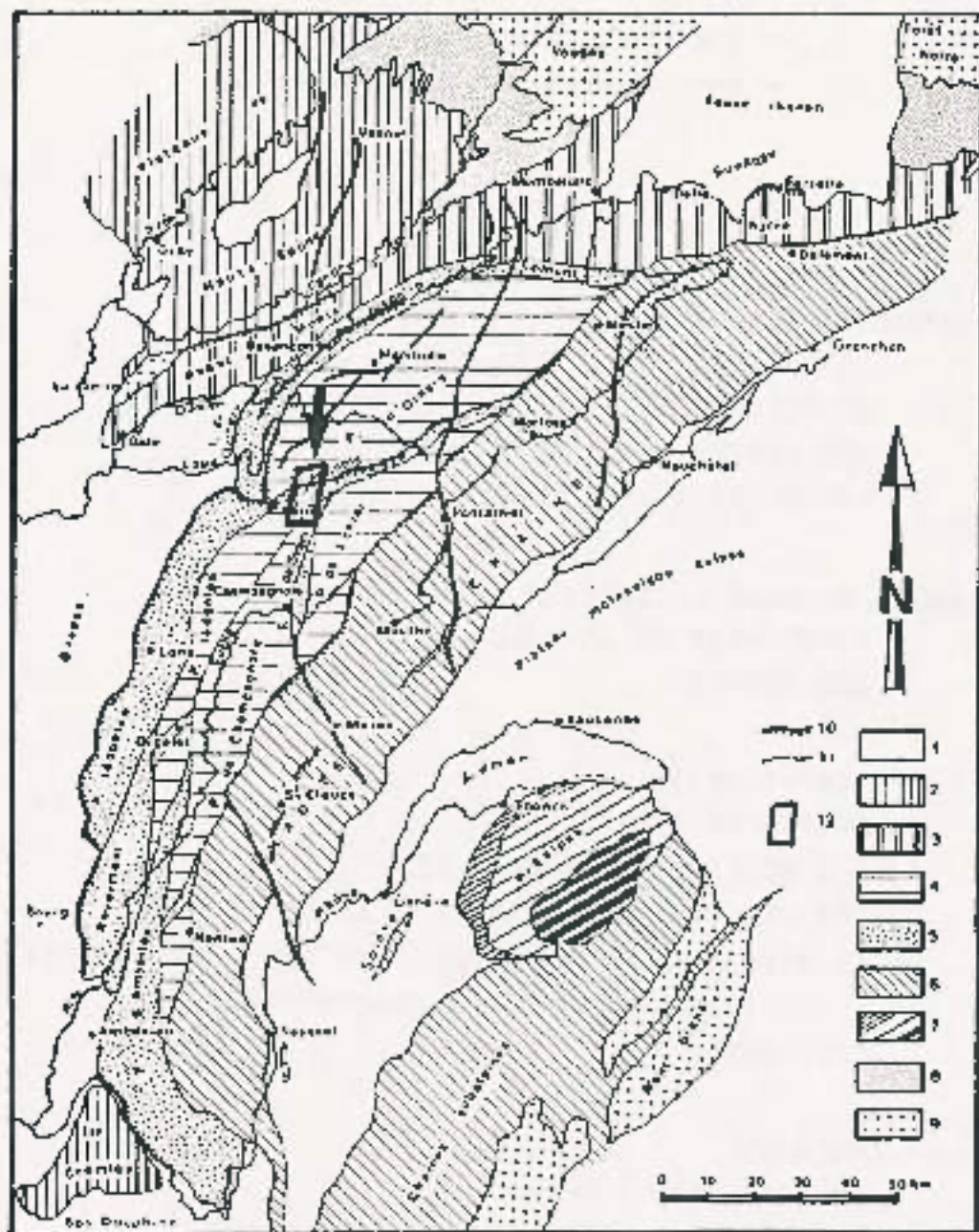


Fig. 1 - POSITION DU SECTEUR ETUDIÉ DANS LE CADRE DU JURA -

1. Dépressions tertiaires et quaternaires. - 2. Plateaux de Haute-Saône et île Crémieu. - 3. Avant-Monts et collines préjurassiennes. - 4. Plateaux du Jura externe. - 5. Faisceaux plissés du Jura externe. - 6. Haute-Chaine et chaînes subalpines. - 7. Préalpes. - 8. Couverture triasique des Vosges et de la Forêt-Noire. - 9. Massifs cristallins. - 10. Ligne de chevauchement. - 11. Failles. - 12. Secteur étudié.

(d'après P. CHAIVE, 1975)

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Du point de vue géologique, la région de Mans-sous-Ste-Anne correspond à une zone caractéristique du Jura externe où se mêlent des zones tabulaires, des groupements de failles, et des faisceaux plissés. (Fig. 1).

La zone déprimée qui se suit de Salins à Mans, correspond au faisceau salinois, appelé anciennement "Ondulation Transversale" en raison de la zone de relief (oblique à la direction du croissant jurassien) qui se développe au NE du village depuis le Mont Mahoux jusqu'à la région de Mouthier-Haute-Pierre.

De part et d'autre de ce tronçon du faisceau où affleurent surtout des marnes du Lias se développent deux zones calcaires qui sont respectivement au Nord le plateau d'Ornans dont l'ossature est formée par du Jurassique supérieur et au Sud une zone plus complexe où se rejoignent différentes unités structurales et morphologiques du Jura externe.

LITHOLOGIE

Comme dans tout le Jura la série stratigraphique est essentiellement calcaire ou marneuse (Fig. 2). Elle a fait l'objet de descriptions détaillées (C. CASTANY, 1939 ; A. CAIRE, 1961-1967 ; J. SIRI, 1964 ; J. POLTETE, 1968 ; P. CELET, 1975).

Les termes reconnus s'étagent du Lias au Jurassique supérieur.

Le Lias

Il est représenté par une puissante série marneuse. Les niveaux calcaires sont rares. Ils sont localisés à la base, au-dessus des niveaux marneux du Trias supérieur. Cette formation n'affleure que dans le faisceau salinois et constitue un substratum imperméable sur lequel se développe un réseau hydrologique de surface. On peut noter la présence de niveaux pyriteux, répartis dans la formation.

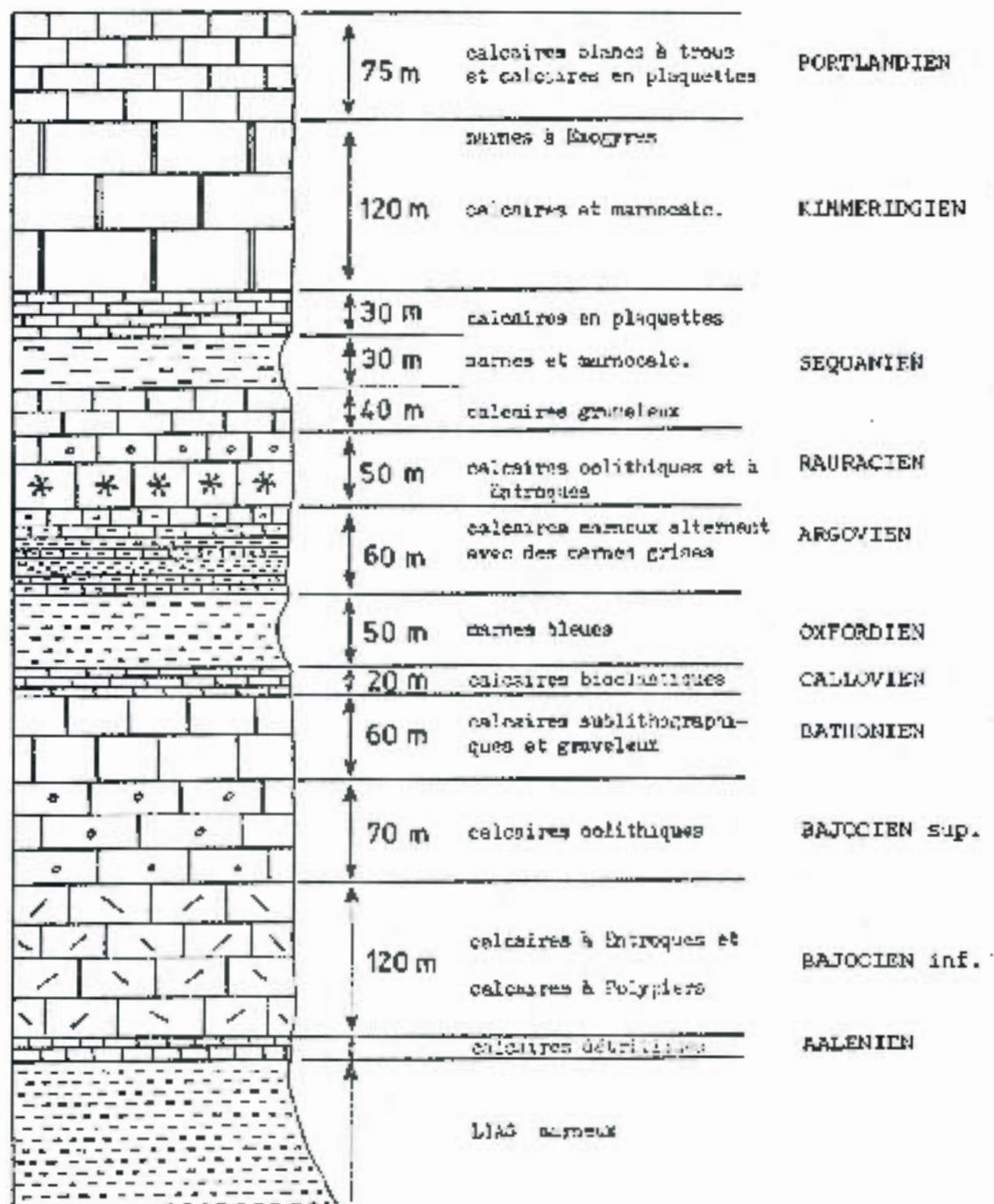
Le Jurassique moyen

Essentiellement calcaire, il se décompose de la base au sommet en :

- Bajocien qui débute par des calcaires à entroques auxquels font suite des calcaires gris à polypiers et des niveaux à silex (épaisseur : 110m).
- Bajocien supérieur ou "Grande Oolite" constitué de bancs peu épais à stratifications entrecroisées, de calcaires blancs franchement oolitiques. (épaisseur : 70 m). C'est dans cet étage que se situent les résurgences du Lison et de la Sarrazine.
- Bathonien. Il est formé de calcaires sublithographiques, ou graveleux en bancs massifs (épaisseur : 60 m).
- Callovien. Il présente un faciès de calcaires bioclastiques, oolitiques en petits bancs à stratifications entrecroisées, "Dalle Nacrée". (épaisseur : 20 m). C'est dans cet étage que se situent les principales pertes.

L'épaisseur totale des calcaires du Jurassique moyen est ici d'environ 260 m. C'est dans cet ensemble fissuré que se développe l'essentiel du réseau du Lison.

Fig. 2 - COUPE LITHOSTRATIGRAPHIQUE DE LA REGION ETUDIEE.



Le Jurassique supérieur

- l'Argovo-Oxfordien sous ce terme sont regroupés d'une part les marnes bleues pyriteuses de l'Oxfordien s.s., d'autre part les marnes à miches de la base de l'Argovien (épaisseur : 50 m).

C'est sur l'Argovo-Oxfordien que se concentrent les écoulements de Lemay-Dournon et de Villers-sous-Chalamont. Il sert également de niveau de base aux écoulements de la reculée d'Éternoz (cf. Fig. 3).

- l'Argovien calcaires marneux alternant avec des marnes grises (épaisseur : 60 m).

- le Rauracien calcaires à entroques, coralligènes surmontés par des calcaires compacts, graveleux, oolitiques (épaisseur : 50 m).

- le Séquanien. On rencontre de la base au sommet, des calcaires grumeleux (30 m), une zone marneuse (35 m), puis des calcaires en bancs ou en plaquettes (30 à 40 m).

- le Kimméridgien comprend des calcaires argileux surmontés de calcaires et marnes à Exogyres (120 m).

- le Portlandien calcaires blancs à trous, surmontés de calcaires en plaquettes. (75 m).

- le Purbeckien n'affleure que dans le ravin de la perte de la Vieille Folle et est réduit à un banc de calcaire dolomitique d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur.

Au Sud du plateau d'Amancey, l'épaisseur totale des calcaires du Jurassique supérieur atteint 300 m. C'est dans cet ensemble calcaire que se développent les pertes et les circulations du réseau du Verneau.

STRUCTURE

L'organisation du secteur étudié se fait le long et de part et d'autre du faisceau salinois d'orientation générale WSW-ENE.

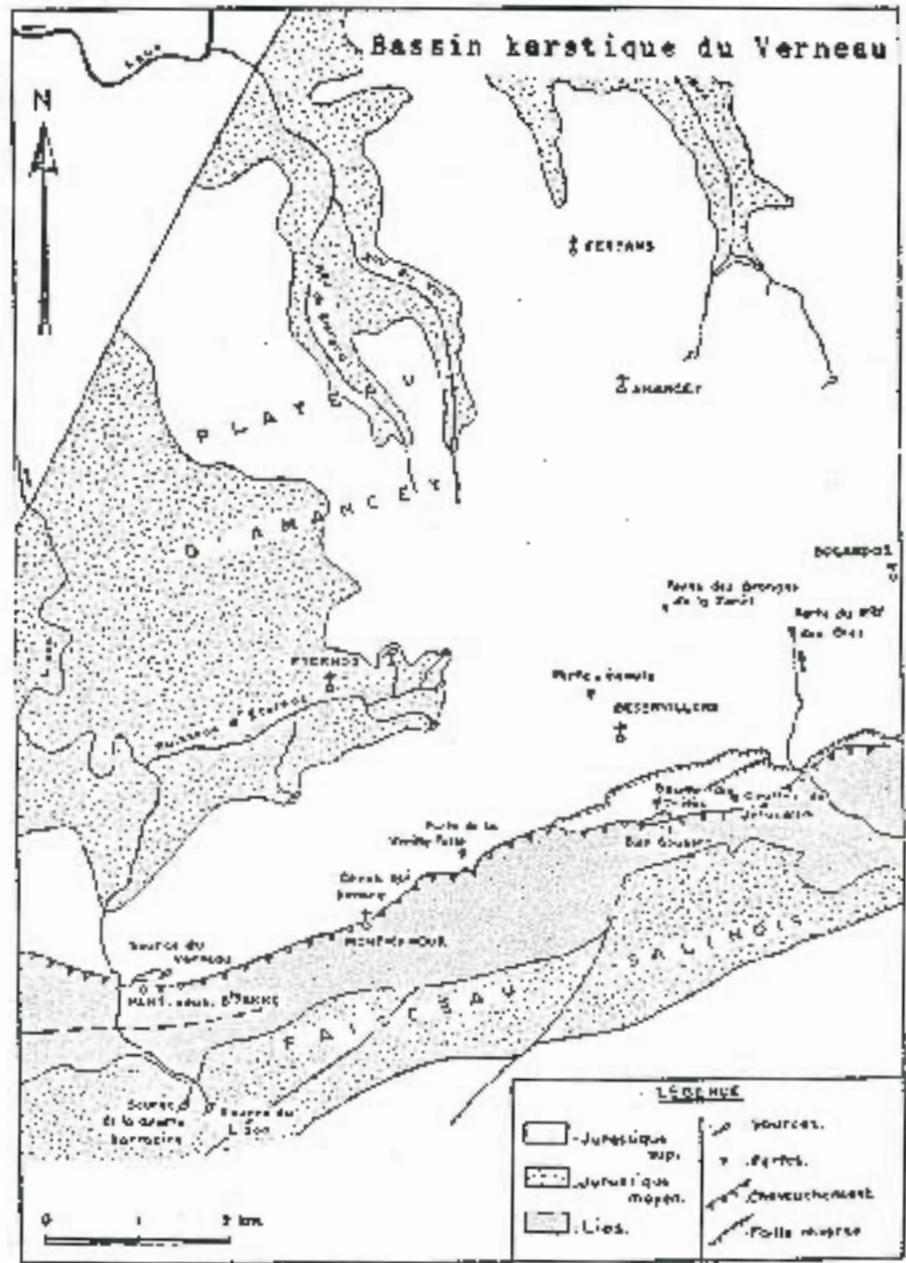
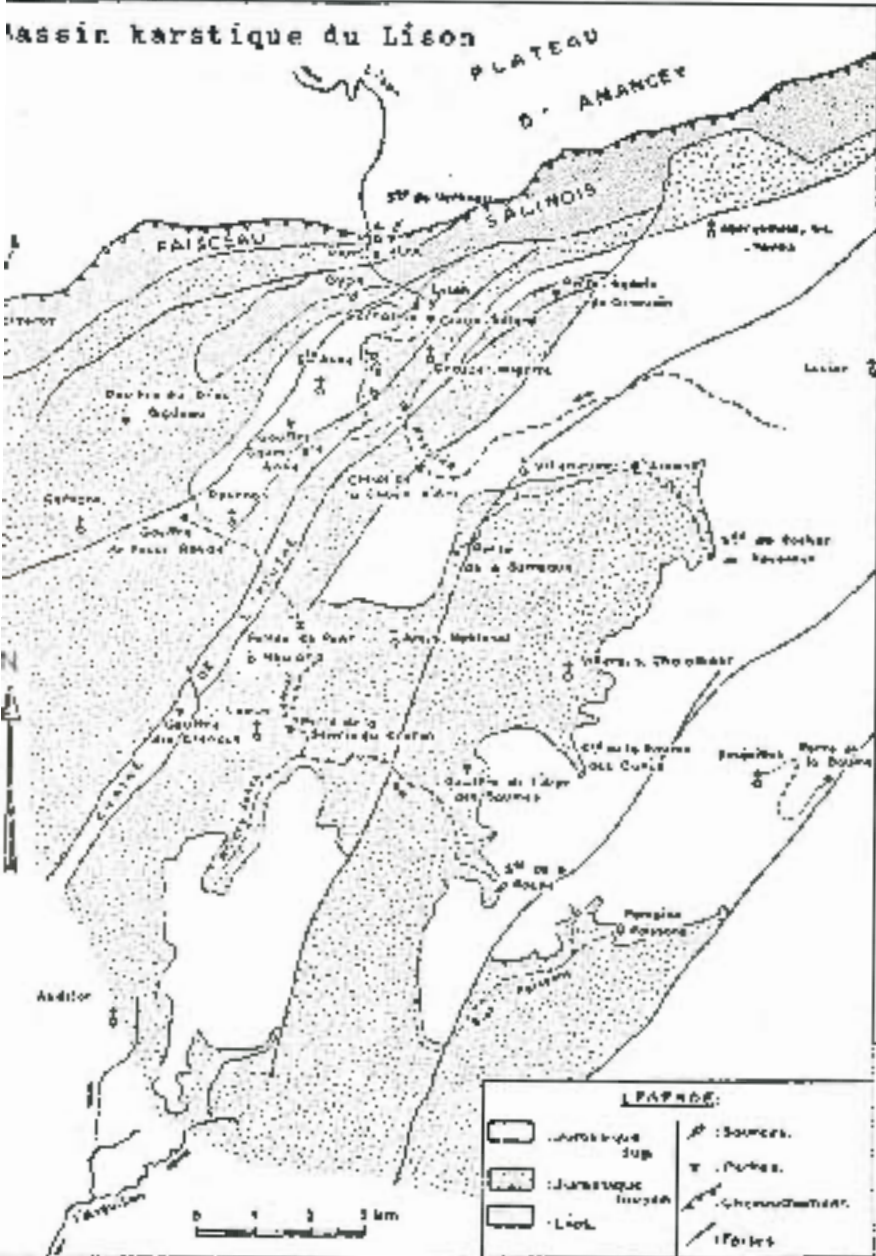
Le faisceau salinois

C'est une structure relativement simple à l'Ouest de Nans : compartiment limité par deux failles verticales entre lesquelles la série marneuse du Trias et du Lias (quelquefois du Jurassique moyen) est légèrement plissée et faillée. À l'Est de Nans, la structure se complique progressivement. Jusqu'au Mont Mahoux, la structure reste simple, bien que la direction du faisceau ait changé, puis la faille septentrionale se courbe et se dédouble, et l'on passe à un chevauchement qui amène les marnes du Lias sur les calcaires du Jurassique supérieur.

Le plateau d'Amancey (Fig. 3)

Le plateau d'Amancey (partie SE du plateau d'Ornans) est constitué par des terrains du Jurassique supérieur. La base oxfordo-argovienne affleurant dans des reculées (Pertans, Éternoz) est surmontée par la corniche calcaire du Rauracien et par les niveaux du Kimméridgien et du Portlandien à proximité du faisceau salinois. Bien que subhorizontales en général, les couches de cette plate-forme peuvent subir des ondulations à grand rayon de courbure (Fig. 5).

- Fig. 3 -



Les plateaux méridionaux (Fig. 3)

Ils sont caractérisés par :

- de vastes surfaces subtabulaires,
- des plis à grand rayon de courbure, anticlinaux (forêt d'Arc) ou synclinaux (forêt de Scay),
- des failles normales subparallèles, encadrant des bandes effondrées et secondairement plissées.

Ainsi, le faisceau salinois constitue un important écran naturel susceptible d'individualiser les circulations de part et d'autre de son axe.

Nous avons complété cette description de la structure par la construction de deux cartes structurales de part et d'autre du faisceau salinois.

LES CARTES STRUCTURALES

Les cartes structurales ont été établies à partir des feuilles géologiques au 1/50000ème de Quingey et de Salins.

La variation d'épaisseur de certains niveaux (l'Argovien par exemple) d'une part, l'incertitude sur la valeur et la représentativité spatiale des pentages d'autre part, peuvent être à l'origine d'imprécisions.

Néanmoins, il est possible de faire certaines remarques :

Le bassin du Verneau (cf. Fig. 4)

Les couches du plateau d'Amancey montrent des ondulations à grand rayon de courbure. Le bombement anticlinal d'Eternoz, qui s'ennoie parallèlement au faisceau salinois en est un exemple.

La lisière méridionale du plateau se raccorde au faisceau salinois par l'intermédiaire d'un pli synclinal à flanc sud renversé.

L'axe de ce pli s'abaisse vers l'Est, en direction de la vallée de la Loue, vers l'Ouest, d'environ trois cent mètres vers celle du Lison, définissant ainsi une zone haute au Sud-Ouest de Bolandoz.

On peut d'ores et déjà souligner l'influence de cette structure sur la délimitation vers l'Est du bassin du Verneau et sur l'établissement du réseau spéléologique.

Le bassin du Lison (cf. Fig. 6)

Contrairement à ce que l'on observe sur le bassin du Verneau, le bassin du Lison ne présente pas d'abaissement axial général en direction de la source. En effet, le plateau est ici morcelé en compartiments orientés Nord-Est - Sud-Ouest qui possèdent des caractéristiques structurales propres :

- le compartiment de Villers-sous-Chalamont - Villeneuve d'Amont est occupé par un anticlinal à flancs symétriques avec cependant dans la partie méridionale un abaissement axial vers le Sud-Est.

- le compartiment de Lemuy présente deux points bas structuraux situés à proximité de Lemuy et du Creux de la Chaux d'Arc.

- le compartiment de Dournon est caractérisé par une dépression structurale allongée parallèlement à la direction des plis et présente un abaissement axial vers la source du Lison.

Il est intéressant de constater que le tracé des circulations superficielles actuelles, ainsi que celui des circulations anciennes matérialisées sur les cartes géologiques par des dépôts limono-caillouteux coïncide avec les points bas structuraux.

BASSIN DU VERNEAU.

Esquisse Structurale au toit de l'Oxfordien.

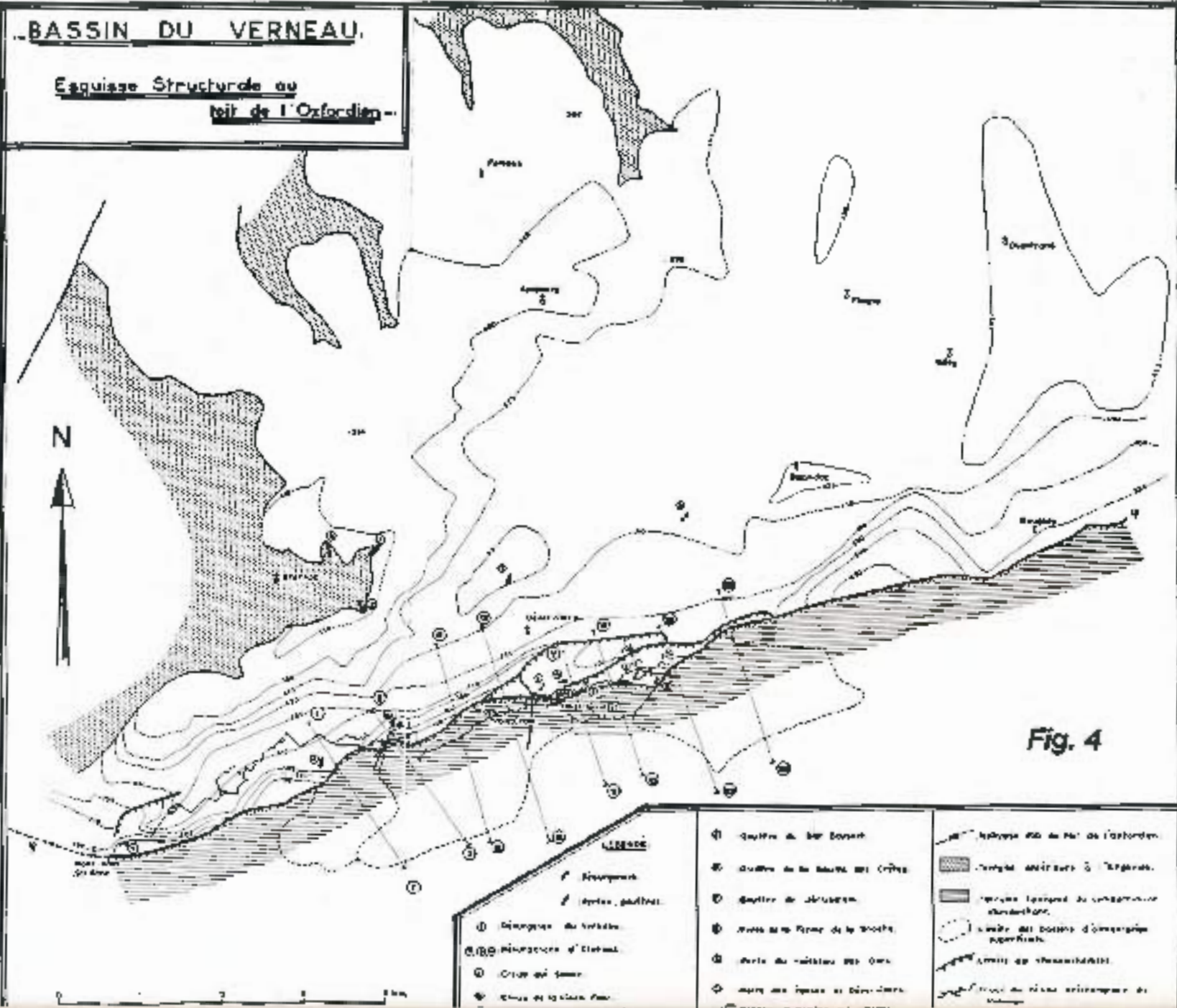


Fig. 4

LEGENDE

<ul style="list-style-type: none"> ① Dépression du versant. ② Mésogèze d'Estival. ③ Crue du Saône. ④ Crue de l'Isère. 	<ul style="list-style-type: none"> ⑤ Gouffre de St Bonnet. ⑥ Gouffre de la Haute des Crêtes. ⑦ Gouffre de Jussieu. ⑧ Vallée sans forme de la Troche. ⑨ Vallée de l'Isère des Ours. ⑩ Vallée de l'Isère de St-Jean. 	<ul style="list-style-type: none"> ⑪ Vallée des Hauts de l'Oxfordien. ⑫ Vallée antérieure à l'Isère. ⑬ Vallée ligandée au versant sud-est. ⑭ Vallée des basses d'origine superficielle. ⑮ Vallée de l'Isère.
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

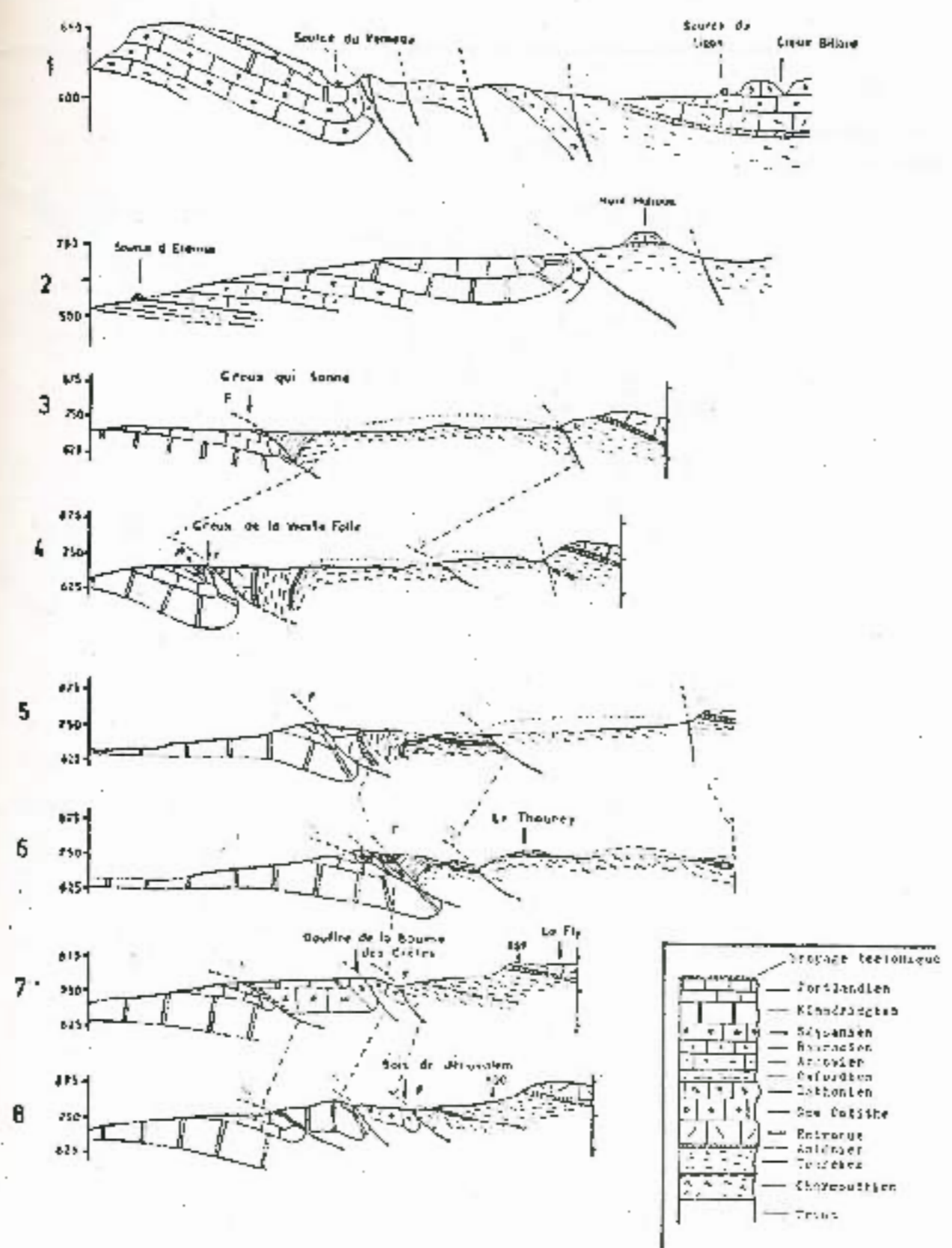


Fig. 5 - COUPES GEOLOGIQUES DU FAISCEAU SALINCIS ET DU PLATEAU D'AMANCEY.
(d'après J. Foltête 1968)

LA FRACTURATION

Nous avons cherché à mettre en évidence les maximums de fracturation, pour les comparer ensuite aux directions de karstification.

En l'absence de mesures effectuées en carrières, seule l'étude de la fracturation à partir de photos aériennes a été abordée dans le cadre de ce travail.

Elle a été réalisée à partir des clichés I.G.N., de format 19x19 et d'échelle sensiblement 1/25000ème, en vision stéréoscopique.

Etant donné l'échelle et le grain des photos disponibles, il n'est pas possible de repérer des fractures inférieures à la centaine de mètres. Les données acquises présentent de nombreuses imperfections. En effet les fractures, même de taille convenable, pourront être masquées par le couvert forestier. Inversement un certain nombre d'éléments (limites de coupes de bois, limites agricoles) peuvent perturber l'observation. En outre l'utilisation des histogrammes se heurte à une difficulté : la non connaissance de la nature des alignements relevés. La représentativité de ces histogrammes est limitée par le fait qu'ils ne tiennent pas compte de la fracturation de "détail". De plus, des travaux (P. VERDIER, M. POURMENTRAUX, G. PERRIN, 1971) ont montré que dans certains cas, en zone plissée, cette méthode conduit à sous-estimer le pourcentage de fractures longitudinales. Ces histogrammes présentent cependant deux avantages : ils tiennent compte de toutes les fractures importantes et ils permettent la connaissance de la fracturation pour des secteurs bien délimités.

Les résultats de l'étude en photos aériennes

L'histogramme des directions de fractures du Verneau (Fig. 7) met en évidence deux maxima, l'un à N20-50, l'autre à N160-180, et un groupe moins important à N140-150.

Sur le bassin du Lison (Fig. 7), l'étude d'ensemble a montré qu'il existe également deux directions prédominantes : l'une à N40-50, parallèle aux plis et aux accidents principaux du plateau de Champagne, la seconde à N120-150. Des relevés de détail, à proximité des principales pertes (Fig. 7), mettent en relief l'apparition locale de certaines directions l'une à N70-80, à la perte des Baraques, l'autre à N90-100 au gouffre de Fosse Ronde.

On remarque que la direction N40-50 est commune aux deux bassins, la classe N130 prend cependant plus d'importance dans le cas du Lison, la direction N160-180 étant mieux représentée sur le bassin du Verneau.

Il faut également noter dans le cas du Lison, la similitude des histogrammes de fracturation établis pour le Jurassique supérieur et le Jurassique moyen. Ce qui permet de ne pas attribuer à des différences de lithologie (Jurassique supérieur - Jurassique moyen) les divergences observées entre les histogrammes du Lison et du Verneau.

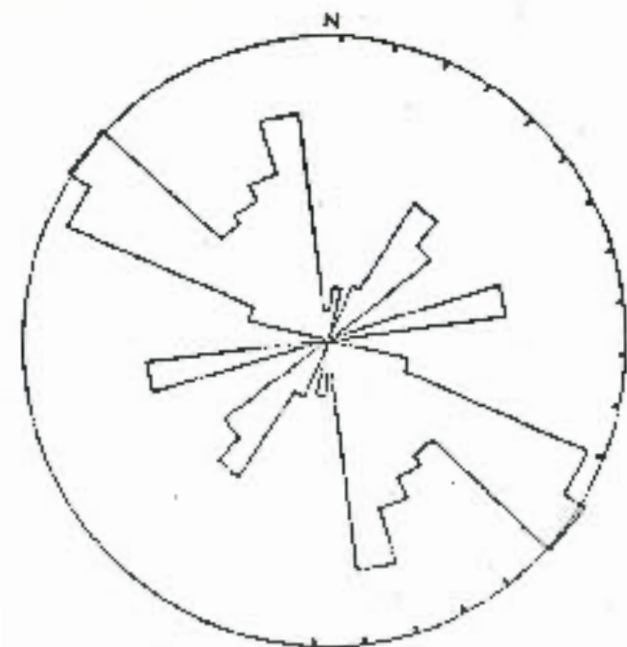


PHOTO - INTERPRETATION
ZONE DE LA PERTE DES BARAQUES

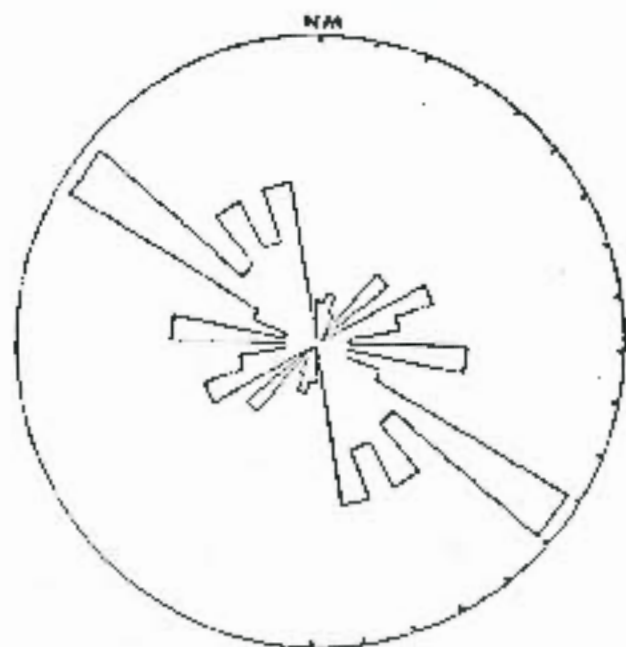


PHOTO - INTERPRETATION
ZONE DE LA PERTE DE FOSSE - RONDE

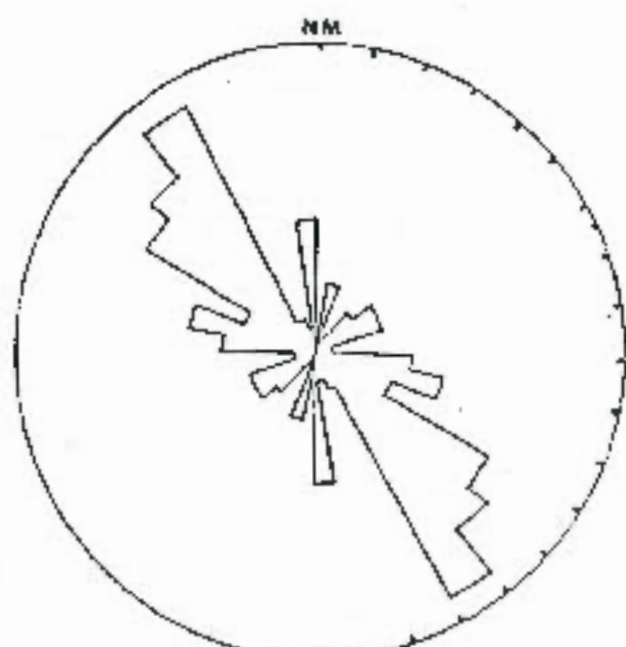


PHOTO - INTERPRETATION
ZONE DU GOUFFRE DE LA BAUME S^{TE} ANNE

. 7 - HISTOGRAMME DES DIRECTIONS
DE FRACTURES RELEVÉES SUR
PHOTOS AERIENNES.

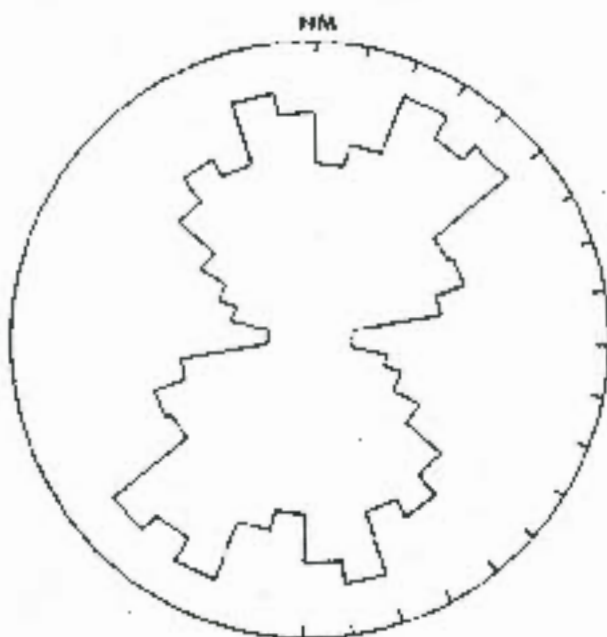


PHOTO - INTERPRETATION BASSIN DU VERNEAU

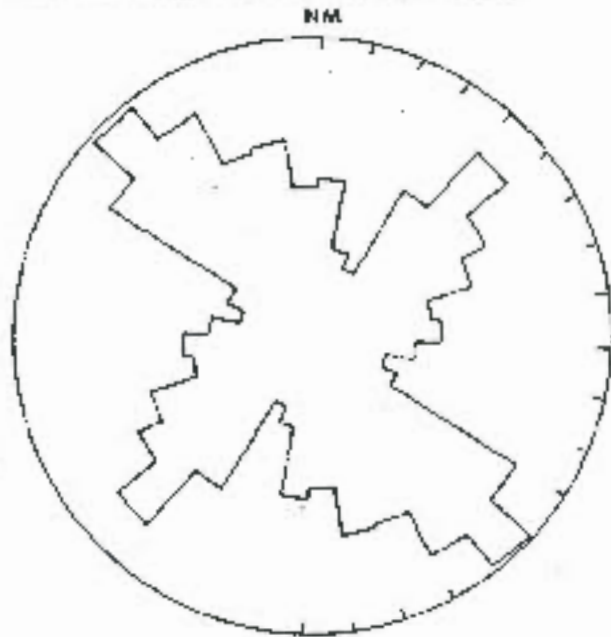


PHOTO - INTERPRETATION BASSIN DU LISON

CADRE HYDROGÉOLOGIQUE

HYDROLOGIE DE SURFACE

Bassin du Verneau (Fig. 3)

Sur les marnes du faisceau salinois, on observe des circulations aériennes au niveau des bassins liasiques ; cependant les ruisseaux se perdent rapidement au contact des calcaires tectonisés de la bordure du plateau d'Amancey.

Ce plateau est entaillé :

- à l'Ouest par la reculée du ruisseau d'Eternoz, affluent du Lison.

- au Nord par les reculées de Biétyard, et du Val d'une part, de Norvaux d'autre part, tributaires de la Leue.

- à l'Est, par la cluse du ruisseau des Oies, qui disparaît progressivement dans les calcaires du plateau.

Bassin du Lison (Fig. 3)

Sur le plateau de Champagnole, deux bassins fermés collectent les eaux vers les ruisseaux du Muy et de la Peculée, qui se perdent progressivement dans les calcaires dans la région de Dourron. Ces bassins fermés sont peu enfoncés dans la masse du plateau.

Les bassins du Verneau et du Lison présentent tous deux la particularité de posséder un impluvium marneux sur lequel se concentre une partie des précipitations, avant infiltration massive au niveau des pertes.

LES SOURCES

La source du Verneau

$x = 679,07$; $y = 226,34$; $z = 420$ m

Elle est située dans le village de Mans, et constitue le principal exutoire du système du Verneau. En étiage, l'eau sort d'une petite grotte située en contrebas de la source. Sur les bords de la petite reculée du Verneau, qui entaille les calcaires du Kiméridgien, prennent naissance quelques petits ruisseaux affluents du Verneau.

La source du Lison

$x = 679,54$; $y = 224,85$; $z = 382$ m

C'est un exutoire creusé dans les calcaires du Bajocien supérieur. Son débit en fait la deuxième résurgence de Franche-Comté.

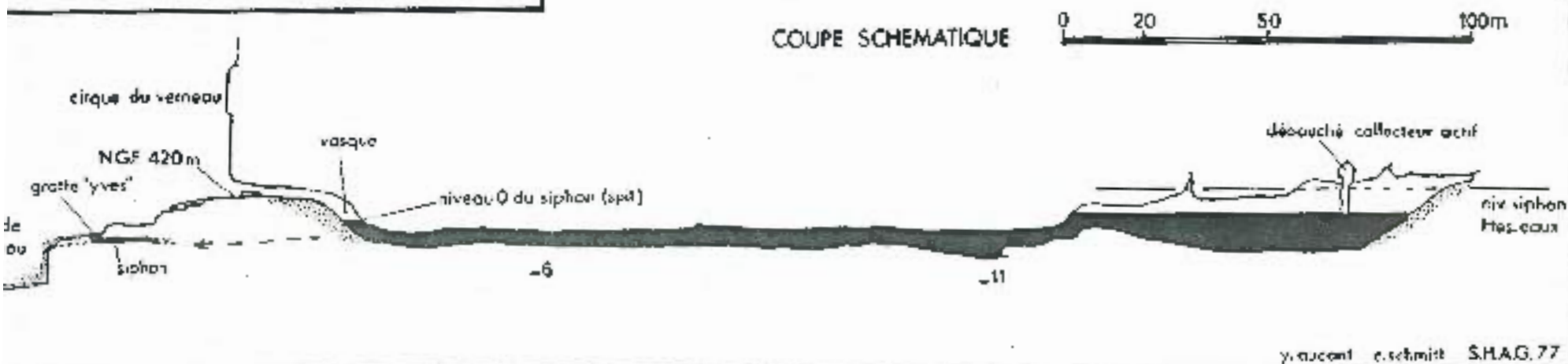
La grotte Sarrazine

$x = 879,29$; $y = 224,88$; $z = 400$ m

La source de la grotte Sarrazine située en rive gauche du Lison s'ouvre à la base d'un grand porche, dans les calcaires du Bajocien moyen. En étiage, l'exutoire se trouve dans les éboulis, vingt mètres en contrebas de la grotte. Cet exutoire, dont le débit est constant correspond à une perte située à l'intérieur de la grotte.

- Fig. 8 -

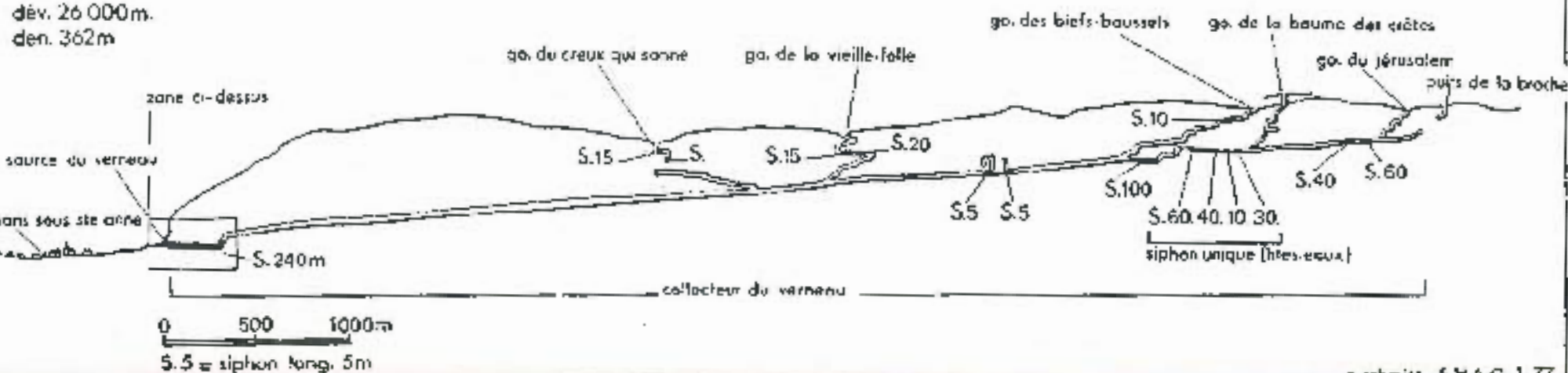
SOURCE DU VERNEAU Nans-sous-Ste-Anne, Doubs



RESEAU SOUTERRAIN DU VERNEAU

COUPE SCHEMATIQUE

dév. 26 000m.
den. 362m



LA KARSTIFICATION

FORMES DE SURFACE

Elles sont pratiquement inexistantes sur le bassin du Verneau, mis à part quelques gouffres-pertes et dolines au contact calcaires-marnes (perte de la Vieille Folle, du Jérusalem, du Bief Boussets, par exemple). Sur le reste du plateau, la végétation masque les éventuelles surfaces lapiazées.

Sur le bassin du Lison, les témoins de l'érosion karstique sont proportionnellement beaucoup plus nombreux. On distingue d'une part des zones fortement lapiazées localisées sur les calcaires du Jurassique moyen, d'autre part des gouffres et des pertes actifs situés au contact Callovien Oxfordien et qui collectent l'ensemble des ruisseaux de surface. (Creux de la Chaux d'Arc, entonnoirs de Fosse Ronde, perte de la Baraque).

LES RESEAUX SPELEOLOGIQUES

Le Verneau

. Historique .

Dès le début du siècle, E. FOURNIER avait entrepris l'exploration des principaux gouffres situés sur le plateau d'Asancey. Les galeries parcourues ne l'étaient pas au-delà des siphons, obstacles infranchissables à cette époque. Jusqu'en 1970, l'essentiel des explorations a été mené à bien par le groupe spéléologique solois. Depuis, utilisant de nouvelles techniques d'exploration, principalement la plongée souterraine, la Société Météromorphe des Amateurs de Gouffres (SHAG), porte le développement du réseau à environ vingt cinq kilomètres, pour une dénivellation de plus de quatre cent mètres. Seuls huit mille mètres environ de réseau sont visitables sans utiliser les techniques de plongée.

Le réseau du Verneau se compose d'un drain principal collectant de nombreux affluents. (cf. Fig. 8).

. Les affluents

Parmi ceux-ci on peut citer d'Est en Ouest :

- la perte de la ferme de la Broche, petit gouffre perte situé dans le Séquanien.

- le gouffre perte du Jérusalem, situé également dans le Séquanien, permet d'accéder à l'amont du collecteur.

- le gouffre de la Baume des Crêtes s'ouvre à la limite Séquanien - Kimméridgien. Jusqu'à la cote -130 m, les galeries sont fossiles, et présentent notamment des dépôts varvés sur un mètre d'épaisseur.

A partir de la cote -130 m, le gouffre devient actif, et rejoint le collecteur.

- le gouffre des Biefs Boussets s'ouvre dans le Séquanien, dans le même compartiment que le gouffre du Jérusalem et la perte de la ferme de la Broche. Il permet lui aussi d'accéder au collecteur.

- la perte des Trois Croix ; il s'agit d'une petite doline qui concentre des ruissellements sur le Séquanien. Elle est située dans le compartiment de la Baume des Crêtes.

S. Schmitt S.H.A.G. 1.77

S. 5 e siphon long. 5m

- la perte des égouts de Déservillers ; les égouts se perdent dans une ancienne carrière en limite Kimméridgien - Séquanien, sur le plateau.

- la perte de la Vieille Folle ; elle est située dans le Portlandien et draine un important bassin subsaérien sur le Lias.

- la perte du Creux qui Sonne, creusée comme la précédente, dans le Portlandien, collecte également des eaux ruisselant sur le Lias.

. Le drain principal

Il s'agit d'un axe drainant, de dimensions importantes, surmonté de tronçons fossiles. L'écoulement y est le plus souvent libre, à l'exception de quelques voûtes moullantes. Il se développe dans la gouttière synclinale jurassique supérieure, et peut localement passer sous le chevauchement du faisceau salinois. Il débute à l'amont du gouffre du Jérusalem, et se termine à la source du Verneau par un "siphon" de deux cent mètres, ce qui représente une distance de sept kilomètres à vol d'oiseau.

Le Verneau est un des plus importants réseaux mondiaux explorés derrière siphon.

Le Lison

Le stade actuel des explorations spéléologiques ne permet pas de déterminer la disposition du réseau en profondeur. Les principaux points pénétrables sont :

- le Gouffre de l'Aige des Baumes, constitué par un puits qui à -30 m rejoint une circulation. Son rattachement au réseau du Lison demeure pour l'instant hypothétique.

- le Gouffre des Cheneaux, situé dans la chaîne de l'Heute ; il recoupe un ruisseau souterrain à -40 m.

- la perte de la Baraque ; elle reçoit les eaux de ruissellement des marnes oxfordiennes au Nord de la forêt d'Arc. C'est la perte pénétrable la plus importante du plateau. Elle débute dans le Callovien, présente un développement de 1100 mètres et atteint une profondeur de 70 m.

- le Creux de Fosse Ronde ; c'est la perte extrême du ruisseau du Muy, développement 400 m, profondeur 65 m.

- le gouffre de la Baume-Ste-Arne ; important gouffre d'effondrement, s'ouvrant à la limite Rauracien - Séquanien et recoupant à -100 m une circulation d'eau.

- la perte des égouts de Gevresin s'ouvre dans le Jurassique supérieur. Il s'agit d'un puits en diacrase avec niveau d'eau.

En ce qui concerne les resurgences, les explorations spéléologiques restent également limitées :

- la grotte Sarrazine ; malgré un développement de 3500 m, la grotte ne s'enfonce que de 400 m en ligne droite à l'intérieur du plateau. Elle se termine sur un puits noyé plongé jusqu'à -30 m. Les galeries en interstrates s'étagent sur plusieurs niveaux reliés entre eux par de petits réseaux de diacrases.

- la source du Lison ; différentes plongées ont permis de découvrir une galerie principale longue d'environ 200 m avec point bas à -20 m, et une galerie latérale, parcourue sur 60 m, jusqu'à -12 m.

- le Creux Billard ; il s'agit d'un puits circulaire échancré au Nord-Est, entaillant de quatre vingt mètres le plateau de Jurassique moyen et dans lequel s'ouvrent :

. Deux grottes situées dans la paroi au Sud et à l'Est. Elles présentent une partie fossile recoupée par un drain actif. Dans la partie fossile, on observe des remplissages, qui dans la littérature ont été rattachés à des dépôts glaciaires (Y. MUCANT, J. FOLMETE, J.C. FRACHON, P. PETREQUIN, 1971).

- un puits noyé de 18 m de profondeur recoupant une galerie noyée en interstrate de 100 m avec un point bas à -22 m. (1)

LES DIRECTIONS DE KARSTIFICATION

Les analyses effectuées ont trait aux réseaux spéléologiques, connus au 1er Janvier 1978.

Les histogrammes directionnels sont établis pour les galeries horizontales ou subhorizontales, à partir des topographies réalisées par différents clubs spéléologiques, et de levés sommaires réalisés dans le cadre de ce mémoire.

Bien que la précision attendue ne soit pas inférieure à 20°, les histogrammes sont découpés en tranches de 10°, afin d'améliorer leur clarté.

Le principe (R. GUERIN, 1973) est de noter la direction et la longueur des portions rectilignes de galeries, la longueur totale de chaque classe angulaire étant exprimée en pourcentage de la longueur totale du réseau analysé.

Les histogrammes obtenus n'intègrent pas forcément l'ensemble des directions karstifiées des systèmes. En effet, peu de galeries ont été reconnues au Lison, et de toute façon, les microfissures karstifiées échappent à l'analyse.

Dans le cadre de cette étude, il n'a pas été possible d'analyser séparément les différents niveaux de galeries. Ce qui ne permet pas d'étudier la liaison entre l'enfoncement et les directions de karstification.

. Les résultats . (voir figure 9)

- Dans le cas du bassin du Verneau on note une nette prédominance de la direction N60 à 80.

- dans le cas du bassin du Lison, les histogrammes ont été établis à partir de portions accessibles plus limitées et plus dispersées.

On note cependant la présence constante des directions N0-10 et N30-50, avec l'apparition locale de la direction N90-100 aux gouffres de Fosse Ronde, Baume Ste Anne et à la grotte Sarrazine.

RELATIONS ENTRE LA KARSTIFICATION, LES DONNÉES STRUCTURALES, ET LA FRACTURATION

Le principe de la méthode étant la comparaison entre des directions structurales et des directions karstiques, le matériel utilisé sera d'une part des histogrammes "tectoniques" ayant trait à des longueurs de fractures mesurées sur photos aériennes et d'autre part des histogrammes "karstiques" ayant trait à des longueurs de galeries. Ces histogrammes permettent une bonne comparaison entre direction de fracturation et direction de galeries karstiques, puisqu'étant calculés tous les deux en pourcentages par rapport à des longueurs. Les réserves faites à propos de la représentativité de la fracturation d'après photos aériennes, limitent la portée des conclusions que l'on peut tirer de cette comparaison.

(1) La relation de ce puits avec la Source du Lison, a été établie lors d'un accident survenu en 1889 : on a en effet retrouvé à la source du Lison le corps d'une jeune fille tombée dans le puits.

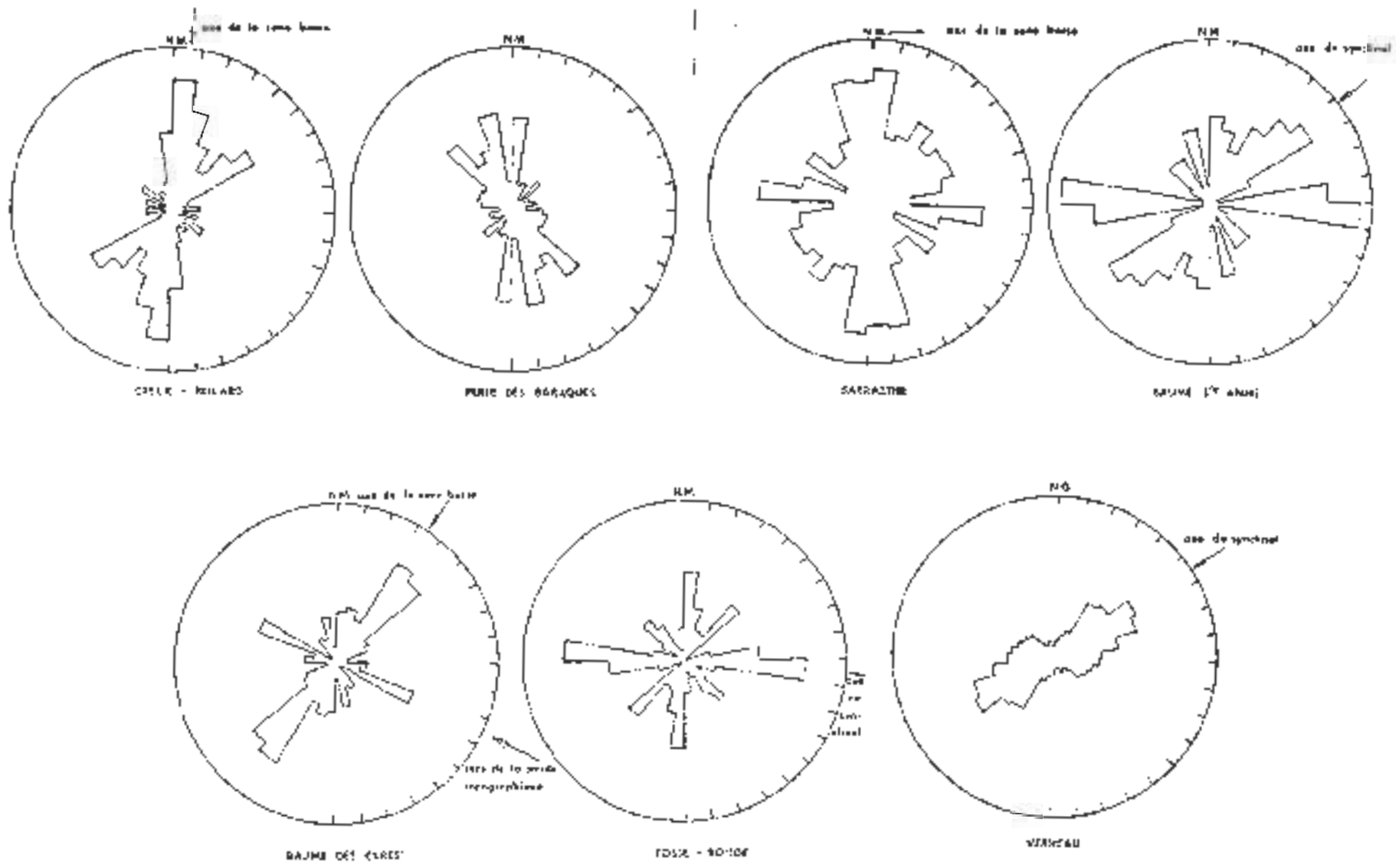


Fig. 9 - HISTOGRAMME DES DIRECTIONS DE GALERIES KARSTIQUES.

Le Verneau

L'ensemble de la karstification du Verneau a été très nettement induite par l'abaissement axial de la gouttière synclinale, en effet les pertes les plus en amont se développent au sommet de l'axe du pli, la résurgence étant située sur le point structural le plus bas.

Ces faits semblent confirmés par la concordance entre la direction de l'axe du synclinal (N70) et le maximum directionnel des galeries (N50-70).

La comparaison des histogrammes fracturation - karstification montre l'indépendance des directions de galeries vis à vis des maxima de fracturation. Il est possible que l'importance des fractures d'orientation N70, parallèles à l'axe du pli, ait été sous-estimée, ce qui expliquerait leur faible représentation sur la rosace. En effet, la position du Lias chevauchant le cœur du synclinal masque peut être en partie les fractures longitudinales. Il n'en demeure pas moins que les directions perpendiculaires et subperpendiculaires à l'axe du synclinal, bien observées sur photos aériennes semblent n'avoir été que peu utilisées par les circulations d'eau.

Le Lison

Contrairement au bassin du Verneau, le bassin du Lison présente une structure complexe. Il est découpé en bandes effondrées et plissées, séparées par des failles normales subparallèles. De plus, les informations relatives aux réseaux spéléologiques sont fragmentaires. En effet il n'existe pas de liaison spatiale connue entre les différentes pertes situées sur le plateau d'une part, entre ces pertes et les résurgences d'autre part. Ces faits ne vont pas faciliter la comparaison entre les données structurales, la fracturation et les galeries karstiques.

Les histogrammes de direction de galeries présentent tous un maximum à N00-10, exception faite de la Faume des Curés, et de la Baume Ste-Anne seules cavités importantes situées dans le Jurassique supérieur. Ce maximum (N00-10) n'apparaît pas sur les histogrammes de fracturation où la direction N125, peu employée par les galeries karstiques, semble privilégiée.

Il est intéressant de constater que ces deux directions majeures (N00 et N125) sont classiquement considérées comme les deux principales directions de raccourcissement dans le Jura (J.P. SOPENA et J.P. SOULAS, 1973).

CONCLUSION

La karstification dans les deux systèmes semble avoir été favorisée par :

- la concentration des eaux en surface, sur les terrains imperméables.
- l'ouverture de certaines fractures.
- la structure : un abaissement axial très marqué au Verneau, des petits compartiments effondrés à points bas structuraux sur le bassin du Lison.

La karstification dans le cas du Verneau a été principalement guidée par la structure, au détriment des maxima de fracturation.

Dans le cas du Lison, la conjugaison des effets de la direction de fracturation N00, liée aux contraintes tectoniques et des abaisséments axiaux rend l'interprétation plus délicate.

Le cas de la Sarrazine illustre bien l'influence de la fracturation et de la structure sur la karstification. En effet, la dispersion des directions de galeries mise en évidence et la morphologie des conduits observés sur le terrain, montrent que la karstification résulte d'un creusement en zone noyée proche de l'exutoire, donc à gradient hydraulique faible. Malgré la dispersion, la direction N00 est bien marquée sur l'histogramme.

D'autre part, il est probable que l'évolution quaternaire de la région ait eu une influence importante sur l'état actuel des systèmes du Lison et du Verneau.

En effet dans certaines cavités, des sédiments varvés et même des éléments morainiques plus ou moins remaniés semblent être des témoins de phase de dépôt. De plus, des sondages dans la vallée du Lison, au niveau de Nans-sous-Ste-Anne ont mis en évidence un surcreusement glaciaire (C. BERTHOIER, J. MAILLOT, J. MARTIN, 1970).

Ces variations du niveau de base ont dû conditionner l'évolution locale de la karstification.

LES TRACAGES (cf. Fig. 10 et Tabl. I)

LE BASSIN DU VERNEAU

Dès 1910, E. FOURNIER avait émis l'hypothèse d'une communication entre les différentes pertes du plateau et la résurgence du Verneau. Il n'avait cependant effectué aucune coloration.

A partir de 1970-1971, parallèlement aux explorations spéléologiques, plusieurs tracages vont être effectués sur le plateau :

- En Janvier 1970, une coloration est réalisée à la perte de la Vieille Folle par le groupe spéléologique SHAG (cf. Fig. 11). La vitesse apparente de circulation observée lors de cette expérience est de 330 m/h, ce qui met en évidence une zone de drainage importante entre la perte et la résurgence du Verneau. Cette hypothèse est actuellement vérifiée par l'exploration spéléologique d'une vaste galerie. (n°1, Fig. 10).

- En Mars 1970, une coloration est effectuée par le groupe spéléologique Maurice RAVEL dans les pertes du ruisseau des Maïs. Le colorant, détecté à la source du Bief Poutot, à Lods, se propage dans ce cas également très rapidement. Cette expérience permet de situer la zone de divergence entre les bassins d'alimentation de la source du Bief Poutot vers l'Est et du Verneau vers l'Ouest (n°2, Fig. 10).

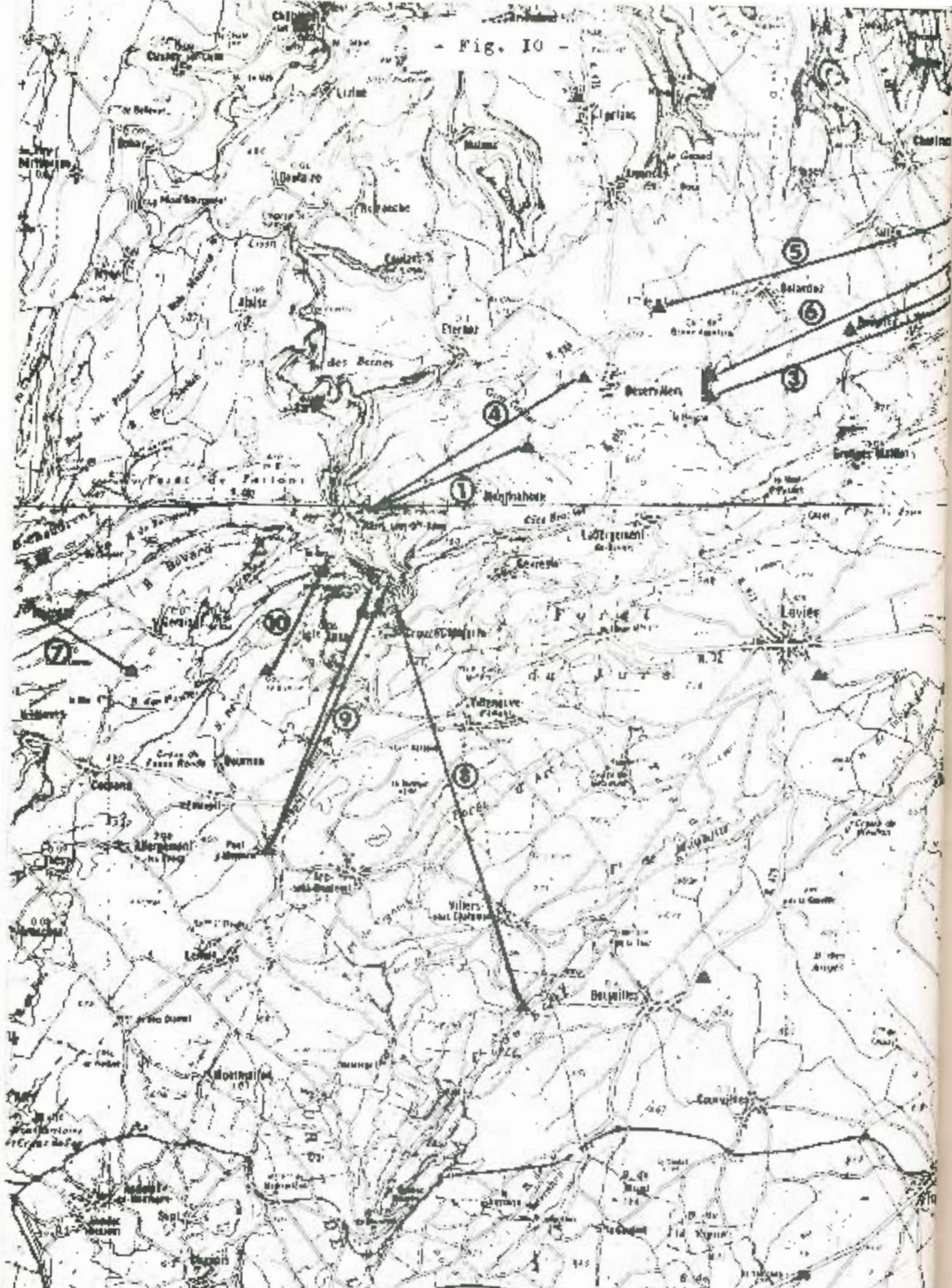
- En Février 1971, les groupes spéléologiques SHAG, GSD et le SRAE marquent le ruisseau des Oies mais ne peuvent observer de réapparition du colorant. Renouvelée en 1977 par le SRAE et le Laboratoire de Géologie, avec une quantité plus importante de colorant, cette expérience met en évidence la liaison de la perte aval du ruisseau des Oies et de la source du Bief Poutot et rapproche de la perte de la ferme de la Froche la limite orientale du bassin du Verneau. (n°3, Fig. 10).

- En Octobre 1976, une coloration effectuée par le Laboratoire de Géologie et le SRAE, dans la perte des égouts de Déservillers, réapparaît à la résurgence du Verneau et aux sources situées à proximité. (n°4,

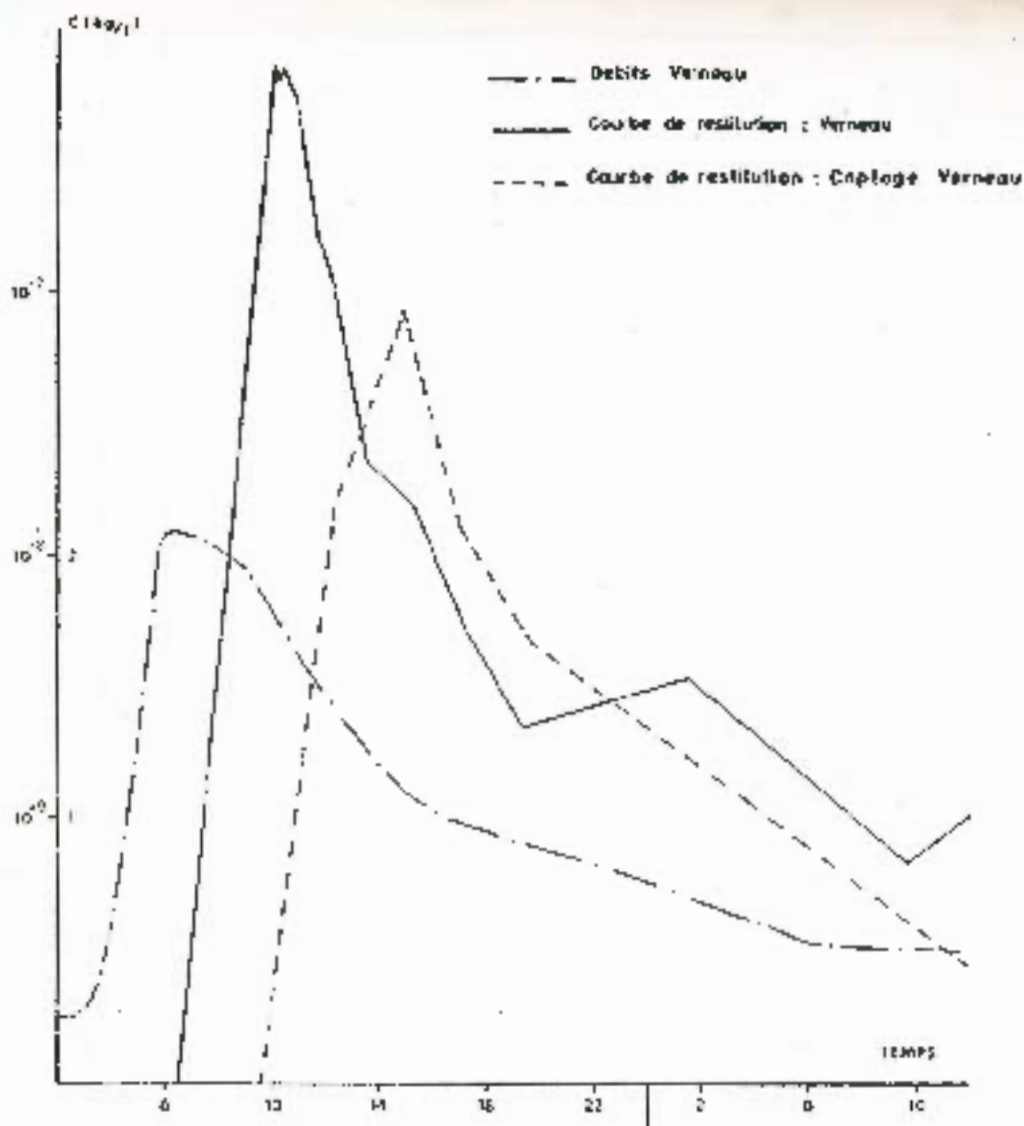
N°	Année	Auteur	I N J E C T I O N					R E A P P A R I T I O N										
			Lieu	Colorant	Quantité	Débit	Date	Heure	Lieu	Date et Heure		Débit	Remarques	Temps	Distance	Qcvté.	Référence	
1	1961	E. FOJAZIER	Gouffre du Gros Gécob	Fluorescéine	1,5 ug	100 l/s	26/5		Epeurines de Saigney	28/5			visible nuit nu	48h	4,5 km		52 m/h	FOJAZIER
2	1967	E. FOJAZIER	Gouffre de la Sca de la Roche (M.iers S. Dalmont)	Fluorescéine	1 ug		24/1	17h	Sac de Lison	27/1 matin			visible nuit nu	70h	8,9 km		130 m/h	FOJAZIER
3	1970	S.R.A.E. S.A.A.G.	Parte de la Vallée Folle	Fluorescéine	1 ug	Crue	20/1	23h	Sac de Yvernes	21/1 08:30	1/2 12h	2,8 m ³ /s	visible nuit nu	3h30	3 km	265 m	230 m/h	Spe (L)
4	1975	G.S. Huchet Anst. - SRAE Franck-Castel	Ruisseau des Mûts	Fluorescéine	1 ug	Passes Eau.	21/5	17h	Sac de Bief Puyot	22/5			Eau + Fluocapteur (Fluorimètre)	30h	9,5 km		217 m/h	Spe (L)
	1971	S.R.A.E. - G.S.O. - SRAE	Ruisseau des Dics	Fluorescéine	1 ug	30-40 l/s	25/5	16h30										Spe (L)
4	1978	S.R.A.E. Labo. Géologie	Égouts de Réviersillers	Fluorescéine	1 ug	10 l/s	12/10	10h30	Sac Lembeau + Sac (capot) d'Or. Vertebou	21/10 nuit 21.10 matin	2/11 2/11		visible nuit nu	277	5,8 km		21	TRC (L)
													visible nuit nu	109	5,9 km		26	TRC (L)
5	1977	S.R.A.E. Labo. Géologie	Maisons des Dics	Fluorescéine	5 ug	25 l/s	7/5	15h	Sac de Bief Puyot	avant 18 15.5			Fluocapteurs					TRC (L)
	1977	S.R.A.E. Labo. Géologie	Maisons des Dics	Fluorescéine	10 ug	Étiage	26/9	10h					Eau + Fluocapteurs (Spectrofluorimètre)					TRC (L)
10	1977	S.R.A.E. Labo. Géologie	Gouffre de la Baume Ste Anne	Rhodamine B	2 ug	Étiage 10-20 l/s	28/9	15h	Sac de Lapt			80 l/s	Eau + Fluocapteurs (Spectrofluorimètre)					TRC (L)
5		S.R.A.E.	Parte de Pont à Moujère (Passage du Lancy)	Fluorescéine	1 ug				Sac de Lison Sac de la Sca - Roche				Eau + Fluocapteurs (Fluorimètre)	21h 24h			250 m/h 285 m/h	
5	1978	S.R.A.E. S.R.A.E.	Parte des Granges de la Forêt	Fluorescéine	5 ug	2 l/s	26/1	12h	Sac de 1 Gros Sac de Lison	nuit du 27 au 28/1		Crue	Fluocapteurs	60h	12,6 km	250 m	185 m/h	S.N.
5	1978	S.R.A.E. S.R.A.E.	Gouffre fossile en Roches	Fluorescéine	5 ug	4 l/s	26/2	25h	Sac de Bief Puyot	nuit du 26/2 au 1/3	2/3 15h	Crue	Fluocapteurs	60h	12,5 km	200 m	180 m/h	S.N.
	1978	Labo. Géologie	Parte des égouts de Lancy	Fluorescéine	5 ug	10 l/s	15/5	11h					Fluocapteurs					TRC (L)

Les numéros de référence correspondent aux numéros de la figure 10

TABL. I - BILAN DES COLORATIONS ENTREPRISES SUR LE SECTEUR ETUDIÉ

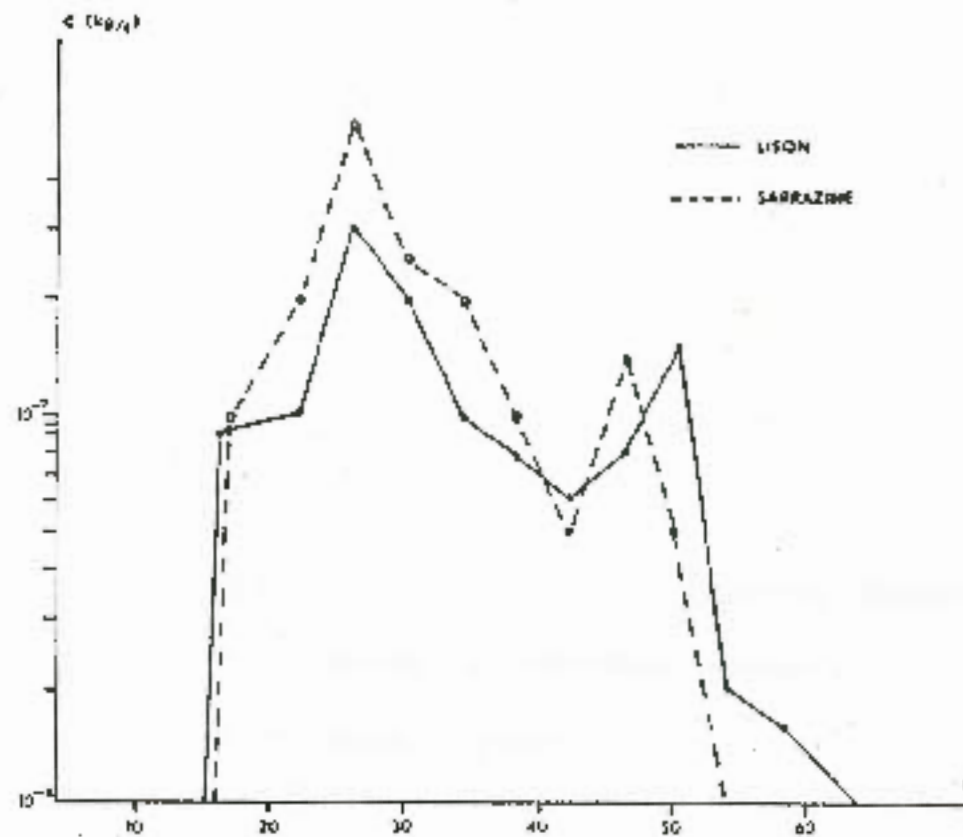


CARTE DES TRACAGES



31 janvier 1970

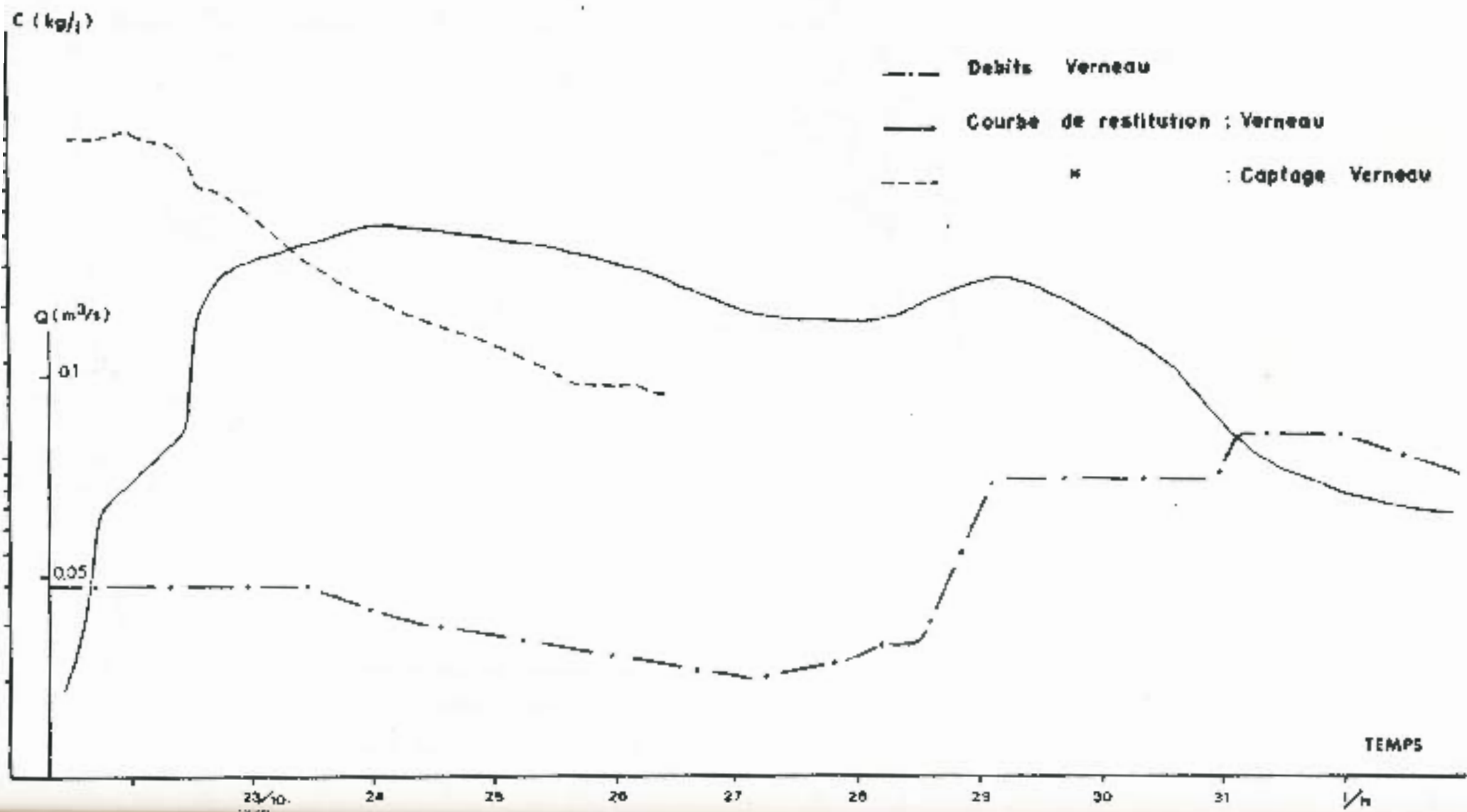
a - COLORATION PERTE DE LA VIEILLE FOLLE



b - COLORATION PERTES DE PONT-A-MOUJARD

Fig. 11 - COURBES DE RESTITUTION

Fig. 12 - COURBE DE RESTITUTION - COLORATION DES EGOUTS DE DESERVILLERS (1976)



La vitesse relativement faible (21-26 m/n), de passage du colorant, peut être imputée à l'état du système, en étiage au moment de l'expérience et au temps mis pour rejoindre le drain principal. (cf. Fig. 12).

- Fin 1977, début 1978, deux traçages ont été effectués par le groupe spéléologique SHAG, à la perte des Granges de la Forêt d'une part, et au niveau du ruisseau des Oies, dans un petit gouffre situé à côté du lit du ruisseau d'autre part. La réapparition du traceur à la source de la Grande Baume à Lods, dans la vallée de la Loue, permet d'affiner la limite orientale du bassin du Verneau. (n°5 et 6, Fig. 10).

LE BASSIN DU LISON

La plus ancienne coloration répertoriée, effectuée sur le plateau remonte au mois de Mai 1901, c'est à cette époque que E. FOURNIER a établi la relation entre le gouffre perte du Gros Gâteau et les fontaines de Saizenay. (n°7, Fig. 10).

- En Janvier 1927, E. FOURNIER injecte de la fluorescéine en aval du captage de la source de la Roche, et observe sa réapparition à la source du Lison. D'après E. FOURNIER, la coloration de la source du Lison aurait été visible à l'oeil nu après un parcours apparent de 9 km. Il conviendrait de reprendre cette expérience afin de la confirmer, et d'étudier en détail la réapparition aux sources du Lison et de la Sarrazine. (n°8, Fig. 10).

- En 1969 et 1970, le SPAE et le Groupe Spéléologique du Doubs colorent le ruisseau du Mny, en amont de la zone de pertes. Le colorant a été décelé aux sources du Lison puis trois heures plus tard à la grotte Sarrazine. On peut noter que les concentrations observées ont été plus élevées à la Sarrazine qu'au Lison, la vitesse apparente de circulation était rapide, puisque de l'ordre de 250 à 200 m/h. (cf. Fig. 11), (n°9, Fig. 10).

- Un traçage effectué en 1977, à la Baume-Ste-Anne (n°10, Fig. 10) à l'aide de Rhodamine B, semblait établir la liaison entre le gouffre et la source du Gyps. La détection de teneurs faibles de Rhodamine B (10^{-10} kg/l) étant délicate, il conviendrait de reprendre cet essai à l'aide de fluorescéine.

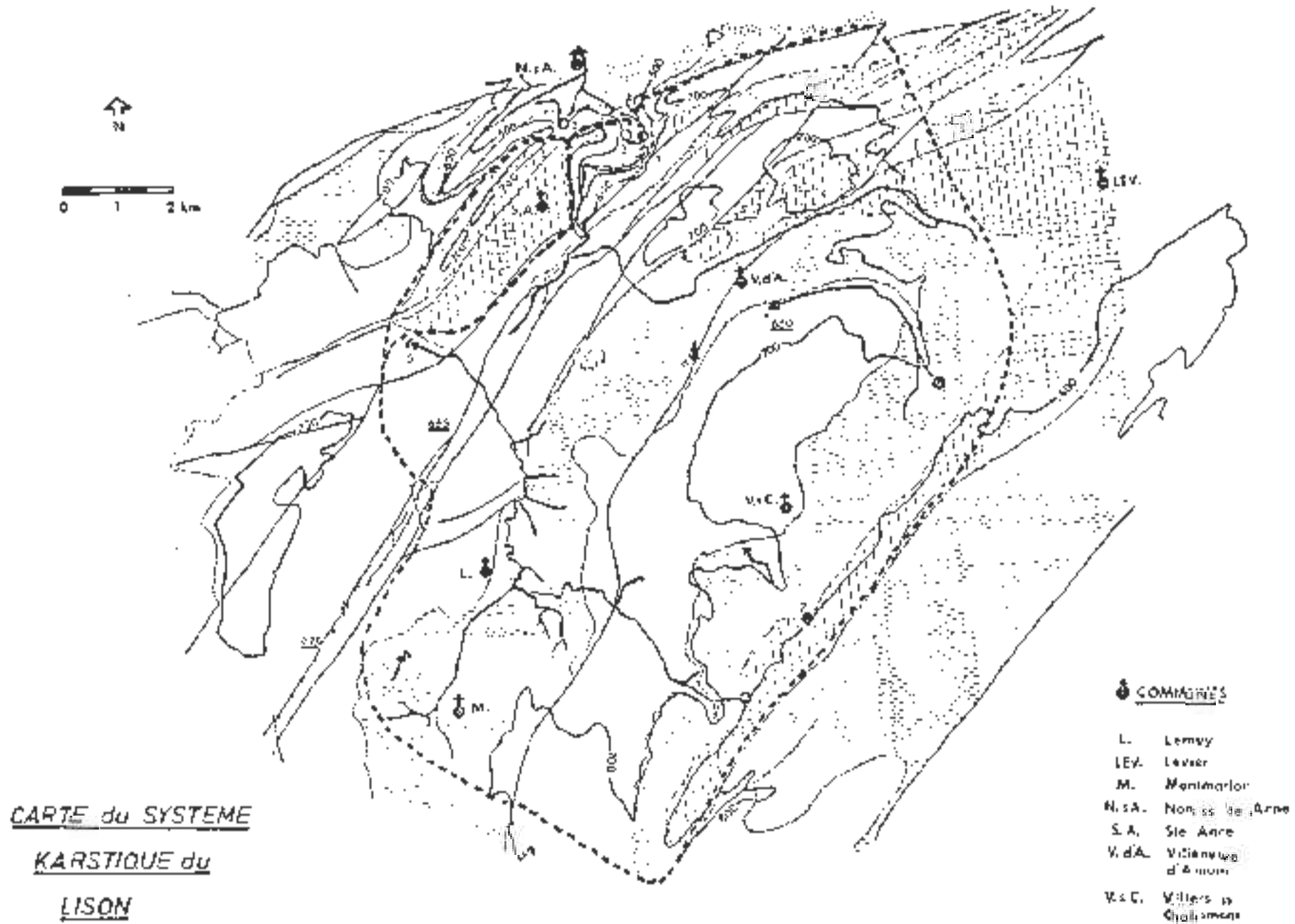
- Un traçage effectué en Septembre 1977, à la perte du ruisseau de Boujailles s'est révélé négatif, malgré la quantité importante de colorant utilisée (10 kg de fluorescéine).

Les sources surveillées sont les suivantes :

. source de la Loue (x = 901,15 ; y = 231,05 ; z = 535 m), source du Lison (x = 879,07 ; y = 226,34 ; z = 420 m), Fontaine Noire (x = 877,42 ; y = 208,55 ; z = 650 m), sources des Nans (x = 870,32 ; y = 201,67 ; z = 720m), sources de la Doye (x = 876,05 ; y = 212 ; z = 640 m), source du Rocher de Ravonet (x = 884,84 ; y = 220,59 ; z = 735 m), source de la Roche (x = 882,44 ; y = 216,26 ; z = 760 m).

- Un dernier traçage effectué en Mai 1978 à la perte des égouts de Levier s'est également révélé négatif (les sources surveillées étant les mêmes que précédemment).

Les premières constatations tirées de ces données qui seront ensuite confrontées aux résultats de l'hydrodynamique et de l'hydrochimie, permettent de supposer l'indépendance des sources du Lison et du Verneau, aucune coloration n'étant réapparue simultanément aux deux exutoires. Elles mettent aussi en évidence un axe de circulation rapide au Verneau. Par contre elles n'ont toujours pas apporté d'indication sur le drainage des eaux qui se perdent dans la région de Levier et celle de Boujailles.



LEGENDE



Calcaires du Jurassique supérieur



Marnes de l'Argovo Oxfordien



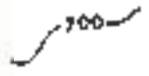
Calcaires du Jurassique moyen



Marnes liasiques



Failles



Courbe de niveau



Points cotés



Sources



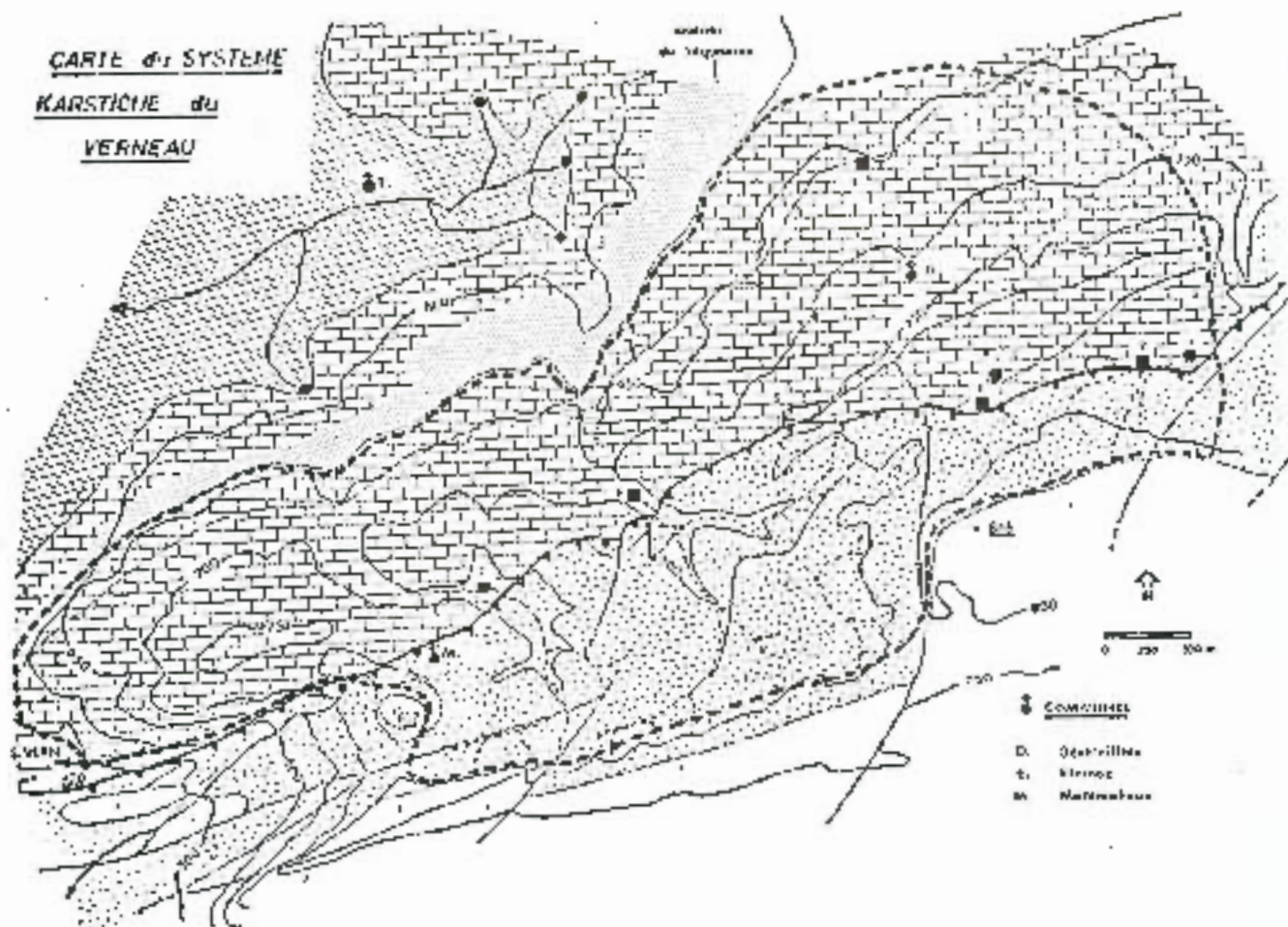
Pertes

1. Source du Lison
2. Source de la Sarrazine
3. Source du Gyps
4. Perte du Creux Billard
5. Perte de Fosse Ronde
6. Perte de la Baraque
7. Source de la Roche (Baume des Durés)



Limites du bassin versant utilisé

CARTE du SYSTEME
KARSTIQUE du
VERNEAU



LEGENDE

LITHOLOGIE



Calcaires du Jurassique supérieur



Marnes ou Séquites



Marnes de l'Argovc-Oxfordien



Calcaires de Jurassique moyen



Marnes du Lias



Chevauchement du Lias sur le Jurassique supérieur



Failles



Courbe de niveau



Point cotés



Cours d'eau permanents



Cours d'eau temporaires



Sources

Principales grottes et pertes

- 1 Entrée de la Jusse de la Broche
- 2 Grotte-perte du Jérusalem
- 3 Entrée de la Laine des Carrières
- 4 Grotte-perte des Dieux Amoureux
- 5 Entrée des Égouts de Désertiers
- 6 Perte de la Vieille Toile
- 7 Perte du Creux du Soin



Lignes du bassin versant utilisé

LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS

ESSAI DE DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS

Dans le cas du bassin du Lison, les colorations disponibles et le contexte géologique, ne permettent pas de délimiter exactement le bassin versant. Seules les limites N et SW ont pu être tracées avec précision. (cf. Fig. 13).

Dans le cas du bassin du Verneau, la limite S a été tracée en fonction des limites de bassins versants aériens sur le compartiment liasique chevauchant. La limite est a été fixée à partir des résultats des colorations effectuées au niveau du ruisseau des Oies et de la perte des Granges de la Forêt. La limite nord résulte de considérations géologiques : présence du niveau marneux du Séquanien moyen, sur la bordure du plateau, et hydrologiques : difficulté de déplacer cette limite vers le Nord sans empiéter sur les sources d'Eternoz. Les éléments disponibles permettent ici une meilleure approche du bassin. (cf. Fig. 14).

Le bassin du Verneau ainsi délimité a une superficie de 13,9 km², celui qui a été tracé pour le Lison, en première approximation, couvre 104,5 km².

COURBE HYPSONÉTRIQUE - COEFFICIENT DE COMPACTITÉ

Seul le bassin du Verneau, bien délimité, permet une étude des paramètres de forme.

Courbe hypsonétrique (cf. Fig. 15)

Elle exprime les surfaces comprises entre les courbes de niveau et la limite supérieure du bassin versant. En exprimant les surfaces en pourcentage de la surface totale, et les hauteurs en pourcentage de la dénivellation, on obtient la courbe hypsonétrique réduite, inscrite dans un carré ; celle-ci permet de calculer l'intégrale hypsonétrique $\int_0^1 x dy$ qui représente le rapport de la surface comprise entre la courbe et les axes de référence, et de la surface du carré dans lequel la courbe est inscrite.

Elle permet le calcul de la hauteur moyenne du bassin versant (A.M. STRAHLER, 1952) :

$$\bar{h} = h \cdot \int_0^1 x dy = \frac{v}{s} \quad \text{si} \quad v = h \cdot s \int_0^1 x dy$$

avec h = hauteur du bassin versant

\bar{h} = hauteur moyenne

v = volume du relief

s = surface du bassin versant

Pour le système du Verneau :

altitude la plus élevée : 804 m

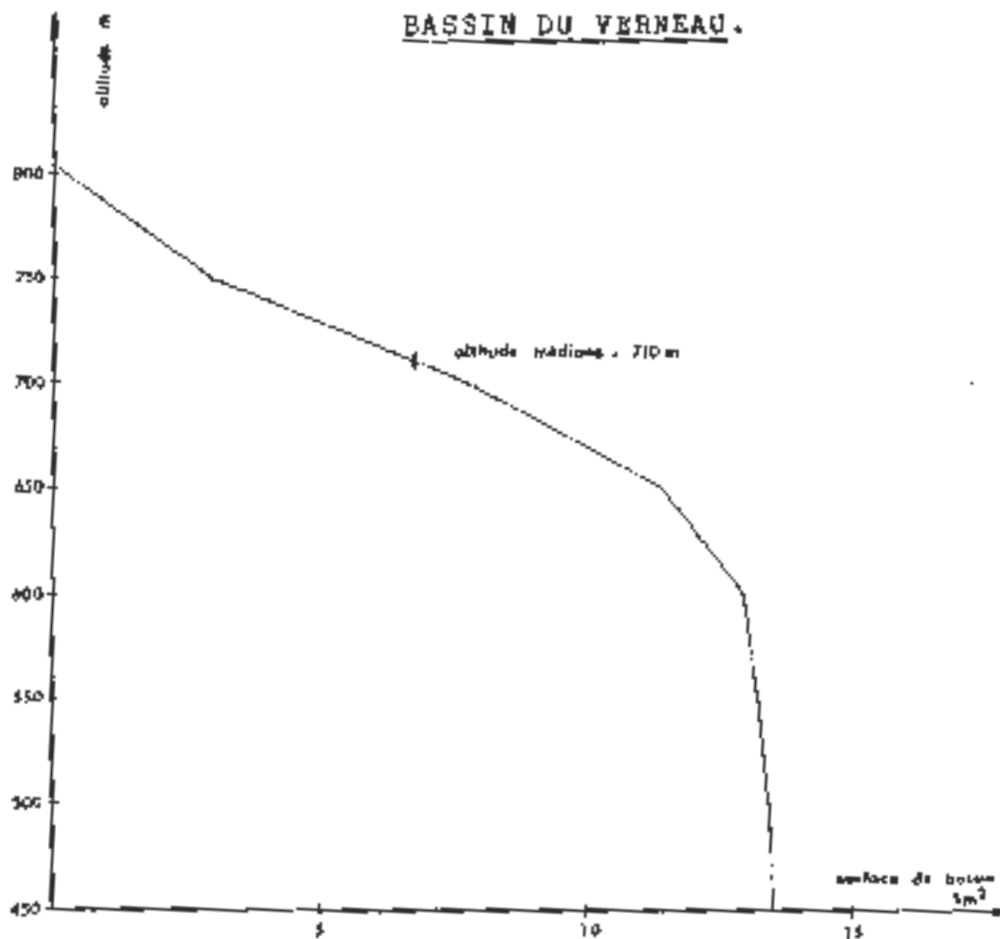
altitude la moins élevée : 420 m

$$S = 13,9 \text{ km}^2$$

$$\int_0^1 x dy = 0,714$$

altitude moyenne : 694 m
altitude médiane : 710 m

Fig. 15 - COURBE HYPSONOMETRIQUE
BASSIN DU VERNEAU.



Indice de compacité

également appelé "coefficient de compacité de Gravelius".

Cet indice définit la forme du bassin versant en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface (M. ROCHE, 1963). Plus le bassin est ramassé plus l'indice est proche de 1.

$$KC = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

avec

A = surface du bassin
soit 13,9 km²

P = périmètre du bassin
soit 18,5 km

pour le Verneau cet indice de compacité est égal à

CONCLUSION :

CARACTERISATION DES BASSINS DU VERNEAU ET DU LISON

Ainsi définis les bassins du Verneau et du Lison présentent chacun leur originalité.

Tous deux possèdent une aire d'alimentation superficielle, mais pour l'un (le Verneau) le drainage superficiel se fait sur les marnes du Lias, tandis que pour le second (le Lison) le drainage se fait sur les marnes de l'Oxfordien. Il en est de même pour le réseau karstique qui s'est développé pour le premier dans les calcaires du Jurassique supérieur et pour le second dans ceux du Jurassique moyen.

La karstification est aussi différente d'un réseau à l'autre. Dans celui du Verneau les galeries sont vastes et ont pu être reconnues in situ, la géométrie de ce réseau est relativement bien connue. On peut se rendre compte de l'importance du réseau de drains actifs et fossiles et affirmer leur rôle primordial dans les circulations. Pour ce qui est du Lison la structure interne du karst est moins connue, des galeries importantes existent aussi mais il ne semble pas, si l'on tient compte des données de la structure et des colorations du réseau, aussi simple que dans celui du Verneau.

Dans le réseau du Verneau les conditions structurales bien différenciées semblent être à l'origine d'un haut niveau de hiérarchisation karstique, tandis que dans celui du Lison l'évolution semble plus complexe et tenir compte de plusieurs facteurs. Dans l'un et l'autre cas, le point bas constitué par la dépression morphologique de Nans-sous-Ste-Anne a conditionné l'établissement du niveau de base des deux résurgences.

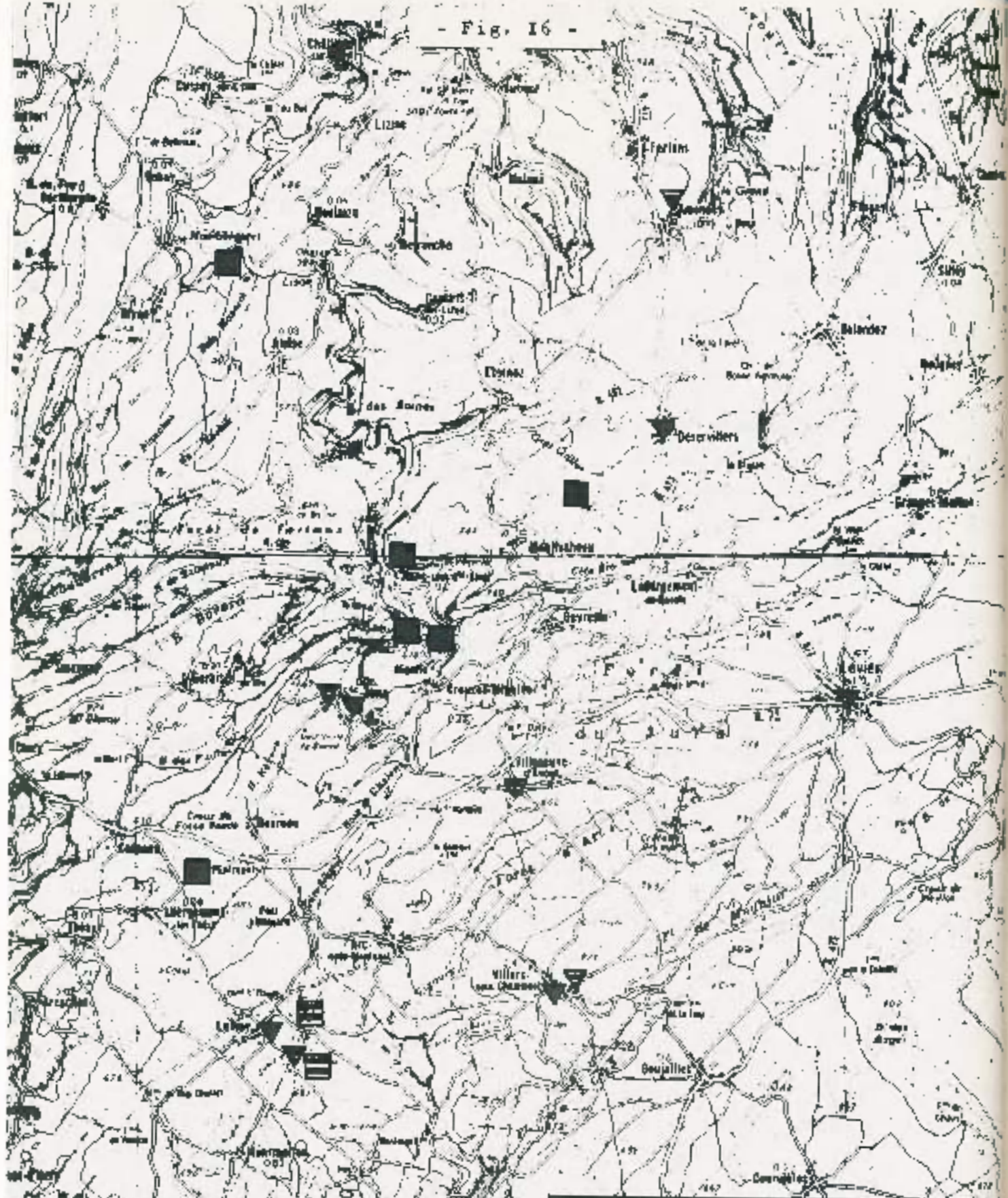
D E U X I E M E P A R T I E

AMÉNAGEMENT DU BASSIN
CLIMATOLOGIE
HYDROMETRIE

DONNÉES CLIMATOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES
LES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES
EVALUATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION
LES DONNÉES HYDROLOGIQUES

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS
RELATIONS EXISTANT ENTRE LES STATIONS ET CORRELATIONS
ETUDE DES DEBITS CLASSES
COURBES DE DECRUE ET TARISSEMENT
LES BILANS

CONCLUSION



IMPLANTATION DU RESEAU DE MESURES

-  limnigraphe
-  échelle limnimétrique
-  pluviographe

AMÉNAGEMENT DU BASSIN (cf Fig. 16)

CLIMATOLOGIE

Réseau préexistant

Nous avons pu utiliser les données de 3 stations appartenant à la Météorologie Nationale : Amancey, Levier, Villeneuve d'Amont.

- La station d'Amancey (Alt. 580 m)

Située au Nord, et en dehors du bassin du Verneau, elle est équipée d'un pluviomètre de 400 cm² relevé quotidiennement, et d'un thermomètre à maxima et minima placé dans un abri standard.

- La station de Levier (Alt. 720 m)

Cette station est située dans une zone que les tracés disponibles n'ont pas permis de rattacher au Lison, à la Loue ou à l'Anguillon.

Elle est également équipée d'un pluviomètre de 400 cm² relevé tous les jours, et d'un thermomètre à maxima et minima. Il est possible que la présence des bâtiments entourant la station ait une influence sur les résultats fournis.

- La station de Villeneuve d'Amont (Alt. 600 m)

Cette station est située dans la partie centrale du bassin du Lison tel que nous l'avons provisoirement défini dans la première partie. Elle n'est équipée que d'un pluviomètre relevé tous les jours.

Stations installées dans le cadre de cette étude

Quatre stations installées en collaboration avec le Service Régional d'Aménagement des EAUX (S.R.A.E.) sont venues compléter le réseau préexistant.

- La station de Déservillers

(x = 601,9 ; y = 229 ; z = 705 m)

Un pluviographe hebdomadaire Philotechnica (2000 cm²) à augets basculants a été installé sur le réservoir d'eau du village.

Cette station est située au pied des reliefs du faisceau salinois, dominant le plateau d'Amancey.

Par suite de l'absence d'observateur, le fonctionnement de cette station a été très épisodique.

- La station de Sainte-Anne

(x = 877,6 ; y = 223,5 ; z = 630 m)

Un pluviographe Précis Mécanique (2000 cm²) à augets basculants et un pluviomètre relevé quotidiennement ont été installés depuis Septembre 1976. Le pluviographe n'a fonctionné que jusqu'en Mars 1977. Cette station est située dans une légère dépression à la limite ouest du bassin du Lison.

- La station de Lemuy

(x = 876,6 ; y = 117,5 ; z = 639 m)

Cette station est dotée d'un pluviomètre (400 cm²) relevé quotidiennement, et d'un pluviographe Précis Mécanique à augets basculants de 2000 cm².

Elle est située dans la partie méridionale du bassin du Lison. L'irrégularité de l'observateur nous fera examiner d'un oeil critique les résultats fournis par cette station.

La station est en service depuis Septembre 1976, le pluviographe n'ayant fourni des résultats que jusqu'en Mars 1977.

- La station de Villers-sous-Chalamont

(x = 882,3 ; y = 218,2 ; z = 700 m)

Un pluviomètre (400 cm²) relevé quotidiennement, et un pluviographe Philotechnica à augets basculants (2000 cm²), ont été installés dans Villers-sous-Chalamont, au Sud-Est du bassin du Lison, en bordure du relief de la Forêt de Scay.

Les données pluviométriques quotidiennes et pluviographiques hebdomadaires sont disponibles depuis Septembre 1976.

A l'exception de Villers-sous-Chalamont, aucune station pluviographique n'est équipée d'enceinte chauffante. En ce qui concerne les pluviomètres, lors des chutes de neige, la quantité d'eau équivalente est obtenue par réchauffement dans la maison de l'observateur.

HYDROMETRIE

Le réseau S.R.A.E. préexistant

Dans le cadre de cette étude, deux stations de base du S.R.A.E. ont pu être utilisées.

- La station de Myon

(x = 875,05 ; y = 232,05 ; z = 322 m)

Installée en 1968 sur le Lison, son bassin versant regroupe les sources karstiques du Lison, de la Sarrazine, et du Verneau, mais aussi la résurgence du Gypse, ainsi que plusieurs ruisseaux alimentés par de petites sources et des écoulements superficiels (ruisseau d'Eternoz, ruisseau de Vau ... etc).

Cette station est équipée depuis 1968, d'un limnigraphe OTT XX, à réduction de 1/10ème, et vitesse d'avancement de 4 mm/h. Le seuil naturel est constitué de dalles calcaires recouvertes de cailloutis.

- La station du Verneau à Nans-sous-Ste-Anne

(x = 878,7 ; y = 226,3 ; z = 370 m)

Installée depuis 1969, pour l'étude hydrologique de la retenue collinaire de Nans. En amont de la station, le ruisseau du Verneau reçoit un certain nombre de sources :

. en rive droite : une source incrustante qui semble ne dépendre que d'un aquifère perché dans le Jurassique supérieur. Une expérience de coloration effectuée dans la porte d'un ruisseau au-dessus du cirque du Verneau, et à 400 m de la source incrustante, n'a marqué que celle-ci, sans atteindre les sources voisines.

. en rive gauche : trois petites sources qui dépendent plus ou moins directement de la source du Verneau.

Cette station est équipée depuis 1970 d'un limnigraphe OTT XX à réduction de 1/10ème, et vitesse d'avancement de 4 mm/h. Le seuil naturel est constitué par des cailloutis et des blocs.

On peut également signaler la présence de deux échelles limnimétriques sur les ruisseaux superficiels du Muy et des Jongs.

Les nouvelles stations

- La station du Lison - source

(x = 879,55 ; y = 224,83 ; z = 382 m)

Cette station a été mise en place en Septembre 1976. Placée sous le porche de la grotte, elle bénéficie d'un seuil très stable.

Sur le plan pratique, elle nous a cependant posé de nombreux problèmes. En effet, elle a été détruite trois fois : les deux premières stations ont subi les effets néfastes d'individus en mal d'action, la troisième a été emportée par une crue importante.

Les limnigraphes utilisés ont été successivement trois OTT XX à réduction de 1/5ème, et à vitesse d'avancement de 2 mm/h.

- La station de la Sarrazine

(x = 879,3 ; y = 224,95 ; z = 330 m)

L'équipement de la source de la Sarrazine remonte au mois de Mai 1976. Malgré un régime torrentiel lors des crues, le seuil naturel est resté stable pour la période étudiée.

La station a été équipée d'un limnigraphe OTT XX à vitesse d'avancement de 2 mm/h et à réduction de 1/5ème, ramenée à 1/10ème par suite d'un important battillage.

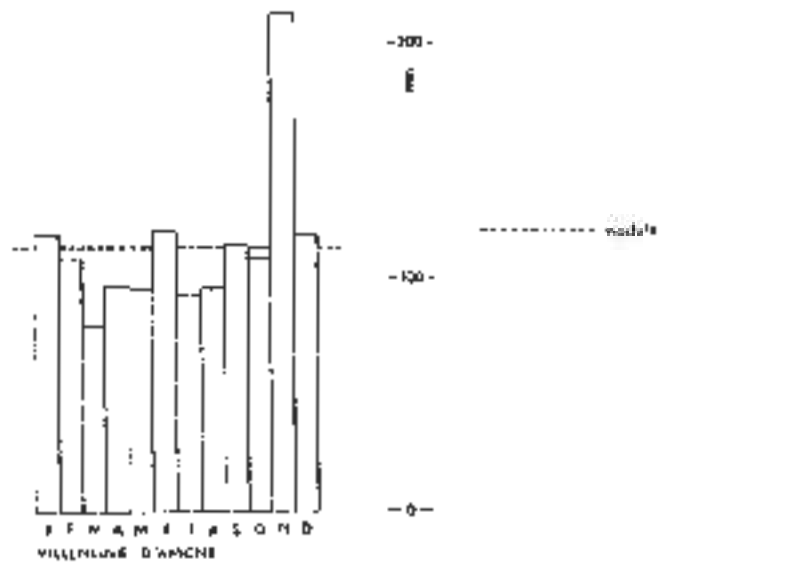
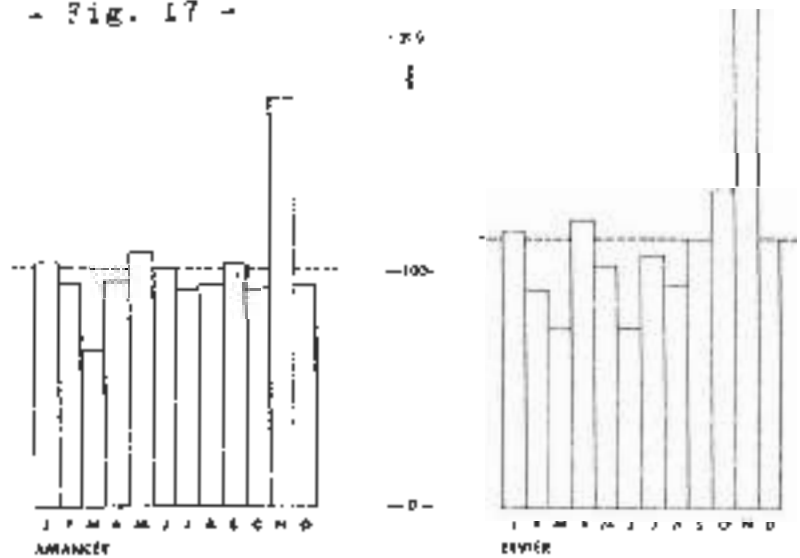
- La station de Dournon

(x = 676,8 ; y = 220,35 ; z = 610 m)

Située sur le cours temporaire du Muy, la station de Dournon est en service depuis Septembre 1976.

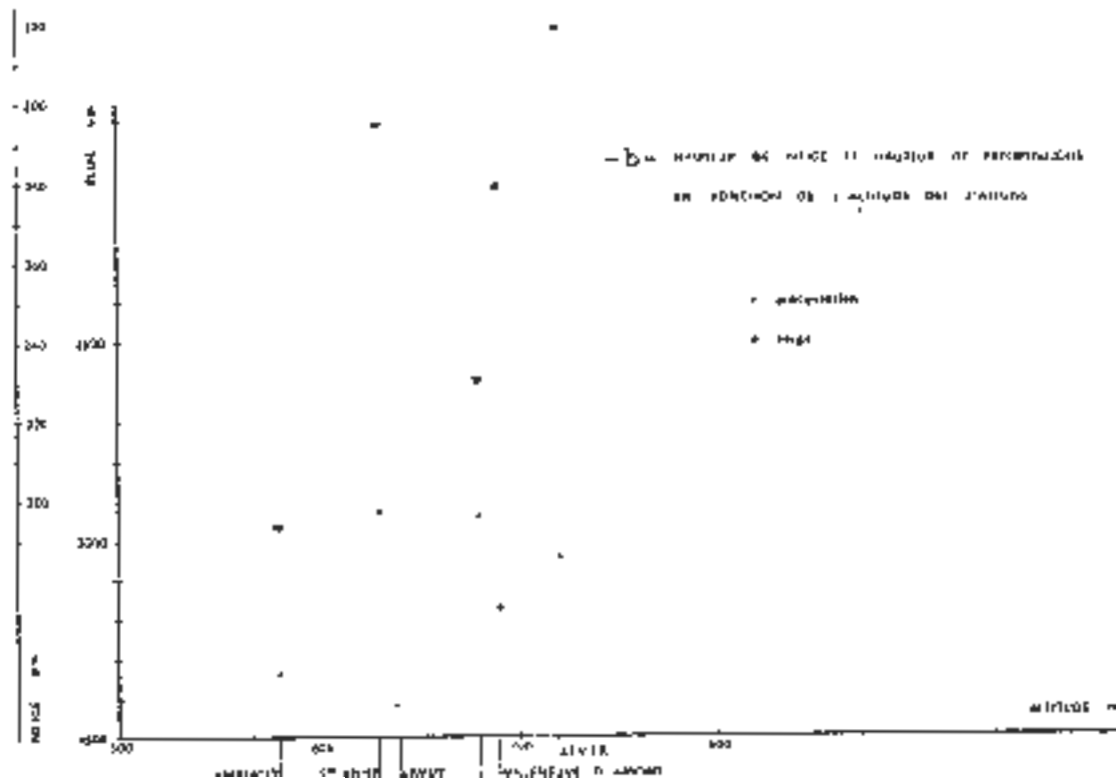
Le limnigraphe utilisé est un OTT XX à réduction de 1/5ème et à vitesse d'avancement de 4 mm/h.

- Fig. 17 -



—●— MOYENNES DES PRÉCIPITATIONS ANNUELLES

DE 1954 à 1977



- La station de la perte de la Vieille Folle

Elle est située sur le cours du ruisseau temporaire se perdant à la Vieille Folle. Elle a fonctionné avec un limniographe Richard à mouvement hebdomadaire et à réduction de 1/10ème, pendant les mois d'Avril et Mai 1978. Le seuil naturel semble stable.

DONNÉES CLIMATOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

LES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES

Précipitations

. Résultats .

Les tableaux en annexe n° I regroupent les valeurs mensuelles correspondant à la somme des valeurs journalières relevées sur pluviomètres (400 cm²).

Les enregistrements disponibles pour les stations équipées d'un pluviographe (cônes de 1000 ou 2000 cm²) n'ont été utilisés que pour de courtes séquences lors d'analyses de crue.

Leur calage dans ces cas précis a été effectué par rapport aux données pluviométriques.

. Analyse .

- Etude de l'enneigement

Il s'agit d'un phénomène saisonnier, qui n'est dans cette région du Jura, ni très abondant, ni très constant.

Sur le secteur étudié, la neige a fait son apparition le 3 Novembre, en 1976 ; le 14 Novembre, en 1977. La dernière chute de neige intervenant respectivement le 16 Avril 1977 et le 14 Avril 1978.

	STE. ANNE		VILLERS. S. CHAL.		AMANEY		LEVIER		VIL. d'AMONT	
	jours	mm	jours	mm	jours	mm	jours	mm	jours	mm
Janvier	10	78,4	7	49,9	9	51,1	10	73,3	11	91
Février	1	9			2	10	4	36	2	12,3
Mars			1	3	1	12,2	2	19,1	1	1,8
Avril	4	19	4	30	5	26	6	77,7	6	53,6
Novembre	11	129,5	12	142,2	10	73,1	10	99	10	101,7
Décembre	12	58,2	2	5	3	20,7	4	13,8	2	19
TOTAL		294,1		250,1		193,1		318,9		279,4
Pourcentage neige-précipi- tations totales		14%		11%		12%		16%		15%

Tableau n° 2

Y	LEMUY	VILLERS/CHALAMONT	VILLENEUVE d'AMONT	LEVIER	Ste ANNE	AMANCEY
	1	a = 1,05 b = 4,85 r = 0,904 N = 36	a = 0,96 b = 5,54 r = 0,870 N = 33	a = 0,96 b = 5,52 r = 0,895 N = 33	a = 0,81 b = 12,97 r = 0,800 N = 36	a = 0,89 b = 5,64 r = 0,934 N = 33
RS/CHALAMONT		1	a = 0,89 b = 0,92 r = 0,935 N = 48	a = 0,92 b = 1,39 r = 0,950 N = 48	a = 0,87 b = 5,59 r = 0,929 N = 48	a = 0,73 b = 5,07 r = 0,911 N = 48
NEUVE d'AMONT			1	a = 0,94 b = 5,42 r = 0,917 N = 48	a = 0,87 b = 10,37 r = 0,882 N = 48	a = 0,75 b = 7,99 r = 0,886 N = 48
R				1	a = 0,85 b = 9,62 r = 0,876 N = 48	a = 0,80 b = 4,88 r = 0,927 N = 48
NE					1	a = 0,72 b = 6,65 r = 0,838 N = 48
EY						1

a, b : coefficients de la droite de régression - r : coefficient de corrélation - N : Nombre de couples utilisés

Tab. 3 : - CARACTERISTIQUES DES CORRELATIONS ET DES DROITES DE REGRESSION
ENTRE HAUTEURS DE PRECIPITATIONS DECAIRES
(AOUT 1976 A DECEMBRE 1977)

Le tableau n° 2 rassemble les caractéristiques de l'enneigement pour l'année 1977.

Le pourcentage de neige dans les précipitations totales semble du même ordre sur l'ensemble du secteur étudié et ne représente qu'un faible pourcentage des précipitations. C'est pourquoi dans les tableaux de valeurs des précipitations donnés en annexe, nous n'avons pas distingué la neige de la pluie.

- Afin d'essayer de dégager des variations saisonnières sur le secteur étudié nous avons construit le diagramme des moyennes des précipitations mensuelles de 1971 à 1977 pour les stations de Levier, Amancey, et Villeneuve d'Amont (Fig. 17).

Ce diagramme fait apparaître deux périodes constantes sur les trois stations : un minimum en Mars, et une période de pluies abondantes en Novembre.

En dehors de ces deux tendances, il est difficile de mettre en évidence un minimum d'été du fait de la grande variabilité des précipitations d'une année à l'autre.

- L'étude des variations dans le temps a été complétée par une étude des variations spatiales afin de rechercher l'influence éventuelle d'un gradient d'altitude. La dispersion observée sur la figure 17, comportant en abscisse l'altitude et en ordonnée la hauteur de précipitations pour chaque station, montre que la variation spatiale des précipitations n'est donc pas due seulement à l'altitude. Par contre, il semble exister une relation entre l'altitude des stations et l'équivalent en eau de la neige pour l'année 1977.

Nous avons donc cherché à mettre en évidence par l'analyse des liaisons corrélatives entre stations les erreurs importantes sur les hauteurs de précipitations, et éventuellement l'influence de facteurs locaux autres que l'altitude. (Le principe et les démonstrations de la méthode des liaisons corrélatives et des régressions linéaires peuvent être consultés dans tous les ouvrages d'Analyse Statistique).

Le tableau 3 rassemble les valeurs des paramètres des droites de régression et des coefficients de corrélation. Ceux-ci semblent séparer les stations de Ste-Anne et Lemuy du groupe : Amancey, Levier, Villeneuve d'Amont, Villers-Scus-Chalamont, relativement homogène.

Les coefficients des droites de régression liant les stations de Lemuy et Ste-Anne aux autres montrent que Lemuy a tendance à sous-estimer, Ste-Anne à surestimer les précipitations (phénomène que l'on avait déjà vu apparaître lors de l'étude de l'enneigement).

Ces écarts peuvent être imputés soit à des imprécisions sur les hauteurs de précipitations (observateur), soit à des conditions locales.

Profitant des données disponibles aux stations de Levier, Villeneuve d'Amont et Amancey, nous avons effectué les corrélations entre les valeurs mensuelles relevées à ces trois stations, pour une période allant de Janvier 1971 à Décembre 1977.

	VILLENEUVE d'AMONT - AMANCEY	LEVIER - AMANCEY	LEVIER - VILL. d'AMONT
a	0,79	0,76	0,90
b	13,50	15,51	7,35
r	0,930	0,916	0,950
N	82	73	73

- a et b : coefficients de la droite de régression
 r : coefficient de corrélation
 N : nombre de couples de données

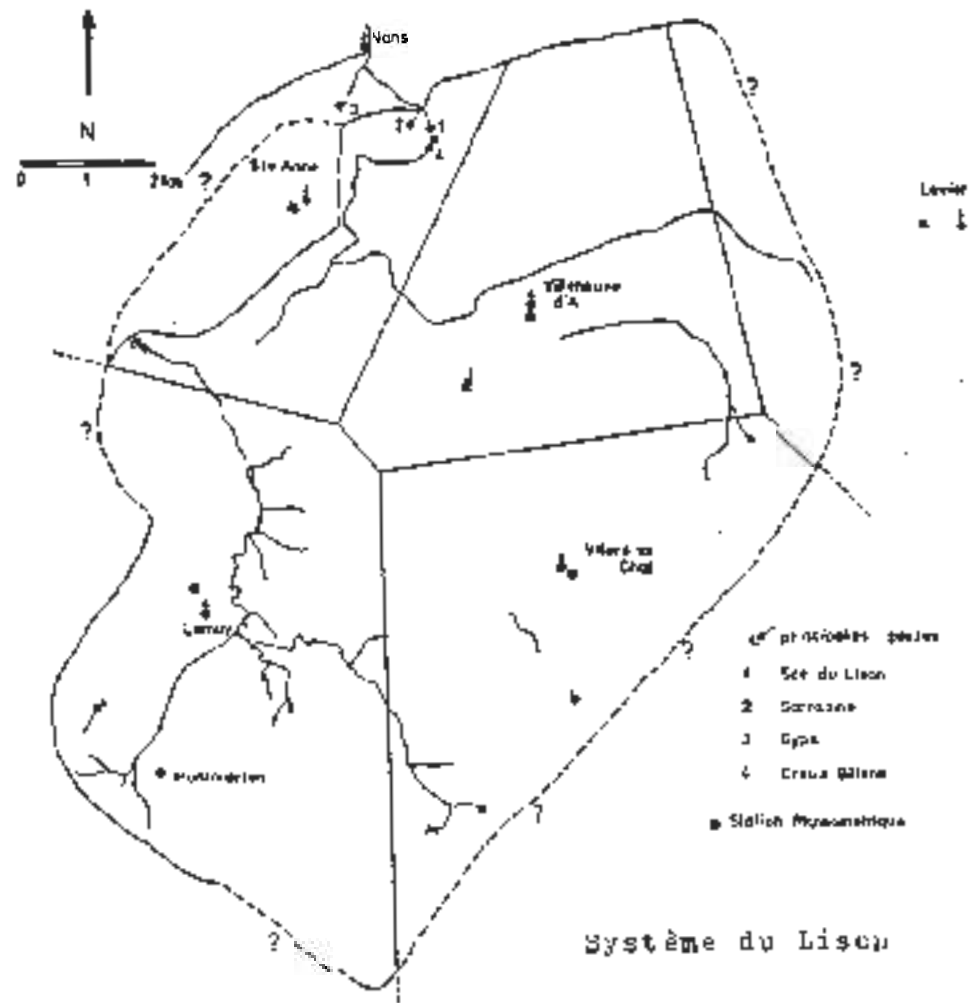
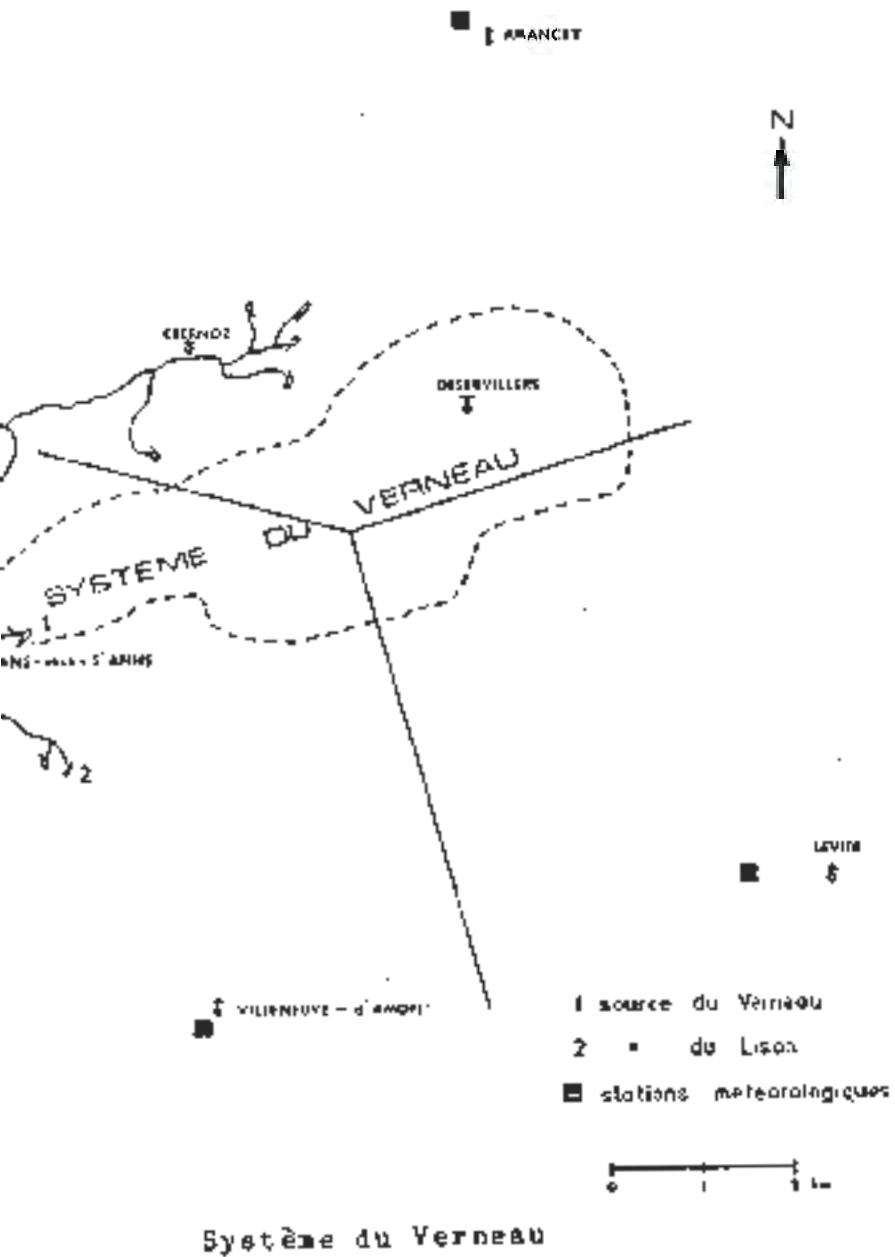


Fig. 18 - CARTE DES POLYONES DE THIESSEN.

Ces corrélations dont les caractéristiques sont rassemblées dans le tableau précédent, montrent, que d'une façon générale, ces trois stations sont soumises aux mêmes conditions climatiques régionales.

Il est probable que des facteurs locaux (répartition hétérogène des crages et des giboulées par ex.), aient une influence sur les ordonnées à l'origine des droites de régression, qui devraient être nulles dans le cas de stations soumises aux mêmes conditions climatiques régionales.

Si l'analyse des valeurs mensuelles sur de longues périodes montre l'homogénéité des données aux différentes stations, il serait nécessaire de multiplier les stations pluviographiques afin de mieux cerner l'hétérogénéité de la pluviométrie pour des pas de temps plus fins (journaliers, ou même horaires lors d'études fines de crues).

. Estimation de la lame d'eau précipitée sur les bassins du Lison et du Verneau pour la période étudiée .

Cette estimation a été effectuée sur des cycles hydrologiques, et sur des années civiles, en vue d'établir des bilans.

Dans les deux cas, nous avons dû utiliser la méthode des polygones de THIESSEN. La densité de stations disponibles ne permettant pas de construire des isohyètes avec suffisamment de précision.

- Bassin du Lison (cf. Fig. 18)

L'estimation de la lame d'eau précipitée sur le bassin du Lison, n'a porté que sur le cycle 1976-1977, et a été effectuée à partir des stations de Villers-sous-Chalamont, Villeneuve d'Amont, Levier, Ste-Anne, Lemuy.

Les hauteurs d'eau précipitées sont les suivantes :

VILLERS SOUS CHALAMONT	:	2169 mm	sur	25,6%	de la surface du bassin
VILLENEUVE d'AMONT	:	1966 mm	sur	26%	" " "
LEVIER	:	2067 mm	sur	6%	" " "
STE-ANNE	:	2149 mm	sur	9,1%	" " "
LEMUOY	:	1745 mm	sur	33,2%	" " "

Ce qui fait une lame d'eau de 1965 mm précipitée sur l'ensemble du bassin.

- Bassin du Verneau (cf. Fig. 18)

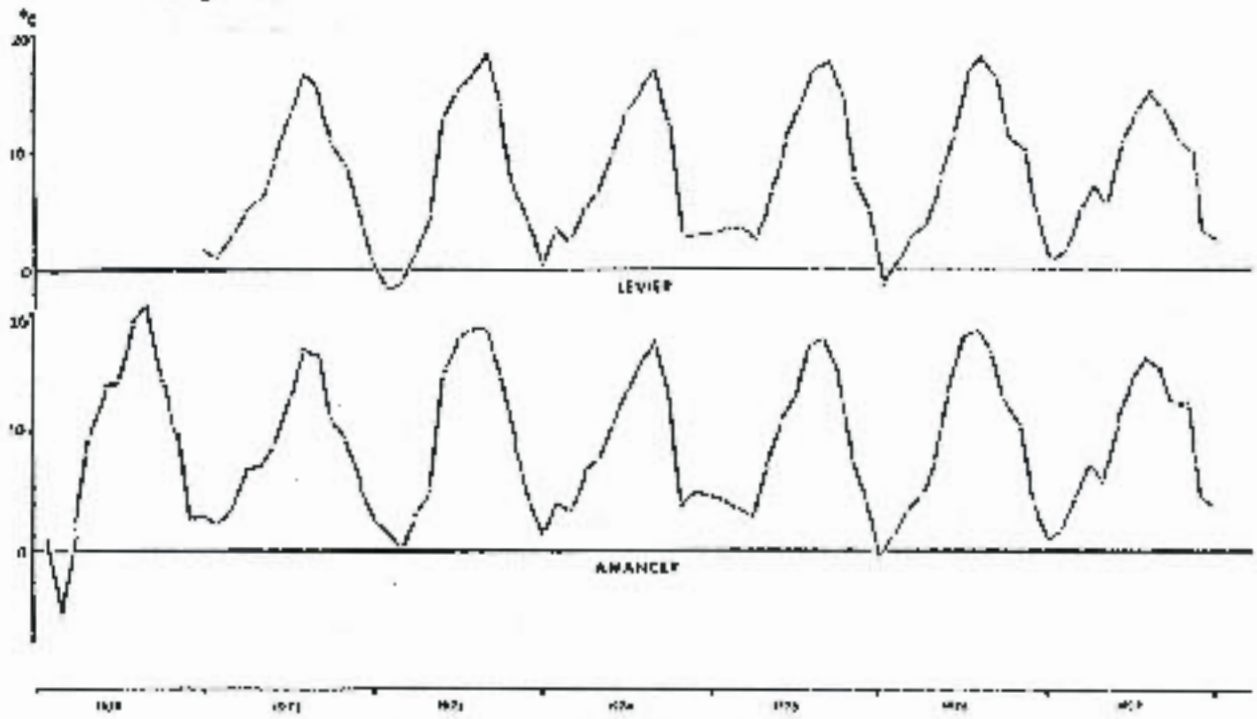
L'estimation de la lame d'eau précipitée a été effectuée pour six cycles de 1971 à 1977, à partir des stations de Levier, Amancey, Villeneuve d'Amont, représentatives respectivement de 14,2%, 48,2%, et 37,6% de la surface du bassin versant.

Les différents résultats relatifs aux cycles hydrologiques et aux années civiles étudiées sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

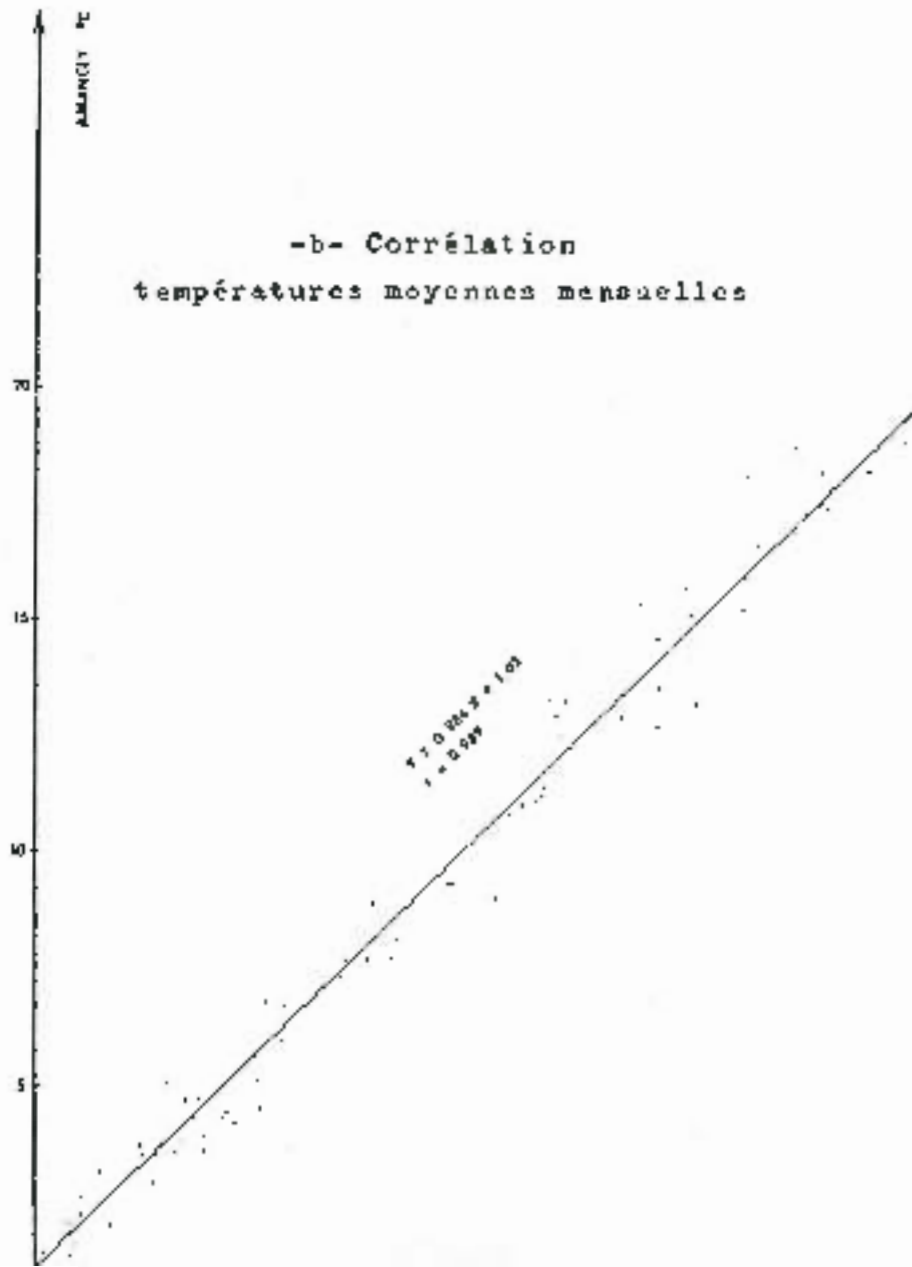
ANNEES	:	1972	1973	1974	1975	1976	1977
Lame d'eau précipitée en mm		1199	1212	1543	1355	1061	1805
Cycles		71 - 72	72 - 73	73 - 74	74 - 75	75 - 76	76 - 77
Lame d'eau précipitée en mm		1089	1107	1156	1470	1242	1856

Fig. 18 - CARTE DES POLYGOUES DE THIESSEN.

Fig. 19 -a- Evolution de températures moyennes mensuelles



-b- Corrélation
températures moyennes mensuelles



Températures de l'air

. Résultats .

Les valeurs de températures moyennes mensuelles pour les stations de Levier et Amancey correspondant aux années 1971 à 1977 sont rassemblées dans le tableau en annexe.

Les valeurs des maxima et minima sont relevées chaque jour sur des thermomètres à mercure. La précision de la lecture effectuée par l'observateur est d'environ 0°,5.

C'est à partir de ces valeurs journalières qu'ont été calculées les moyennes mensuelles.

. Analyse .

L'évolution des températures moyennes mensuelles au cours des sept dernières années (Fig. 19a) mettent en évidence une période chaude qui apparaît suivant les années en Juillet, Août ou Septembre, une période froide en Décembre, Janvier ou Février.

L'examen du tableau des valeurs mensuelles (annexe I) et de la Figure 19a, montre que d'une façon générale, la température de l'air est plus élevée à Amancey qu'à Levier.

Afin de vérifier l'homogénéité de nos données, nous avons effectué une corrélation (régression linéaire) entre les températures moyennes mensuelles à Amancey et à Levier (Fig. 19b).

Avec 68 couples de valeurs, cette régression donne un coefficient de corrélation de 0,989.

Les deux stations distantes de 12 kms sont donc soumises aux mêmes conditions climatiques régionales.

Cette corrélation a de plus été utilisée pour compléter les tableaux des valeurs mensuelles. Nous avons également rassemblé les valeurs des températures moyennes par années civiles, et par cycle dans le tableau ci-dessous afin de comparer l'influence du découpage dans le temps sur le calcul de l'ETR.

ANNEE	CYCLE HYDROLOGIQUE	AMANCEY	LEVIER
1971		8,8	
	1971 - 1972	6,2	
1972		8,6	7,9
	1972 - 1973	9,4	7,7
1973		9,2	7,6
	1973 - 1974	8,9	8,1
1974		8,8	7,9
	1974 - 1975	8,7	8,1
1975		8,8	8,5
	1975 - 1976	10,2	9,5
1976		9,4	8,7
	1976 - 1977	9,6	8,5
1977		9,4	8,3

Tabl. 4 : Températures moyennes des années civiles et des cycles hydrologiques.

EVALUATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION

Pour l'estimation de l'évapotranspiration (réelle ou potentielle), nous avons utilisé 4 méthodes : celles de L. TURC (1954, 1961), THORNTHWAITE (1948), et celle du bilan d'énergie (M. BAKALOWICZ, 1974).

Estimation de l'ETR par la formule de Turc

Cette formule a été établie par comparaison des résultats d'expériences sur cases lysimétriques, et par l'analyse de bilans hydrologiques de bassins versants dans le monde entier. Nous l'utilisons ici sous sa forme générale :

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

avec E : évaporation réelle annuelle en mm

P : précipitation annuelle en mm

$$L = 300 + 25t + 0,05t^3$$

avec t : température moyenne annuelle en °C

. Application au bassin du Lison .

Faute de données suffisantes, nous n'avons dans ce cas effectué ce calcul que pour le cycle 1976-1977.

Nous avons vu précédemment qu'au cours du cycle 1976-1977, la lame d'eau précipitée était de 1965 mm.

En prenant comme température moyenne du bassin, pour la période considérée, les valeurs de Levier, on obtient pour le cycle 1976-1977 :

$$ETR = 525 \text{ mm}$$

avec t = 8,5°C

et P = 1965 mm

. Application au système du Verneau .

Les valeurs obtenues à partir de la formule de Turc, pour le système du Verneau (en prenant comme température la moyenne des températures à Levier et Aucey), sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

CYCLE	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77
Nombre de jours du cycle	370	336	329	334	398	410
ETR (mm)	483	493	496	510	541	561
ANNEES	1972	1973	1974	1975	1976	1977
ETR (mm)	492	497	511	512	503	533

Estimation de l'ETP par la formule de Thornthwaite

La formule de Thornthwaite est une formule empirique, vérifiée pour les zones climatiques tempérées et pour des périodes au moins égales au mois :

$$ETP_{Th} = A.a.t^c$$

où

A est un coefficient fonction de la durée d'insolation théorique, donc fonction de la latitude et de la saison

a et c sont des paramètres caractérisant la station. Ils sont fonction de l'indice thermique :

$$i = (t/5)^{1,514}$$

avec

t : température moyenne du mois considéré.

Pour les calculs, nous avons utilisé des abaques publiés par C. GLEIZES (1964).

L'avantage de cette méthode est de permettre un calcul mensuel, et par là un meilleur ajustement au découpage en cycles hydrologiques.

. Application au bassin de Lison .

Cette application se limite au cycle 1976-1977, les données hydro-métriques et pluviométriques ne permettant pas d'établir de bilan pour les périodes antérieures. Les valeurs de températures ont été prises à la station de Levier. Les ETP mensuelles sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

ETP (mm)	S	O	M	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
ETP (mm)	58,8	49,3	16,9		6,8	21,6	39,8	31,9	74,7	95,8	109,9	91	63	47,4

Ce qui fait une ETP sur le cycle 76-77 (410 j.) de 651 mm.

Les débits moyens journaliers disponibles, nous ont conduit à considérer un cycle hydrologique raccourci, débutant le 30 Septembre 1976.

L'ETP adoptée à ce cycle sera donc de : 632 mm.

. Application au bassin du Varneau .

Les valeurs annuelles d'ETP de Janvier 1971 à Décembre 1977, ont été rassemblées dans le tableau ci-dessous. Les valeurs de température utilisées correspondent pour les années 1972 à 1977 à la moyenne des températures d'Anancey et de Levier.

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
ETP (mm)	623	608	610	620	609	623	617

Pour l'année 1971, la station de Levier n'étant pas encore installée, nous avons pris les valeurs d'Anancey.

En prenant un découpage en cycles hydrologiques, nous arrivons aux résultats rassemblés dans le tableau ci-dessous :

1971-1972	1972-1973	1973-1974	1974-1975	1975-1976	1976-1977
607 mm	593 mm	551 mm	487 mm	725 mm	658 mm

Estimation de l'ETP par la formule de Turc modifiée en 1960

Cette formule s'écrit :

$$ETP = (I_g + 50) 0,40 \frac{T}{T+15} \left(1 + \frac{50-u}{70}\right)$$

ETP : évapotranspiration potentielle en mm/mois

I_g : valeur moyenne mensuelle de la radiation solaire globale exprimée en cal./cm² de surface horizontale et par jour

T : étant la température moyenne mensuelle en °C

u : humidité relative moyenne de l'air

Turc considère que lorsque $u > 50\%$, $1 + \frac{50-u}{70} = 1$.

La formule donnant I_g est :

$$I_g = I_{gA} (0,18 + 0,62 \frac{h}{H})$$

avec

I_{gA} : énergie de la radiation solaire qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère

h : durée d'insolation en heures

H : durée astronomique du jour en heures exprimée en cal./cm²/jour

I_{gA} et H ne dépendent que de la latitude et sont donnés par des tables

Cette formule présente l'avantage de permettre une évaluation mensuelle de l'ETP, et de tenir compte de l'énergie de radiation réellement fournie, et de l'humidité relative de l'air.

Nous avons utilisé les moyennes des valeurs mensuelles prises aux stations de Besançon et Pontarlier, situées respectivement à 30 km au Nord et au Sud-Est des bassins du Lison et du Verneau, après étude des liaisons corrélatives entre ces deux stations (durée d'insolation : 83 couples $r = 0,958$; humidité relative : 84 couples $r = 0,843$).

Application au bassin du Verneau

Les valeurs de températures utilisées correspondent aux moyennes mensuelles des températures relevées aux stations de Levior et Amancey.

Les calculs ont été effectués pour les années 1971 à 1977, les résultats annuels sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
ETP	562	546	578	553	564	657	548

En effectuant le découpage par cycles, on arrive aux résultats :

	1971-72	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76	1976-77
ETP (mm)	543	560	517	461	741	605

Estimation de l'ETR par la méthode du bilan énergétique

Nous ne développerons pas ici cette méthode qui a été exposée en détail par M. BAKALOWICZ (1974).

Application au système du Verneux

Le calcul a été effectué pour les années 1971 à 1977, à partir des valeurs mensuelles de températures des stations de Levier - Anancy, des valeurs d'humidité relative et de durée d'insolation effective, à la station de Besançon et à celle de Pontarlier (déjà utilisées pour le calcul de l'ETP par la formule de Turc).

Les valeurs annuelles calculées sont rassemblées dans le tableau :

	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
ETR (mm)	686	610	667	664	648	719	620

Le découpage par cycles donne les résultats suivants :

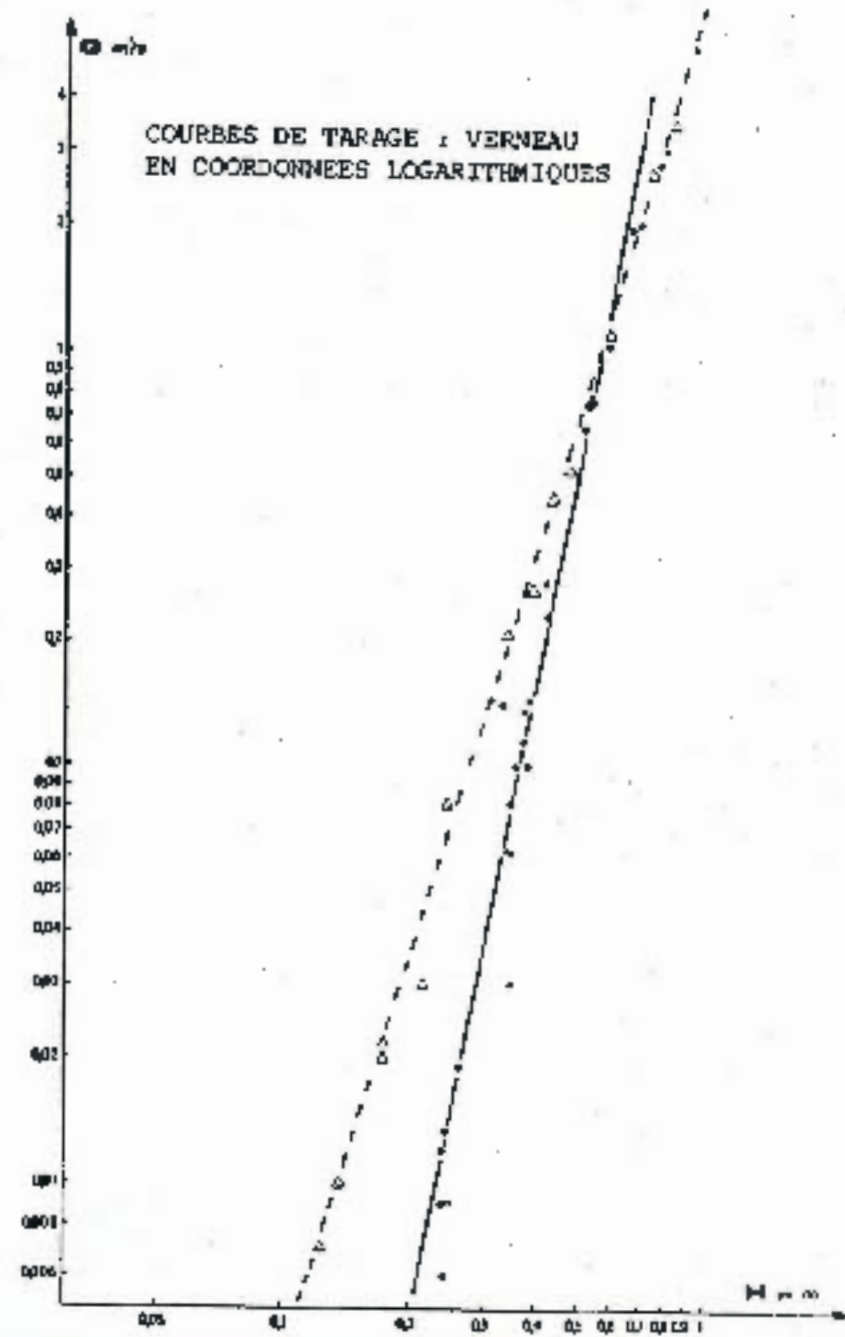
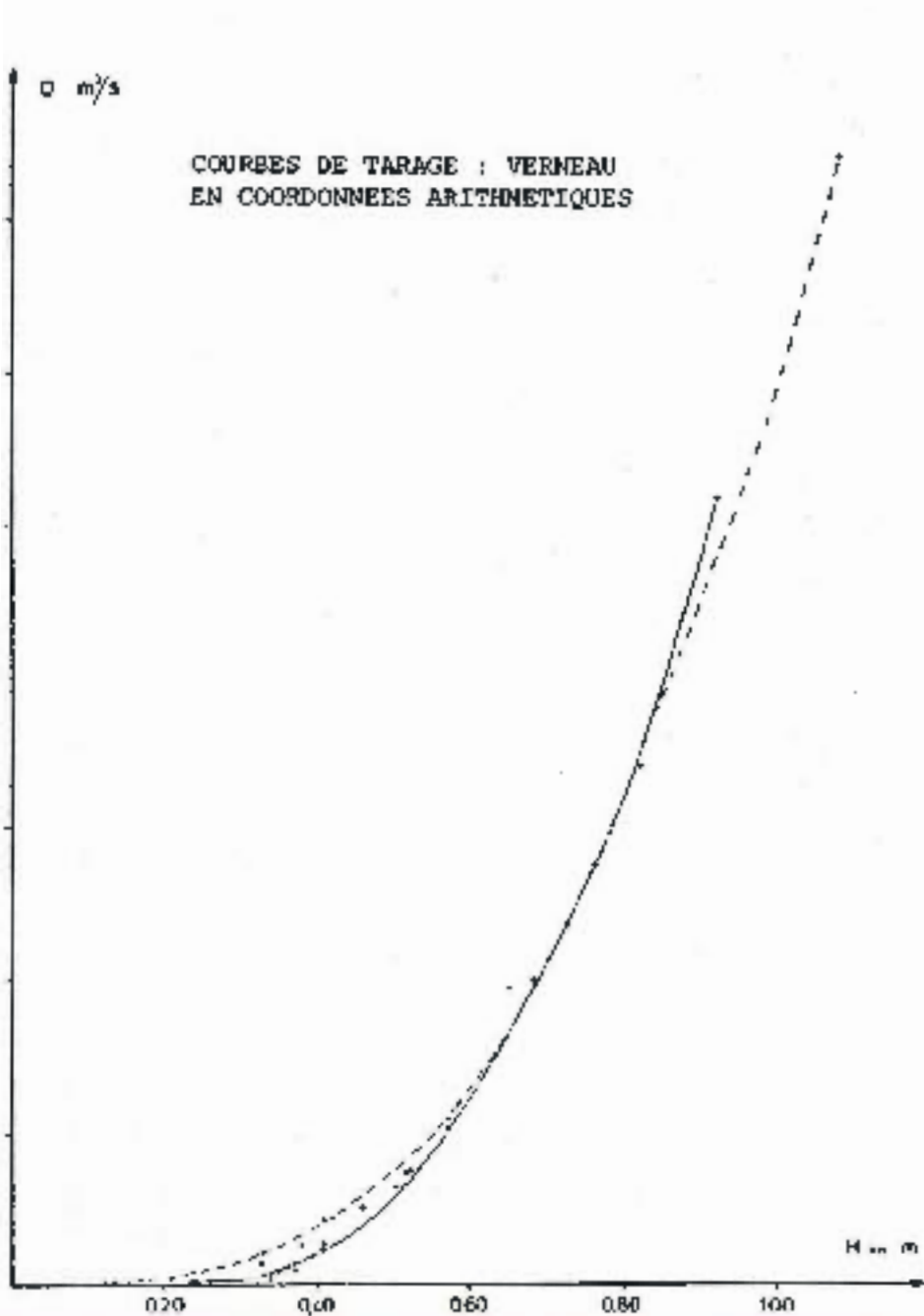
	1971-72	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76	1976-77
ETR (mm)	614	638	606	566	605	680

Les méthodes utilisées pour calculer l'évapotranspiration aboutissent à l'évaluation soit de l'ETR (formule générale de Turc, et bilan énergétique), soit de l'ETP (formule de Turc et de Thornthwaite).

Le calcul du bilan hydrologique, qui permet de vérifier les hypothèses sur les limites du bassin versant, fait appel à l'ETR. Le calcul de l'ETR, à partir de l'ETP, fait intervenir des données concernant la réserve en eau du sol, qui sont inconnues et ne nous permettent pas d'effectuer la transformation. Les définitions de l'ETP données dans la littérature permettent de la considérer comme l'ETR maximale (cas d'un sol constamment saturé en eau).

Les différentes valeurs d'ETP calculées étant généralement inférieures aux précipitations, pour un pas de temps mensuel, on peut supposer que l'ETR se rapproche de l'ETP.

Les valeurs d'ETR fournies par la méthode du bilan énergétique, sont systématiquement supérieures à celles fournies par la formule de Turc générale, donnant l'ETR annuelle, et aux valeurs d'ETP fournies par les méthodes de Thornthwaite et de Turc (1960).



Ch. PASQUIER en 1974 avait observé des écarts allant dans le même sens. Il est possible que ces écarts soient dus à l'hétérogénéité physique (effet de versant) de la région englobant les stations de Besançon (Alt. 307 m) et de Pontarlier (Alt. 842 m).

En l'absence de valeurs de références, ne permettant pas de pencher pour l'une ou l'autre de ces méthodes, nous utiliserons, lors du calcul des bilans hydrologiques, les différents résultats obtenus.

LES DONNÉES HYDROLOGIQUES

Les jaugeages

Nous avons surtout utilisé la méthode au moulinet hydrométrique dite "par points".

La technique consiste en une mesure de vitesse du courant point par point. Lorsque la vitesse et la profondeur le permettaient les jaugeages ont été effectués au moyen d'un moulinet monté sur perche de 20 cm. Les jaugeages de crue ont été réalisés à l'aide d'hélices autocomposantes montées sur saumon de 25 kg (ces hélices réduisent l'erreur due au régime turbulent).

Les courbes de tarage

- Station de Myon

La courbe de tarage (cf. Fig. 21) a été construite à partir de jaugeages effectués par les équipes hydrométriques du S.R.A.E. de Franche-Comté.

Cette station pose de nombreux problèmes en hautes eaux ; en particulier une dispersion des points due à un blocage des eaux au niveau du pont, situé directement en aval et peut être à un détarage à partir d'un débit de 2 m³/s.

Les données de la station de Myon n'ont été utilisées que pour l'étude des tarissements en 1971 et 1972, et ne concernent donc que la partie basse de la courbe (débits inférieurs à 1 m³/s) relativement précise.

- Station du Verneau (cf. Fig. 20)

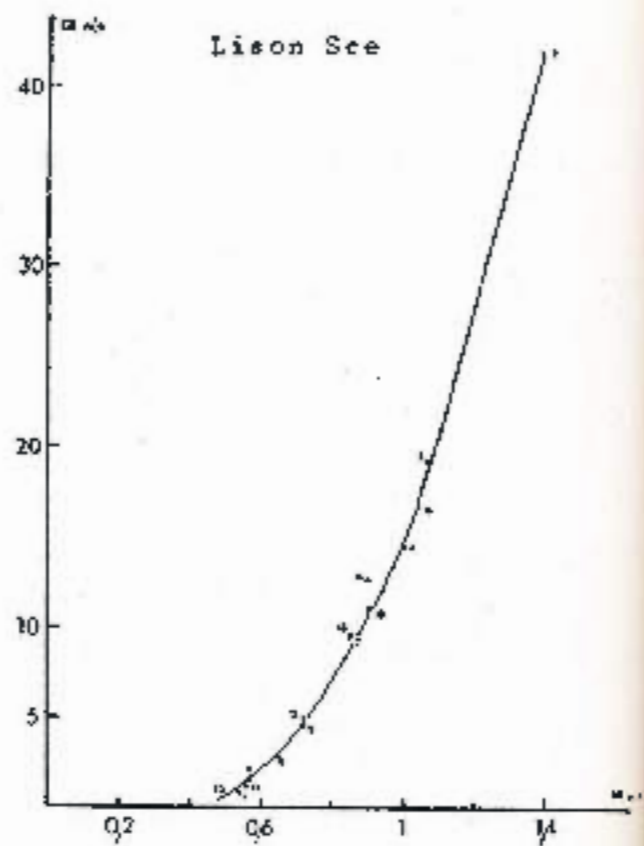
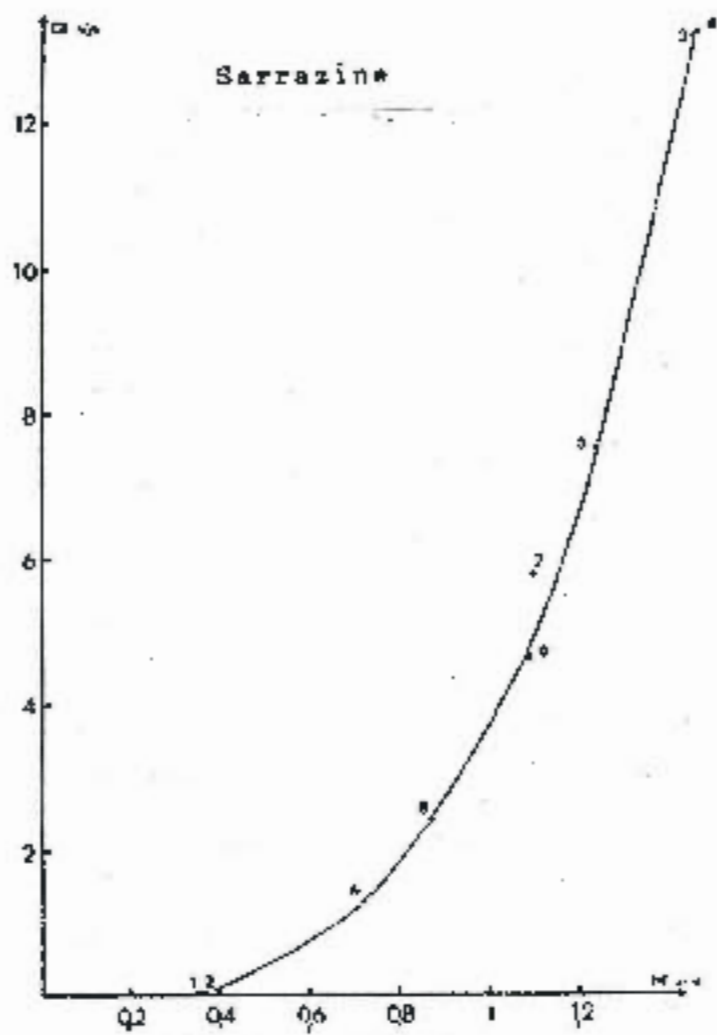
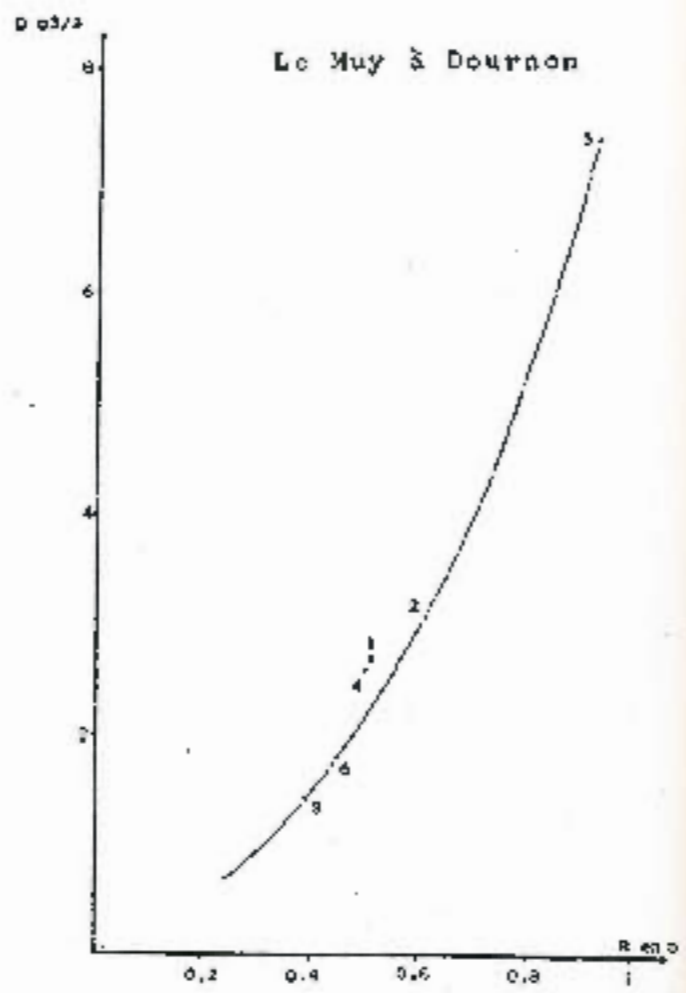
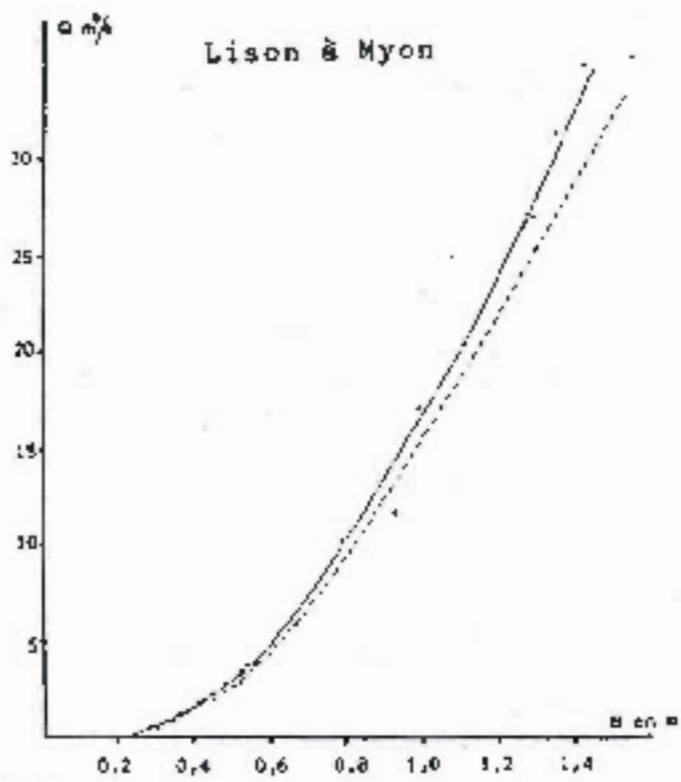
Pour cette station nous disposons d'un nombre important de jaugeages effectués pour la plupart par les équipes du S.R.A.E.

Les jaugeages effectués après septembre 1975 mettent en évidence un détarage provoqué par le creusement du seuil lors d'une crue exceptionnelle. Ce détarage est surtout sensible pour les bas débits.

Pour le dépouillement des limnigrammes, nous avons utilisé deux courbes, l'une postérieure à 1975 qui semble précise pour les bas débits, l'autre antérieure à septembre 1975, pour laquelle la dispersion des points pose le problème de la stabilité du seuil, et de la précision des jaugeages.

Dans les deux cas, nous avons extrapolé les débits supérieurs à 7 m³/s.

Il serait nécessaire de préciser la courbe par des jaugeages en hautes eaux, ce qui paraît difficile en raison de la faible durée du passage des crues.



A l'initiative du CTGREP, trois jaugeages chimiques ont été effectués. Nous avons utilisé la méthode à "injection continue" (G. GALEA, Ph. LION, 1976). Le colorant étant la tartrazine, les résultats des jaugeages chimiques et mécaniques effectués au même moment sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

DATES	JAUGEAGES CHIMIQUES	JAUGEAGES MECANIQUES
15.3.77	0,258	0,252
16.3.77	0,222	0,209
29.3.78	0,776	

Les écarts relatifs mettent en évidence des imprécisions soit au niveau des jaugeages mécaniques, soit au niveau des jaugeages chimiques, par suite d'un mauvais mélange du colorant dans l'eau. Si cette méthode peut présenter des avantages lors des jaugeages de cours d'eau à régime torrentiel, sa mise en oeuvre reste relativement longue et peu pratique.

- Station du Lison (cf. Fig. 21)

Nous avons effectué, en collaboration avec les équipes du S.R.A.E., 15 jaugeages qui couvrent une gamme de débits permettant d'éviter les extrapolations en hautes eaux lors du dépouillement des limnigrammes. La courbe reste cependant peu précise en bas débits. La plupart des jaugeages ont été effectués dans le lit du Lison, 100 m environ en contrebas de la station. Certains jaugeages d'étiage ont été réalisés sur une échancrure du seuil au niveau de la station. Il est possible que lorsque l'écolement ne se fait plus que par l'échancrure du seuil, la loi hauteur - débit soit modifiée. Il serait intéressant de préciser cette loi par des jaugeages répétés en étiage. Nous pouvons noter que la sensibilité relativement faible lorsque l'écoulement se fait sur toute la largeur du seuil doit s'améliorer lorsque cet écoulement ne se fait que par l'échancrure qui peut alors être considérée comme un déversoir rectangulaire.

- Station de la Sarrazine (cf. Fig. 21)

Les différents jaugeages ont été effectués, soit au seuil et au chronomètre (méthode par empottement) au niveau de l'exutoire d'étiage, soit au saumon de 25 kg monté sur téléphérique installé en aval de la station.

Ces 9 jaugeages sont relativement homogènes par rapport à la courbe de tarage que nous avons tracée.

Le principal problème posé par cette station est l'importance du batillage qui conduit à des imprécisions sur la lecture des hauteurs aussi bien sur l'échelle limnimétrique que sur le limnigramme.

- Station de Dournon (ruisseau du May) (cf. Fig. 21)

Le nombre de jaugeages disponibles ne permet pas de tracer une courbe de tarage satisfaisante.

En dehors de ce fait, se pose le problème du fonctionnement de la station : en effet au-dessus d'une certaine cote, les eaux envahissent la plaine, modifiant sans doute la courbe de tarage. A ce phénomène viennent s'ajouter un blocage relatif des eaux au niveau du pont sur lequel est installé la station et une instabilité du seuil.

En l'absence de données concernant les autres pertes du plateau les renseignements fournis par cette station ne peuvent être considérés comme représentatifs de l'ensemble des entrées concentrées du système du Lison. Il conviendrait donc pour mieux cerner ces entrées concentrées, de multiplier d'une part les jaugeages à la station de Dournon, et d'autre part les stations de mesure aux autres pertes du plateau.

- Station de la Vieille Folle

Nous ne possédons pas suffisamment de jaugeages pour construire une courbe de tarage. Il serait à l'avenir utile de maintenir cette station et de compléter la courbe de tarage. En effet le ruisseau qui se perd à la station de la Vieille Folle est l'exutoire d'un bassin marneux superficiel bien délimité dont l'étude pourrait permettre une approche de l'ETR locale.

Les résultats

Les résultats obtenus sont d'une part des portions d'hydrogrammes qui seront décrites et analysées dans des paragraphes ultérieurs, d'autre part des débits moyens journaliers mensuels et annuels.

Pour les stations de Myon et du Verneau, les débits moyens journaliers antérieurs au 1er Janvier 1977, ont été calculés par les services du ministère de l'Agriculture (programmes "ARHMA"). Pour les débits moyens journaliers du cycle 1976-1977, nous avons été amenés à mettre au point un programme de calcul, sur l'IRIS 50 du Centre de Calcul de l'Université de Besançon.

Le principe de calcul est le même que celui des programmes ARHMA du ministère de l'Agriculture, ce qui ne pose donc pas le problème de l'homogénéité des valeurs moyennes calculées dans le cadre de ce travail et de celle du ministère de l'Agriculture. Le principe de calcul et listing du programme sont donnés en annexe n° II.

- Source du Lison

Les tableaux de valeurs des débits moyens journaliers sont donnés en annexe n° III.

Les valeurs moyennes mensuelles en m³/s sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

1976			1977										
O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	
1,9	6,38	8,69	7,16	15,99	4,35	7,53	6,63	4,08	4,18	6,25	0,56	2,15	
					*				*	*			

* moyenne d'un mois présentant des absences d'information

- Source de la Sarrazine

Comme pour le Lison, les tableaux de valeurs des débits moyens journaliers sont donnés en annexe n° III.

Fig. 22 - DEBITS MOYENS JOURNALIERS - VERNEAU

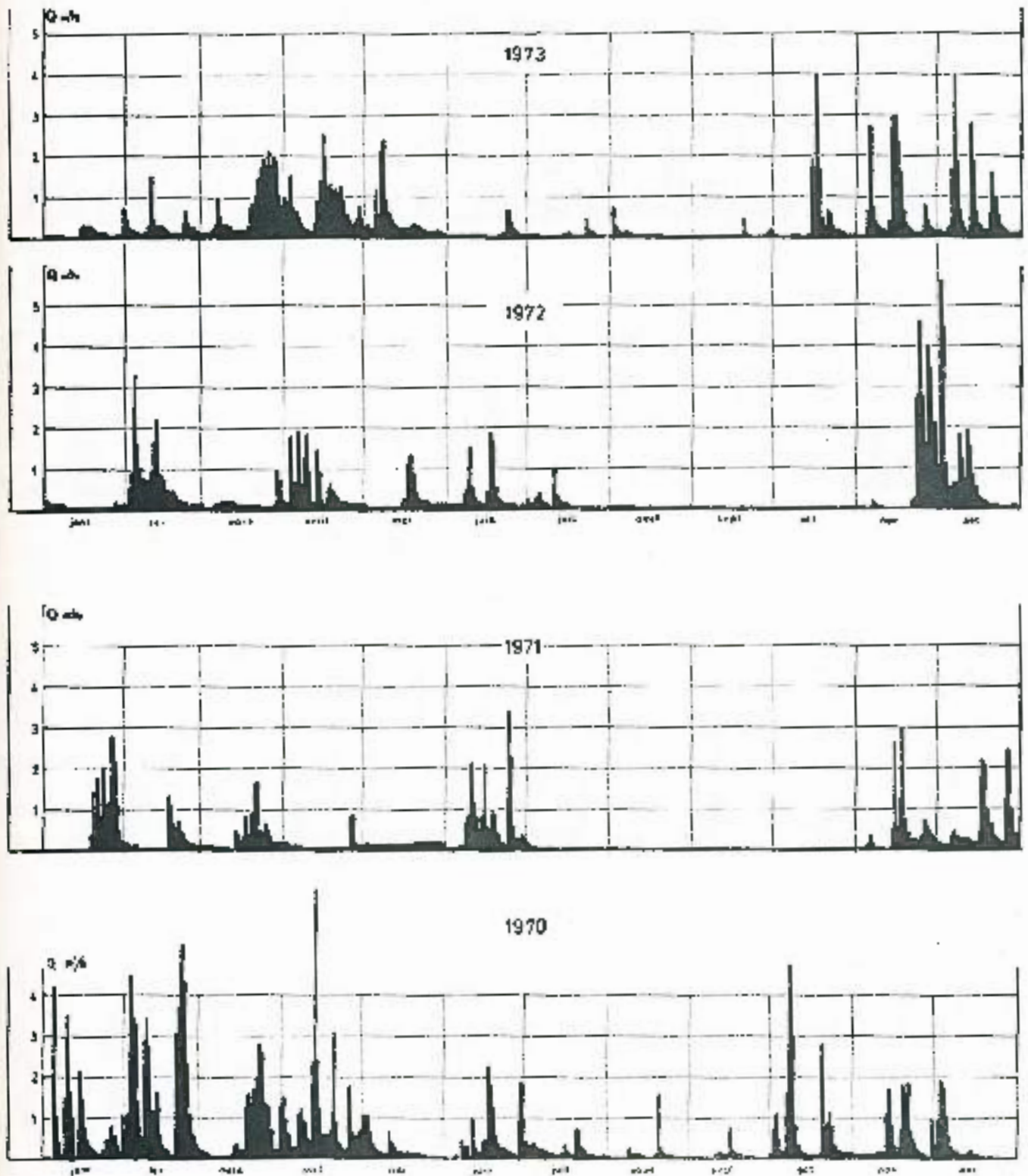
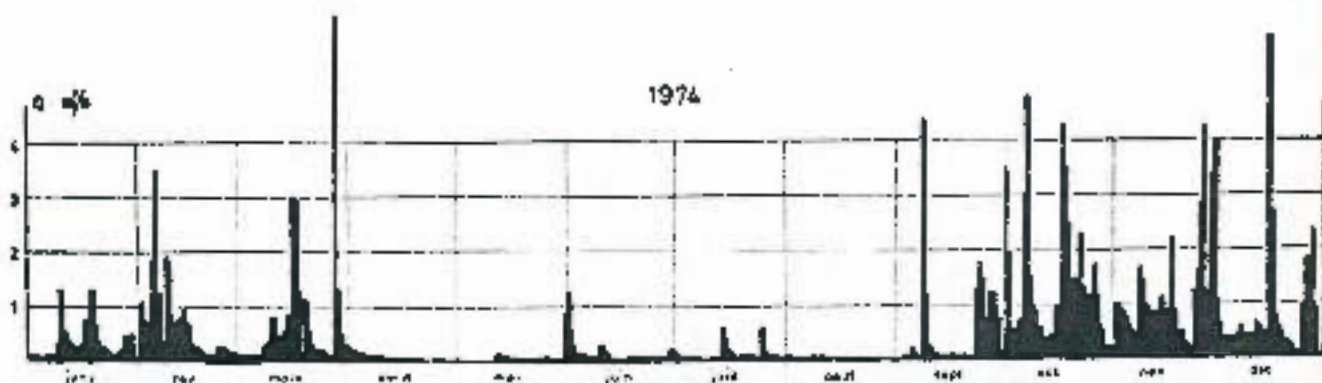
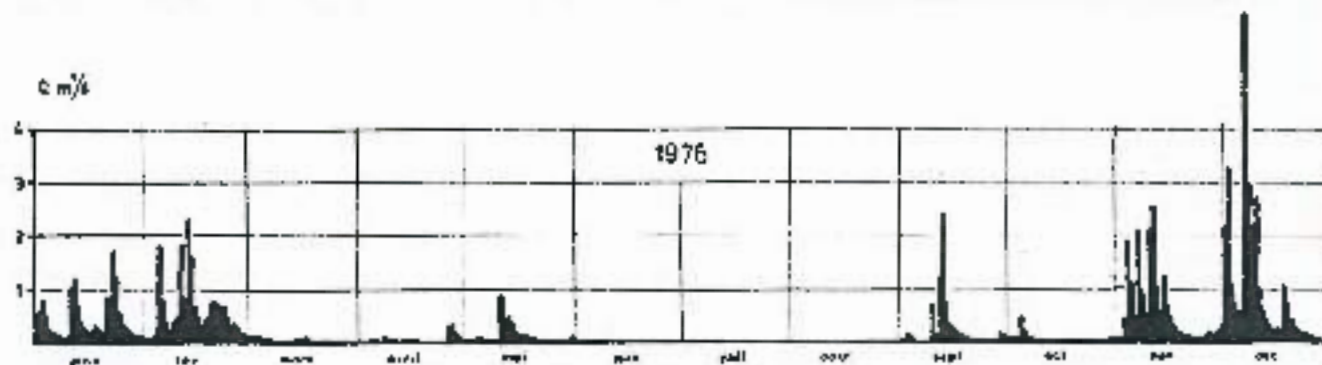
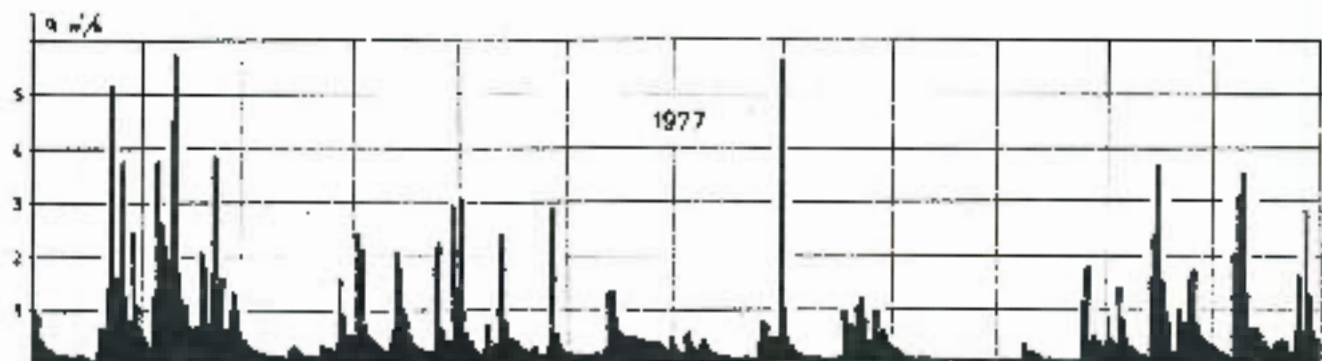


Fig. 23 - DEBITS MOYENS JOURNALIERS - VERNEAU



ANNEXES

1970	0,
1971	0,
1972	0,
1973	0,
1974	0,
1975	0,
1976	0,
1977	0,

1970-77 0,

Les valeurs moyennes mensuelles en m³/s sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

1976							1977							
O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0,000	1,79		3,48	6,92	0,32	2,06	1,35	0,57	0,35	1,01	0,015	0,21	2,19	2,47

* moyenne d'un mois présentant des absences d'information.

- Source du Verneau

Les tableaux de valeurs des débits moyens journaliers sont donnés en annexe n° III.

Les figures représentent les variations des débits moyens journaliers pour les années 1970 à 1977. (Fig. 22 - 23).

Nous avons en outre calculé les débits moyens mensuels, annuels, pour la période disponible (1970 à 1977). Les résultats en m³/s sont rassemblés dans le tableau n°5.

ANNÉES	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNÉE Mo	sp.
1970	0,825	1,81	0,735	1,14	0,286	0,505	0,244	0,144	0,097	0,725	0,493	0,308	0,600	0,043
1971	0,550	0,274	0,368	0,146	0,156	0,685	0,073	0,018	0,014	0,011	0,410	0,565	0,272	0,020
1972	0,102	0,700	0,198	0,595	0,236	0,365	0,130	0,031	0,020	0,024	1,24	0,455	0,337	0,024
1973	0,127	0,299	0,790	0,835	0,452	0,113	0,070	0,085	0,044	0,423	0,655	0,830	0,394	0,028
1974	0,364	0,720	0,805	0,080	0,075	0,133	0,129	0,040	0,545	1,53	1,19	0,990	0,550	0,039
1975	0,895	0,267	0,580	0,79	0,244	0,228	0,083	0,378	0,705	0,324	0,885	0,339	0,476	0,034
1976	0,481	0,560	0,068	0,076	0,137	0,021	0,018	0,018	0,016	0,081	0,645	0,960	0,265	0,019
1977	0,844	1,675	0,31	0,873	0,623	0,396	0,454	0,436	0,095	0,234	0,853	0,915	0,635	0,046
1970-77	0,524	0,801	0,481	0,567	0,276	0,306	0,151	0,144	0,192	0,419	0,797	0,67	0,441	31,63*

TABLEAU n° 5

+ module spécifique

* en l/s

Les limites des cycles hydrologiques et les valeurs des débits moyens par cycle sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

CYCLES	DATES	DUREE	DEBIT MOYEN. m ³ /s
1970-1971	1.10.70 au 8.11.71	404 j.	0,301
1971-1972	8.11.71 au 12.11.72	370 j.	0,276
1972-1973	13.11.72 au 14.10.73	336 j.	0,30
1973-1974	15.10.73 au 8.9.74	329 j.	0,392
1974-1975	9.9.74 au 8.8.75	334 j.	0,669
1975-1976	9.8.75 au 9.9.76	398 j.	0,305
1976-1977	10.9.76 au 24.10.77	410 j.	0,548

Les débits moyens mensuels interannuels ont été reportés sur la Fig. 24, qui montre deux périodes de hautes eaux en Février et en Novembre, encadrant une période de basses eaux en Juillet, Août, Septembre.

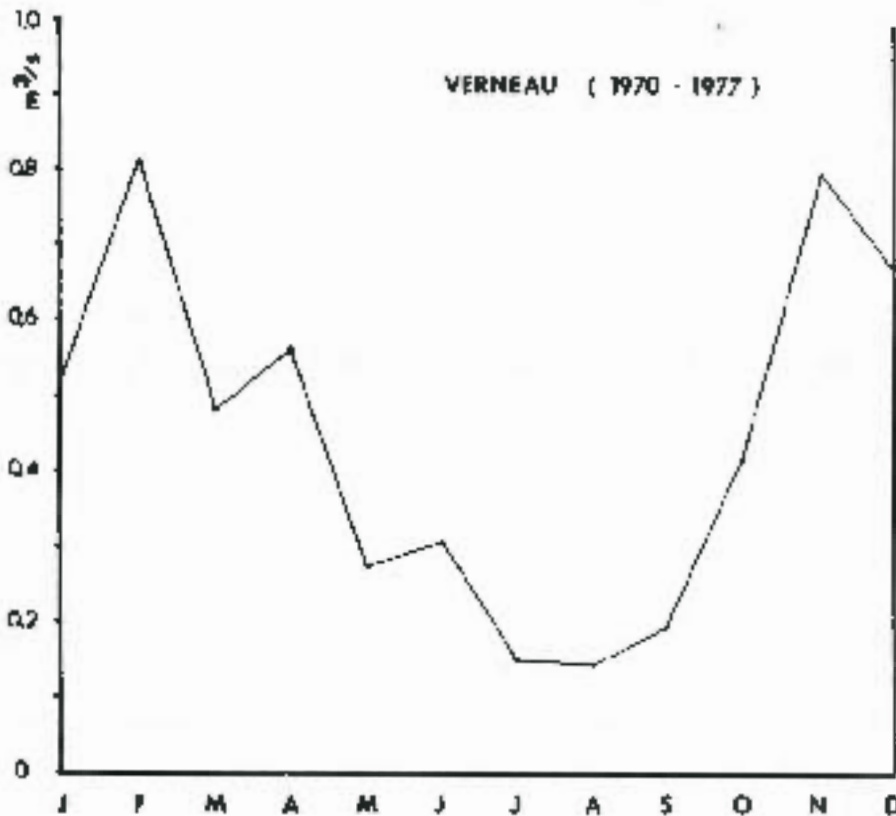


Fig. 24 - DEBITS MOYENS MENSUELS INTERANNUELS.

Nous avons calculé les débits spécifiques pour la période étudiée. Les résultats sont rassemblés dans le tableau n° 5.

Le module spécifique moyen interannuel pour la période 1970 à 1977 est de $31,6 \text{ l/s/km}^2$, pour un débit moyen de $0,441 \text{ m}^3/\text{s}$.

En l'absence de valeurs de référence régionales, définies pour des bassins versants bien délimités, il est difficile d'utiliser ce résultat pour confirmer ou infirmer la valeur de superficie avancée pour le bassin du Verneau.

L'analyse des données brutes (climatologiques et hydrologiques) et des conditions dans lesquelles elles ont été recueillies nous ont conduit à mettre en relief les facteurs d'imprécision et la limite de validité des résultats.

L'exemple le plus net en est le calcul de l'E.T.R., dont l'incertitude peut être masquée par l'apparente précision des chiffres fournis dans les tableaux relatifs à l'estimation de l'E.T.R.

Il conviendra donc, lors des traitements qui seront effectués sur ces chiffres, et des interprétations qui en seront tirées, de ne pas

INTERPRÉTATION DES RESULTATS

RELATIONS EXISTANT ENTRE LES STATIONS ET CORRELATIONS

Les résultats présentés dans la première partie, et notamment ceux des traçages effectués sur le secteur étudié, nous avaient amenés à formuler des hypothèses sur les relations existant entre les trois sources principales de la reculée de Nans-sous-Ste-Anne.

Il convient maintenant de confronter ces hypothèses aux résultats de l'hydrodynamique.

Dans un premier temps, nous avons utilisé la méthode des liaisons corrélatives appliquée soit à des débits ponctuels, soit à des débits moyens journaliers.

Stations Lison Source - Verneau

Une régression linéaire entre des valeurs ponctuelles prises sur les limnigrammes de ces deux sources (avec des valeurs prises à raison d'un point par montée de crue et d'un point par décrue) a été effectuée au cours du cycle hydrologique 1976-1977. Quarante six couples de valeurs ont été traités. Le coefficient de corrélation obtenu est de 0,614. La valeur critique de "r" en-dessous de laquelle la liaison n'est pas significative est de 0,541 pour 45 valeurs, au seuil de 5% (A. MANGIN, 1975).

Sur le plan théorique, la liaison Lison Source - Verneau, pourrait être considérée comme significative. On peut cependant estimer que ces deux exutoires appartiennent à deux systèmes indépendants, par suite de la médiocrité du coefficient de corrélation, et du faible écart qui le sépare de la valeur critique de "r". Cet écart peut être imputé à l'effet d'une composante climatique régionale (pluviométrie).

Stations de Myon - sources du Lison, Sarrazine et du Verneau

Les données disponibles à la source du Lison, n'étant que très fragmentaires, il nous a paru utile de voir dans quelle mesure les valeurs de débits à la source du Lison pouvaient être déduites de celles de la station de Myon.

A cet effet, sur la Fig. 25 ont été reportés les hydrogrammes de crue des sources du Lison, de la Sarrazine, du Verneau, et celui du Lison à la station de Myon, pour la crue du 24 au 28 Octobre 1977.

Le Verneau par son temps de réaction rapide contribue en même temps que le ruissellement (ruisseaux de Vau, d'Eternoz, de Coulans, etc...) à la montée rapide des eaux à Myon et détermine avec un décalage de 3 à 5 heures le pic de crue. Au cours de la décrue, l'importance relative du ruissellement diminue et l'hydrogramme de Myon se rapproche de celui de la somme des débits du Lison source et de la Sarrazine.

Ces hydrogrammes ne permettant pas de déterminer de façon précise la liaison entre la source du Lison et la station de Myon, nous avons effectué une corrélation des débits moyens journaliers. (cf. Fig. 25). En effet les débits ponctuels d'étiage sont numériquement insuffisants.

- CRUE DU 14 AU 28 OCTOBRE 1977

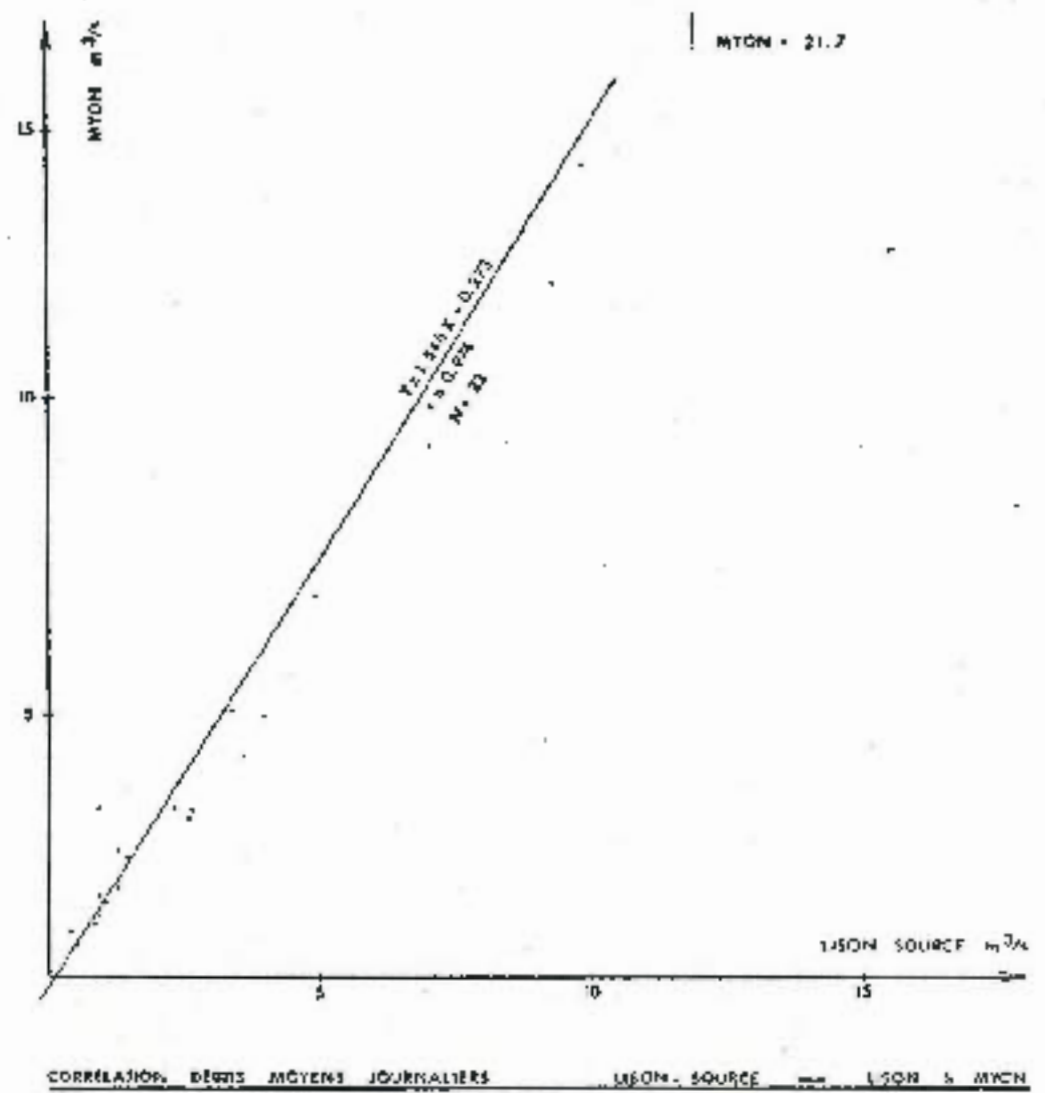
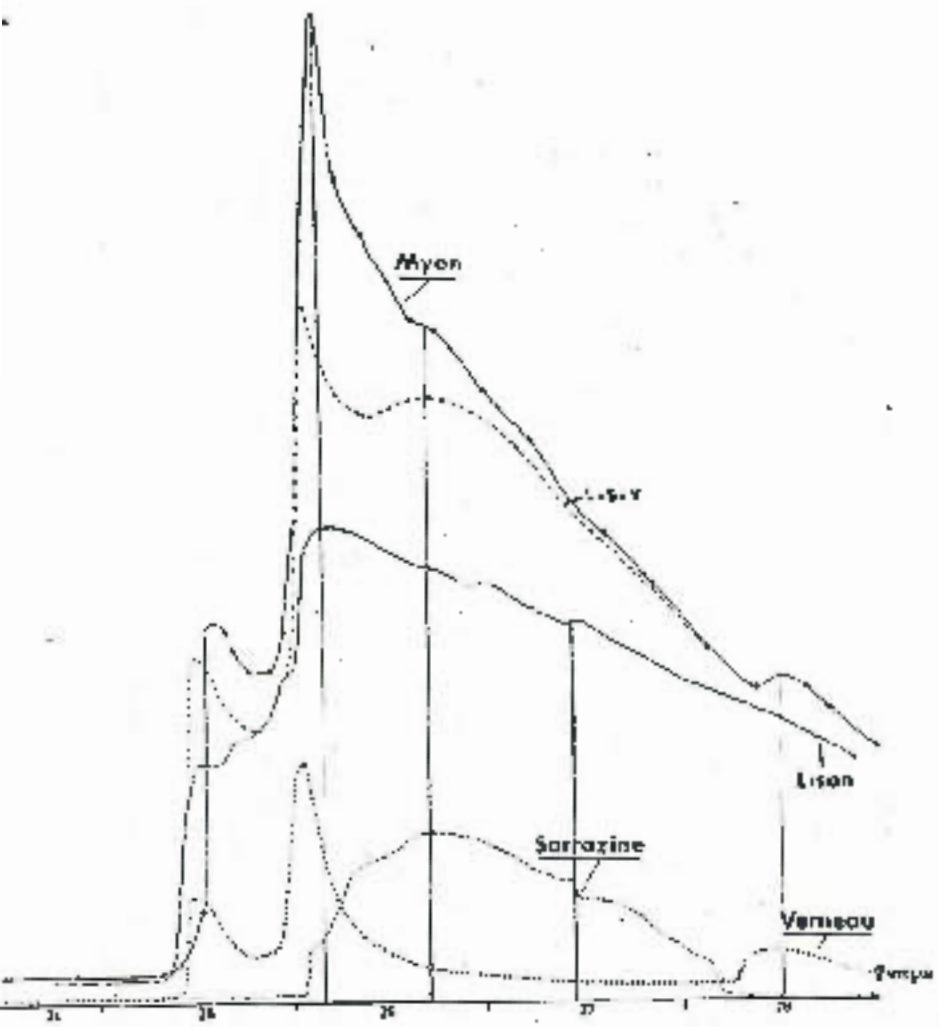


FIG. 25 - RELATIONS ENTRE LA SOURCE DU LISON ET LE LISON A MYON.

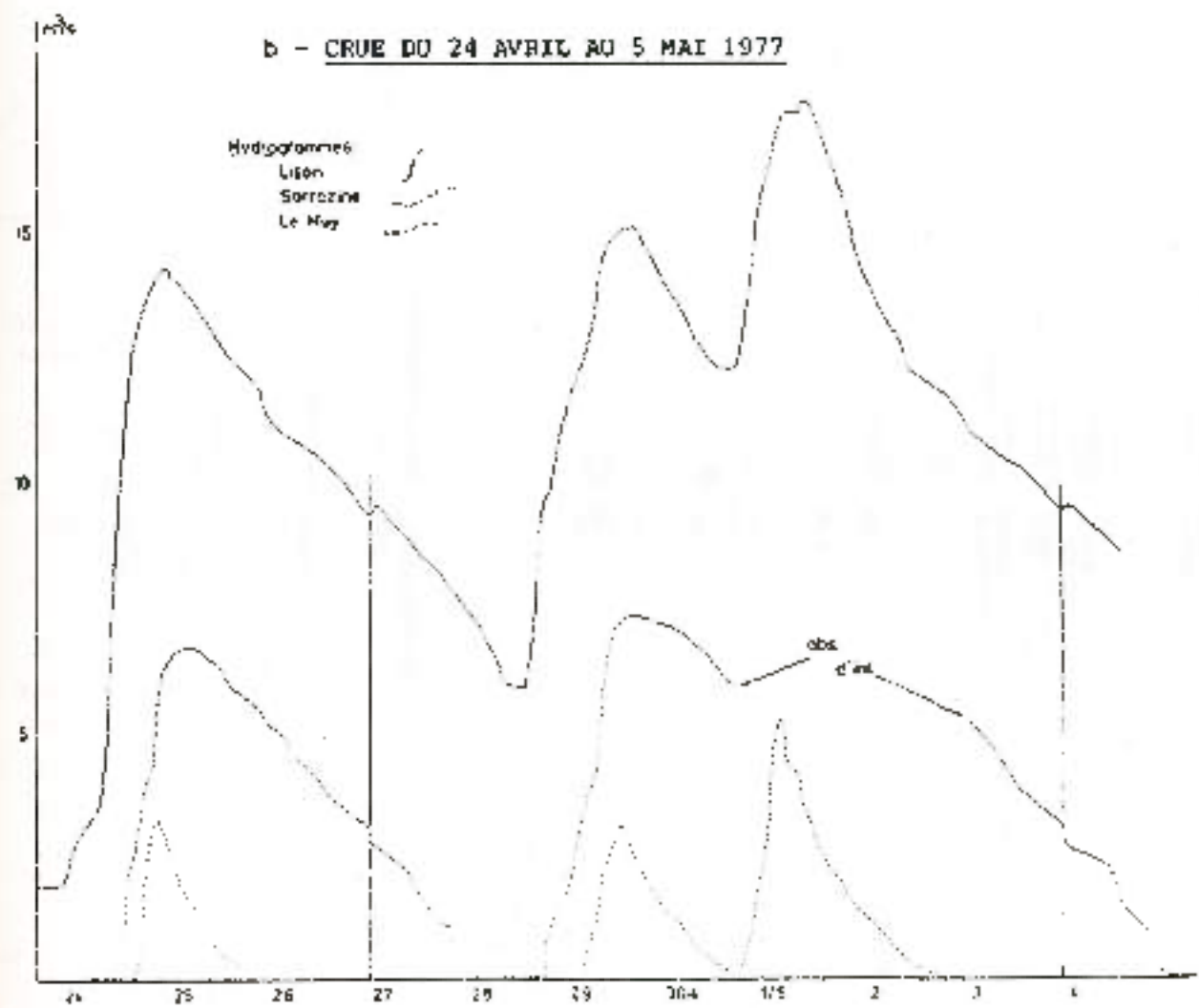
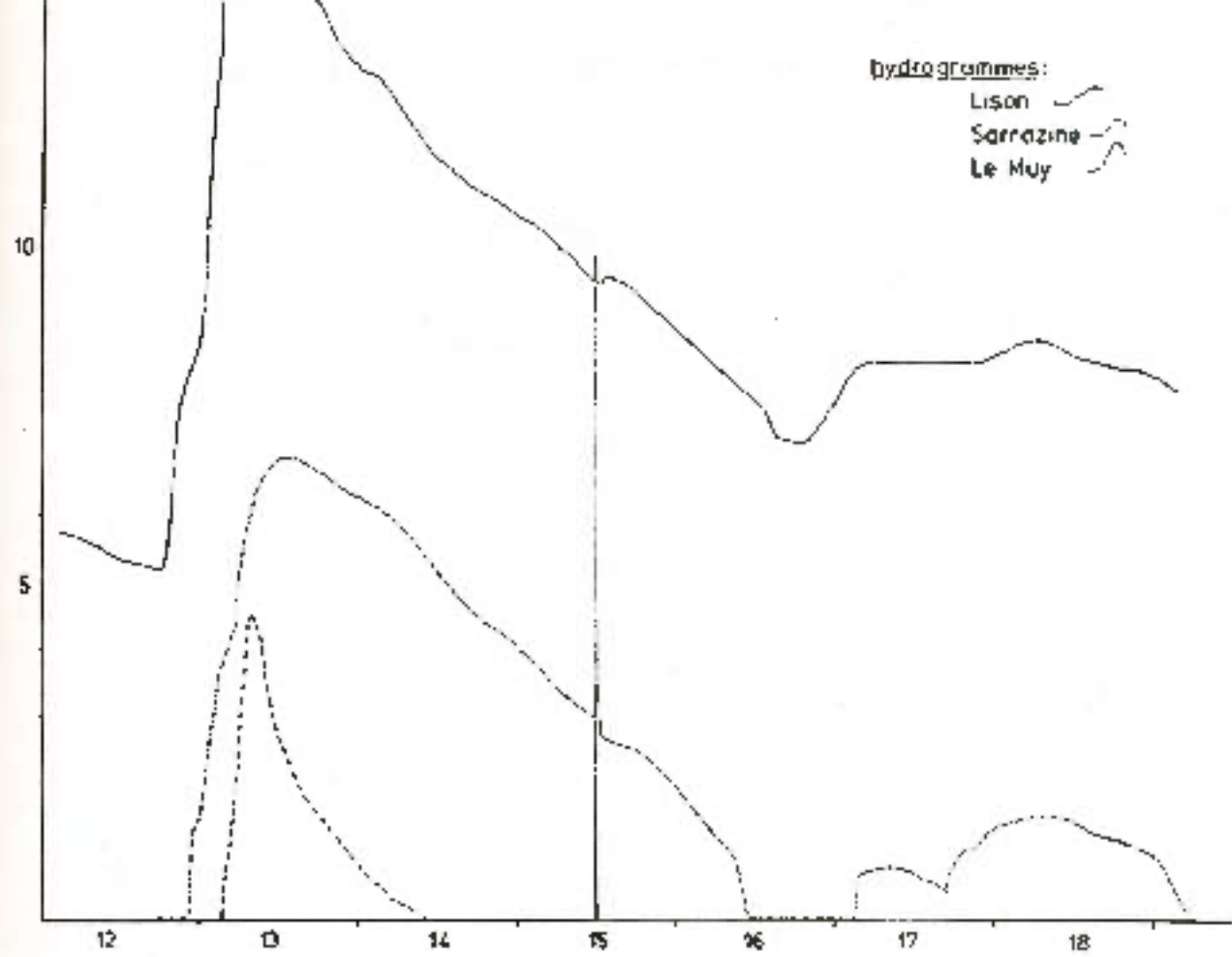
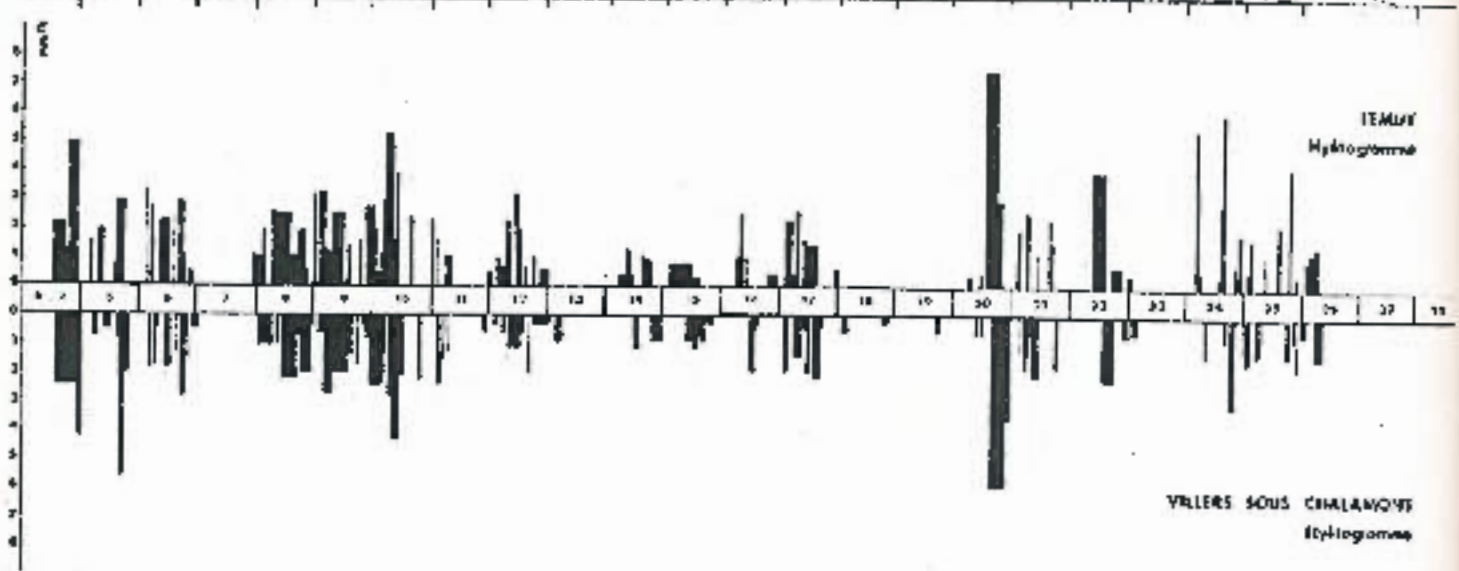
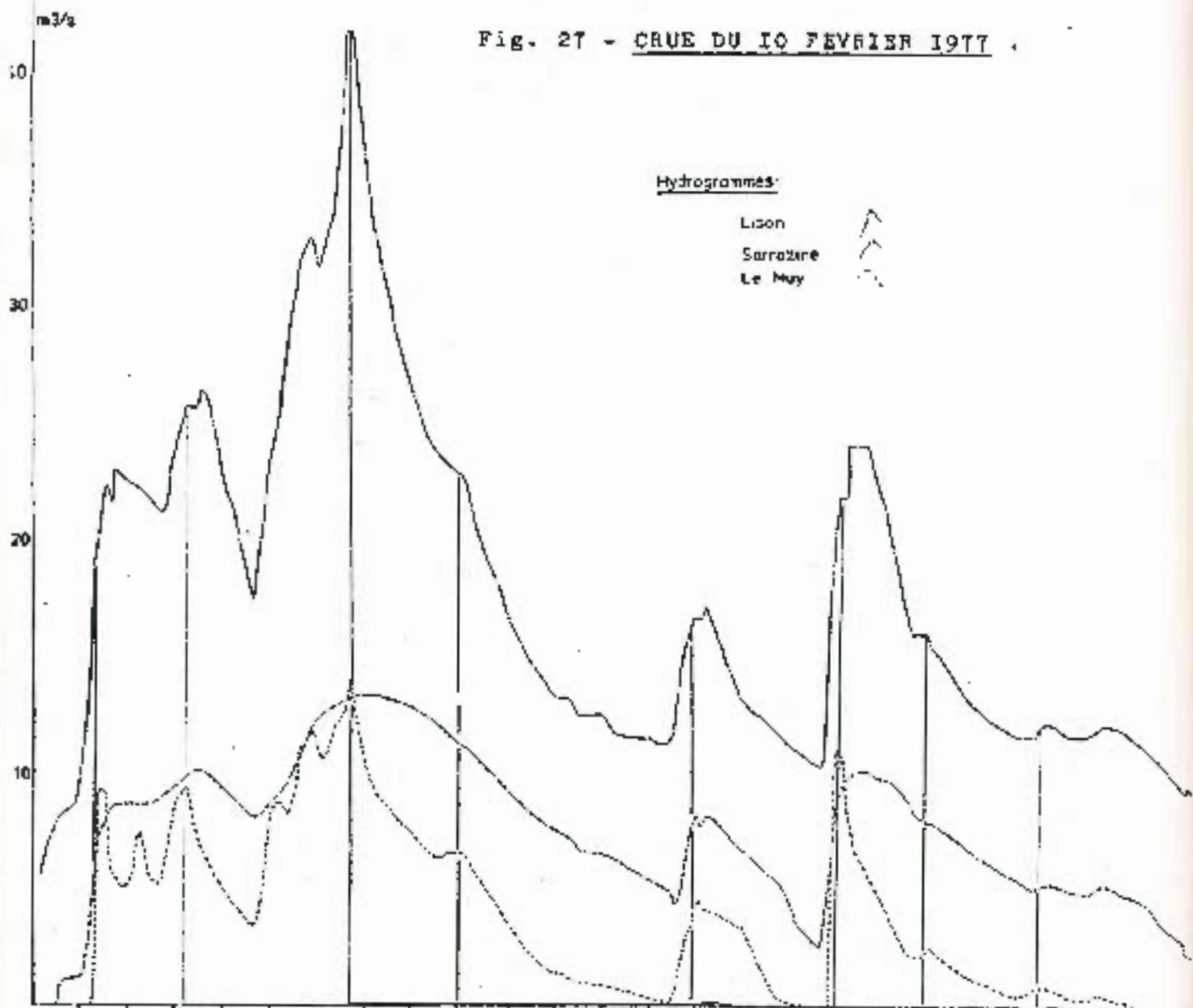


Fig. 27 - CRUE DU 10 FEVRIER 1977



Cette corrélation pour un nombre de 22 couples de valeurs (sélectionnés en raison d'un couple au plus par décennie) donne un coefficient $r = 0,974$. Ce coefficient précise la liaison entre la station de Myon et celle de la source du Lison. Les jaugeages réalisés lors de l'étiage 1976 semblent confirmer la convergence du Lison source et du Lison à Myon lors des bas débits ; le 16 Juin ces jaugeages ont donné :

Verneat	22 l/s
Lison source	430 l/s
Sarrazine	11 l/s
Gyps	11 l/s
Lison à Myon	440 l/s

La différence entre le débit à Myon et la somme des débits des sources de Nans-sous-Ste-Arne (480 l/s) représente 8% du débit à l'aval de Nans. Cette différence peut être imputable soit à une zone de perte entre Nans et Myon, soit plus probablement à l'imprécision des mesures, les débits du Lison à sa source et à Myon étant de toute façon comparables.

L'étude du tarissement sur plusieurs cycles et au cours d'étiages prononcés à la station de Myon pourra donc donner en première approximation une idée de la valeur des paramètres du tarissement à la source du Lison, en l'absence de données antérieures à 1976.

Source du Lison - Sarrazine - Muy à Dournon

Trois hydrogrammes ont été construits, afin de préciser les relations entre la source du Lison, la source de la Sarrazine, et le ruisseau temporaire du Muy à Dournon, qui ne constitue qu'un des points d'entrée du système. (cf. Fig. 26 - 27).

Cette étude comparée montre :

- . que la mise en charge brutale de la Sarrazine coïncide avec une croissance moins rapide des débits à la source du Lison, pendant quelques heures. Cette mise en charge a lieu pour des débits au Lison, de 8 à 10 m³/s.
- . un phénomène de désamorçage au cours de la décrue, qui se traduit par un brusque déficit à la Sarrazine, parallèlement à un gain au Lison.
- . que la fin de la décrue est marquée par une baisse brusque du débit à la Sarrazine, qui se stabilise aux alentours de 15 l/s.
- . que les hydrogrammes de crue montrent sensiblement les mêmes variations que ceux du Lison, mais décalés et amortis.

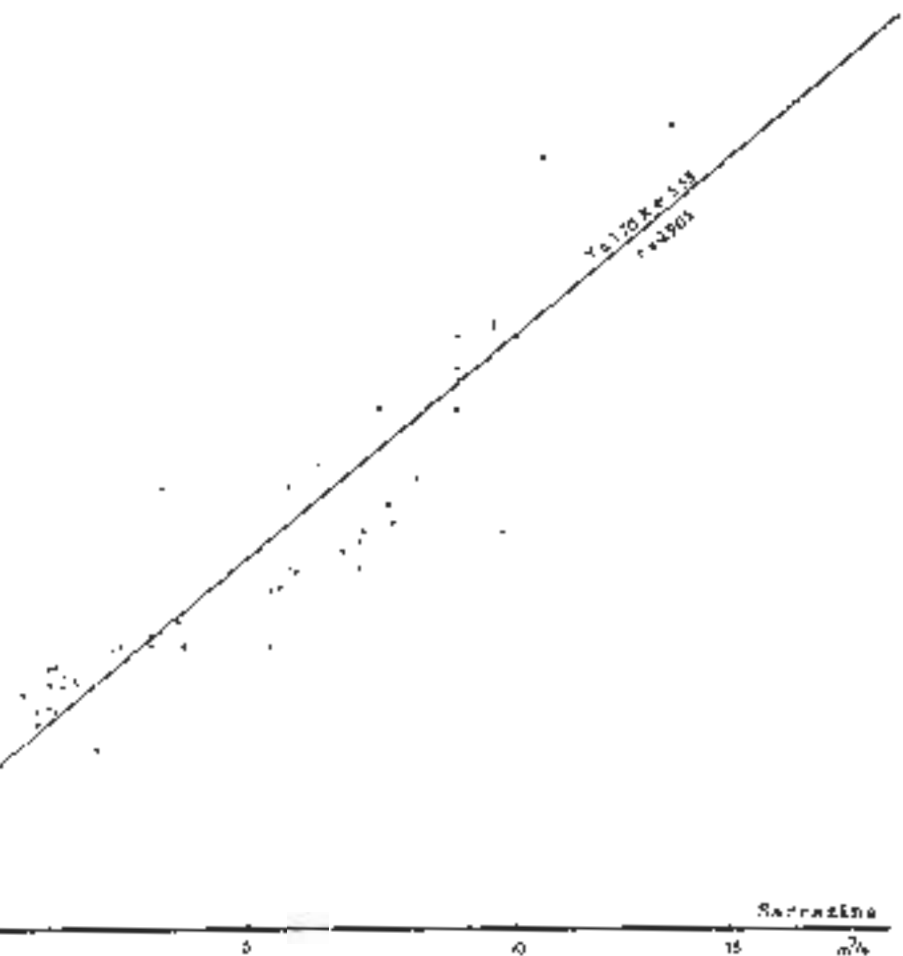
Ces données nous amènent à penser que la Sarrazine est un trop-plein du Lison.

L'étude des relations Lison source-Sarrazine a été complétée par une corrélation de débits ponctuels. Les valeurs de débits utilisées ont été sélectionnées sur les limnigrammes d'une part sur des montées de crues, d'autre part sur des décrues, échelonnées de Janvier 1977 à Août 1977.

Sur la Fig. 28 ont été représentés en ordonnées les débits du Lison, et en abscisses, ceux de la Sarrazine. L'interprétation est rendue délicate par la dispersion des points, que l'on peut attribuer aux réactions du système, et peut-être en partie aux imprécisions sur les débits et les échelles de temps des limnigrammes.

Le décalage entre les pics de crue contribue à l'étalement vertical des points ; en effet, la plupart du temps, la décrue est amorcée au Lison, alors que le sommet de crue n'est pas encore atteint à la Sarrazine.

CORRELATION DEBITS MOYENS JOURNALIERS



CORRELATION DEBITS PONCTUELS

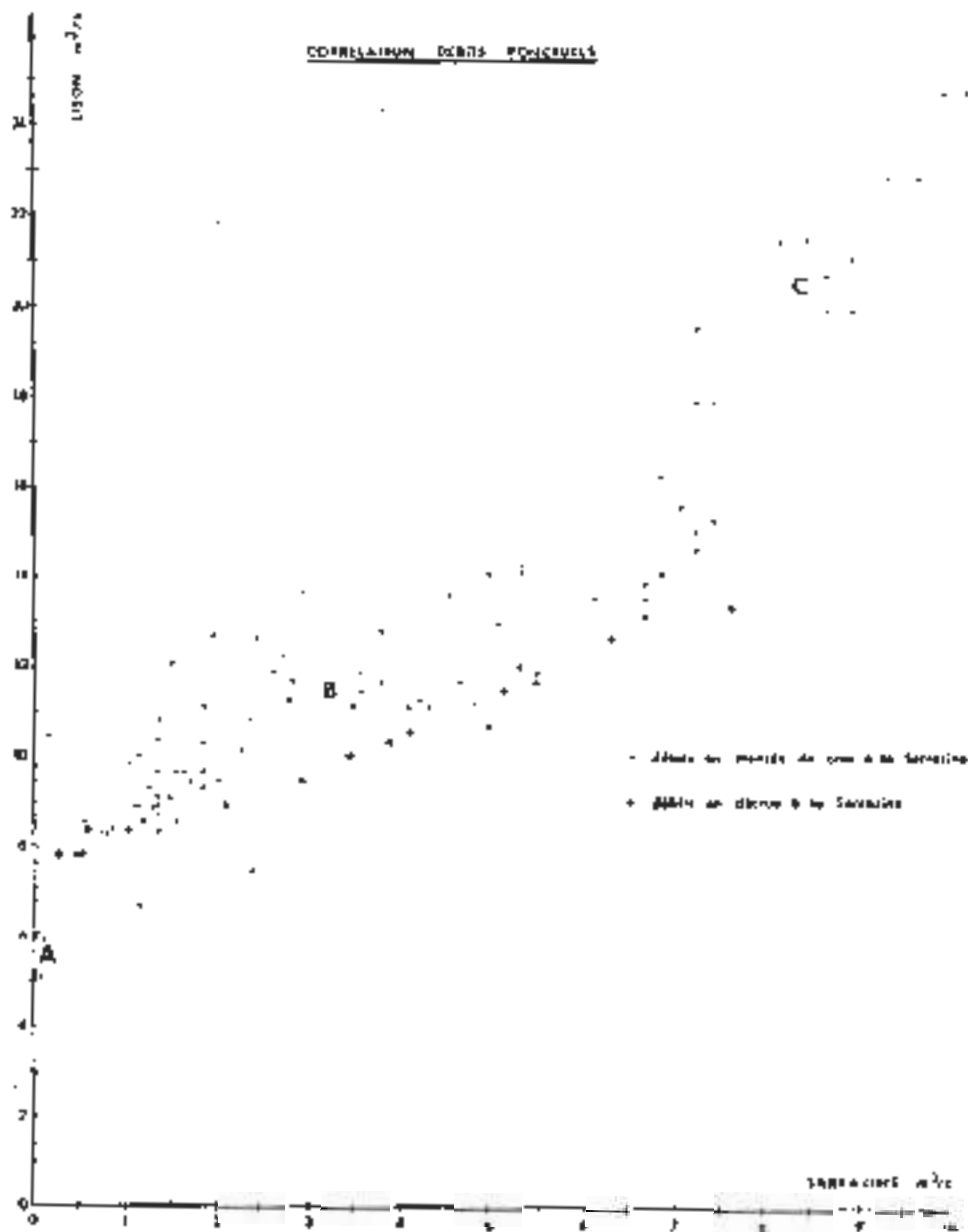


Fig. 2B - CORRELATIONS LISON Sce - SARRAZINE.

Sur ce graphique, les points correspondant aux montées de crue semblent se regrouper en 3 nuages :

- . le nuage A, correspond à un débit constant à la Sarrazine, (15 l/s), indépendant de celui du Lison.
- . le nuage B qui correspond à une croissance des débits à la Sarrazine, dépendante de celle du Lison. ($r = 0,813$; $a = 1,02$)
- . le nuage C ; la régression établie pour le nuage C donne un coefficient de corrélation moyen : 0,89 pour 21 couples de valeurs. La pente de la droite de corrélation, plus forte que la précédente, correspond à une croissance plus rapide des débits au Lison qu'à la Sarrazine. ($a = 2,9$)

Deux hypothèses peuvent expliquer ce phénomène :

- soit une saturation relative au niveau de la Sarrazine
- soit un apport d'eau supplémentaire, intéressant le Lison sans influencer la Sarrazine.

En l'absence d'équipement supplémentaire, en particulier sur le ruisseau de la Reculée, juste en amont du Creux-Billard, il est difficile de pencher pour l'une ou l'autre de ces hypothèses.

Une régression linéaire établie séparément pour les points correspondant à des débits sélectionnés en décrue fait apparaître une nouvelle loi. En effet la droite de corrélation est caractérisée dans ce cas par une pente plus faible que celle de la droite liant les débits en montée de crue. ($r = 0,99$; $a = 0,77$). L'ensemble de ces résultats qui peut être mis en parallèle avec les résultats du traçage de Pont-à-Moujard, permet de considérer la Sarrazine comme un trop-plein de la source du Lison. Il ne s'agit cependant pas d'un trop-plein physique simple comme en témoignent l'apparition de liaisons corrélatives différentes d'abord au cours de la montée de crue, et ensuite au cours de la décrue.

Il est donc possible de réunir le Lison et la Sarrazine en un même système karstique. Il serait cependant nécessaire d'affiner cette conclusion, qui sera par ailleurs confirmée lors de l'étude des débits classés, par une liaison corrélative portant sur une période beaucoup plus longue. En effet les régressions portent dans le cas présent sur une courte période allant d'Octobre 1976 à Août 1977.

Les débits moyens journaliers, lors des absences d'information au Lison source, et à la Sarrazine, ont été déduits d'une corrélation entre les deux sources. (cf. Fig. 20).

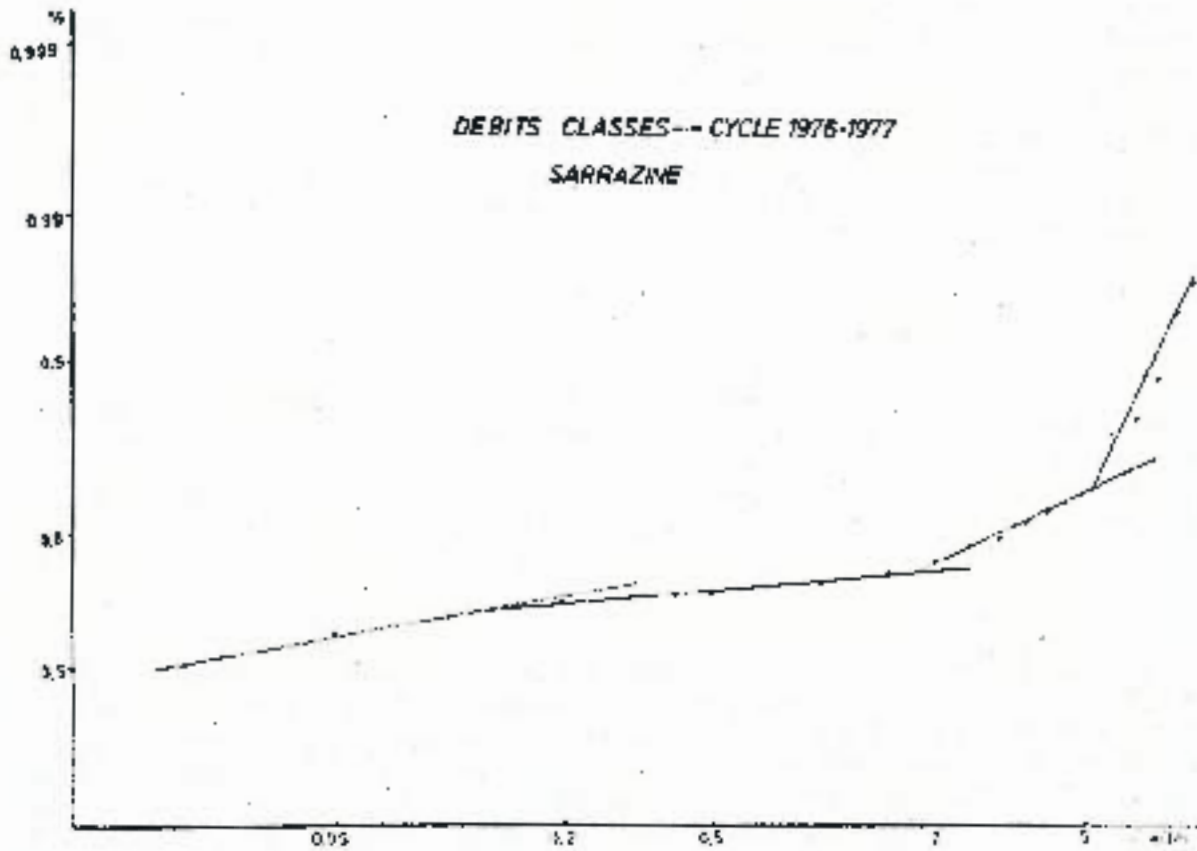
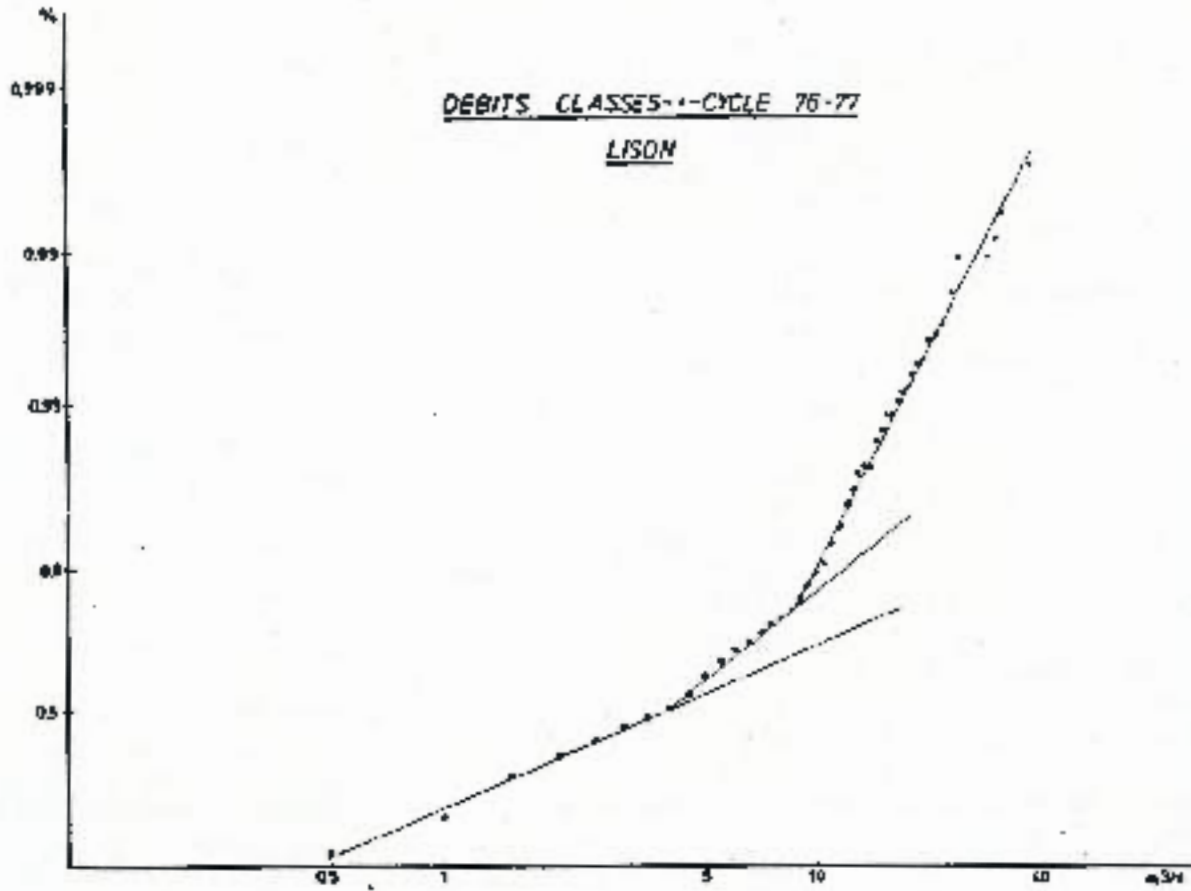
ETUDE DES DEBITS CLASSES

L'étude des relations entre les sources du Lison, de la Sarrazine et du Verneau, a mis en évidence l'indépendance des systèmes du Verneau d'une part, de la Sarrazine et du Lison d'autre part.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes, nous avons utilisé la méthode des débits classés de A. MANGIN (1971).

Principe

La courbe des débits classés est construite en portant pour une classe de débit donné le nombre de jours pendant lesquels ce débit a été observé. A. MANGIN a adopté à la courbe observée une dérivée de la loi de Laplace qui permet d'obtenir une droite lorsqu'on reporte sur un diagramme, en ordonnée les fréquences cumulées sur une échelle de probabilité, et en abscisse les valeurs des classes de débits sur une échelle arithmétique ou logarithmique.



Nax qu'une hétérogénéité intervient (influence de la réserve ou d'un trop-plein ...) les points s'écartent de l'alignement pour former une nouvelle droite qui correspond à une loi de répartition des débits du même type dont les paramètres sont différents.

Une augmentation de pente de la droite obtenue traduit une croissance ou une décroissance moins rapide des débits pour ces classes et inversement lors d'une diminution de pente.

Applications

. Système du Lison .

Sur les sources du Lison et de la Sarrazine les données disponibles ne recouvrent que le cycle hydrologique 1976-1977. Les résultats obtenus ont été complétés par une étude portant sur la station de Myon de 1969 à 1974.

- Le Lison source

La période étudiée s'étend du 30 Septembre 1976 au 25 Octobre 1977. Sur le diagramme (cf. Fig. 20) apparaissent deux ruptures de pentes respectivement à 4 et 9 m³/s.

Avant le seuil de 4 m³/s, les fréquences cumulées des débits classés s'alignent sur une droite de pente plus faible. La comparaison avec la partie basse de la courbe des débits classés établie pour le Lison à Myon pour la période 1968-1974, sur laquelle aucune rupture de pente n'est visible en hautes eaux nous incite à penser que ce phénomène ne peut être rattaché à une anomalie de fonctionnement du système.

Après le seuil de 9 m³/s, la pente augmente au moment de l'amorçage de la Sarrazine. Il semble que le fonctionnement de la Sarrazine en trop-plein soit responsable de la croissance des débits moins rapide à la source du Lison.

- La Sarrazine

Comme au Lison source seul le cycle 1976-1977 a été étudié (du 30 Septembre 1976 au 25 Octobre 1977).

Le diagramme (cf. Fig. 29) montre que la courbe se redresse d'abord pour un débit de 1,9 m³/s puis pour un débit de 6 m³/s, indiquant dans les deux cas une croissance moins rapide des débits.

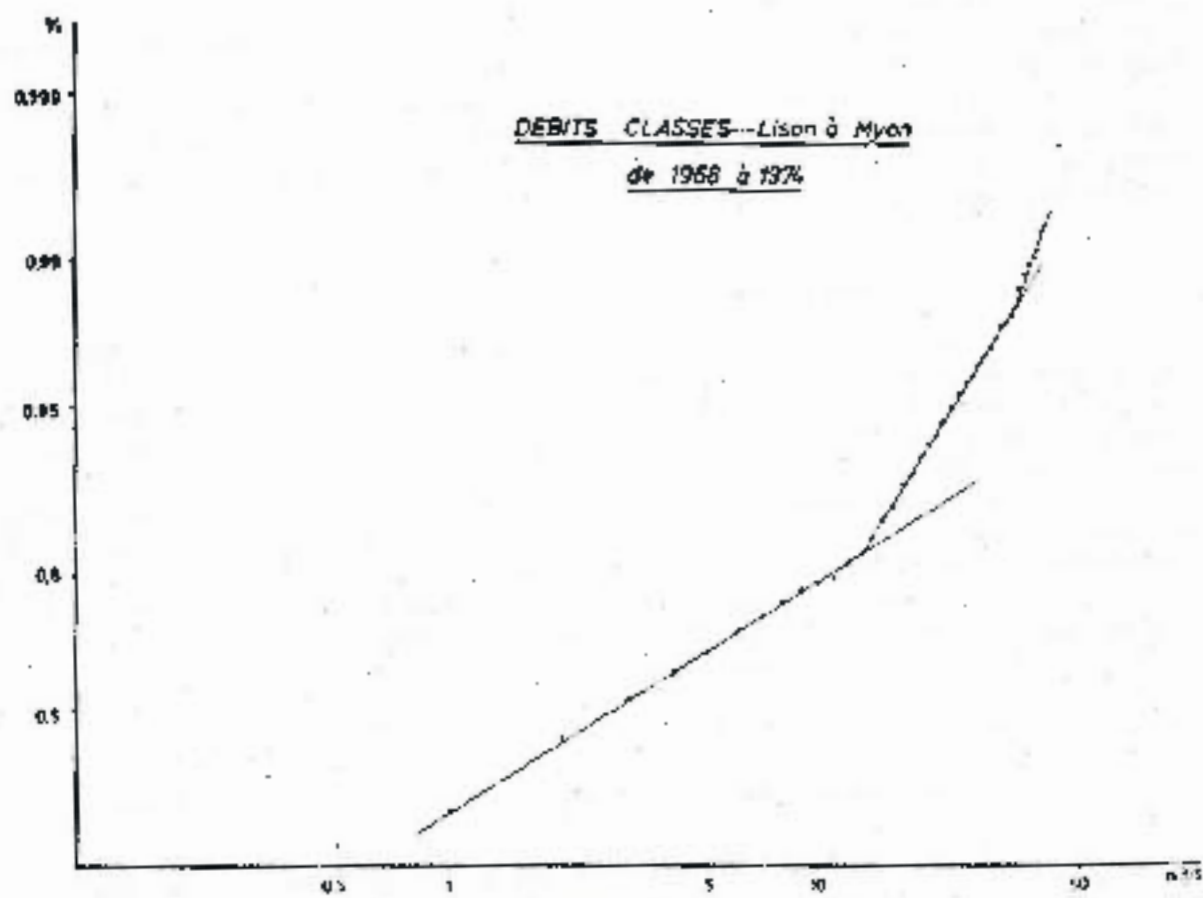
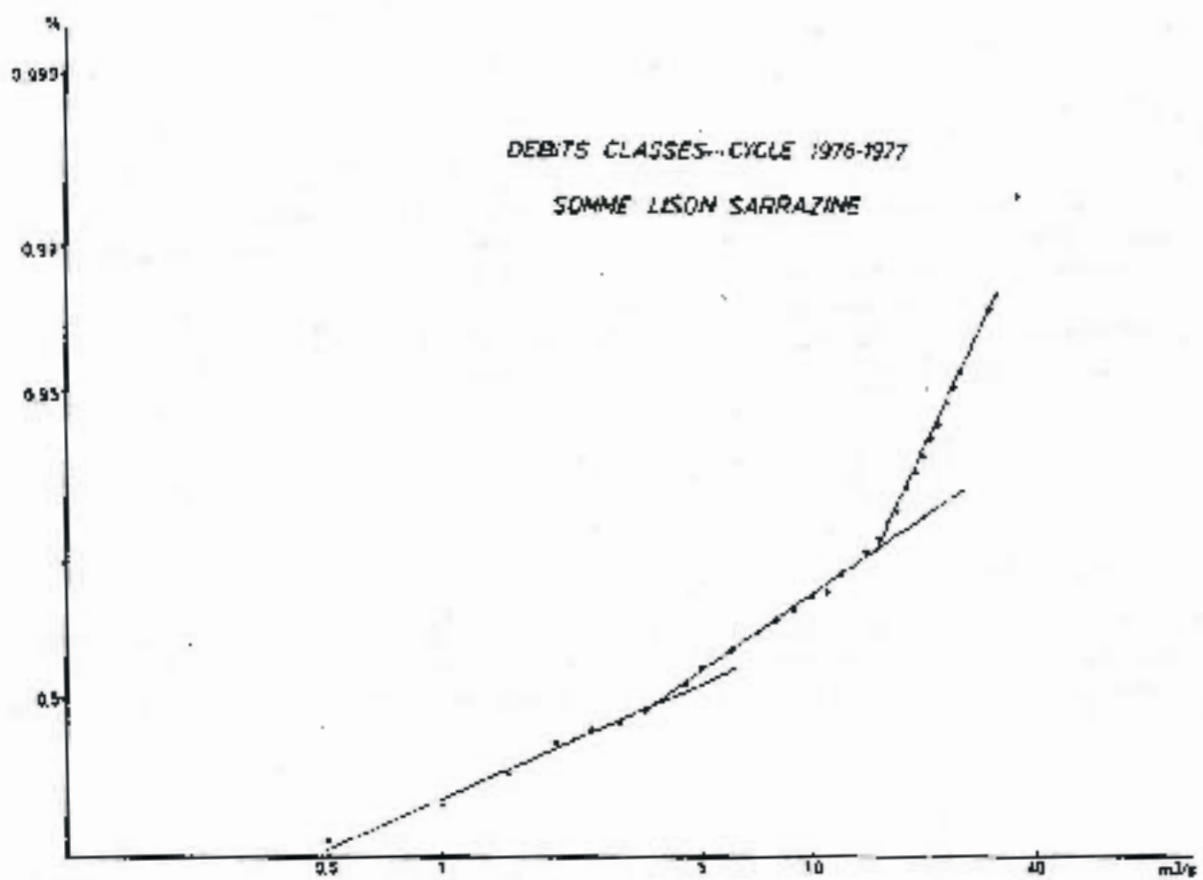
L'insuffisance de la connaissance de cet exutoire, ainsi qu'une période d'observation trop brève ne permettent pas d'expliquer la nature des mécanismes qui sont à l'origine de la variation dans la croissance des débits.

Pour essayer de mieux saisir ce phénomène nous avons construit les courbes de débits classés de la somme Lison-Sarrazine, pour le cycle 1976-1977, puis celles du Lison à Myon pour une période allant de 1968 à 1974.

- La somme Lison-Sarrazine, et le Lison à Myon

La courbe de débits classés de la somme Lison plus Sarrazine (Fig. 30) présente une rupture de pente qui se traduit par un redressement de la courbe. Ce déficit ne survient pas à 9 m³/s mais aux environs de 14,5 m³/s.

- Fig. 30 -



Il semble donc qu'à partir d'un débit moyen de 9 m³/s la Sarrazine fonctionne en trop-plein du Lison, mais que pour un débit de 14,5 m³/s le système du Lison montre un ralentissement dans la croissance des débits.

D'autre part, les courbes de débits classés à Myon dont la moyenne sur les années 1969 à 1974 est représentée en Figure 30, montrent également une augmentation de pente au-delà de 13,5 m³/s. Il ne semble donc pas exister d'autres trop-pleins que la Sarrazine dans la vallée du Lison.

Afin de rechercher s'il existe une concordance entre les volumes correspondant au déficit, pour les courbes de débits classés de la somme Lison-Sarrazine et du Lison à Myon, nous avons utilisé une méthode décrite par A. MANGIN (1975).

Pour des débits supérieurs à 14 m³/s dans le premier cas, 11 m³/s dans le deuxième cas, la droite réelle est obtenue à partir des valeurs observées. La construction de la droite représentative théorique se fait à partir de la figure 30, par reconstitution des pourcentages cumulés qui permettent ensuite le calcul du nombre de jours. La démarche inverse est ensuite utilisée en ne tenant compte que du nombre total de jours pour lesquels les débits sont supérieurs à 14 ou 11 m³/s.

Dans le cas de la courbe Lison - Sarrazine, la loi de distribution réelle a comme paramètres :

Q_0 est l'abscisse de probabilité nulle, a est la pente de la droite,

\bar{Q} correspond au centre de gravité de la distribution

$$Q_0 = 13,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad ; \quad a = 4,18 \quad ; \quad \bar{Q} = 15,71 \text{ m}^3/\text{s}$$

La loi de distribution théorique a pour paramètres :

$$Q_0 = 13 \text{ m}^3/\text{s} \quad ; \quad a = 1,73 \quad ; \quad \bar{Q} = 31,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le volume de transit réellement écoulé correspond à :

$$100 \times \frac{15,71}{31,4} = 50\% \text{ du transit total}$$

L'importance du déficit serait alors de 50%.

Dans le cas de la courbe du Lison à Myon :

la loi de distribution réelle a comme paramètres :

$$Q_0 = 10,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad ; \quad a = 3,01 \quad ; \quad \bar{Q} = 14,06 \text{ m}^3/\text{s}$$

la loi de distribution théorique a comme paramètres :

$$Q_0 = 8,4 \text{ m}^3/\text{s} \quad ; \quad a = 1,28 \quad ; \quad \bar{Q} = 41,99 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le volume de transit réellement écoulé est :

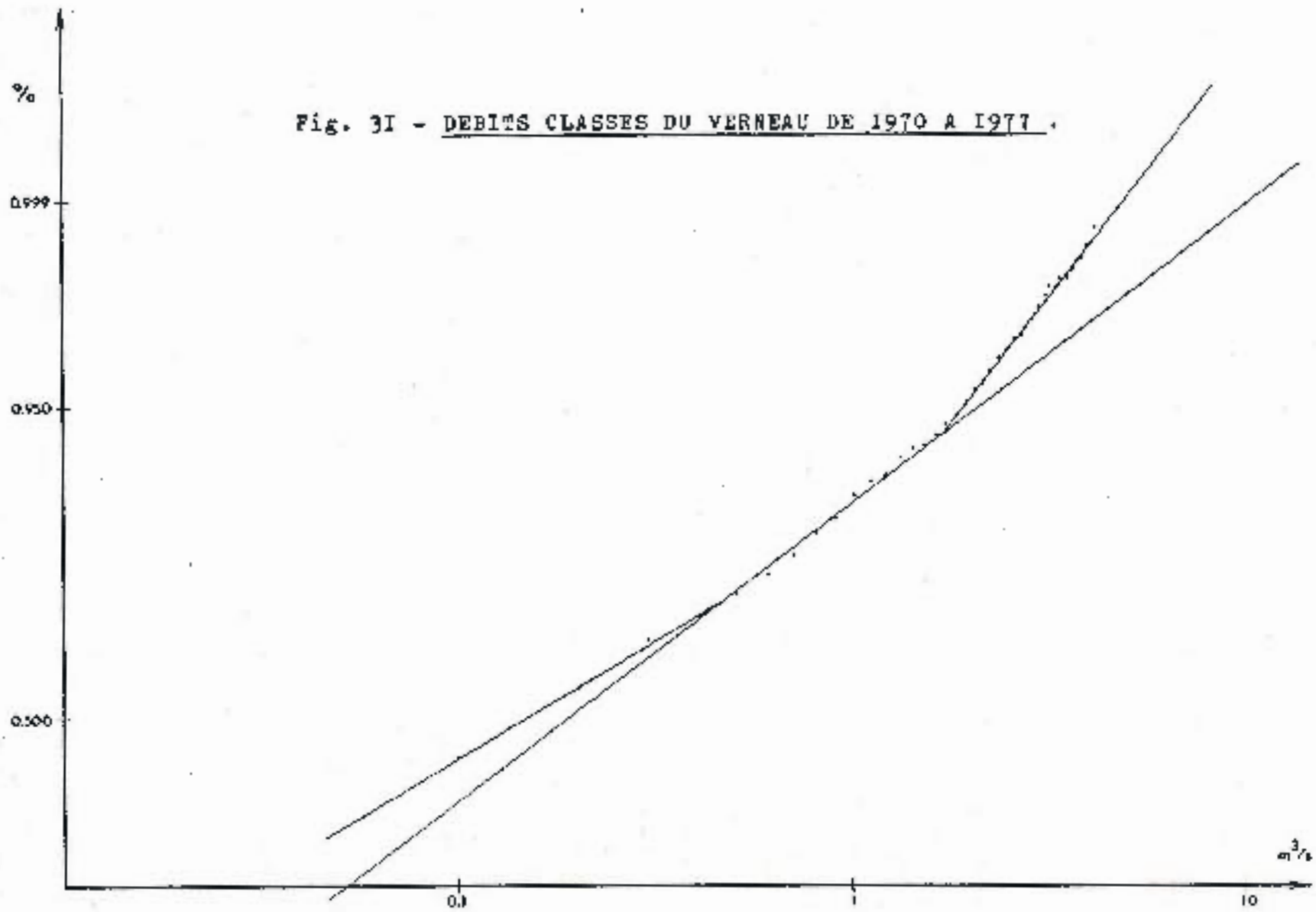
$$100 \times \frac{14,06}{41,99} = 33,5\% \text{ du transit total}$$

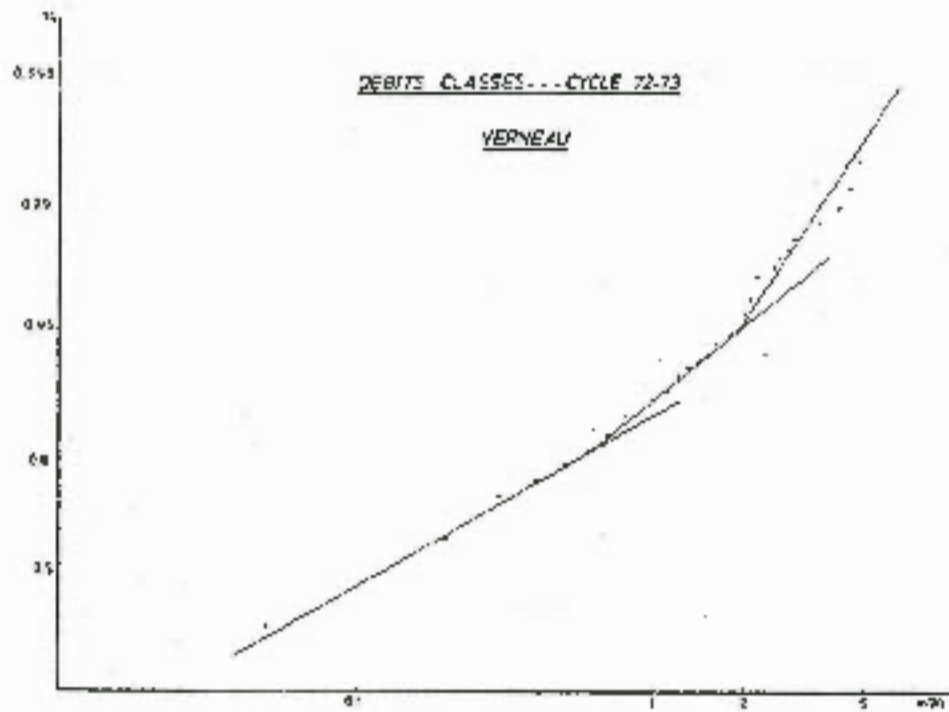
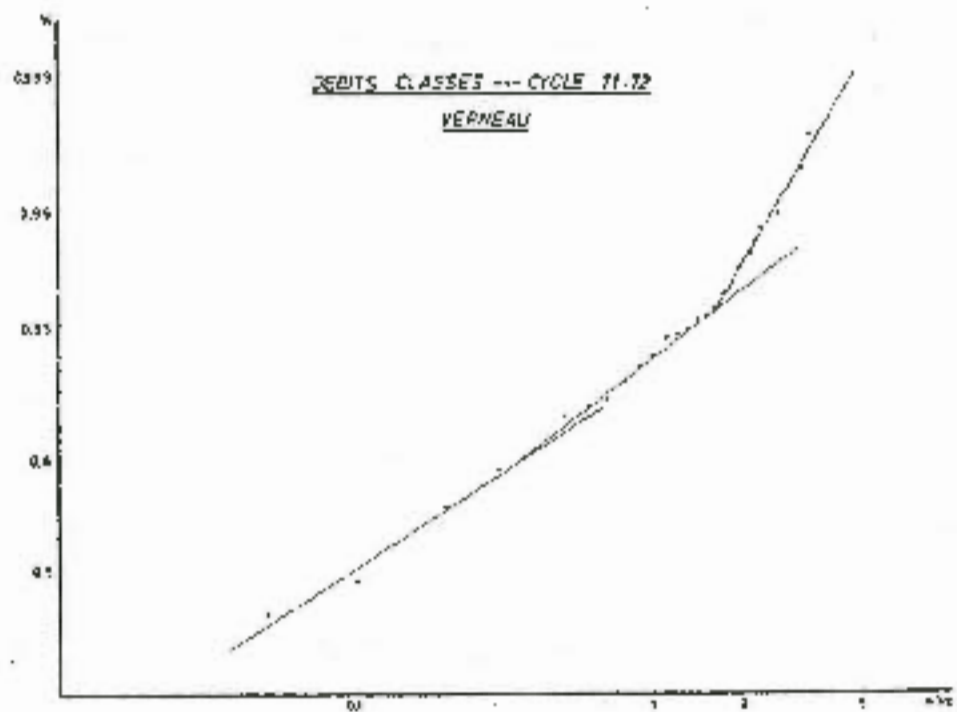
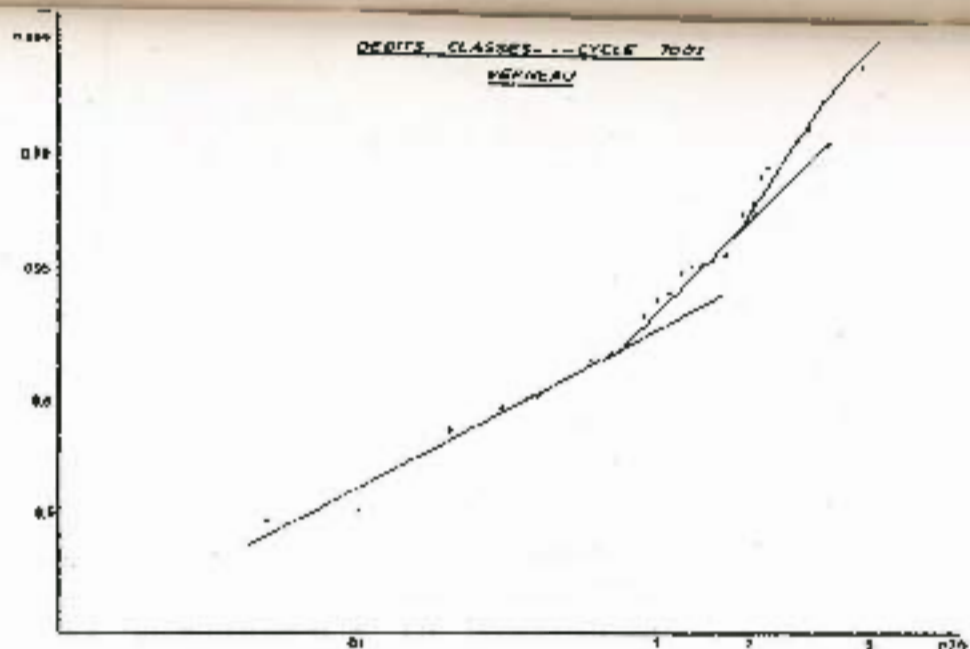
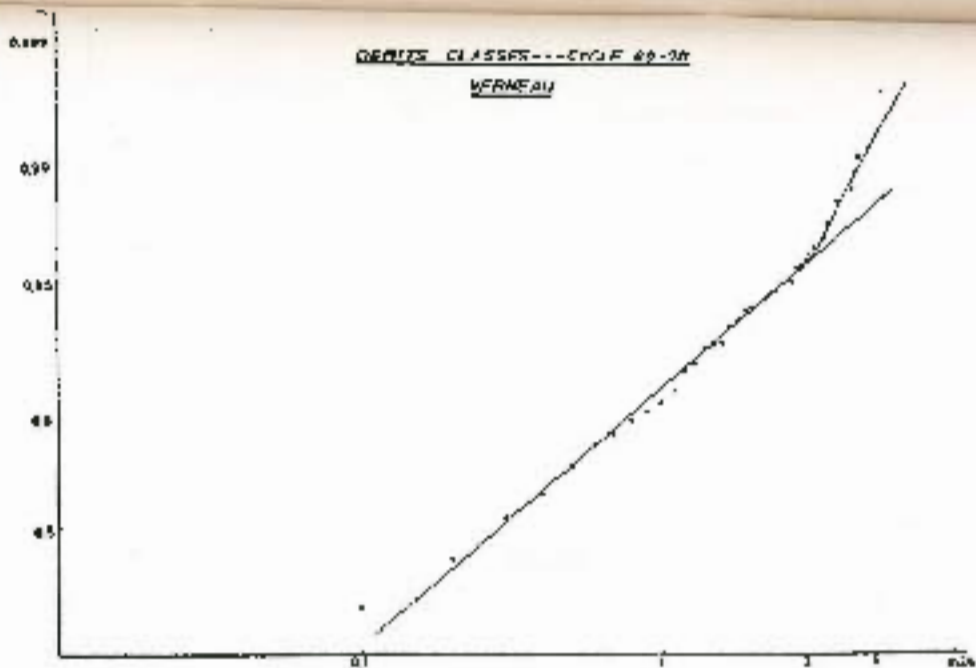
Le volume qui correspond au déficit est donc d'environ 66%.

Ces résultats montrent que le pourcentage du volume soustrait au volume de transit total est relativement différent dans les deux cas, mais surtout qu'il intéresse des quantités d'eau non négligeables.

Dans la mesure où le modèle employé est bien applicable dans ce cas précis, le problème posé est de déterminer, principalement par une approche plus précise des observations de terrain, la réalité et la nature de ces anomalies.

Fig. 3I - DEBITS CLASSES DU VERNEAU DE 1970 A 1977

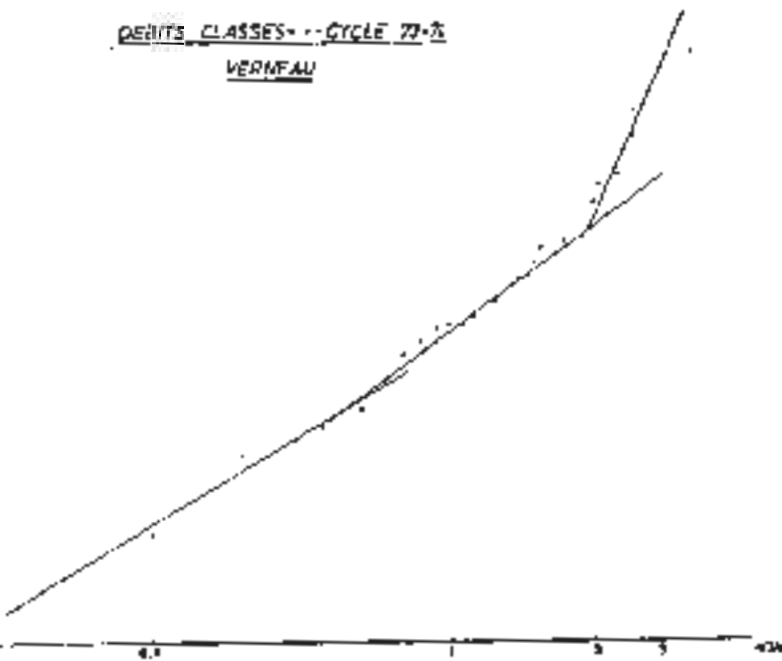




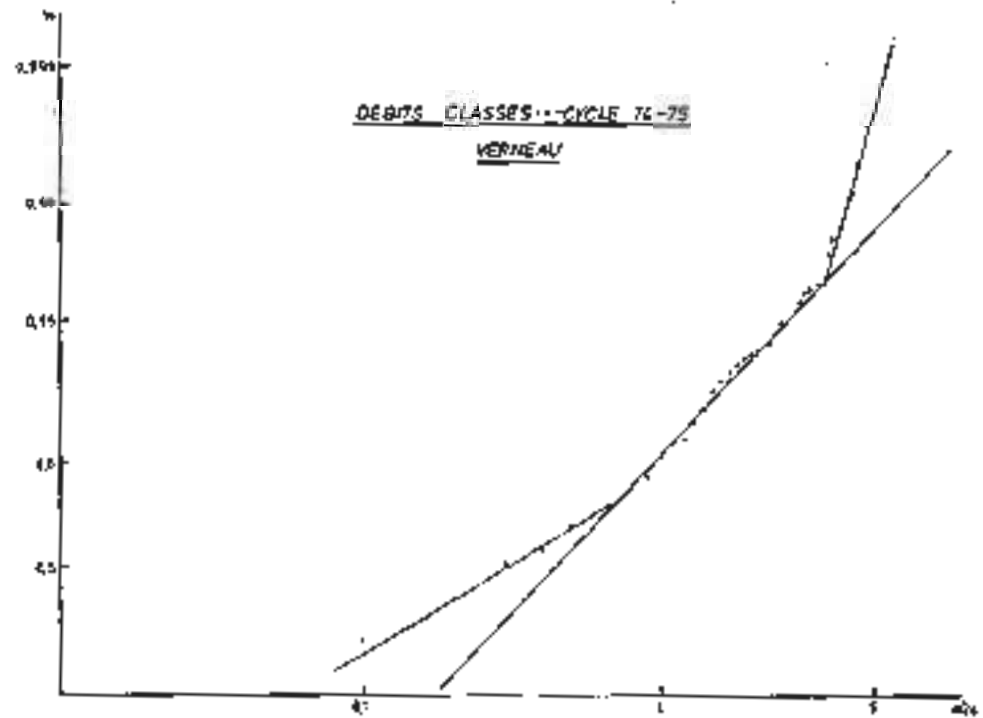
- Fig. 32 -

- Fig. 33 -

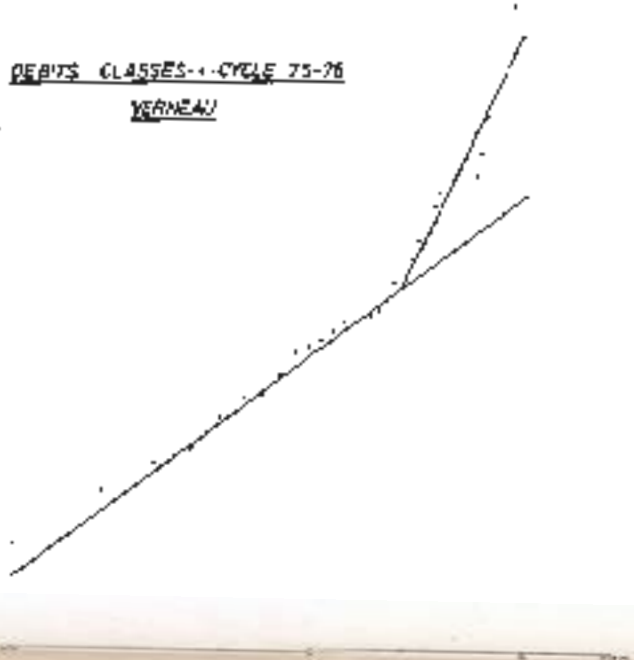
DEBITS CLASSES - CYCLE 77-78
VERNEAU



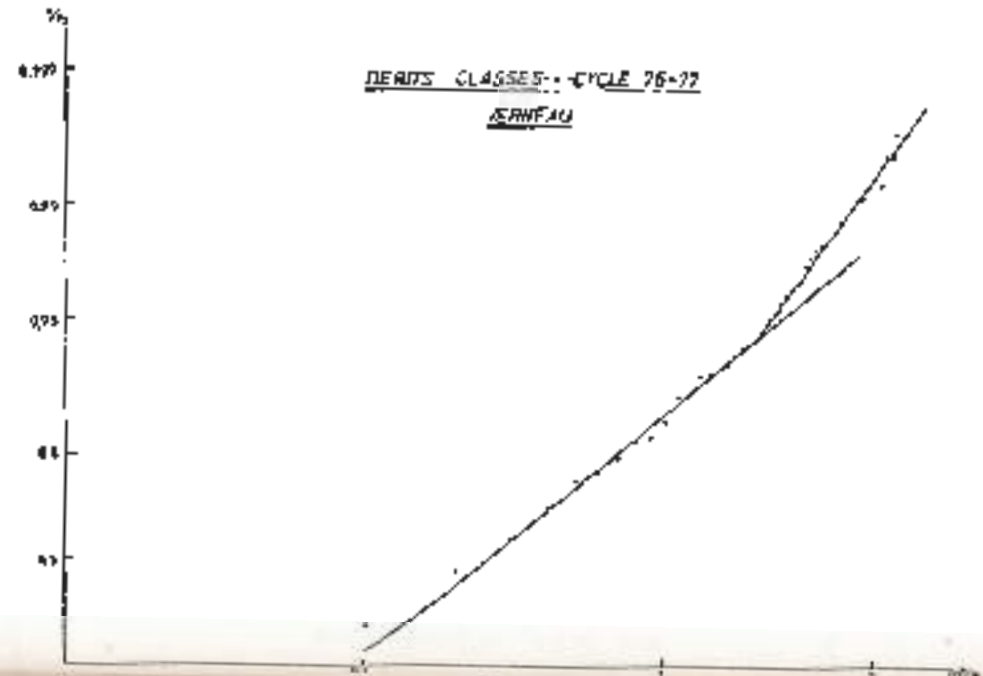
DEBITS CLASSES - CYCLE 76-78
VERNEAU



DEBITS CLASSES - CYCLE 75-76
VERNEAU



DEBITS CLASSES - CYCLE 76-77
VERNEAU



Nous avons mis en évidence, à l'aide des liaisons corrélatives, la complexité de la relation entre l'exutoire principal du Lison et son exutoire de trop-plein : la Sarrazine. L'étude des débits classés met l'accent sur la complexité du système dans son ensemble.

Systeme du Verneau .

L'analyse des débits classés a d'abord été effectuée sur une période s'étendant du 1er Novembre 1970 au 24 Novembre 1977. La courbe a été construite en portant en abscisses les débits suivant une échelle logarithmique et en ordonnées les fréquences cumulées suivant une échelle de probabilité. La Figure 31 montre que les fréquences cumulées des débits classés s'alignent sur deux droites sécantes pour un débit de l'ordre de 1,7 m³/s.

L'augmentation de pente de la droite pour des débits supérieurs à 1,7 m³/s correspond donc à une croissance ou à une décroissance moins rapide des débits.

Les observations de terrain ont montré qu'il n'existait aucun exutoire de trop-plein physique, proche de la résurgence du Verneau, susceptible d'expliquer cette anomalie.

Une méthode identique à celle décrite pour le Lison à Myon et la somme Lison-Sarrazine a été utilisée pour calculer le pourcentage du volume de transit qui ne participe pas à l'écoulement à l'exutoire.

Le calcul a été effectué pour les débits supérieurs à 1,6 m³/s.

Les paramètres de la loi de distribution réelle sont :

$$Q_0 = 1,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad ; \quad a = 4,24 \quad ; \quad \bar{Q} = 1,74 \text{ m}^3/\text{s}$$

La loi de distribution théorique a pour paramètres :

$$Q_0 = 1,45 \text{ m}^3/\text{s} \quad ; \quad a = 2,99 \quad ; \quad \bar{Q} = 1,95 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le volume de transit réellement écoulé correspond à :

$$100 \times \frac{1,74}{1,95} = 89\%$$

du transit total.

L'importance du volume qui ne participe pas à l'écoulement à l'exutoire serait donc de l'ordre de 10% du transit total.

Afin de rechercher de quelle façon se manifeste cette anomalie au niveau de chaque cycle hydrologique, nous avons construit les courbes de débits classés pour les cycles 1969-1970 ; 1970-1971 ; 1971-1972 ; 1972-1973 ; 1973-1974 ; 1974-1975 ; 1975-1976 ; 1976-1977. (cf. Fig. 32-33).

Toutes les courbes présentent la même forme d'ensemble :

- une rupture de pente dans les bas débits liée au tarissement de chaque cycle, qui est pratiquement inexistante sur la courbe générale de la période 1970-1977.

- une deuxième rupture de pente pour des débits variant de 1,6 à 3,5 m³/s suivant les cycles.

Il est intéressant de constater que le débit du point de rupture varie suivant que les étiages sont plus ou moins prononcés.

A partir de cette constatation, nous avons cherché à mettre en relation (Fig. 34) ces débits du point de rupture avec respectivement la pluie efficace sur le bassin, les débits de sortie à l'exutoire et avec Q_0 (débit de base 0% sur le diagramme des débits classés).

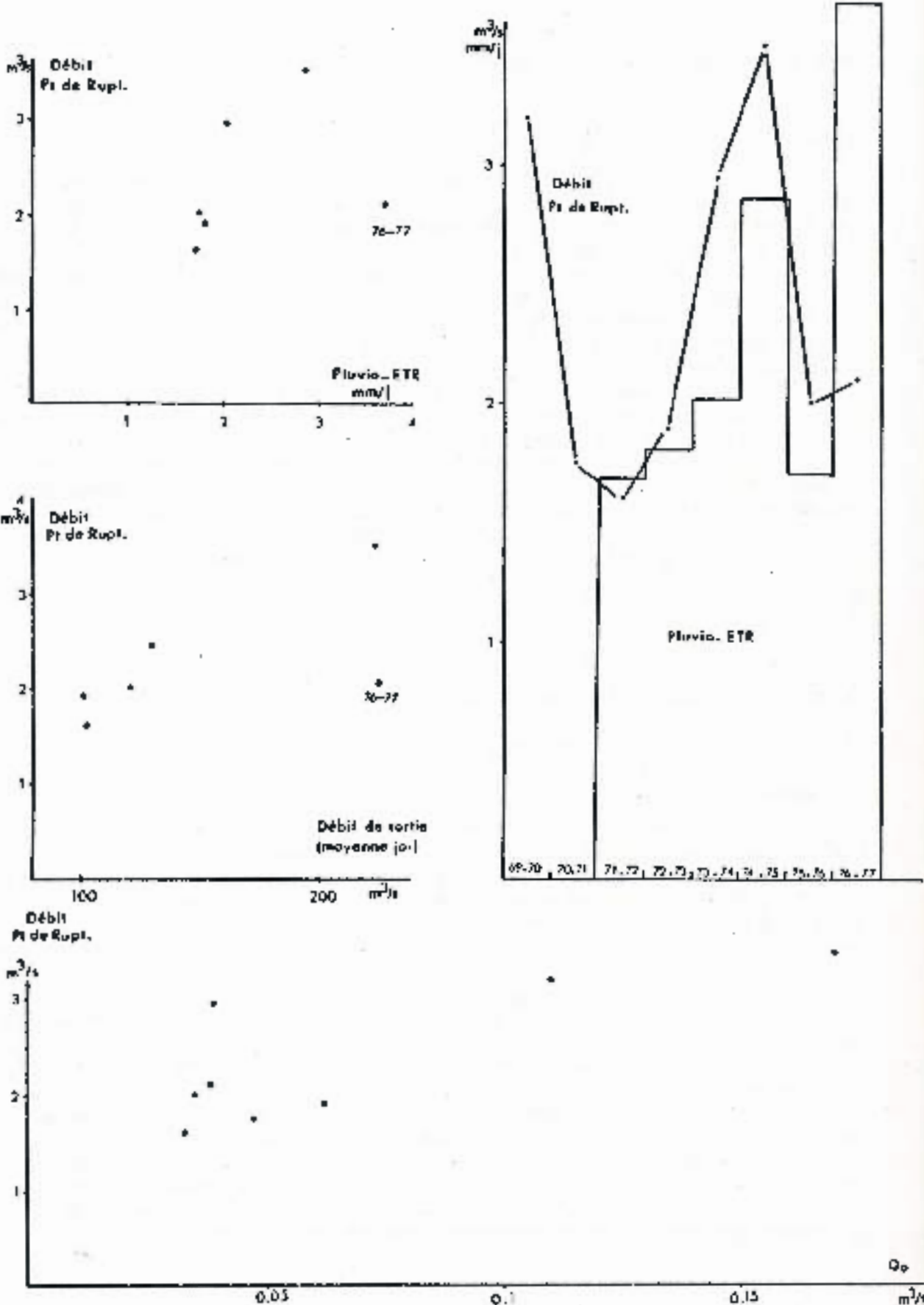


Fig. 34 - RELATION ENTRE LE DEBIT DU POINT DE RUPTURE DE LA DROITE DES

Dans les trois cas il semble difficile de dégager une loi, bien que la liaison entre, d'une part pluie efficace - débit du point de rupture, et d'autre part débit de sortie - débit du point de rupture semble effective mais non quantifiable.

Quatre hypothèses peuvent expliquer cette croissance moins rapide des débits et la variation du seuil pour lequel elle intervient :

- la capture d'une partie du bassin versant au profit d'un autre exutoire.
- La mise en réserve au niveau du karst noyé.
- La géométrie de certaines parties du réservoir.
- L'influence d'une grande différence de vitesse d'acheminement entre les eaux concentrées sur bassins marneux, accédant directement au drain principal et les eaux infiltrées dans les calcaires. En effet les observations de terrain ont montré que lors de traçages, les vitesses apparentes sont très élevées dans le drain (330 m/h). La coloration de Déservillers, effectuée dans les calcaires de la bordure du bassin a montré qu'en étiage les vitesses de circulation étaient très faibles (21 m/h). Il est cependant probable que ce retard à l'infiltration ne soit pas responsable de la rupture de pente de la droite des débits classés. En effet les eaux qui circulent plus lentement dans les calcaires interviennent de toute manière dans l'écoulement à l'exutoire. Ils sont donc pris en compte dans l'analyse des débits classés au cours d'un cycle.

Il apparaît que l'étude des lois de répartition des débits classés a apporté des informations complétant celles obtenues lors de l'analyse des liaisons corrélatives. Ces informations posent en fait beaucoup plus de problèmes qu'elles n'en résolvent et mettent en relief la difficulté d'approche de la notion de système karstique, même dans des cas qui apparaissent relativement peu complexe comme le système du Verneau.

Dans le cas de ce système l'analyse des débits classés a montré la nécessité de travailler sur une longue période afin d'amortir les variations importantes qui apparaissent au niveau de chaque cycle (ex basses eaux par exemple). Il serait donc nécessaire de reprendre l'étude après plusieurs années d'enregistrement limnigraphique aux exutoires du Lison et de la Sarrazine afin de vérifier les résultats obtenus sur le cycle 1976-1977.

Cette analyse a également montré que l'importance du déficit n'était pas du même ordre de grandeur pour les systèmes du Verneau et du Lison-Sarrazine. Il semble qu'il ne résulte donc pas de l'effet d'une composante régionale (influence de l'enneigement par exemple) mais plutôt de réactions propres à chaque système.

COURBES DE DÉCRUE ET TARISSEMENT

L'étude des relations entre les stations décrites précédemment et en particulier la Figure 25 montre des réponses différentes des systèmes du Lison et du Verneau, au signal pluie.

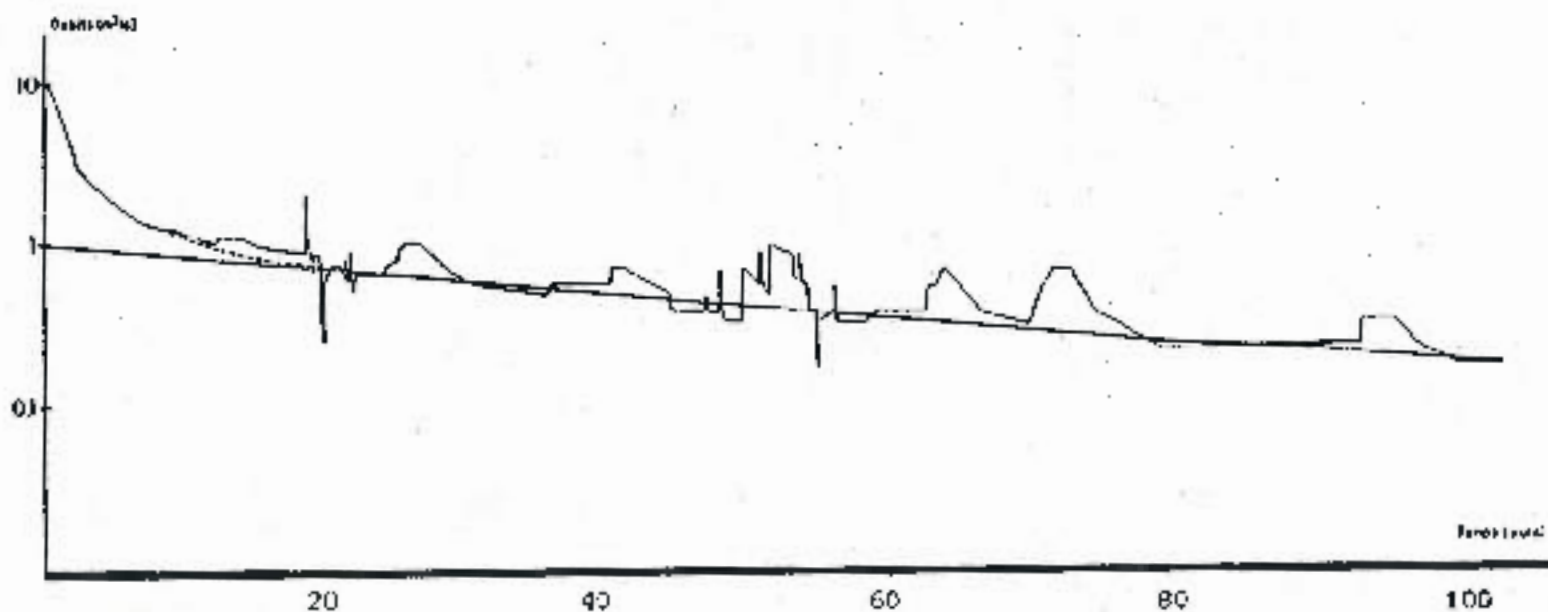
Le Verneau est caractérisé par ces montées de crues brutales (plusieurs m3 en une demi heure dans certains cas), suivies de décrues d'abord très rapides, s'amortissant ensuite, le débit initial étant de nouveau atteint selon les cas, au bout de 1 à 5 jours.

Le Lison présente des montées de crues plus lentes (de l'ordre de la journée) et des décrues très régulières. Le débit initial n'est généralement atteint qu'au minimum 7 jours après le début de la crue.

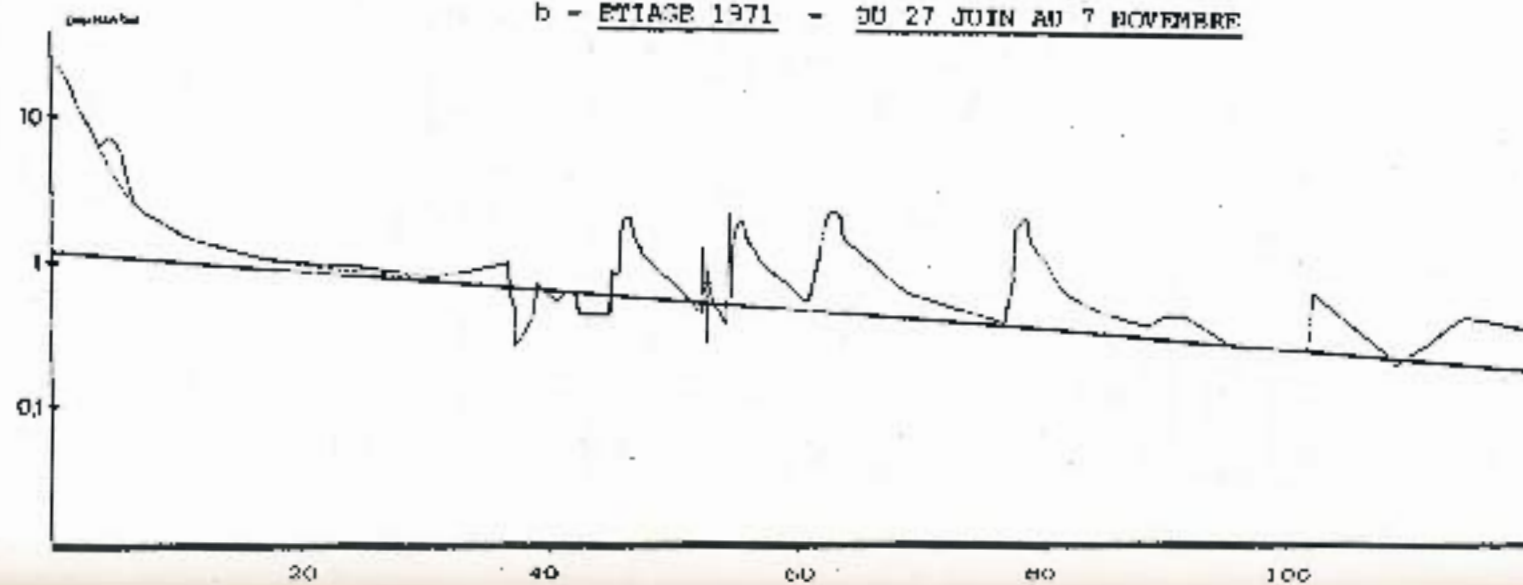
Cet aspect très différent des hydrogrammes des deux systèmes nous a conduit à préciser certaines caractéristiques des systèmes karstiques du Verneau et du Lison à partir de la méthode proposée par A. MANGIN (1970).

Fig. 35 - TARISSEMENTS - LISOR A MYON.

a - ETIAGE 1972 - du 10 JUILLET AU 21 OCTOBRE



b - ETIAGE 1971 - du 27 JUIN AU 7 NOVEMBRE



Principe

Dans ce paragraphe, le terme de décrue désignera la partie décroissante de l'hydrogramme, sur laquelle influent toujours les eaux d'infiltrations, celui de "tarissement", la partie non influencée, pendant laquelle seules les eaux du réservoir karstique participent au débit de l'exutoire.

Soient :

- Q . le débit de l'exutoire
- Qr . le débit imputable aux eaux de la réserve
- q . le débit imputable aux eaux d'infiltration

On a pendant la décrue :

$$Q = Qr + q$$

et pendant le tarissement :

$$Q = Qr$$

Sous une forme dynamique, le débit à l'exutoire peut être considéré comme la somme de deux fonctions :

$$Q = \phi(t) + \psi(t)$$

avec : $\phi(t)$ = participation de la réserve à l'écoulement

et $\psi(t)$ = participation de l'infiltration à cet écoulement.

En 1905, MAILLET propose une formule de décrue des cours d'eau qui correspond bien au tarissement dans le karst :

$$\phi(t) = Qr_0 \cdot e^{-at}$$

où a est le coefficient de tarissement

et t, le temps en jours.

Cette exponentielle $\phi(t)$, une fois ajustée, il est possible de tracer la fonction $\psi(t)$ point par point pour chaque hydrogramme.

A. HANCIN a montré que la fonction homographique rendait le mieux compte de la courbe de décrue ainsi obtenue :

$$\psi(t) = \frac{q_0 - \eta t}{1 + \epsilon t}$$

avec η = coefficient de durée ou de vitesse d'infiltration
 ϵ = coefficient d'hétérogénéité d'écoulement.

L'équation générale d'un hydrogramme de décrue et de tarissement peut donc s'écrire :

$$Q = Qr_0 \cdot e^{-at} + \frac{q_0 - \eta t}{1 + \epsilon t}$$

Application aux courbes de décrue et tarissement du système du Lison

La station de la source du Lison n'ayant été installée qu'après l'étiage 1976, nous ne disposons que de l'étiage 1977 dans le cadre de cette étude. Cet étiage de trop courte durée n'a en effet pas permis l'étude de la décrue et du tarissement sur cet exutoire. Nous avons donc utilisé les étiages 1971 et 1972 disponibles à la station de Myon.

En fonction de la corrélation Lison source - Lison à Myon, étudiée précédemment, qui montre une bonne convergence vers les bas débits, seul le tarissement a été étudié, afin d'obtenir des paramètres qui puissent être extrapolés à la source du Lison. (cf. Fig. 35).

100

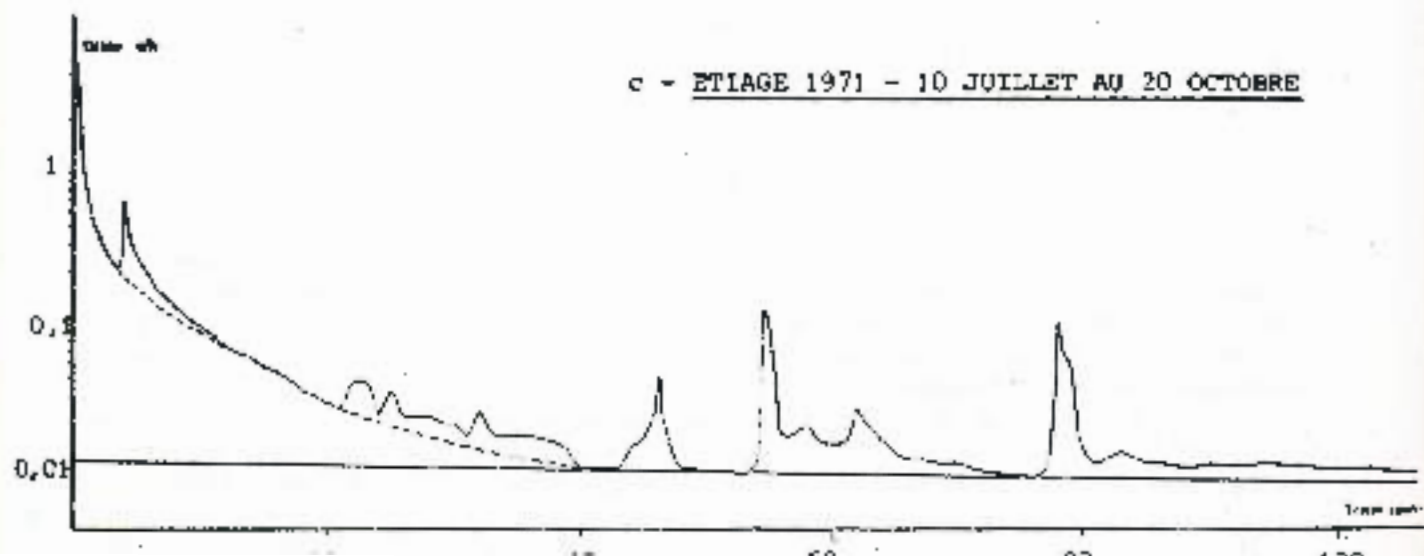
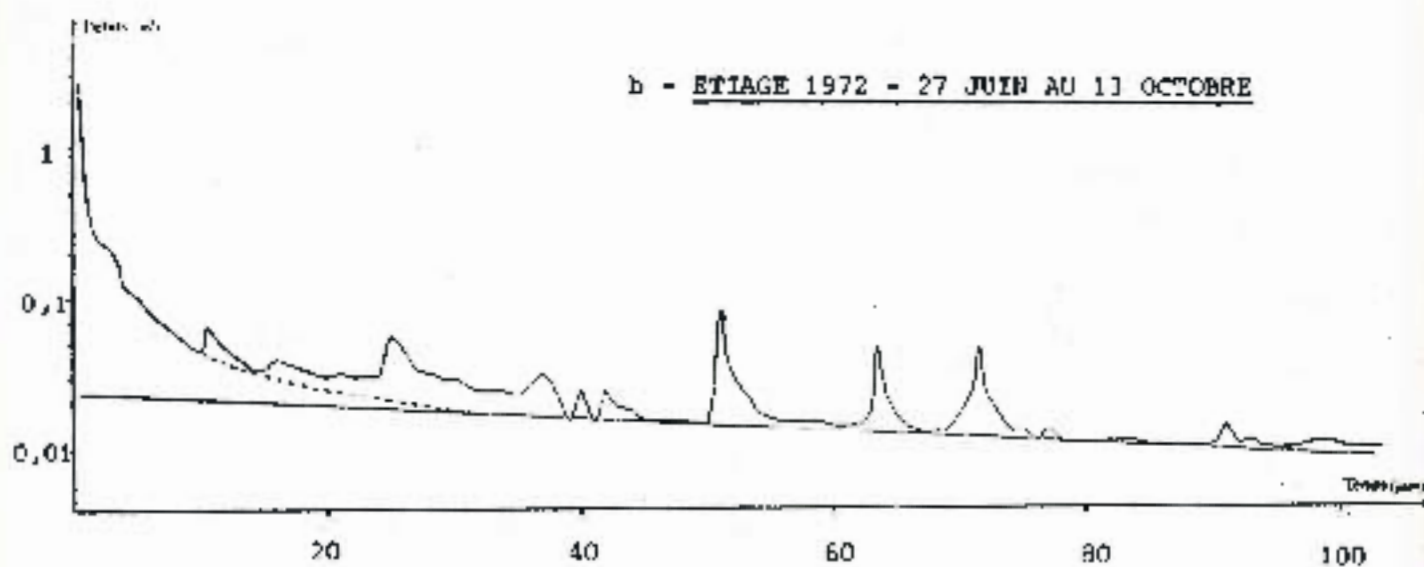
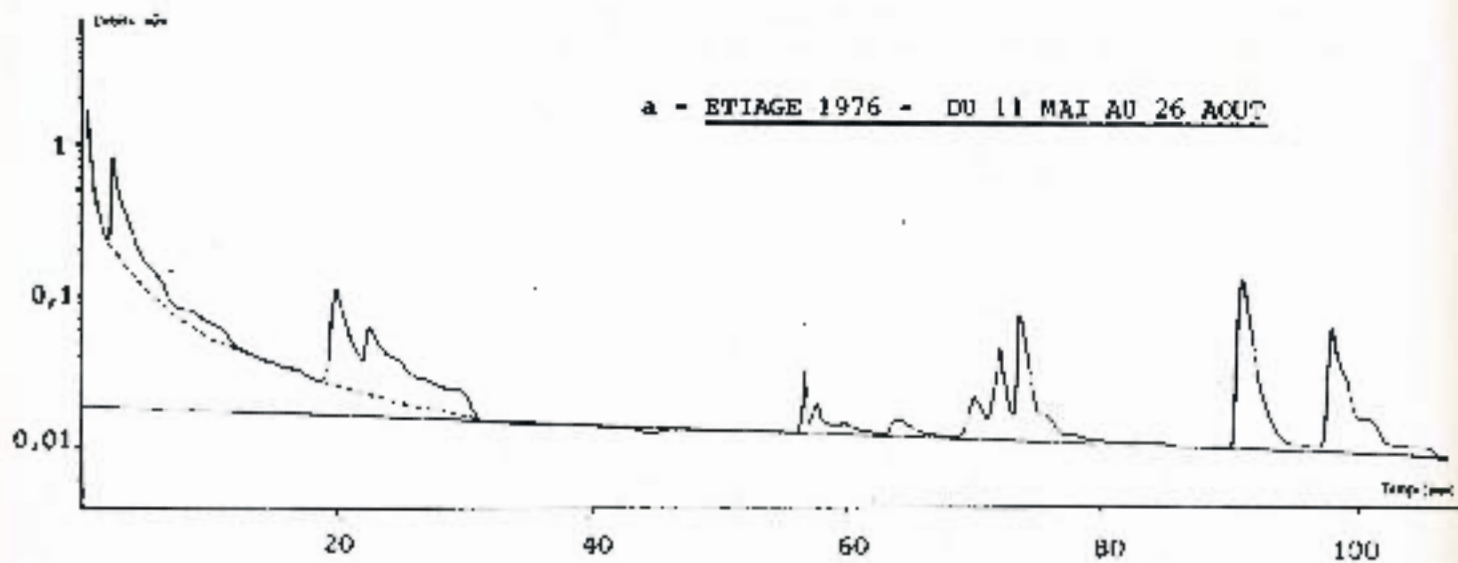
80

60

40

20

Fig. 36 - COURBES DE DECRUE ET DE TARISSEMENT - VERNEAU



L'hydrogramme de la période considérée est reporté on échelle semi-logarithmique, à partir du sommet de la dernière crue importante. Les points postérieurs au 31^{ème} jour en 1971, et au 22^{ème} jour en 1972, permettent de tracer la droite représentative de l'exponentielle du tarissement et d'obtenir le coefficient :

$$n = \frac{\log Q_{r1} - \log Q_{r2}}{0,4343(t_2 - t_1)}$$

pour 1971 $n = 0,016$

pour 1972 $n = 0,017$

Calcul du volume dynamique.

C'est le volume d'eau du karst noyé, en mouvement, dont la dynamique détermine les variations de débit à l'exutoire.

$$V_d = \int_{t_1}^{\infty} Qr_0 \cdot e^{-nt} = \frac{Q_0'}{n} \times C$$

Q_0' = débit au temps t_1 , début du tarissement.

Pour 1971 $V_d = 4 \times 10^6 \text{ m}^3$

Pour 1972 $V_d = 3,8 \times 10^6 \text{ m}^3$

Ces deux valeurs ne peuvent pas être extrapolées avec précision au volume dynamique concernant la source du Lison pour la même période. Elle permettent cependant de constater que la masse d'eau en mouvement à l'exutoire est importante (plusieurs millions de m^3). Cette information permet de penser que le système du Lison possède une zone noyée étendue.

Application aux courbes de décrue et de tarissement du système du Veigneau

Trois hydrogrammes ont été construits, ils permettent d'étudier les courbes de décrue et tarissement des années 1971, 1972, 1976 (cf. Fig. 36).

- Détermination des paramètres

Les paramètres du tarissement ont été définis dans le paragraphe précédent. La courbe $\psi(t)$, $Qr = Qr_0 \times e^{-nt}$ étant construite, on détermine point par point $\psi(t)$, $q = Q - Qr$

$$q = 0 \text{ pour } t = t_1 \quad ; \quad n = \frac{1}{t_1} \quad .$$

On vérifie que l'utilisation de $q_0 \frac{1-nt}{1+st}$ donne un bon ajustement en linéarisant la fonction par un changement de variable :

$$-y = \frac{1}{q}$$

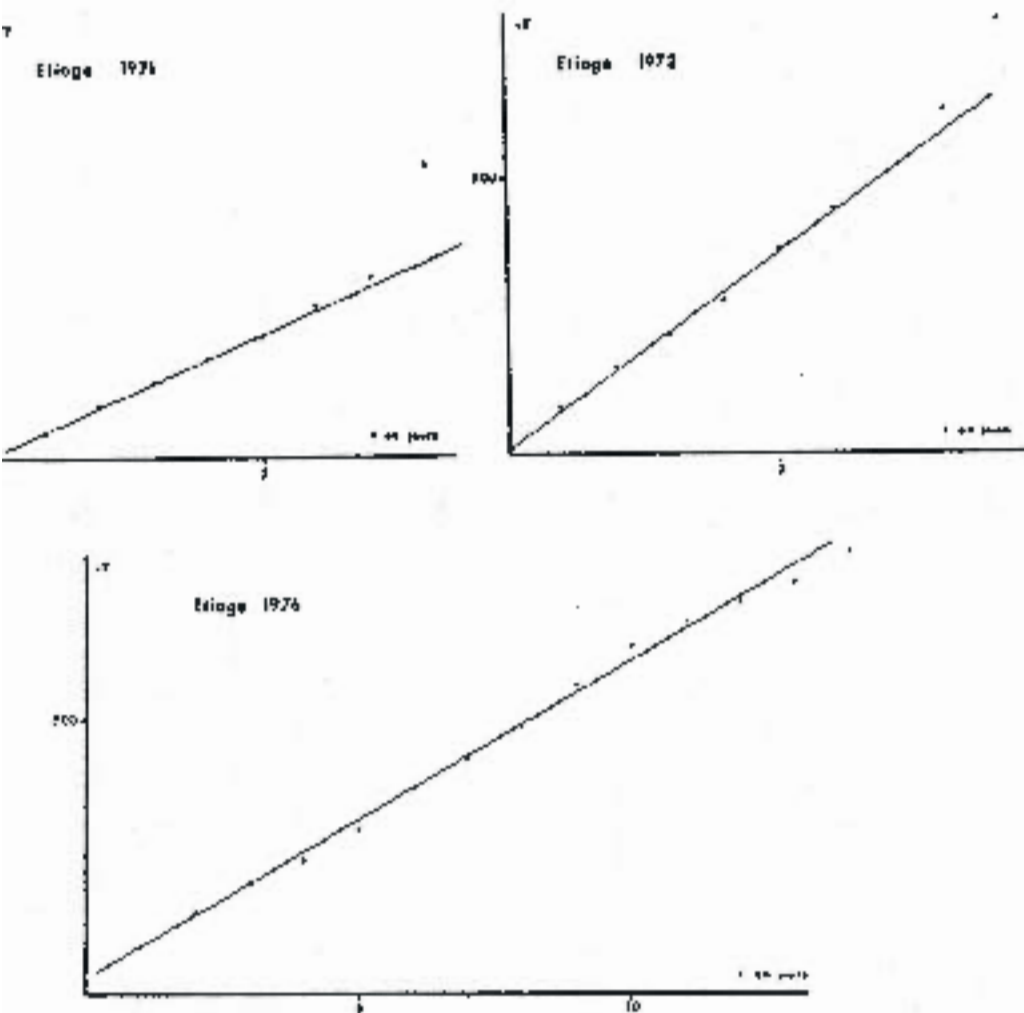
L'ajustement de la fonction homographique par linéarisation n'apparaît correct que pendant un temps relativement court (cf. Fig. 37a).

On détermine ensuite à partir des points situés sur la droite de linéarisation :

$$\varepsilon = \frac{q_0 - q}{qt} - \frac{q_0 n}{q}$$

q_0 = différence entre le débit Q_0 de l'exutoire pour $t = 0$ et Qr_0 .

a) Linéarisation des débits liés à l'infiltration



b) Courbes $y = \frac{1-n't}{1+et}$

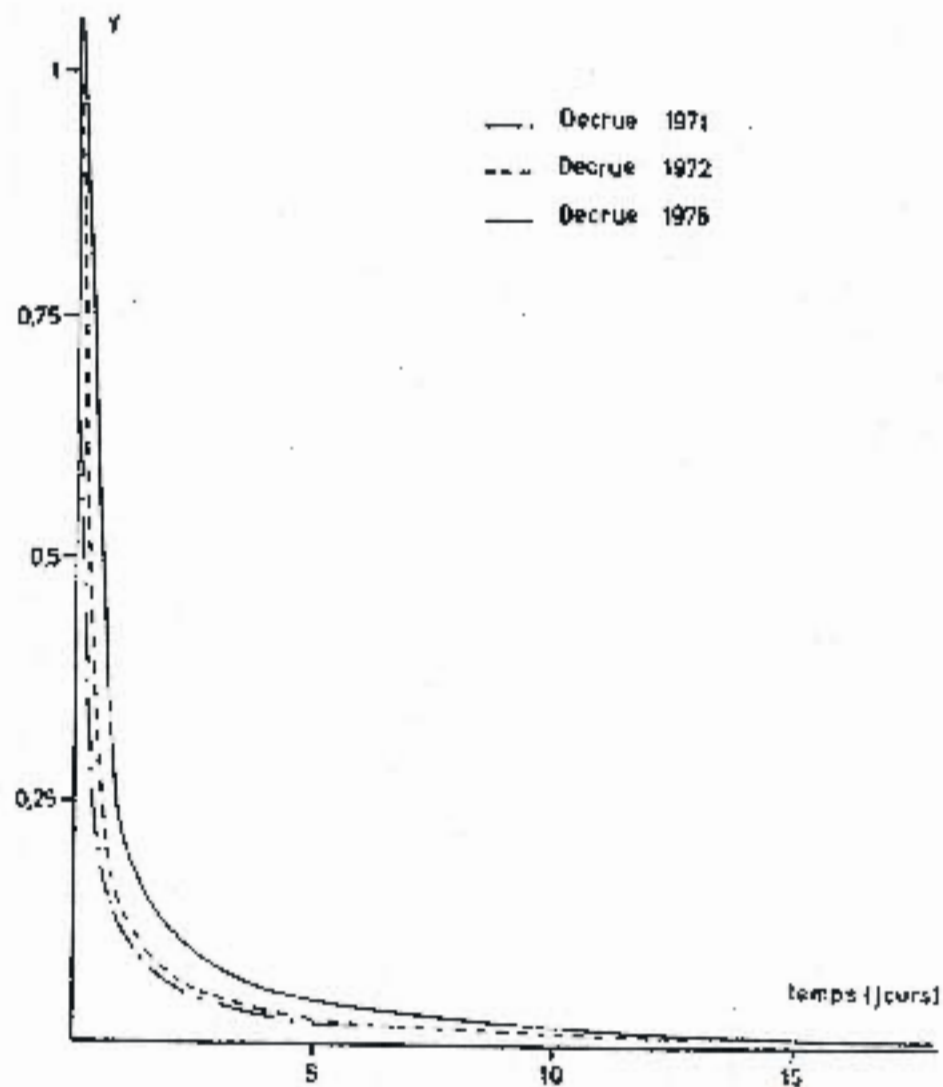


Fig. 37 - ETUDE DES DECRUES DE LA SOURCE DU VERNEAU (méthode de A. Mangin).

- Résultats

Il faut d'abord noter la difficulté d'obtenir une courbe de tarissement qui ne soit pas perturbée par des crues d'orage. Le fait de faire passer la droite de tarissement par les points bas des différentes décrues introduit une imprécision, qui peut être aggravée lorsque se posent des problèmes de seuil (courbe de tarissement de 1971).

TARISSEMENTS	Q_0 m ³ /s	Q_r m ³ /s	q_0	Q'_0	t_L jrs	α	γ'	ϵ	V(m ³)
1971	6,50	0,012	6,400	0,010	40	0,0029	0,027	7,70	300000
1972	2,62	0,024	2,596	0,017	30	0,0093	0,033	6,30	160000
1976	2,75	0,019	2,73	0,015	31	0,0074	0,032	3,54	170000

- Interprétation

Le tableau précédent montre que les coefficients de tarissement sont très faibles, alors que les volumes dynamiques apparaissent négligeables. Le karst noyé du système du Verneau serait donc relativement réduit. La valeur des coefficients de tarissement indique que la vidange de ce karst noyé se fait de façon très lente au cours de l'étiage.

La position du système du Verneau au coeur du synclinal n'a pas favorisé dans ce cas la formation de réserves importantes.

ϵ et η' sont très élevés dans les trois cas ; les courbes $Y = \frac{1-\eta' t}{1+\epsilon t}$ (Fig. 37b), indépendantes de l'amplitude de la crue sont représentatives de la façon dont l'infiltration se manifeste à l'exutoire. Ces trois courbes sont bien regroupées et montrent une concavité bien marquée. Nous avons calculé les valeurs du temps nécessaire pour que le débit q_0 diminue d'une certaine quantité, en prenant les paramètres η' et ϵ moyens.

4 h	pour une diminution de 50%
8 h	" " 66%
12 h	" " 75%
16 h	" " 80%
2 j. 22 h	" " 95%
11 j.	" " 99%

Il apparaît donc que toute impulsion appliquée au système karstique est transmise très rapidement à l'exutoire. Ce qui implique une infiltration rapide entre la surface du plateau et le karst noyé, favorisée par la concentration des eaux de pluies au niveau de petits bassins marneux en surface, et par une karstification très poussée en aval.

Pour permettre la comparaison avec d'autres systèmes karstiques, les deux paramètres proposés par A. MANGIN (1975) ont été utilisés :

$$i = \text{valeur de } y = \frac{1-\eta' t}{1+\epsilon t} \quad \text{pour } t = 2 \text{ jours}$$

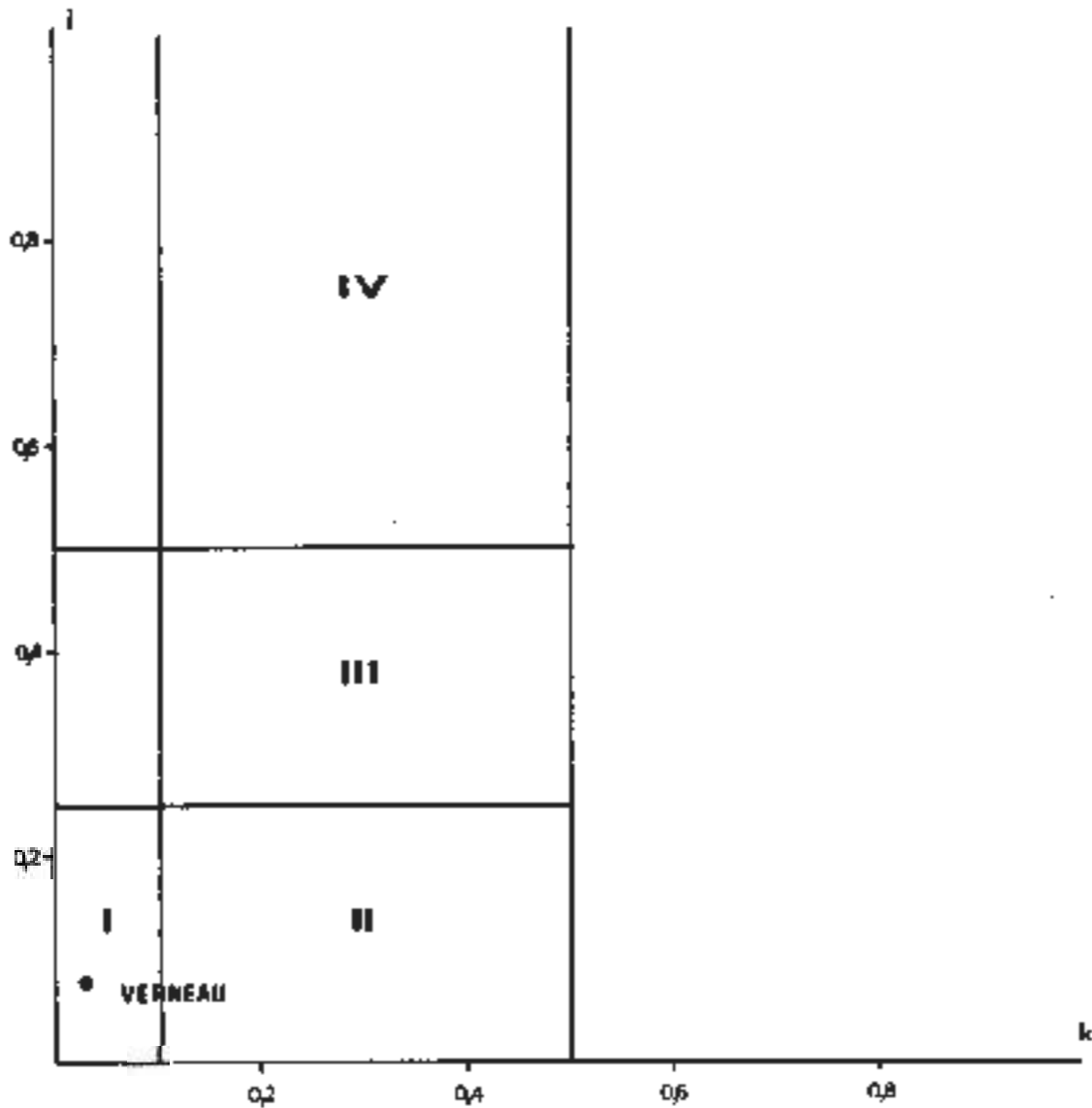
$$k = \frac{\text{volume dynamique}}{\text{volume moyen de transit}}$$

i caractérise la forme de l'hydrogramme de décrue

k traduit l'importance du karst noyé

ÉTUDE DES DÉCRUES DE LA SOURCE DU VERNEAU (méthode de A. Mangin).

CLASSIFICATION des SYSTEMES KARSTIQUES
d'après A. MANGIN



- I : Système très karstifié en aval. Réseau spéléologique très développé .
- II : Réseau spéléologique développé débouchant en aval sur un important karst noyé.
- III : Système plus karstifié en amont ou'en aval avec des retards dans l'alimentation dus, soit à des terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante.

Les valeurs de i pour les trois décrues étudiées sont :

1976 $i = 0,116$

1972 $i = 0,069$

1971 $i = 0,058$

i moyen = 0,081

$$k = \frac{300.000}{10.745.892} = 0,028$$

Le report de ces deux paramètres dans le schéma de classification des systèmes karstiques, défini par A. MANGIN (cf. Fig. 3B) montre que le système du Verneau se classe dans les systèmes très karstifiés à l'aval, dont le karst noyé est négligeable.

Ces résultats sont parfaitement en accord avec les observations de terrain et avec l'aspect des crues qui contrairement à celles du Lison sont de brève durée et de grande amplitude.

L'étude des courbes de tarissement nous a permis de préciser l'importance du volume des réserves participant à l'écoulement, très faible dans le cas du Verneau, plus conséquent dans le cas du Lison.

Si l'étude des courbes de décrue n'a pas été possible au Lison, elle a permis dans le cas du Verneau, du fait de la durée des enregistrements disponibles, de mieux approcher les modalités de l'infiltration.

Elle a permis en outre de confronter les connaissances du réseau spéléologique, décrit dans la première partie, les données hydrologiques (aspect des crues) et la caractérisation du système, obtenue à partir du tableau de classification de A. MANGIN (1975).

LES BILANS

L'étude des relations entre les stations étudiées a conduit à la mise en évidence de l'indépendance des deux systèmes karstiques du Lison et du Verneau. L'établissement de bilans hydrologiques pour ces deux systèmes va permettre la confrontation entre les hypothèses formulées sur les limites des bassins versants et les résultats des analyses climatologiques et hydrologiques.

Définition des éléments du bilan

Pour un bassin de type karstique simple, l'équation du bilan peut s'écrire :

$$Q = P - ETR \pm \Delta R$$

avec Q = volume écoulé à l'exutoire

P = précipitations

ETR = évapotranspiration réelle

ΔR = variation des réserves.

Ce dernier terme est totalement inconnu. Il convient donc de choisir un pas de temps tel que cette variation soit minimale. Le cycle hydrologique répond à cette définition (de la fin d'un étiage, à la fin de l'étiage suivant).

Application au système du Lison

Les expériences de coloration et les résultats des études hydrodynamiques ont montré le rattachement de la Sarrazine au système du Lison.

En conséquence, la lame d'eau écoulée, utilisée lors de l'établissement du bilan hydrologique pour le cycle 1976-1977, a été calculée à partir de la somme des débits du Lison et de la Sarrazine.

Les valeurs de la lame d'eau précipitée et de l'évapotranspiration sont données dans des paragraphes précédents.

Nous avons donc une lame d'eau infiltrée de 1,44 m ou de 1,34 m selon que l'on utilise la formule de Turc pour l'évapotranspiration réelle ou la formule de Thornthwaite donnant l'évapotranspiration potentielle.

Le volume infiltré (pour une surface de bassin de 104,5 km²) est respectivement de 150 et de 159 millions de m³.

Le volume écoulé étant de 246 millions de m³.

Le déficit est donc respectivement de 96 et de 107 millions de m³, soit 39 et 43% du volume total écoulé.

Il apparaît donc que malgré les imprécisions possibles sur les précipitations et l'ETR, la superficie du bassin versant soit nettement sous-estimée.

Il conviendrait donc d'entreprendre une campagne de traçage, afin de préciser la limite est du bassin (extension possible de ce bassin sur le compartiment de Boujeilles et à l'Est de Levier).

Application au système du Verneau

Les données disponibles nous ont permis de calculer des bilans hydrologiques pour les années 1972 à 1977, et pour les cycles 1971-1972 à 1976-1977.

- Calcul des bilans par années civiles

Les valeurs du volume d'eau infiltré, selon les années, et suivant la méthode utilisée pour l'approche de l'évapotranspiration ont été calculées pour un bassin de 13,9 km².

Ces valeurs, ainsi que celles du volume écoulé sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

Volume infiltré et écoulé en millions de m³

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1972 à 1977
TURC	9,83	9,94	14,34	11,72	7,76	17,67	71,25
THORNTHWAITE	8,22	8,37	12,82	10,37	6,09	16,51	62,37
TURC MENS.	9,08	8,81	13,8	10,99	5,62	17,47	65,73
BILAN ENERG.	8,19	7,58	12,22	9,83	4,75	16,47	59,03
VOLUME ECOULE	10,63	12,43	17,3	15	8,3	20	83,66

Nous avons calculé l'écart en pourcentages entre le volume écoulé et les différentes valeurs de volume infiltré : (écarts en %)

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	sur les 6 ANS
TURC	7,53	20	17,1	21,9	6,5	11,7	14,8
THORNTHWAITTE	22,6	32,6	25,9	30,9	26,6	17,5	25,4
TURC MENS.	14,6	29,1	20,2	26,7	32,3	12,7	21,4
BILAN ENERG.	22,9	39	29,4	34,5	42,8	17,7	29,4

- Calcul des bilans par cycles hydrologiques

Les valeurs de volumes infiltrés et écoulés sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

Volume infiltré et écoulé en millions de m³

	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77
TURC	8,42	8,53	9,2	13,34	9,74	18
THORNTHWAITTE	6,7	7,14	9,44	13,66	7,19	16,65
TURC MENS.	7,59	7,6	8,91	14,03	6,96	17,39
BILAN ENERG.	6,6	6,52	7,66	12,57	6,07	16,35
VOLUME ECOULE	8,3	9,7	11,1	19,3	10,4	19,4

Les valeurs des écarts entre les volumes infiltrés et écoulés sont de : (écarts en %)

	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77
TURC	4,3	2	17,1	30,9	6,3	7,2
THORNTHWAITTE	23,9	17,9	24	29,2	30,9	14,2
TURC MENS.	13,8	12,6	19,7	27,3	33,1	10,4
BILAN ENERG.	25	25,1	31	34,9	41,6	15,7

- Analyse

Les résultats qui présentent l'avantage de porter sur une période relativement longue, font apparaître une nette différence entre les valeurs calculées sur les années civiles et celles calculées pour les cycles hydrologiques. Cette remarque peut être mise en parallèle avec l'hypothèse d'une variation minimale des réserves lors du cycle hydrologique.

Dans tous les cas le volume écoulé est plus élevé que le volume infiltré. Le calcul des écarts relatifs des différents volumes infiltrés par rapport au volume écoulé, montre que seule la formule annuelle de Turc permet, dans le cas de ce bassin, une bonne approche de l'ETR. Ce résultat est en accord avec les réserves émises lors du calcul de l'ETR. En effet deux méthodes donnent l'ETP, notion qui n'est pas particulièrement adaptée aux besoins de l'hydrogéologue ; la troisième méthode, le bilan d'énergie, ne permet pas un calcul satisfaisant, par suite de l'absence de certaines informations (humidité relative, insolation) à la surface du bassin étudié, et dans la mesure où les effets de versant ne sont pas négligeables dans la région étudiée.

Il apparaît que cet excès d'écoulement général n'est pas compatible avec les résultats de l'analyse des débits classés qui fait apparaître un déficit d'écoulement à la résurgence du Verneau.

Il semble donc qu'une sous-estimation de la superficie du bassin versant soit la cause d'une partie des imprécisions sur les bilans.

CONCLUSION

Les résultats de la première partie avaient permis de caractériser physiquement les bassins du Verneau et du Lison.

L'étude des exutoires a permis de définir deux systèmes karstiques indépendants : Verneau d'une part, Lison source et Sarrazine d'autre part, qui semblent s'opposer sur plusieurs points.

Le système du Verneau est relativement bien délimité, la karstification très poussée permet un acheminement rapide des eaux vers l'exutoire. L'analyse de tarissement a montré d'autre part le peu d'importance du volume dynamique des réserves.

Le système Lison-Sarrazine semble plus complexe. L'absence de longues chroniques et les incidents survenus sur les appareils au cours du cycle hydrologique étudié n'ont pas permis d'effectuer une analyse aussi précise que nous l'aurions souhaitée. C'est pourquoi il serait nécessaire de maintenir les stations pendant quelques années et de compléter les traçages entrepris dans le cadre de cette étude.

Cependant on peut déjà admettre que la source de la Sarrazine fonctionne à partir d'un certain débit comme un trop-plein complexe du Lison. De plus la comparaison des hydrogrammes de Myon et de la somme Lison-Sarrazine montre une bonne concordance en basses eaux. Ce qui permet d'étendre les résultats de l'étude du tarissement à Myon au système Lison-Sarrazine et d'envisager un important volume dynamique des réserves.

TROISIEME PARTIE

HYDROGEOCHIMIE ET CHIMIE ISOTOPIQUE

METHODES D'ETUDE

RESULTATS ET INTERPRETATION

CONCLUSION

THERMIQUE

APPAREILLAGE ET CADRE DES MESURES

ANALYSE DES RESULTATS

INTERPRETATION

CONCLUSION :

APPORT DE LA THERMIQUE

HYDROGÉOCHIMIE ET CHIMIE ISOTOPIQUE

Les différents résultats disponibles dans la littérature ont mis en évidence des variations temporelles dans la composition chimique des eaux aux exutoires.

Certains auteurs (A. MANGIN, 1974 ; M. BAKALOWICZ, A. AMINOT, 1974) estiment que cette composition chimique est sous la dépendance de deux ensembles de lois :

- les lois de la chimie régissent les conditions de mise en solution et d'équilibre entre les ions ;
- les lois de l'hydrodynamique régissent les déplacements du solvant dans le milieu karstique.

Les lois de la chimie ayant fait l'objet de nombreux travaux et étant relativement connues, l'étude géochimique et isotopique des eaux aux exutoires devrait fournir des informations relatives aux systèmes karstiques étudiés.

Ces informations seront ensuite confrontées aux résultats obtenus par d'autres méthodes dans le cadre de cette étude.

METHODES D'ETUDE

Echantillonnage

Certaines contingences matérielles ne nous ayant pas permis d'effectuer régulièrement des échantillonnages au cours du cycle, nous sommes attachés à étudier les variations du chimisme au cours de trois crues (crue du 1er Avril 1977 à la source du Lison et à la Sarrazine, crue du 4 Novembre 1977 au Verneau et au Lison).

La finesse des événements font nous voulions rendre compte nous a conduit à effectuer un échantillonnage à pas de temps restreint, pour lequel l'emploi de préleveurs automatiques s'est révélé nécessaire.

Nous avons donc utilisé :

- d'une part 5 préleveurs à dépression commandés par un mouvement d'horlogerie (la cadence de prélèvement variant d'1/2 heure à 2 heures suivant l'horloge).

Ils présentent l'avantage d'être autonomes mais restent très sensibles à l'humidité qui entraîne rapidement un blocage des horloges.

En outre la quantité d'eau prélevée reste généralement faible : 100 à 300 cc.

- d'autre part un préleveur mis au point au ministère de l'agriculture. L'arrivée d'eau par gravité ou pompe se fait au niveau d'un curseur dont le déplacement au-dessus des flacons de prélèvement est assuré par un moteur électrique réglé par deux horloges.

Ce préleveur utilisé 15 jours sur le terrain présente de nombreux avantages par rapport aux précédents :

- la quantité prélevée est plus importante (1 litre)
- les horloges étant électriques et bien protégées semblent beaucoup plus fiables que les mouvements mécaniques des précédents.

Quelques facteurs peuvent néanmoins restreindre son utilisation :

- la nécessité de disposer d'un courant alternatif 220 volts.
- D'autre part il conviendrait d'adapter des électrovannes au curseur afin que le temps d'écoulement de l'eau dans le flacon soit très court. Ce dispositif permettrait alors d'obtenir un échantillon beaucoup plus ponctuel que ne le permet le dispositif actuel.

En l'absence de source électrique à proximité de la source du lison certains prélèvements ont été effectués à la main.

Les échantillons prélevés dans des bouteilles plastiques ou P.V.C. sont conservés à une température inférieure à 10°C, l'analyse complète ayant lieu dans la semaine suivant le prélèvement.

Nous avons constaté que des échantillons conservés en bouteilles de verre présentaient un net enrichissement en silice et probablement en sodium.

Mesures de terrain

A côté de ces prélèvements, il a été tenté l'enregistrement du pH et de la conductivité, à l'aide d'une chaîne d'acquisition de données, mise au point au C.R.G.* de Garchy pour des mesures de températures, et prêtée par Mr BENDERITTER.

Des problèmes techniques n'ont pas permis d'obtenir des résultats satisfaisants en ce qui concerne le pH et la conductivité. Ces deux paramètres ont donc été mesurés au Laboratoire.

Paramètres étudiés, méthodes d'analyse

Nous avons effectué 10 analyses à partir d'un même échantillon. Le calcul des écarts maximums relatifs à la moyenne nous donne la reproductibilité de la méthode d'approche de chacun des paramètres décrits ci-après (la reproductibilité est exprimée en pourcentages, en effet elle représente une erreur relative).

Dans la mesure où les échantillons provenant d'une même campagne de crue seront analysés dans les mêmes conditions, les paramètres définissant l'exactitude restant inchangés, les valeurs de la reproductibilité permettront de déterminer le plus petit écart significatif dans l'évolution d'un paramètre.

Le pH

Pour les eaux carbonatées, il est un des paramètres du système $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-} - \text{Me CO}_3$ où Me représente un cation métallique (Ca^{2+} ou Mg^{2+}).

Nous avons utilisé un pH mètre de laboratoire, ORION, digital, dont la précision est de 0,02 unités pH, (pH mètre du laboratoire d'analyse des eaux du S.R.A.E. de Besançon), et un pH mètre portatif WTW, dont la précision est de 0,1 unité dans la gamme de 4 à 9 unités pH.

* C.R.G. : Centre de Recherches Géophysiques

La précision de ces mesures, et le fait qu'elles n'aient pas été effectuées sur le terrain, n'ont pas permis le calcul satisfaisant des écarts au pH d'équilibre du système (ΔpH).

. La conductivité .

La conductivité mesurée en microsiemens (μS), ou en micromho cm^{-1} , est déterminée par la nature et la concentration des ions en solution. Elle varie avec la température.

On exprime la conductivité par rapport à une température de référence (20°C), à l'aide de la relation (J. RODIER, 1966).

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

L'appareil de terrain utilisé est un conductimètre portatif WTW. La précision de l'appareil est de $\pm 2\%$ de la pleine déviation, soit $\pm 10\mu\text{S}$ dans la gamme utilisée.

. Dureté .

La dureté d'une eau karstique est fonction de la teneur de cette eau en Ca^{2+} et Mg^{2+} , et se détermine par le dosage de ces ions.

Le dosage est effectué par complexométrie, avec l'EDTA (ou versenate). L'indicateur de fin de titrage est le noir eriochrome, en présence d'ammoniaque.

La reproductibilité de la mesure est de : 1%.

Le dosage du calcium seul est effectué par complexométrie, avec l'EDTA, en présence de soude N, l'indicateur utilisé est la calcéine. reproductibilité de : 1%.

La concentration en Mg^{2+} est calculée par différence entre dureté totale et dureté calcique. L'erreur relative sur le magnésium est relativement élevée, du fait de sa faible concentration.

. Alcalinité .

Le titre alcalimétrique complet (TAC) correspond à la neutralisation des ions OH^- , CO_3^{2-} et HCO_3^- jusqu'à pH 4,5, par de l'acide sulfurique 0,1 N, en présence de R.D.X. (solution alcoolique de rouge de méthyle et de vert de bromocresol).

Le pH des eaux analysées étant toujours inférieur à 8,3, OH^- et CO_3^{2-} sont négligeables devant HCO_3^- .

La reproductibilité du dosage est de : 2%.

. Les chlorures .

Les dosages de chlorures que nous avons réalisés, ont été effectués par mercurimétrie. Les ions réagissent sur les cations mercuriques (Hg^{2+}) pour former le complexe HgCl_2 . Lorsque tous les ions chlorures ont été consommés, Hg^{2+} réagit sur la diphénylcarbozone, préalablement introduite dans la solution. Du xylène cyanol F.F. ajouté à l'indicateur permet de mieux déceler le point de visage. (Méthode de CLARKE, 1950). Ce dosage doit être effectué dans des conditions de pH très précises (pH de 3 à 3,5).

Les résultats obtenus par cette méthode ne sont absolument pas utilisables, ce qui semble être dû, plus au mauvais fonctionnement de l'appareil à eau distillée, qu'à la méthode elle-même.

En effet, elle est couramment utilisée par de nombreux laboratoires, et semble, moyennant des soins particuliers apportés au rinçage de la verrerie, être satisfaisante pour les concentrations rencontrées (de l'ordre de 2 mg/l).

. Les sulfates .

Nous avons utilisé la méthode turbidimétrique pour le dosage des sulfates. Le principe est de précipiter en milieu acide, le sulfate de Baryum, en présence de composés stabilisant le précipité (méthode inspirée de Standard Methods), lecture de la densité optique au spectrophotomètre (Zeiss, modèle PM2D) à 410 nm.

La variation rapide de la densité optique du précipité nous a conduit à effectuer la lecture, 3 mn après l'addition des réactifs, comme le préconise A. AMINUT, 1974.

La concentration est obtenue par l'intermédiaire d'une courbe d'étalonnage.

La précision globale de la méthode est d'environ 10% ("Standard Methods" A.P.H.A. 1965).

La reproductibilité est de : 6 %.

. La silice .

Nous avons employé la méthode colorimétrique au silicomolybdate d'ammonium.

Coloration jaune du silicomolybdate d'ammonium, en présence d'HCl, et d'acide oxalique pour éliminer l'interférence des phosphates.

La mesure de la densité optique se fait au spectrocolorimètre à 410 nm (Standard Methods, 1971), une courbe d'étalonnage la reliant à la concentration.

La reproductibilité est de : 6 %.

. L'azote .

Pour essayer d'utiliser comme marqueurs les différentes formes de l'azote présentes dans le sol, nous avons été amenés à doser séparément NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ .

Pour ces trois formes de l'azote, nous avons utilisé des méthodes colorimétriques, la densité optique lue, étant transformée en concentration par l'intermédiaire d'une courbe d'étalonnage.

- Les nitrates, sont dosés par la méthode de CARON et BAQUET : coloration jaune du paranitrosalicylate de sodium, mesurée à 420 nm. (Norme AFNOR T9C-C12, Août 1975).

La reproductibilité est de : 12 %.

- Les nitrites : nous avons utilisé la méthode préconisée par l'AFNOR (norme AFNOR T90-013, Août 1975) : développement d'une coloration rose, due à la diazotation de la sulfanilamide par les nitrites, en présence de N (1-naphtyl) étylène diamine, la mesure s'effectuant à 537 nm.

La reproductibilité est de : 11 %.

- L'ammonium : la méthode utilisée est celle décrite dans "Standard Methods" : coloration bleue (mesurée à 640 nm.), en présence de nitroprusiate de sodium, de citrate de sodium, de phénol, et d'hypochlorite de sodium. La reproductibilité est de : 35 %.

. Les phosphates .

Le principe du dosage repose sur la formation d'acide molybdophosphorique, qui est réduit en un complexe donnant une coloration bleue, mesurée au spectrophotomètre à 690 m. La densité optique est ensuite transformée en concentration par l'intermédiaire d'une courbe d'étalonnage.

La précision globale de la méthode est d'environ 6% (d'après "Standard Methods").

La reproductibilité est de : 13%.

. Le sodium et le potassium .

Le dosage de ces deux éléments a été réalisé sur un photomètre de flamme Electrosynthèse. Pour s'affranchir de l'influence du calcium, présent en quantité importante dans les eaux karstiques, les étalons sont préparés avec une solution de carbonate de calcium dont la concentration est voisine de celle rencontrée dans les eaux analysées (environ 80 à 90 mg/l).

La reproductibilité pour le sodium est de : 4%

pour le potassium : 1,5%.

. Analyses isotopiques .

Les analyses isotopiques dont nous disposons ont été réalisées au Centre de Recherches Géodynamiques (C.R.G.) de Thonon.

a). L'oxygène 18

C'est un isotope stable, qui fait partie de la molécule d'eau. Les teneurs sont exprimées en ‰ par rapport à un étalon (S.M.O.W.), avec une incertitude de $\pm 0,16\%$. Elles varient dans les précipitations en fonction de la température au sol. Les valeurs les plus faibles (appauvrissement en oxygène 18, donc valeur de δ plus négative) correspondent aux pluies d'hiver ou d'altitude.

b). Tritium

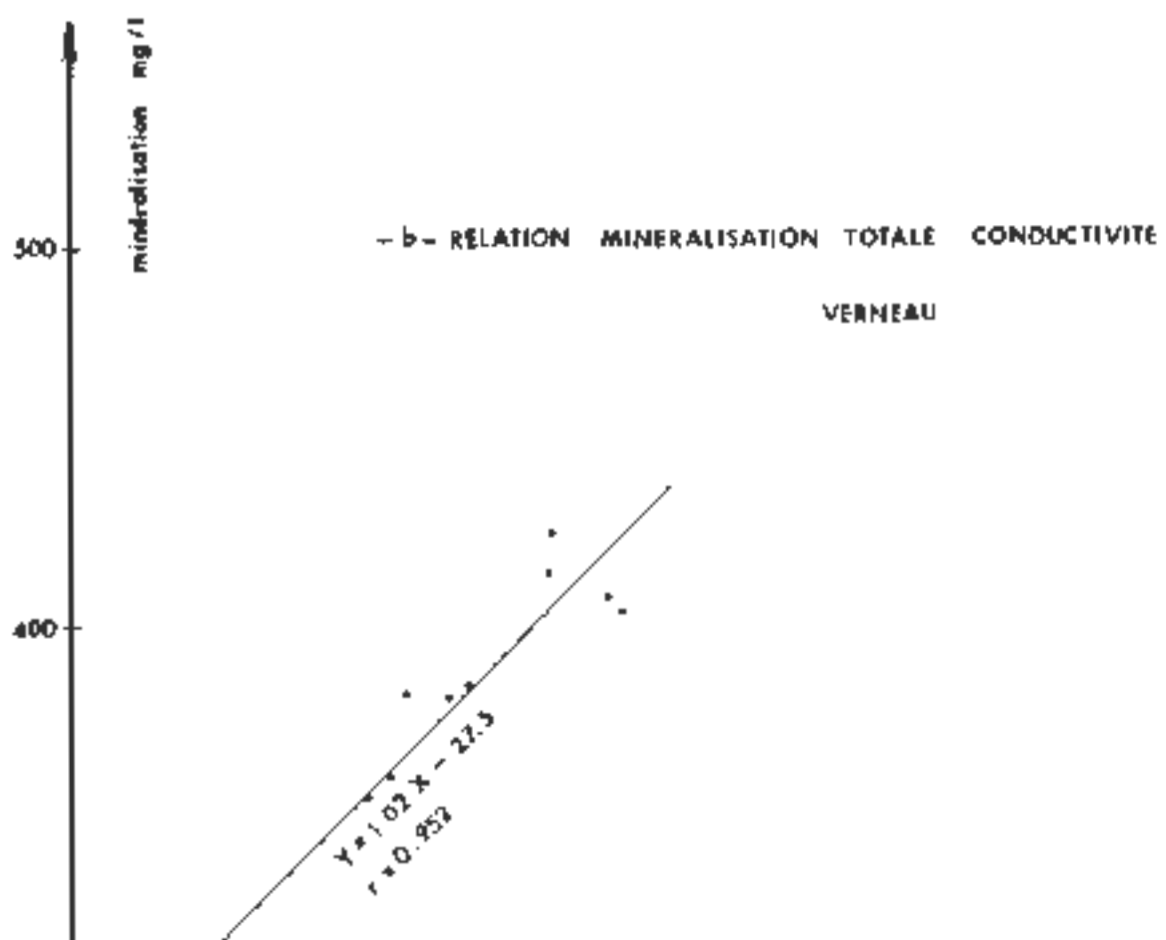
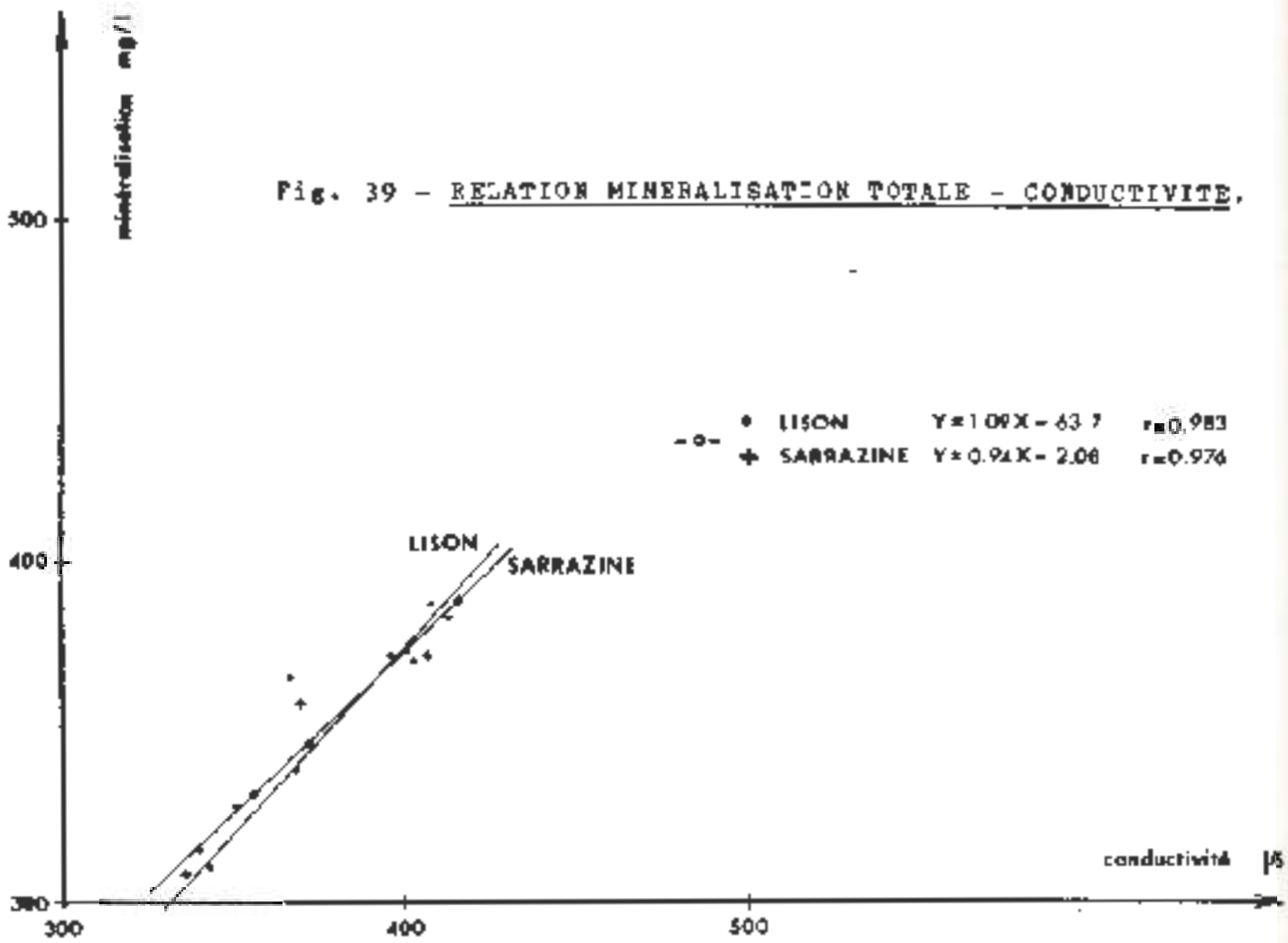
C'est l'isotope radioactif de l'hydrogène. Sa période est de 12,26 ans. Il provient pour l'essentiel des retombées qui ont eu lieu à la suite des essais thermonucléaires aériens. Sa teneur s'exprime en unités tritium (U.T.) 1UT = 1 atome de tritium pour 10^{16} atomes d'hydrogène.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les résultats des analyses effectuées dans le cadre de ce travail, sont rassemblés en Annexe n° IV. Ces données sont pour la plupart relatives aux eaux des exutoires. En effet, à l'exception d'une analyse de pluie lors de l'averse du 4 Novembre, nous ne disposons pas de données concernant les précipitations.

L'écart entre la somme des anions et la somme des cations en milliéquivalents par litre, est comprise entre 0,4% et 7% du total, le plus souvent inférieur à 5%. La balance ionique étant effectuée sans les valeurs de chlorures, ni de magnésium, il semble difficile de tirer des conclusions à partir des pourcentages obtenus.

Fig. 39 - RELATION MINERALISATION TOTALE - CONDUCTIVITE.



Hydrogéochimie

Les quelques données réparties sur le cycle 1976-1977, ne nous ont pas permis d'appréhender les variations des différents paramètres physicochimiques au cours de cette période, aux exutoires considérés.

Ces données ont cependant été utilisées pour l'étude de la relation minéralisation totale - conductivité. (La minéralisation totale exprimée en mg/l correspond à la somme des teneurs des différents ions).

. Relation minéralisation totale - conductivité .

. Source du Verneau

Sur la figure 39a ont été reportées en abscisses les valeurs de conductivité, en ordonnées celles de la minéralisation totale ; malgré le faible nombre de données disponibles, nous avons établi une régression :

$$r = 0,952 ; a = 1,02 ; b = - 27,5$$

(a et b coefficients de la droite de régression $y = ax + b$)

. Sources du Lison et de la Sarrazine

Les valeurs relatives aux sources du Lison et de la Sarrazine ont été reportées sur la figure 39b.

Les régressions établies séparément ont donné :

- pour le Lison : $r = 0,983 ; a = 1,09 ; b = - 63,7$
- pour la Sarrazine : $r = 0,976 ; a = 0,94 ; b = - 2,06$

Vu le faible nombre de données disponibles, il semble difficile de comparer ces résultats à ceux qui ont pu être obtenus dans d'autres régions (M. BAKALOWICZ, 1974 ; S. FUYOO, 1976 ; J. MARCOLET et J. SALADO, 1975). Il serait donc nécessaire de les compléter par la mise en oeuvre de campagnes de prélèvements systématiques.

A côté de ces quelques prélèvements dispersés nous nous sommes surtout attachés à étudier les variations de chimisme au cours d'épisodes de crues (4 crues ont été étudiées au point de vue hydrochimie ; ce sont la crue du 1er Avril 1977 aux sources du Lison et de la Sarrazine, la crue du 4 Novembre 1977 aux sources du Verneau et du Lison).

. Les crues étudiées .

. La crue du 4 Novembre 1977 au Verneau

Du point de vue hydrologique cette crue est la deuxième survenant après l'étiage de Septembre - Octobre 1977.

Elle correspond bien au schéma général des crues du Verneau : montée brusque et décrue très rapide, le débit de départ étant retrouvé au bout de 3 jours.

Nous avons analysé 46 échantillons d'eau prélevés avec un pas de temps variant d'1/2 heure à 1 heure.

* Variations des teneurs en ions au cours de la crue (Fig. 40)

+ Teneurs en bicarbonates, calcium, conductivité

Les bicarbonates et le calcium représentent environ 90% de la

minéralisation de l'eau, la variation de la teneur de ces ions et celle de la conductivité sont donc bien liés.

Ces 3 paramètres présentent un palier suivi d'un très léger pic survenant au moment de la pointe de crue. Les trois courbes sont ensuite caractérisées par une chute brutale, le retour aux teneurs initiales se faisant en trois temps : une remontée rapide suivie d'un palier, puis une augmentation régulière qui conduit à une valeur égale à la valeur initiale au bout de 3 jours.

+ Teneurs en SiO_2 , SO_4^{2-} , NO_2^- , PO_4^{3-}

Les courbes qui représentent les variations des teneurs de chacun de ces ions ont dans tous les cas une allure différente des trois courbes décrites précédemment.

Ces quatre courbes montrent des variations similaires, c'est-à-dire un palier avant et pendant la montée de crue, une diminution des teneurs en SiO_2 et NO_2^- au moment du sommet de crue, et dans tous les cas une augmentation 1 heure après le pic de crue. Les ions SO_4^{2-} , NO_2^- et la silice présentent ensuite un palier jusqu'à 13 heures après la pointe de crue, puis une diminution avec retour aux concentrations initiales.

+ Teneurs en Na^+ et K^+

Les ions Na^+ semblent suivre la même évolution que les ions K^+ , c'est-à-dire un premier pic juste après la pointe de crue, une deuxième augmentation quelques heures après.

+ Les ions NH_4^+ et NO_3^- à comportement différent subissent des variations distinctes de celles des précédents ions.

Les ions NO_3^- poursuivent jusqu'au début de la décrue une décroissance amorcée avant la crue.

En ce qui concerne l'ion NH_4^+ , sa médiocre reproductibilité nous a conduit à ne considérer que le pic qui intervient 8 heures après le sommet de crue.

° Analyse factorielle des résultats

Le traitement des données par des méthodes statistiques considérant les variables deux à deux, aurait nécessité un grand nombre de graphiques, et n'aurait de ce fait pas facilité la vision synthétique des affinités entre variables.

Afin de pallier à cet inconvénient, nous avons utilisé un traitement informatique basé sur un programme d'Analyse Factorielle, en composantes principales. Ce traitement a été effectué au Laboratoire Souterrain de Moulis, sur un calculateur OLIVETTI P652.

+ Principe des analyses factorielles

La théorie a fait l'objet de nombreuses publications dont on pourra trouver les références principales dans le "Traité d'Informatique Géologique" de P. LAFITTE, 1972.

2 NOV. 1 3 NOV. 5 NOV. 6 NOV. 7 NOV.

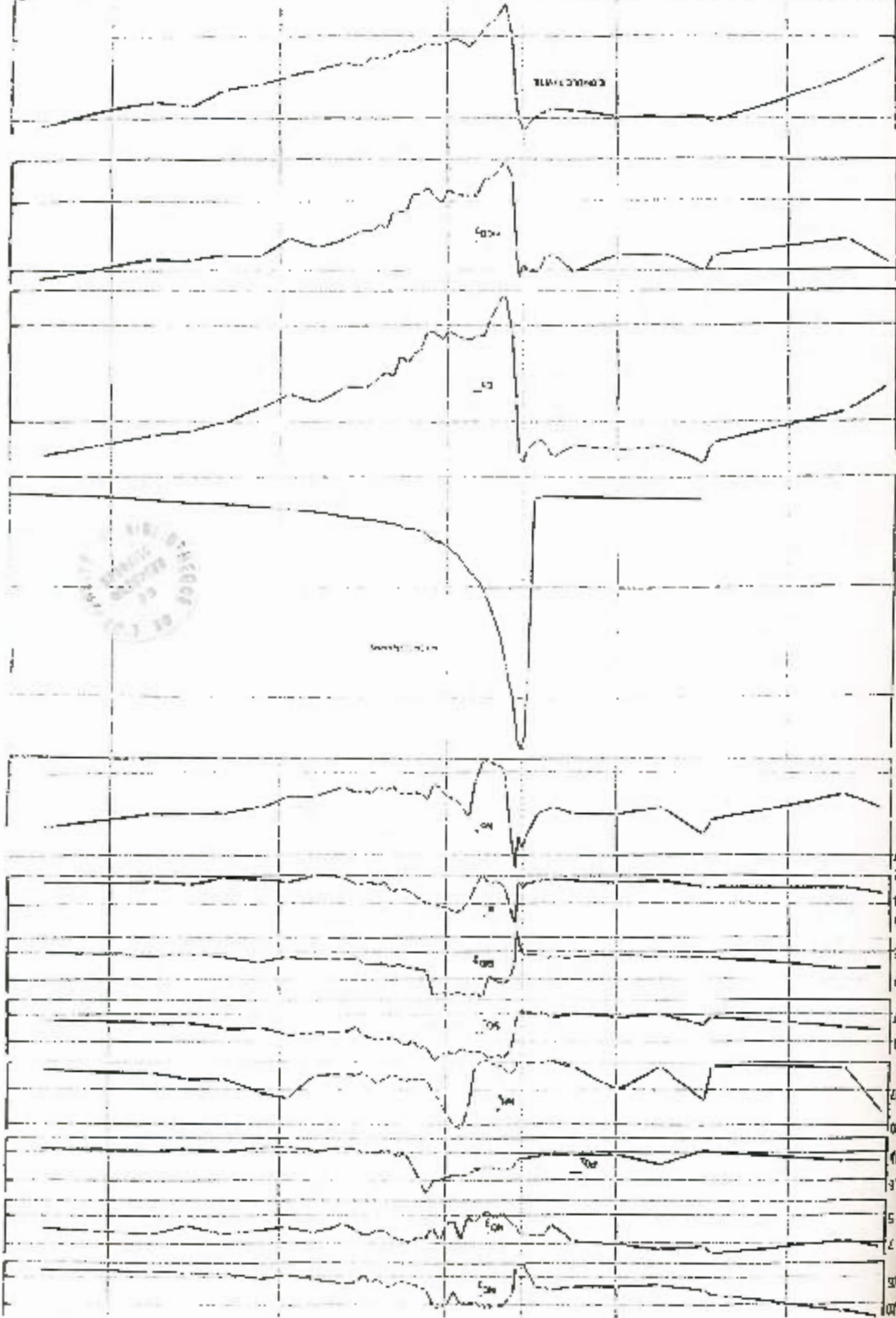
280
290
300
80
90
1
2
3
4
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

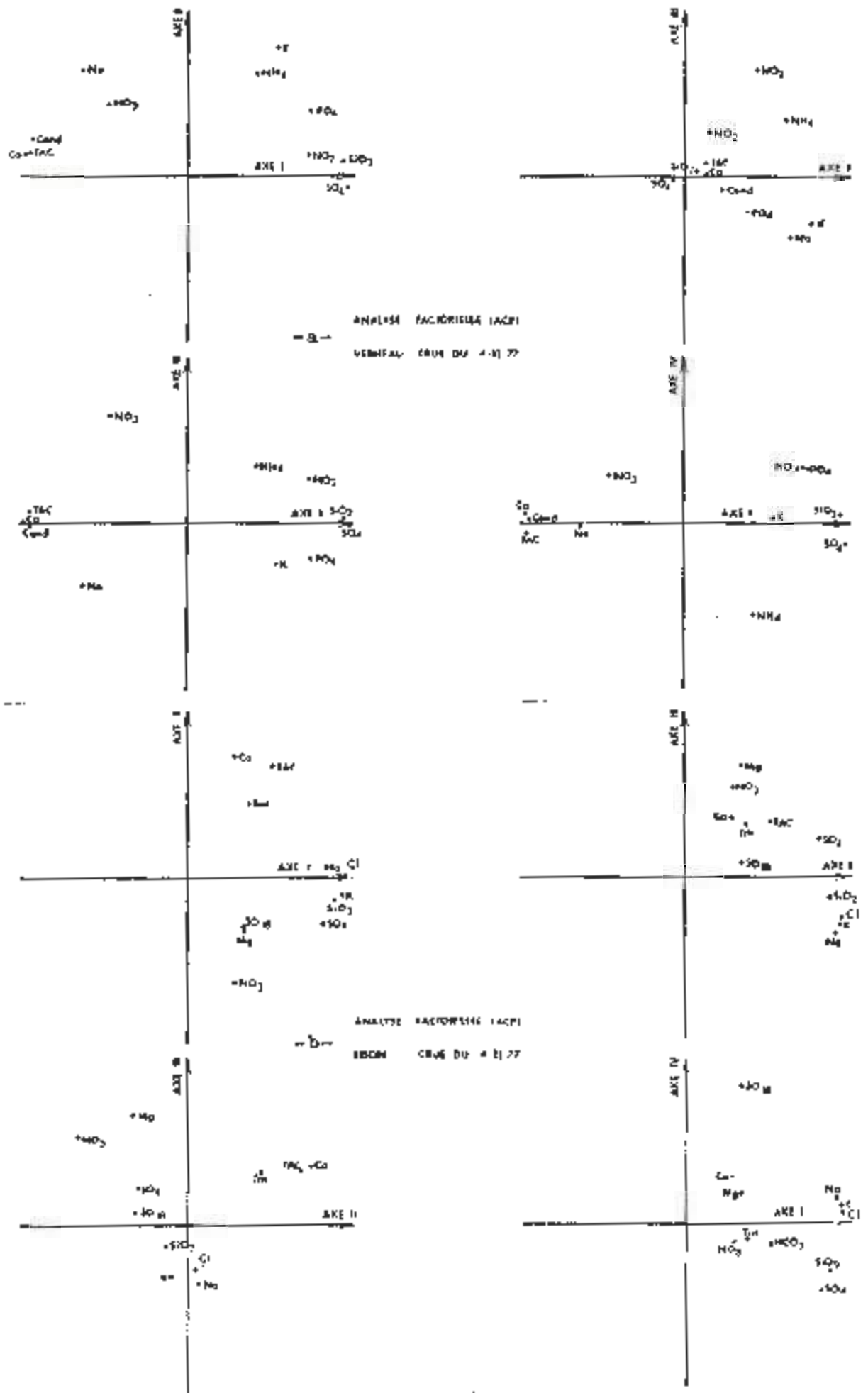
CONDUCTIVITY

CO₂

Cl⁻

Temperature





L'analyse en composantes principales, conçue par PEARSON, a été développée par HOTELLING (1930).

Nous avons effectué des analyses en composantes principales, en mode R, le but étant de dégager des relations entre variables.

+ Application à la crue du 4 Novembre 1977 au Verneau

La matrice de corrélation et la matrice factorielle sont exposées dans les tableaux en Annexe V.

La représentation des variables dans les plans factoriels I-II, II-III, I-III, I-IV, (Fig. 41a) permet de constater les associations suivantes :

- d'une part les paramètres Ca^{2+} , TAC et conductivité ;
- d'autre part un ensemble avec K^+ , NH_4^+ , PO_4^{3-} , NO_2^- , SiO_2 et SO_4^{2-} . Au sein de ce groupe il semble exister une bonne affinité graphique entre les paramètres SiO_2 et SO_4^{2-} ;
- Entre ces deux groupes se disposent des éléments intermédiaires : Na^+ et NO_3^- .

° Interprétation des résultats obtenus

Il semble, d'après les travaux du Laboratoire Souterrain de Moulis (Rapport ATP n°1629, Mai 1975), que les variations du chimisme aux exutoires au cours des crues ne soient pas dues au moins en ce qui concerne Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , qui correspondent à la majeure partie de la minéralisation totale, à une modification rapide des conditions d'équilibre des réactions, mais au fonctionnement du système considéré.

L'interprétation de ces variations pourra donc conduire à une approche du système dans son fonctionnement.

L'évolution du chimisme au cours de la seule crue étudiée à la source du Verneau (crue du 4.11.77) montre des variations rapides des différents paramètres. Elles traduisent l'arrivée à l'exutoire de masses d'eaux de minéralisation différente. Ces premiers résultats impliquent plusieurs origines pour l'écoulement à l'exutoire et nous permettent d'envisager une grande hétérogénéité du système.

Les résultats de l'ACP* exposés au paragraphe précédent, nous ont conduit à interpréter d'une part les variations des paramètres Ca^{2+} , HCO_3^- , conductivité, d'autre part celles des autres facteurs.

Compte tenu des faibles teneurs en Ca^{2+} , HCO_3^- , et de la faible conductivité du signal pluie (cf. analyse de la pluie du 4.11.77 à Déservillers, en Annexe), il semble que l'on puisse attribuer la forte minéralisation (donc les fortes teneurs en Ca^{2+} , HCO_3^-) des eaux sortant à l'exutoire au cours de la montée de crue, à un temps de séjour prolongé dans le karst.

Les paramètres dont nous disposons ne nous permettent pas de dire si ces eaux, en réserve dans le système, proviennent de la zone saturée ou de la zone non saturée.

Nous avons vu que les eaux qui arrivent ensuite à l'exutoire, au début de la décrue, sont caractérisées par une conductivité plus faible (340µS) se rapprochant de celle obtenue sur les eaux de ruissellement en surface (cf. Analyse, ruisseau de Jérusalem).

* A.C.P. : Analyse en composantes principales.

Le passage rapide (2 heures 1/2) d'une eau riche en Ca^{2+} et HCO_3^- (conductivité de 453 μS) à cette eau nettement moins minéralisée ne va donc pas dans le sens d'un mélange progressif entre les eaux infiltrées et l'eau des réserves.

On assiste en fin de décrue à une remontée progressive des teneurs en ions Ca^{2+} et HCO_3^- qui traduit une participation de moins en moins importante des eaux d'infiltration ou débit de l'exutoire. La minéralisation initiale étant de nouveau atteinte au bout de 3 jours. Il semble intéressant de rapprocher ce résultat du calcul du temps nécessaire pour que l'infiltration diminue d'une certaine quantité (étude des décrues et tarissements du Verneau). Ce calcul avait en effet montré que l'infiltration diminue de 95% en 3 jours.

L'examen des variations des autres paramètres apporte des informations complémentaires.

Les eaux les moins minéralisées sont au contraire chargées en SO_4^{2-} , NO_3^- et SiO_2 . Les concentrations de ces ions dans les eaux de l'exutoire étant proches de celles mesurées dans les eaux des ruissellements, avant les pertes, nous avons considéré ces masses d'eaux comme provenant d'une infiltration au niveau de ces pertes.

Nous avons vu, dans les chapitres précédents, que les eaux de ruissellements circulaient sur les marnes du Lias. Il est probable que l'on puisse attribuer l'origine des ions SO_4^{2-} observés à l'oxydation des pyrites contenues dans ces marnes.

Il est possible que la silice soit également originaire de ces mêmes niveaux (présence de lits gréseux et de calcaires sableux). Ce qui confirmerait les observations effectuées à partir des résultats de l'analyse factorielle. H. SCHOELLER (1961) avait déjà noté que les eaux en contact avec des marnes, présentaient des enrichissements en SO_4^{2-} et SiO_2 . Les ions NH_4^+ , présents dans le sol (soit par suite de la dénitrification de la matière organique, soit par suite d'apports agricoles) sont oxydés en NO_2^- puis NO_3^- lorsqu'ils sont lessivés (H. SCHOELLER, 1962 ; J. RODIER, 1973 ; J.J. MISEREZ, 1973). Il apparaît donc que les ions NH_4^+ peuvent être considérés comme des "marqueurs" de l'horizon pédologique. Ces ions peuvent également provenir d'une pollution d'origine organique (égouts). Cette pollution existe dans le cas du Verneau. En l'état actuel des connaissances sur les systèmes, il n'est pas possible de connaître l'importance relative de ces apports. L'ion NO_3^- quant à lui présente des variations le rapprochant du groupe Ca^{2+} , HCO_3^- (cf. analyse factorielle). Il serait donc présent dans les eaux de la réserve, mais également, avec cependant une teneur moindre, dans les eaux d'infiltration.

Le sodium et le potassium sont caractérisés par des concentrations et des courbes de variation qui posent de nombreux problèmes. En effet le rapport

$$\frac{|\text{Na}^+|}{|\text{K}^+|}$$

est toujours inférieur à 1, le plus souvent proche de 1/2. J.J. MISEREZ admet que dans ce cas des facteurs biologiques et des processus d'échange sur la fraction organique explique ce rapport inverse. D'autre part, il est possible que l'utilisation de scories potassiques comme engrais de fond par les agriculteurs locaux, soit à l'origine de l'écart entre les teneurs en ions Na^+ et K^+ .

Ces observations montrent la complexité des variations de chimisme. Elles permettent néanmoins de proposer le schéma interprétatif suivant : au cours de la montée de crue seules les eaux des réserves sont sollicitées. Au moment du sommet de crue les eaux d'infiltration rapide, correspondant aux drainages des bassins liasiques aériens au profit des pertes, commencent à participer au débit à l'exutoire. Cette participation devenant maximale 2 h 30 après la pointe de crue. Il est intéressant de rapprocher ce résultat de la coloration effectuée en Janvier 1970 à la perte de la Vieille Folie, le colorant étant réapparu 2 h 30 après le pic de crue. La contribution des eaux d'infiltration diminue ensuite progressivement au cours de la décrue, la minéralisation de départ étant atteinte au bout de 3 jours.

Il conviendrait de poursuivre l'étude des variations du chimisme sur plusieurs crues prises à différents moments du cycle hydrologique pour préciser les résultats obtenus. De plus il serait nécessaire de comparer les caractéristiques chimiques des eaux qui circulent sur les bassins marneux aériens et celles des eaux qui circulent à travers les calcaires. Ces données pourront peut être fournir des informations relatives au comportement des certains ions, en particulier Na^+ , K^+ , NH_4^+ et à leur répartition au sein du système karstique du Verneau.

Crue du 1er Avril 1977 aux sources du Lison et de la Sarrazine

Il s'agit d'une crue de printemps survenant au cours d'une période prolongée de très hautes eaux. C'est une crue simple avec amorçage de la Sarrazine pour un débit de $9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le retour au débit de départ s'effectuant six jours après le début de la crue, la montée de crue s'effectue en une journée.

Une soixantaine d'échantillons ont été prélevés manuellement et analysés au Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée de Besançon.

Les première et deuxième parties ayant montré la liaison entre la Sarrazine et la source du Lison, nous avons examiné parallèlement les variations des teneurs en différents ions à ces deux exutoires au cours de la crue.

* Variations des teneurs en ions (cf. Fig. 42, 43, 44)

+ Teneurs en bicarbonates, calcium, conductivité

Les bicarbonates et le calcium représentant 90% de la minéralisation seront également bien corrélés avec la conductivité.

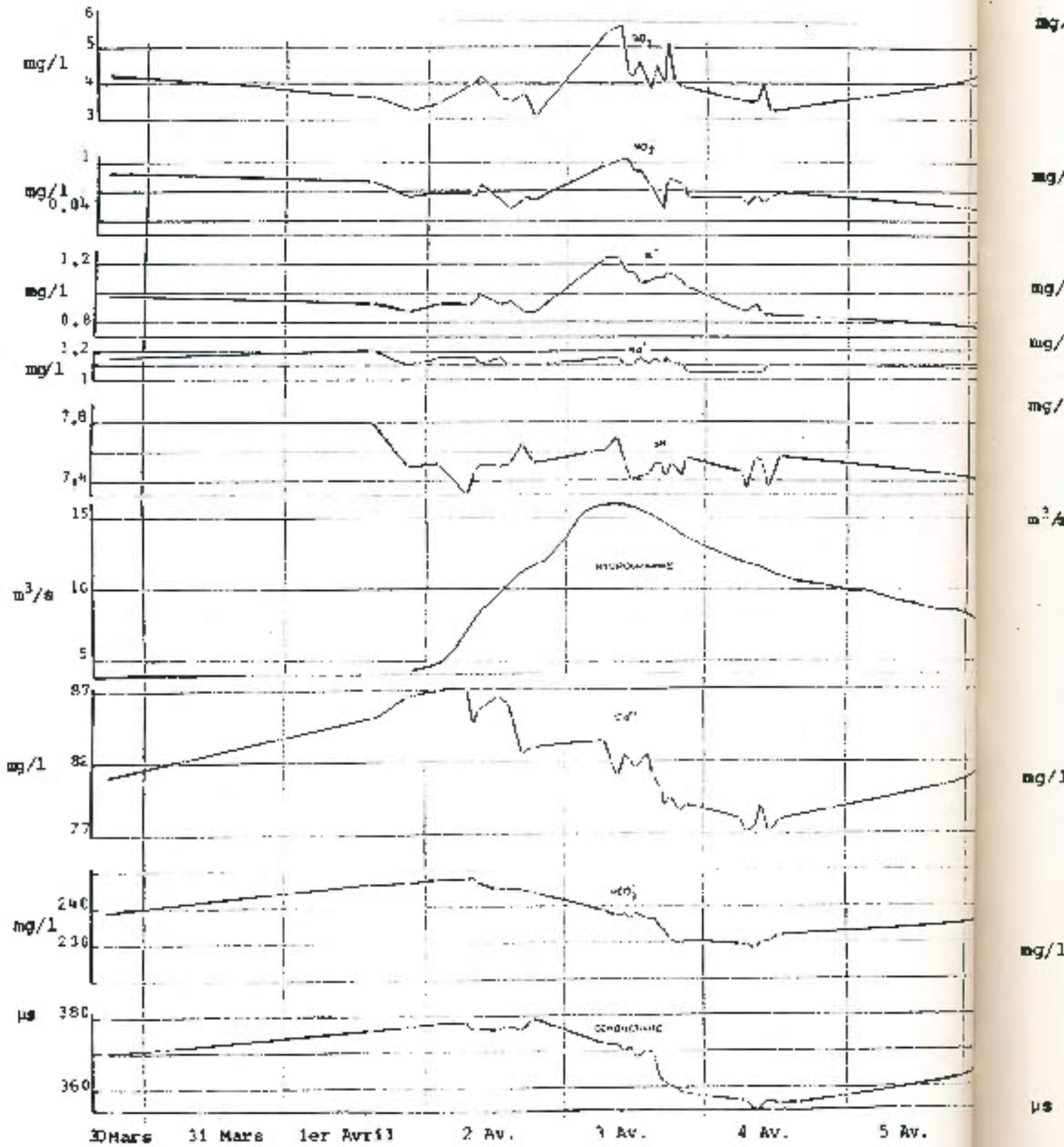
Pour ces différents paramètres, une augmentation apparaît dans la première montée de crue au Lison, dans la deuxième à la Sarrazine (avec un retard d'environ 20 heures par rapport au Lison).

Ces valeurs diminuent jusqu'à un minimum survenant en même temps à la Sarrazine et au Lison, environ une journée après les pointes de crue. On assiste ensuite à un accroissement des valeurs de ces paramètres au cours de la décrue.

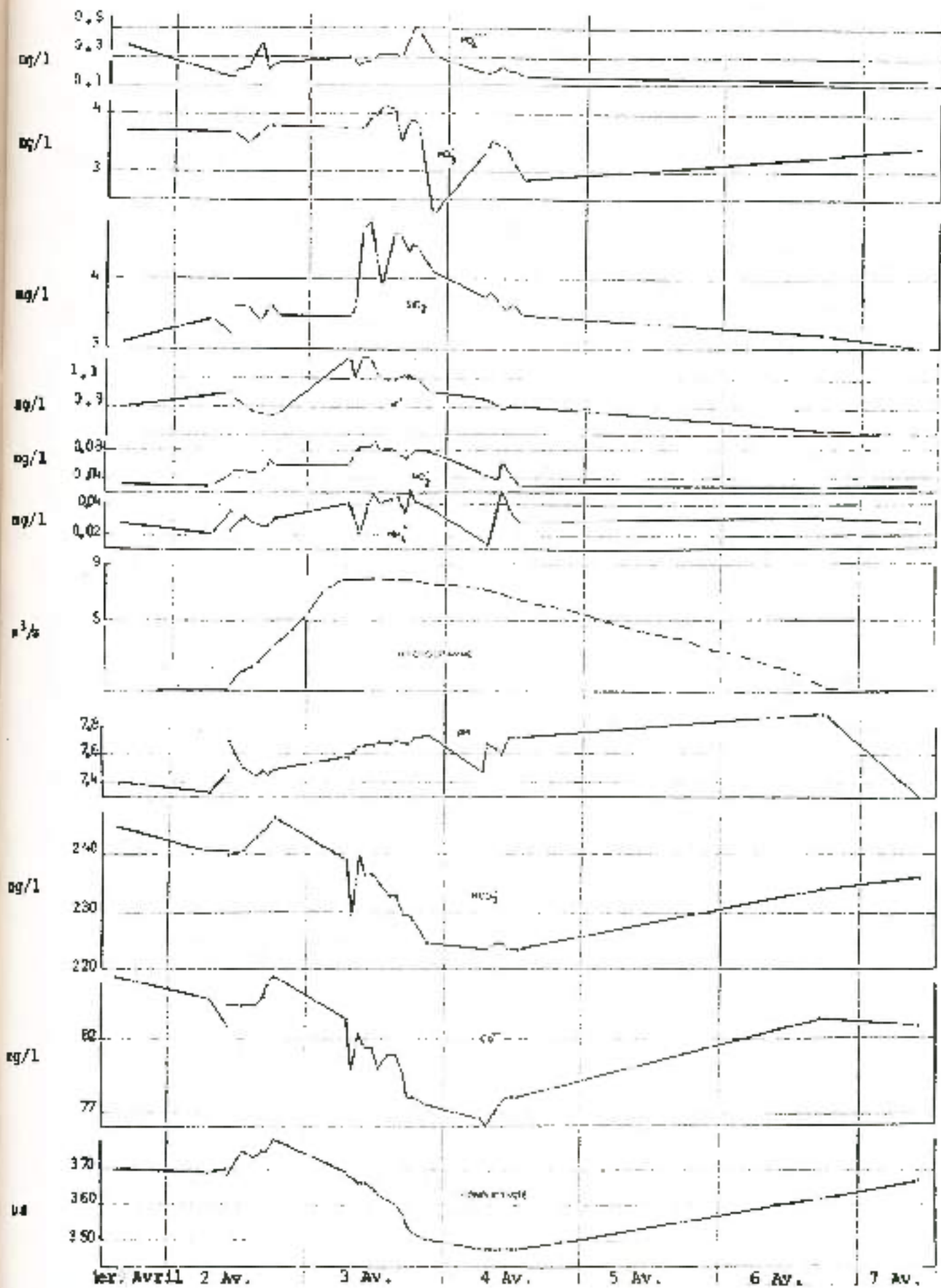
+ Teneurs en SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ , SiO_2 , NO_2^- , NO_3^- , K^+

Tous ces ions subissent des variations très complexes. Il apparaît néanmoins un maximum intervenant après le sommet de crue au Lison comme à la Sarrazine.

Fig. 42 - CRUE DU 1^{er} AVRIL 1977 - LISON.
VARIATION DES TENEURS EN IONS.



VARIATION DES TENEURS EN IONS.



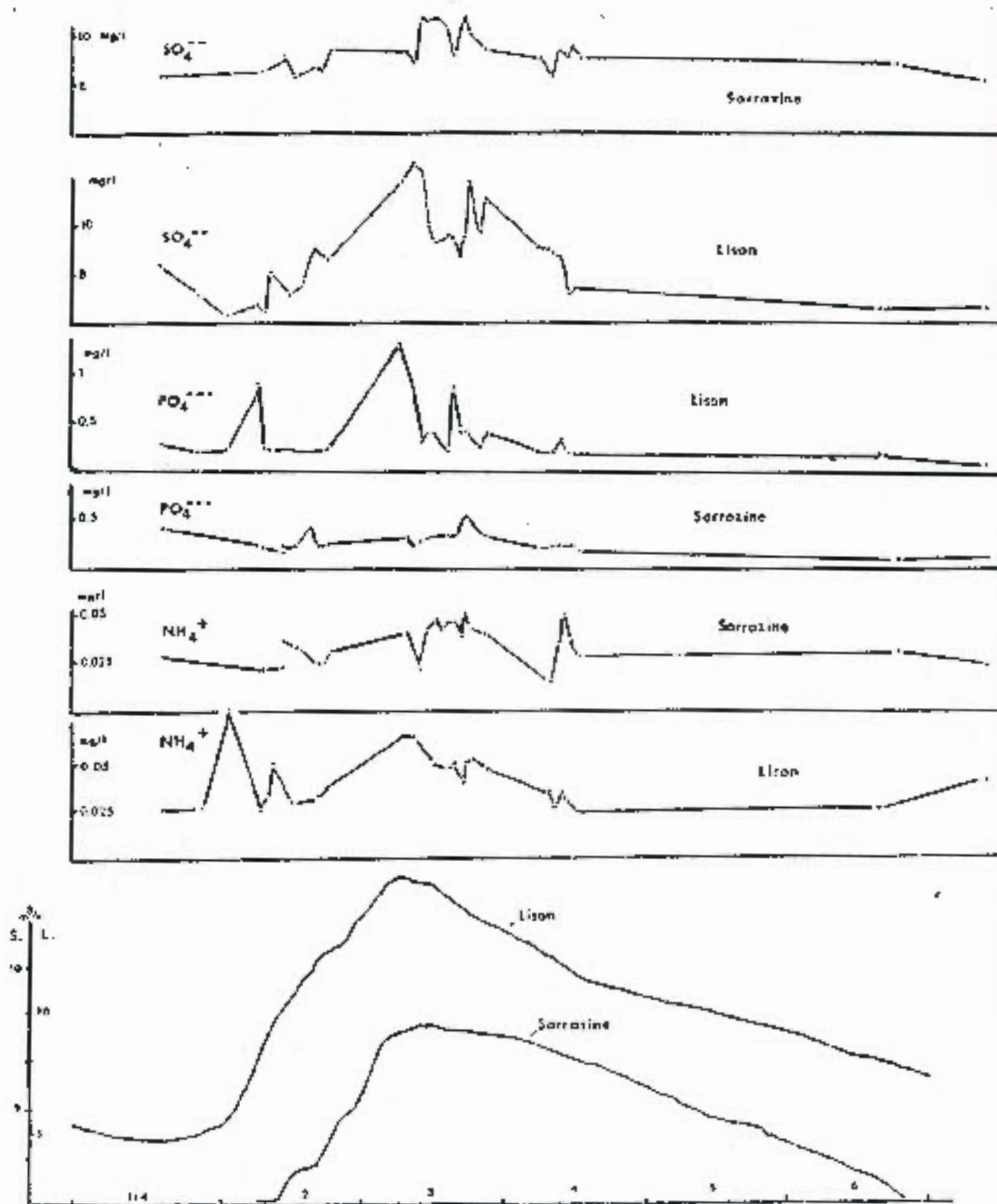
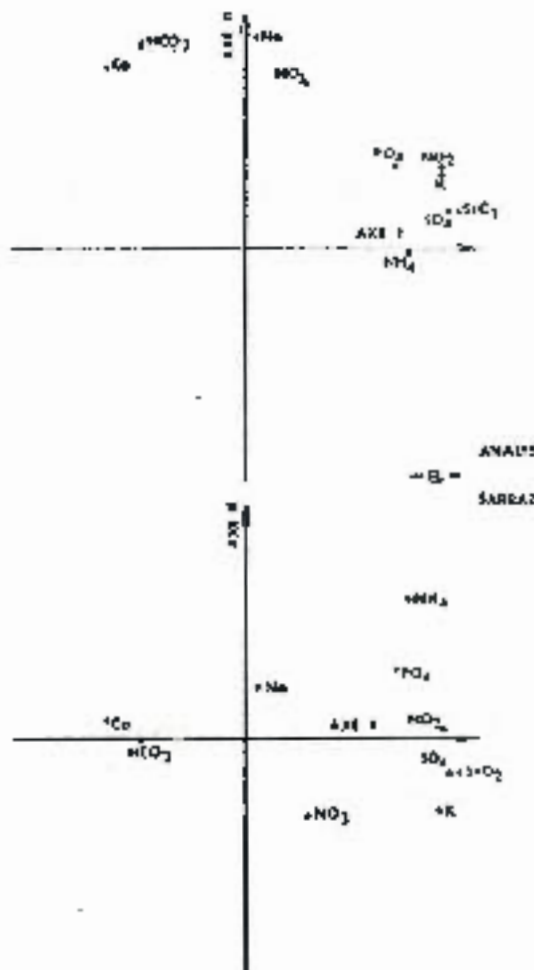
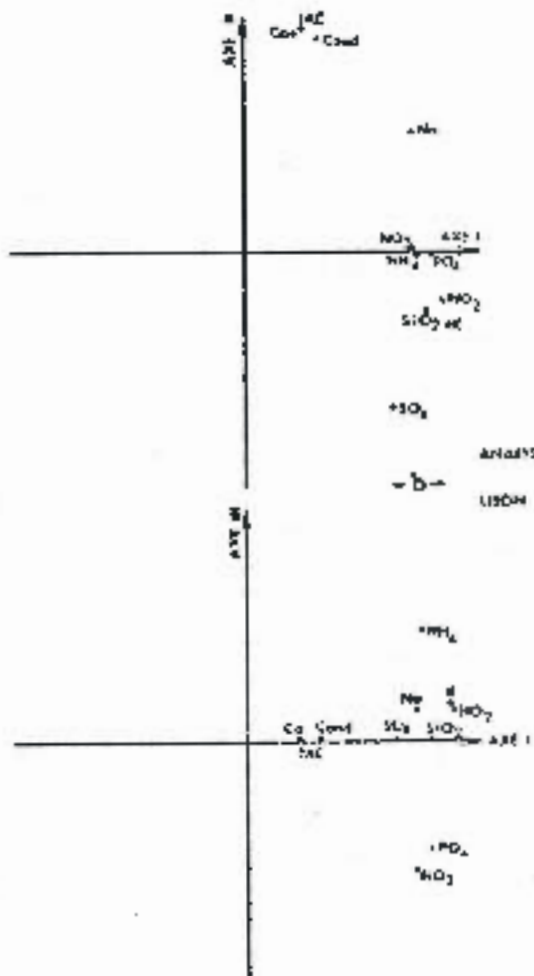
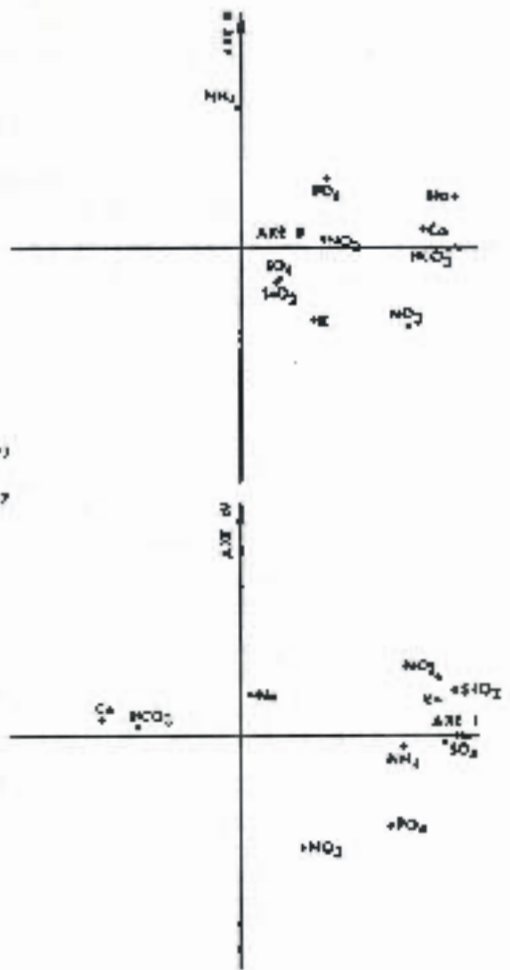


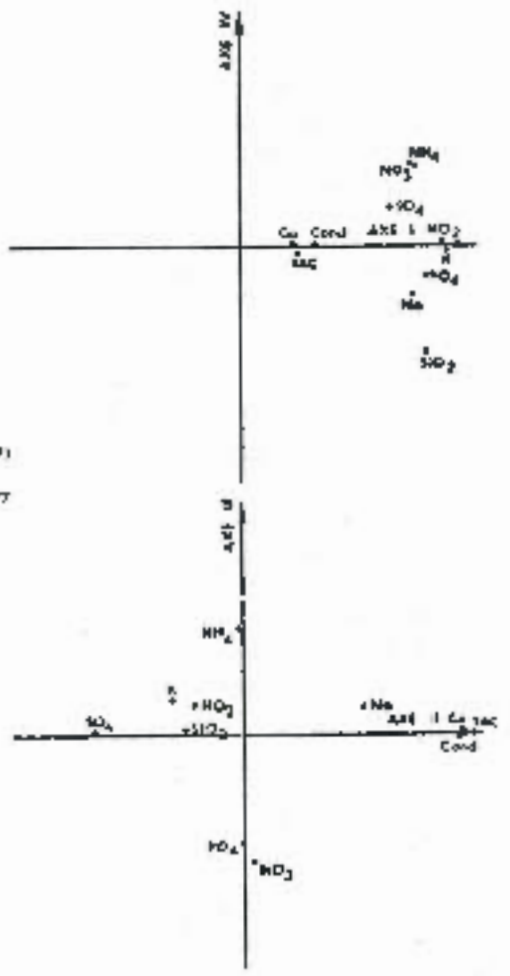
Fig. 44 - CRUE DU 1^{er} AVRIL 1977 - LISON ET BARRAZINE
VARIATIONS DES TENEURS EN IONS.



ANALYSE FACTORIELLE (AOP)
- B -
SARRAZINE CRUE DU 1.4.77



ANALYSE FACTORIELLE (AOP)
- B -
LISSON CRUE DU 1.4.77



° Analyse factorielle des résultats

- Le Lison

La matrice de corrélation et la matrice factorielle sont exposées dans les tableaux en Annexe V.

Sur les diagrammes fournis en Fig. 45a on peut distinguer les associations suivantes :

- d'une part le Ca^{2+} , TAC et la conductivité
- d'autre part un groupe dans lequel les associations les plus constantes sont K^+ , NO_2^- et NO_3^- , PO_4^{3-} .

- La Sarrazine

Les associations qui apparaissent sur les diagrammes de la Fig. 45b semblent rappeler celles du Verneau :

En effet on distingue :

- d'une part un groupe Ca^{2+} , TAC
- d'autre part une famille composée de PO_4^{3-} , NO_2^- , K^+ , SO_4^{2-} , SiO_2 , NH_4^+
- les paramètres Na^+ et NO_3^- occupent sur les diagrammes une position intermédiaire entre les deux groupes précédents.

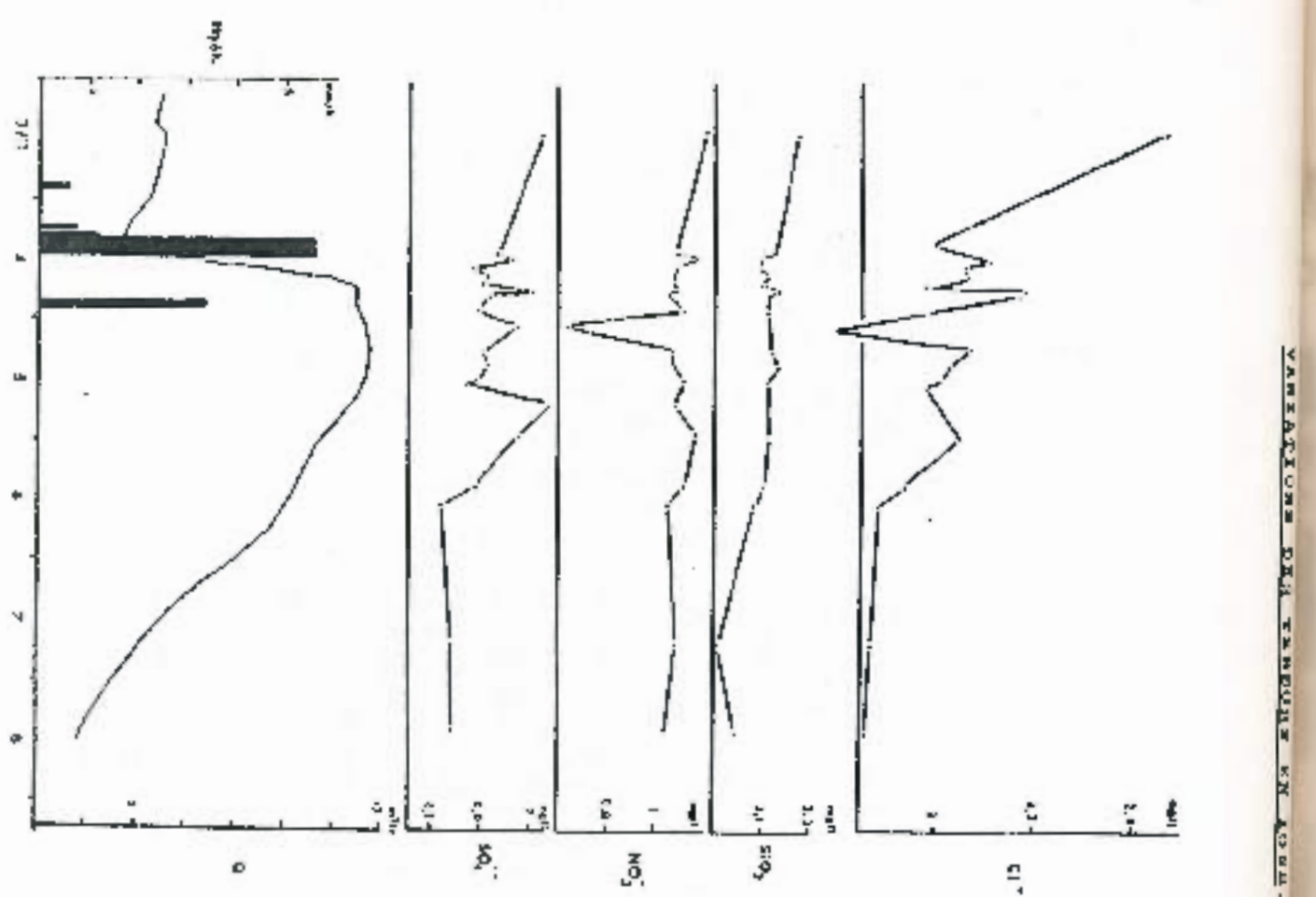
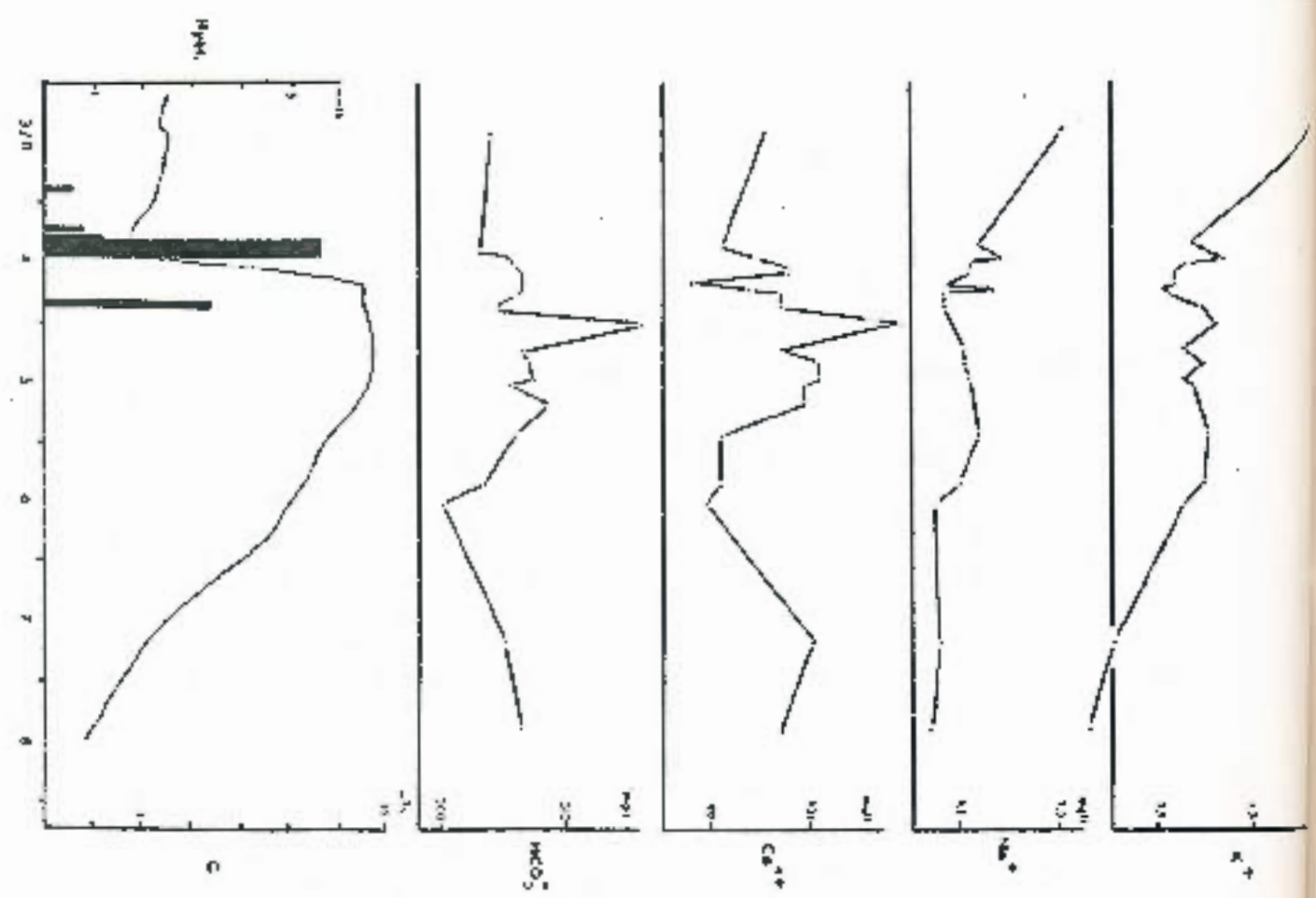
° Interprétation des résultats

Nous analyserons ensemble les crues du 1er Avril à la Sarrazine et au Lison.

Les courbes de variations de teneurs en éléments chimiques au cours des crues du Lison et de la Sarrazine ont une analogie avec celles du Verneau. En effet les courbes présentent de nombreux pics qui correspondent à une évolution rapide de la minéralisation des eaux à l'exutoire. Ces systèmes du Lison et de la Sarrazine sont donc également hétérogènes.

L'aspect amorti et la faible amplitude (30 μS) de la conductivité pour les crues du 1er Avril au Lison et à la Sarrazine pourrait être lié à l'arrivée à l'exutoire d'eaux chimiquement très proches en ions Ca^{2+} et HCO_3^- . Il n'est d'ailleurs pas impossible que la complexité hydrodynamique jointe à un effet de taille du système ait une influence sur cet amortissement.

Il apparaît cependant que les eaux les plus minéralisées (c'est-à-dire les eaux stockées dans le système) participent à l'écoulement au cours de la montée de crue. Les eaux à teneurs moins élevées en Ca^{2+} et HCO_3^- qui arrivent ensuite à l'exutoire sont au contraire enrichies en SO_4^{2-} et silice (ces paramètres présentaient effectivement des affinités sur les projections dans les différents plans factoriels), éléments qui proviennent des marnes de l'Oxfordien sur lesquelles circulent les ruisseaux du Muy et de la Reculée. Les eaux riches en SO_4^{2-} et en SiO_2 qui parviennent à l'exutoire au sommet de la crue correspondent aux eaux de ruissellement qui se perdent sur le plateau. A la Sarrazine, ces eaux arrivent également au moment du sommet de crue, mais avec un retard d'environ 2 heures sur le Lison.



Ce décalage entre le Lison et la Sarrazine ne s'amortit qu'avec l'arrivée des eaux les moins minéralisées en Ca^{2+} et HCO_3^- , et également en SO_4^{2-} et SiO_2 . Ces eaux ne présentant pas les caractéristiques des eaux ayant circulé sur les marnes, nous les avons attribuées à l'infiltration dans les calcaires (à laquelle participent des eaux de pluies et des eaux stockées dans le système).

La remontée des teneurs en Ca^{2+} et HCO_3^- correspond à une diminution de la participation des eaux d'infiltration à l'écoulement au cours de la décrue.

Crue du 4 Novembre 1977 au Lison

Il s'agit de la cinquième crue survenant après l'étiage 1977. C'est une crue de faible amplitude. Nous avons prélevé 20 échantillons qui ont été analysés pour le S.R.A.E. de Franche-Comté par le C.R.G. de Thonon.

Les résultats obtenus mettant en évidence des variations complexes mais faibles, proches des seuils de reproductibilité des méthodes employées. (Fig. 46).

* Analyse factorielle des résultats

La constitution de groupes à partir des diagrammes semble moins aisée que dans les cas précédents. On peut cependant à partir des plans factoriels I-II et II-III retrouver le groupement Ca^{2+} , TAC, associé au paramètre tritium. (cf. Fig. 41b).

Parmi les autres éléments Na^+ et Cl^- et éventuellement K^+ semblent avoir des variations qui vont dans le même sens.

* Interprétation des résultats

L'interprétation de la crue du 4 Novembre 1977 est rendue plus délicate par suite de la faible amplitude des variations des éléments chimiques. On remarque cependant des variations allant dans le même sens que celles décrites précédemment.

Il est possible que la faible amplitude des réponses au cours de cette crue soit due à sa position dans le cycle hydrologique. Il s'agit en effet d'une période de recharge puisque la crue étudiée est la deuxième survenant après l'étiage annuel.

L'étude chimique de cette crue ne nous permet pas d'aller plus loin dans l'interprétation. De même qu'au Verneau, l'analyse de diverses crues réparties sur le cycle hydrologique permettrait de préciser les modalités du fonctionnement hydrodynamique d'un système karstique complexe de grande taille.

Chimie isotopique

Dans le cadre de ce travail nous avons réalisé trois séries de prélèvements, qui s'inscrivent dans trois campagnes d'échantillonnages, à l'échelle du Jura.

Les deux premières ont été réalisées pour le Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, la troisième à l'instigation du S.R.A.E. Les trois séries d'analyse ont été effectuées au C.R.G. de Thonon.

TABLEAU n° 6 : TENEURS EN OXYGENE 18 ET EN TRITIUM AUX EXUTOIRES DES SOURCES
DE LA REGION DE NANS.SOUS.SAINTE.ANNE

	I	II	III
Lison source	$C_{18} : -10,62$ $T : 145 \pm 11$	$O_{18} : -11,1$ $T : 91 \pm 7$	$O_{18} : -9,55$ $T : 170 \pm 13$
Sarrazine	$O_{18} : -10,34$ $T : 143 \pm 11$	$O_{18} : -11,5$ $T : 97 \pm 7$	$O_{18} : -9,75$ $T : 168 \pm 13$
Gyps	$C_{18} : -9,93$ $T : 161 \pm 12$	$O_{18} : -11,0$ $T : 105 \pm 8$	$O_{18} : -10,20$ $T : 160 \pm 12$
Verneau	$C_{18} : -10,24$ $T : 173 \pm 12$	$O_{18} : -10,9$ $T : 129 \pm 9$	$O_{18} : -9,95$ $T : 171 \pm 13$
Bief Poutot	$C_{18} : -10,30$ $T : 152 \pm 24$	$O_{18} : -11,2$ $T : 115 \pm 18$	$O_{18} : -10,15$ $T : 126 \pm 20$
Chauveroché	$O_{18} : -10,15$ $T : 193 \pm 29$	$O_{18} : -10,8$ $T : 130 \pm 21$	

- . Les valeurs d'Oxygène 18 sont données en ‰.
- . Les valeurs de Tritium sont données en Unités Tritium

I : 19 Janvier 1977
 II : 25 Février 1977
 III : 22 Septembre 1977

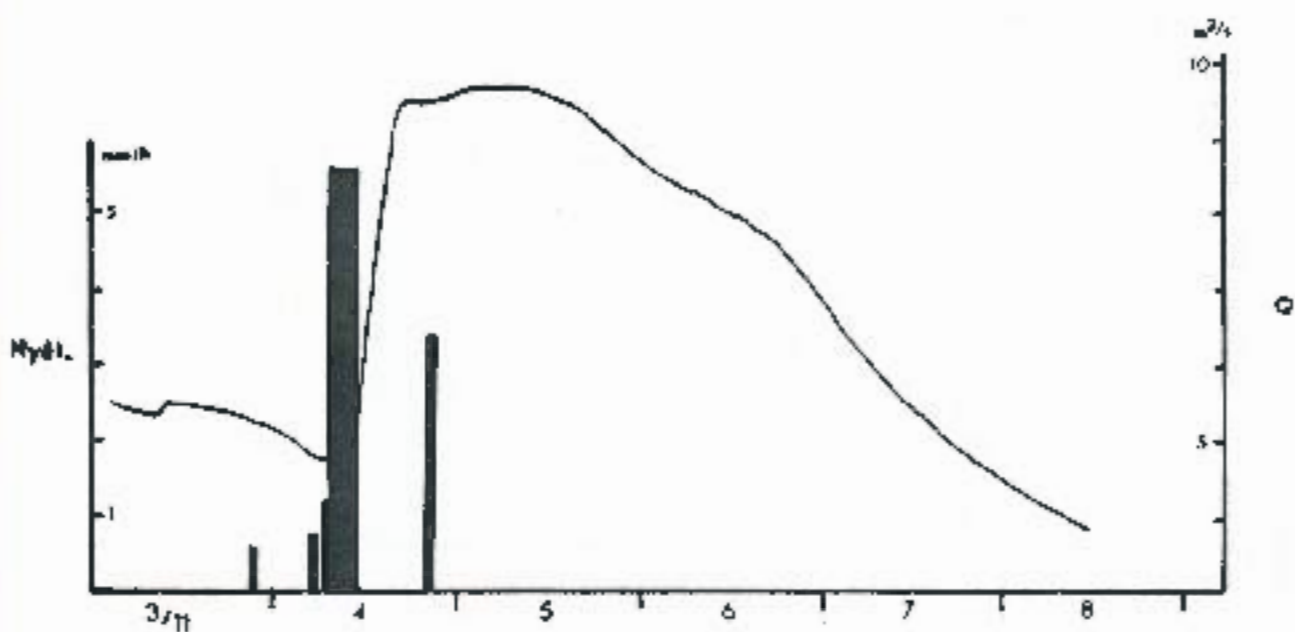
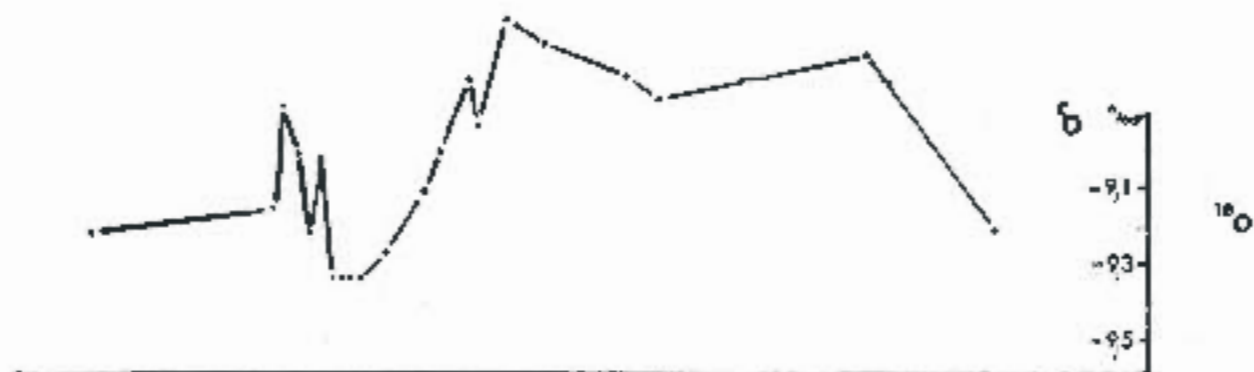
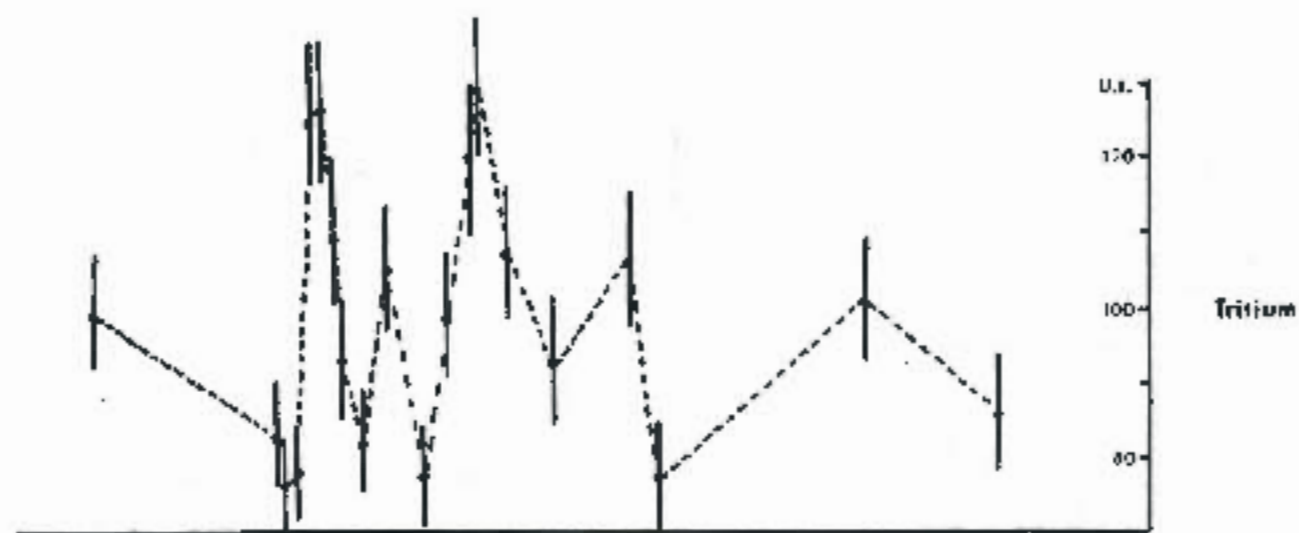


Fig. 47 - EVOLUTION DES TENEURS EN ISOTOPES (^{18}O , T) AU COURS DE LA CRUE DU 4 NOVEMBRE 1977 AU LISON.

Nous avons en outre bénéficié des analyses isotopiques (effectuées au C.R.G. de Thonon pour le S.R.A.E.) portant sur la crue du 4 Novembre au Lison, dont les résultats au point de vue chimique ont été exposés au paragraphe précédent.

. Résultat des campagnes de prélèvements de l'année 1977 .

(cf. Tableau 6)

Les valeurs de tritium des première et troisième campagnes de prélèvements effectués en étiage (I : étiage d'hiver, III : étiage d'été) sont plus fortes que celles des prélèvements de la deuxième campagne effectuée en crue.

Celle-ci présente en outre les teneurs les plus faibles en oxygène 18.

Les valeurs des paramètres chimiques classiques, relatifs à ces trois campagnes, sont fournis en Annexe IV.

. Résultats des analyses isotopiques de la crue du 4 Novembre 1977 au Lison .

Au cours de cette crue, nous avons observé des variations de la composition isotopique (cf. Fig. 47).

Les courbes traduisent la complexité des variations des teneurs en oxygène 18 et en tritium pendant la fin de la montée de crue, et au cours de la décrue. Il conviendra, lors de l'interprétation, de rapprocher ces valeurs du contexte chimique à l'exutoire.

. Interprétation des résultats .

L'évolution des teneurs en isotopes observée au cours de la crue du 4 Novembre 1977 au Lison montre la variabilité de ces paramètres aux exutoires et rend délicate l'interprétation des valeurs ponctuelles correspondant aux trois campagnes de prélèvements au cours du cycle.

Il conviendrait de compléter ces premiers résultats par des prélèvements systématiques aux exutoires et au niveau des entrées (pluie et ruissellement).

Les résultats des trois campagnes de prélèvements de l'année 1977 montrent cependant que les valeurs d'oxygène 18 sont sensiblement voisines pour les trois sources (Lison, Sarrazin et Verneau). Les variations des teneurs isotopiques pour chaque exutoire sont à rapprocher de la position des prélèvements dans le cycle. En effet le prélèvement de la deuxième campagne a été effectué lors d'une crue due à la fonte de neige. Cette observation permet d'expliquer les valeurs plus faibles en oxygène 18 et en tritium par rapport aux deux autres campagnes. En effet les pluies d'hiver ou la neige présentant des teneurs faibles en oxygène 18, ainsi que des teneurs plus faibles en tritium (minimum saisonnier annuel en hiver).

Comme l'avait mis en évidence l'étude des variations du chimisme au cours de la crue du 4 Novembre 1977, les variations des isotopes au cours de cette crue mettent en évidence l'arrivée massive à l'exutoire de masses d'eaux de compositions isotopiques différentes, traduisant ainsi l'hétérogénéité de l'aquifère.

La comparaison des teneurs en oxygène 18 de l'eau de pluie, des eaux de ruissellement sur les marnes, et des eaux qui arrivent à l'exutoire permet de faire les constatations suivantes :

- les eaux qui participent à l'écoulement à l'exutoire ont toutes des teneurs en oxygène 18 plus faibles et des teneurs en tritium plus fortes que les eaux du signal pluie (teneur moyenne 5,948 ‰ et 14 UT.). L'eau de pluie ne parvient donc pas directement à l'exutoire pendant la crue, mais provoque une impulsion qui sollicite des eaux stockées dans le système karstique. Il semble qu'un phénomène identique se produise au niveau des bassins marnaux aériens ; en effet les eaux de ruissellement présentent également des teneurs en oxygène 18 et tritium déjà très éloignées de celles de la pluie. Ces eaux correspondraient alors à des eaux stockées dans les marnes ou dans les sols du bassin et chassées par les eaux de précipitation.

CONCLUSION

Cette approche des paramètres géochimiques et isotopiques des systèmes du Verneau et du Lison a montré la nécessité d'effectuer des analyses réparties sur tout le cycle.

Dans le cadre de ce travail, nous avons mis l'accent sur l'étude des variations du chimisme au cours des crues. Cette étude a mis en évidence l'arrivée aux exutoires de masses d'eau de composition chimique différente, traduisant une hétérogénéité géochimique des aquifères.

L'acheminement de cette hétérogénéité jusqu'à l'exutoire, traduit donc la structuration et l'organisation d'un drainage au sein de cet aquifère. Il s'agit donc bien d'aquifères karstiques au sens défini par A. MANGIN (1974).

Les systèmes du Verneau et du Lison, à côté de ces caractères communs aux aquifères karstiques, possèdent chacun leur originalité.

LE SYSTEME KARSTIQUE DU VERNEAU

Les résultats obtenus à partir de l'hydrogéochimie, sont en accord avec les conclusions établies par ailleurs (première et deuxième partie).

On peut en effet rapprocher la grande variabilité du chimisme observée au cours de la crue du 4 Novembre 1977, de l'importante hiérarchisation de l'aquifère.

D'autre part, les modalités de l'augmentation des teneurs en Ca^{2+} et HCO_3^- au cours de la décrue traduisant la diminution de l'influence des eaux d'infiltration, confirment dans le cas de cette crue, les résultats de l'étude des décrues du Verneau.

Enfin, l'analyse des variations du chimisme, et en particulier celle des sulfates, de la silice, du calcium, et du TAC, a mis en évidence la rapidité d'acheminement des eaux de drainage sur bassin marnaux à l'exutoire. Ces résultats sont en accord avec le traçage effectué en 1970 à la perte de la Vieille Folle.

LE SYSTEME KARSTIQUE DU LISON

Au Lison, les résultats de l'hydrogéochimie ont permis la confirmation de la relation Lison - Sarrazine, et de la complexité de cette relation illustrée en particulier par les décalages dans les variations des teneurs en Ca^{2+} et HCO_3^- .

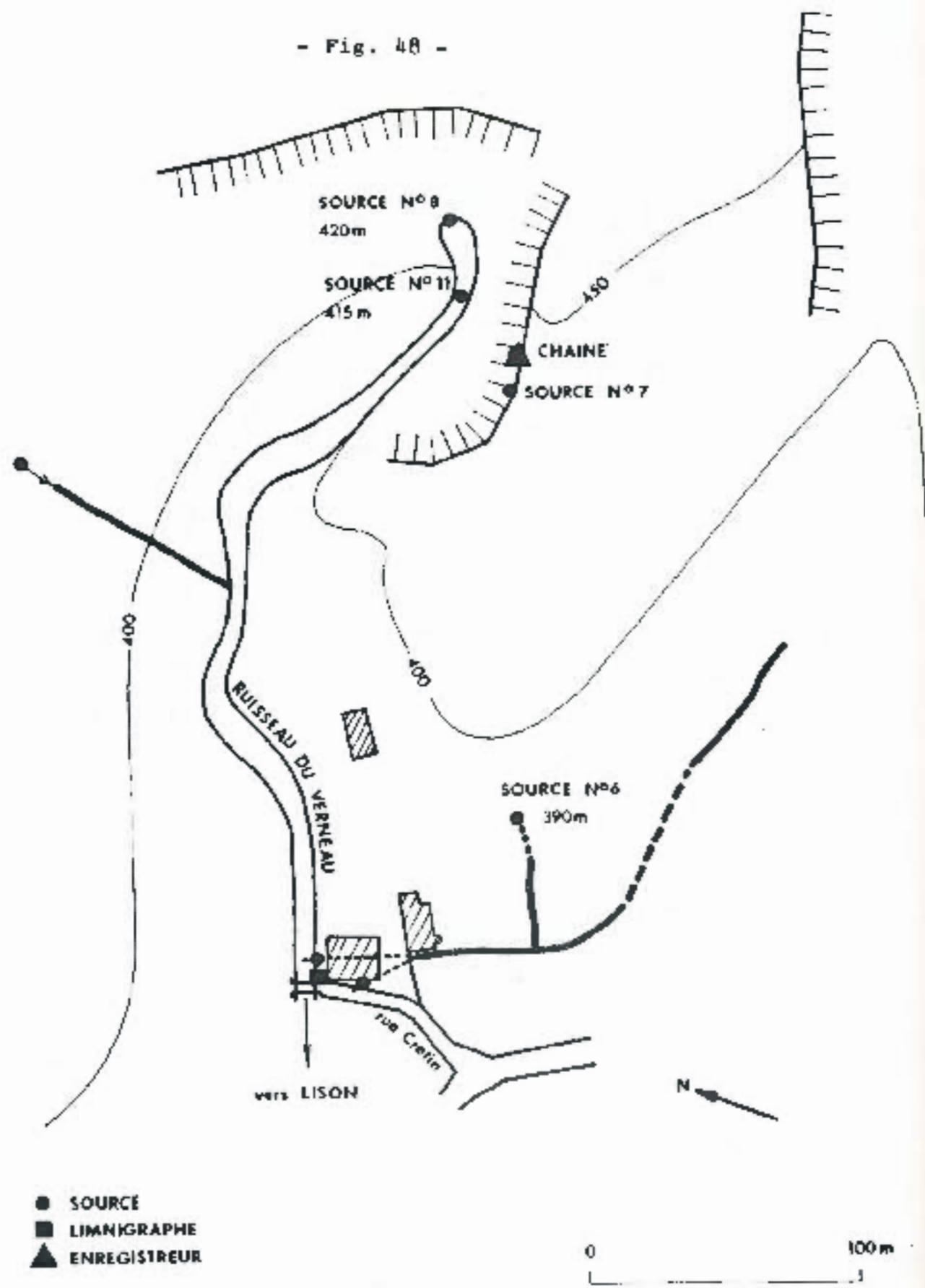
Ces résultats ont en outre permis de mettre en évidence la difficulté d'approche de l'influence des eaux drainées sur bassin marneux, dans le fonctionnement de l'aquifère ; les eaux de ruissellement analysées étant chimiquement proches de celles sortant à l'exutoire.

Il est possible que cette proximité, entre les minéralisations des eaux de ruissellement et celles s'écoulant à l'exutoire, soit à l'origine de l'amortissement des variations par rapport à celles du Verneau.

Cet amortissement peut également être dû à un degré moindre de karstification, ou à un effet de taille (le bassin du Lison, bien que sous-estimé est environ dix fois plus étendu que celui du Verneau).

Enfin, l'analyse des teneurs en isotopes, de la pluie, du ruissellement sur les marnes, et des eaux s'écoulant à l'exutoire, a montré que les eaux de pluie ne participaient pas directement à l'infiltration au niveau des pertes ni à l'écoulement à l'exutoire dans le cas de la crue du 4 Novembre.

- Fig. 48 -



SCHEMA DE LOCALISATION DES SONDES THERMIQUES

THERMIQUE

Dès le début du siècle, dans notre région, le Professeur E.N. FOURNIER, parallèlement à E.A. NARTEL, effectuait des mesures de température aux exutoires karstiques. Il reliait ensuite les données obtenues à l'origine des eaux s'écoulant à ces exutoires.

Depuis, les travaux effectués principalement à Bordeaux (H. SCHOELLER, 1949-1962), à Montpellier (C. DROGUE, 1969 ; G. MARJOLET et J. SALADO, 1975 ; J.L. LACAS, 1976) et à Moulis (C. ANDRIEUX, 1972-1975-1976-1977) ont permis de définir une méthodologie. En particulier C. ANDRIEUX (1976) a montré que les informations recueillies au niveau des exutoires étaient de deux types :

- des variations de température dues au paramètre thermique proprement dit (équilibre entre les températures de l'eau et de la roche),
- des variations de température dues à l'arrivée à l'exutoire d'eaux thermiquement différentes, donc liées au fonctionnement du système.

Dans le cadre de ce travail, l'étude des variations thermiques aux exutoires a été entreprise parallèlement à l'étude des paramètres chimiques et de l'hydrodynamique des systèmes considérés.

APPAREILLAGE ET CADRE DES MESURES

Appareillage

Les mesures de température des eaux ont été effectuées en liaison avec le Centre de Recherche Géophysique de Garchy. Nous avons utilisé une chaîne d'acquisition de données mise au point par M. DUBREULE.

Cette chaîne a fait l'objet d'une description détaillée (DUBREULE). Nous ne fournissons ici que les principales caractéristiques de l'enregistreur et des sondes.

. Enregistreur .

Il s'agit d'un enregistreur 15 voies à imprimante. L'alimentation s'effectue à partir d'une batterie de 12 volts. La consommation est de 5 watts. La tension d'entrée étant de 10 volts.

La scrutation des 15 voies se fait par périodes réglables (1 mn, 5 mn, 15 mn, 1 h.) et à raison d'une voie par seconde. Chaque sonde est mise sous tension 15 secondes avant la scrutation.

. Les sondes .

Elles sont construites à partir d'un élément capteur constitué par une sonde au platine (100 Ω à 0 $^{\circ}$).

Cette thermistance au platine est l'élément d'un pont dont on mesure le déséquilibre. La sensibilité des capteurs est linéaire et égale à 100 mV/ $^{\circ}$ C aux tolérances des composants.

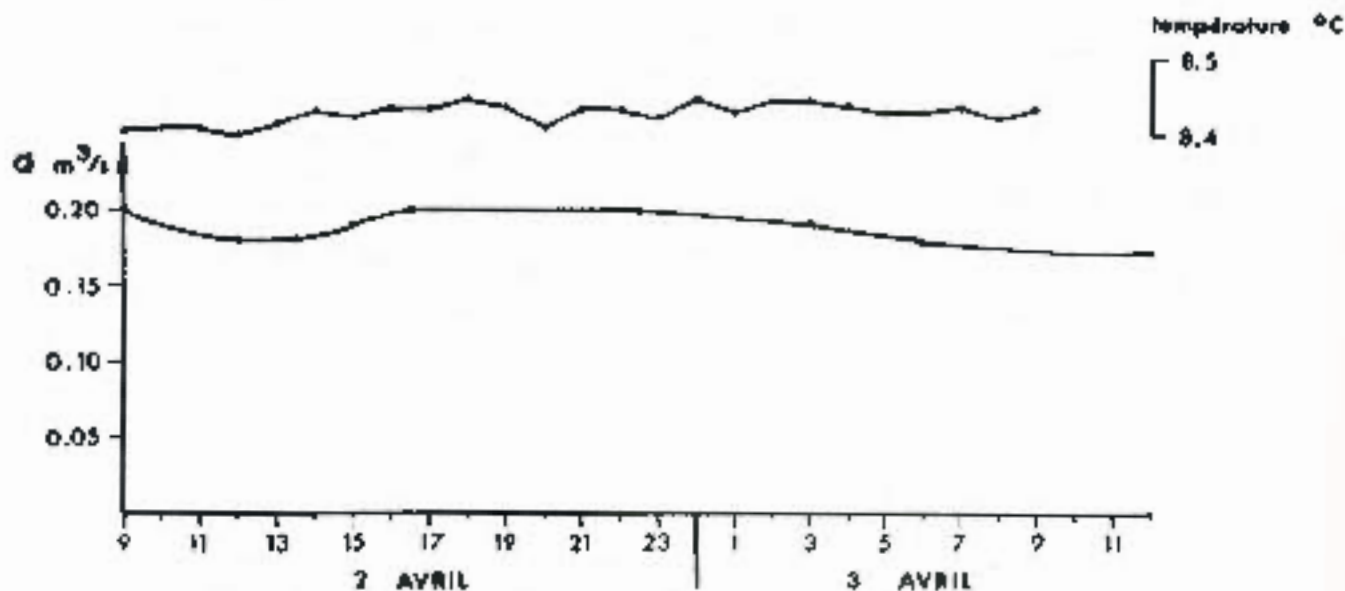
Chaque sonde est étalonnée sur sa voie.

La précision de l'ensemble sondes-enregistreur est de ± 2 centièmes de $^{\circ}$ C.

. Signification des variations thermiques obtenues .

Comme l'avait fait C. ANDRIEUX (1975) pour le système du Baget, nous avons essayé de relier les variations de température à des événements hydrologiques. Nous avons donc recherché dans la période étudiée la plus petite variation de température correspondant effectivement à une crue.

Pour la crue du 2 au 3 Avril, il apparaît une variation de 0,05°C au cours d'une petite crue (variation de débit de 30 l/s) pour les sources n°8 et 11.



Nous ne considérons donc comme significatives que les variations de températures supérieures à 0,05°C sur les sources n°8 et 11.

En l'absence de limnigraphe sur la source n°6, il n'est pas possible d'effectuer une démarche similaire. Nous tiendrons cependant compte de certaines variations survenant lors des crues enregistrées à la source du Verneau.

Cadre des mesures

. Situation des exutoires étudiés .

La figure 48 montre l'emplacement des différents points de mesure du réseau installé à la source du Verneau.

Certains exutoires sont pérennes (source d'étiage n°11, Alt. 415 m ; source de l'abreuvoir n°6, Alt. 390 m). Les autres sont temporaires (source n°8 du Verneau, Alt. 420 m ; source latérale n°7, Alt. 410 m).

. Périodes de surveillance .

En l'absence de mesures de température réparties sur le cycle hydrologique, les résultats obtenus sont les variations thermiques au cours de trois crues du 23 Mars, 25 Mars et 27 Mars 1978. En effet, le manque de matériel ne nous a pas permis d'acquies de données pour la période anté-

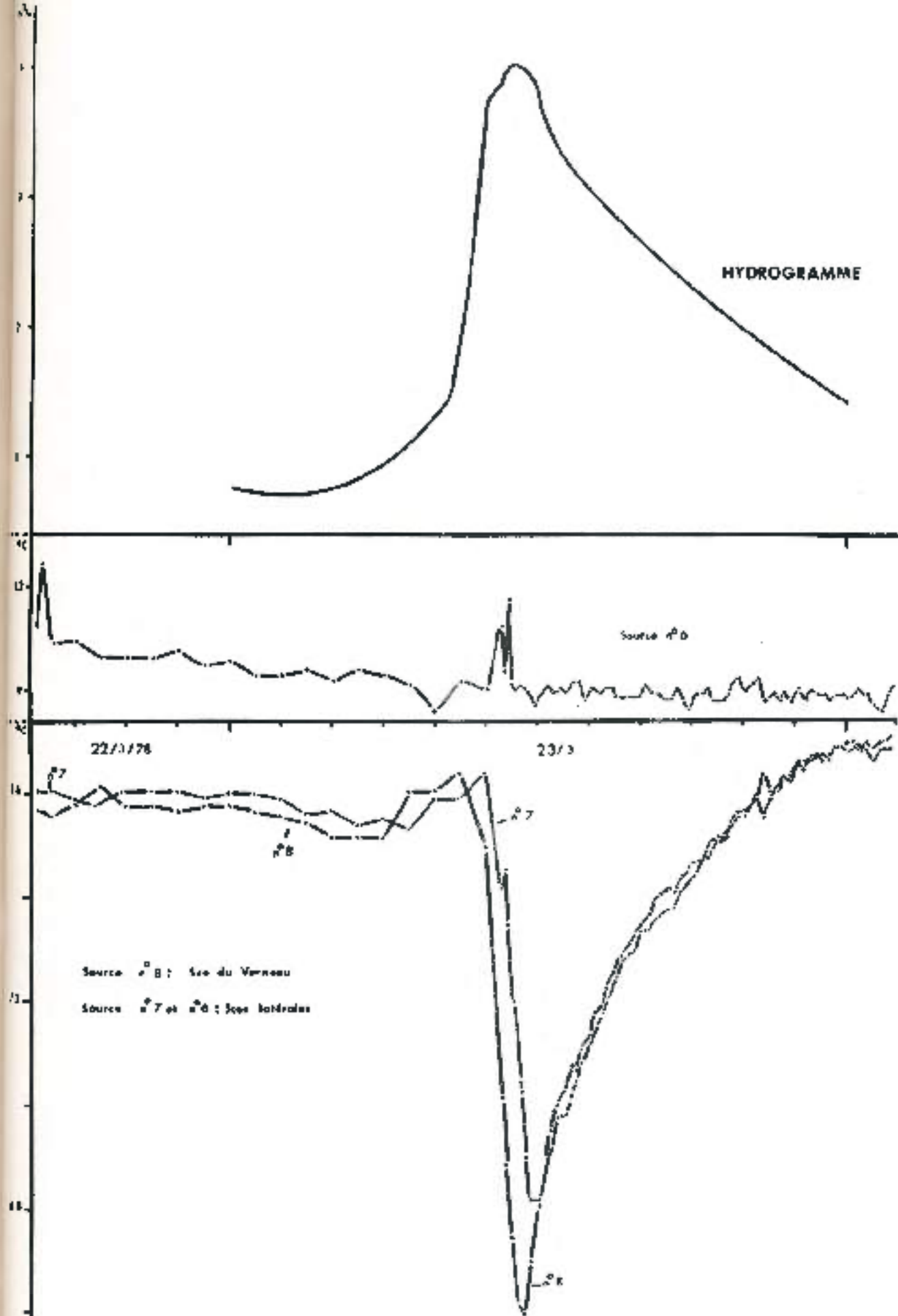
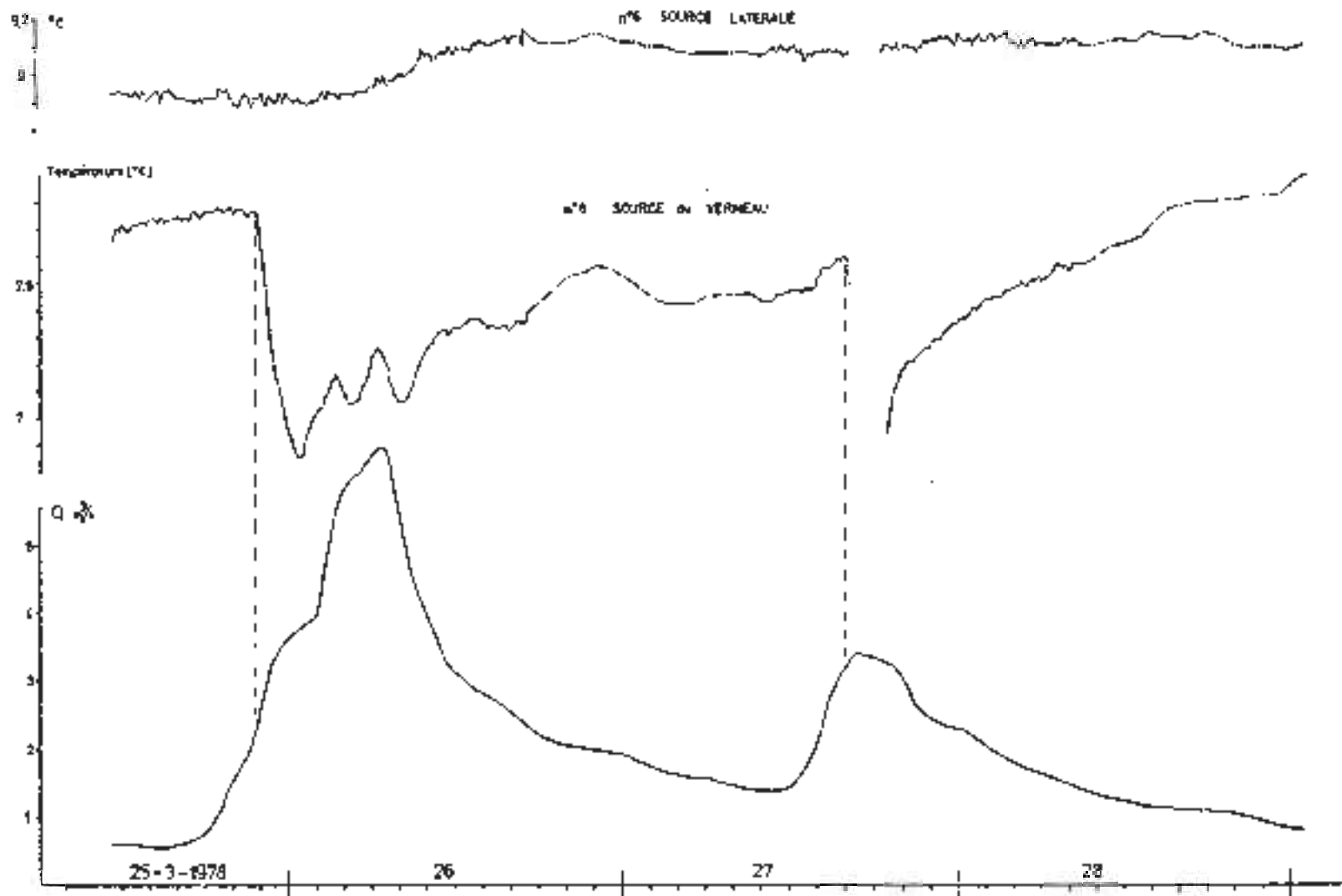


Fig. 49 - VARIATIONS THERMIQUES - CRUE DU 23 MARS 1979

SYSTEME DU VERNEAU

Fig. 50 - VARIATIONS THERMIQUES - CRUES DU 25 ET DU 27 MARS 1978

SYSTEME DU VERNEAU



rière à la fin du mois de Mars 1978. Ces trois crues surviennent, dans le cycle hydrologique, au cours de la période de hautes eaux du printemps.

ANALYSE DES RESULTATS

Description des variations thermiques à la source du Verneau (source d'étiage n°11 et exutoirs de crues n°8)

Sur les trois crues étudiées, deux semblent répondre au même schéma. La troisième est plus complexe.

. Crues du 23 Mars et du 27 Mars 1977 . (Fig. 49 et 50)

Ces deux crues simples, comparables hydrologiquement, présentent des variations thermiques du même type : une augmentation, au cours de la montée de crue, qui atteint dans les deux cas, un maximum respectivement 2 et 1 heure avant la pointe de crue. L'élévation de température correspond dans les deux cas à environ $0,1^{\circ}\text{C}$.

Cette augmentation est ensuite suivie d'une diminution brusque. Le minimum est atteint 1/2 heure après la pointe de crue dans le cas de la crue du 23 Mars. L'enregistrement des variations, par suite d'une absence d'information ne permet pas de situer de façon précise le minimum de température pour la seconde crue.

L'amplitude est de $1,05^{\circ}\text{C}$. Le minimum thermique est atteint 2 h 30 après le maximum décrit ci-dessus.

Au cours de la décrue la température remonte rapidement. Le temps de retour à la température initiale est variable.

. Crue du 25 Mars 1977 . (Fig. 50)

Sur le plan hydrologique, c'est une crue complexe. La montée s'effectue en trois temps, chaque accroissement étant dû à la reprise de la pluie. Nous n'observons pas dans ce cas de pic de température en montée de crue.

L'évolution de la température au cours de la montée de crue et de la décrue est caractérisée par quatre minima. La différence de température la plus importante est de $0,9^{\circ}\text{C}$.

L'apparition de la crue du 27 Mars n'a pas permis de prolonger les observations au cours de la décrue.

Variations thermiques aux sources latérales (n°6 et 7)

La source latérale n°7 montre les mêmes variations thermiques que la source du Verneau mais légèrement décalées dans le temps. L'amplitude des variations thermiques est légèrement inférieure à celle observée au Verneau.

Le schéma des variations thermiques à la source latérale n°6 est très différent de celui observé aux autres exutoirs. En effet depuis le début de la période observée (22 Mars) la température s'abaisse de $9,1^{\circ}$ à $8,9^{\circ}$ jusqu'au milieu de la montée de crue du 25 Mars. A partir de ce moment, la température augmente pendant 15 heures jusqu'à $9,15^{\circ}$. Elle s'abaisse jusqu'au sommet de la crue du 27 Mars ($9,1^{\circ}$) puis s'élève ensuite au cours de la décrue pendant 12 heures pour atteindre à nouveau $9,15^{\circ}$. Elle oscille encore au cours de la décrue et s'abaisse pour atteindre 9° trois jours après la crue.

INTERPRETATION

Source du Verneau

Les sources n°8 et 11 (source du Verneau et source d'étiage) donnent les mêmes résultats. En effet la source n°11 correspond à l'exutoire d'étiage de la source principale du Verneau (grotte) située à cinq mètres au-dessus de la première.

Il est intéressant de noter les analogies entre les courbes des variations thermiques et celles des variations des ions Ca^{2+} et HCO_3^- , décrites dans le chapitre précédent.

De même que la diminution de teneur en Ca^{2+} et HCO_3^- était due à l'arrivée à l'exutoire des eaux de ruissellement s'infiltrant massivement au niveau des pertes, le refroidissement brusque des eaux, enregistré à l'exutoire peut être attribué à l'arrivée rapide de ces eaux à température plus basse que celles de l'aquifère. Ces eaux n'ont pas eu le temps de se mettre à l'équilibre avec la roche.

Dans la remontée de température au cours de la décrue interviennent deux phénomènes : une diminution de la participation des eaux d'infiltration et une mise à l'équilibre progressive de celles-ci avec la température de la roche.

Compte tenu de ces précisions nous pouvons proposer le schéma interprétatif suivant :

. La crue du 23 Mars survient alors que la décrue de l'épisode précédent n'est pas encore achevée. La diminution de température survenant au début de crue correspond à des eaux d'infiltration de la crue précédente chassées par l'onde de crue.

On peut rapprocher cette diminution de température en début de crue de l'abaissement des teneurs en Ca^{2+} et HCO_3^- ainsi que de la conductivité observée au cours de la crue du 4 Novembre 1977. Ce phénomène n'avait alors pas été interprété, les variations étant proches des seuils de reproductibilité. Nous observons ensuite l'arrivée d'une eau légèrement plus chaude, correspondant à des eaux stockées dans le système, mises en mouvement par l'onde de crue. La brusque chute de température correspond ensuite à l'arrivée des eaux d'infiltration rapide dont la participation diminue au cours de la décrue.

Ce schéma se reproduit de façon analogue pour la crue du 27 Mars. La décrue plus complexe est influencée par des pluies survenant au cours de la nuit du 27 au 28.

Dans le cas de la crue du 25 Mars l'évolution en début de crue est légèrement différente : en effet à ce moment là, il semble que la proportion des eaux d'infiltration de la crue précédente à l'écoulement soit minime. Le passage de l'onde de crue ne mobilise que des eaux de la réserve, évitant ainsi le contraste observé lors des deux autres crues.

L'arrivée d'eaux thermiquement différentes ensuite au cours de la crue correspond à une évolution de cette crue par paliers (influence de trois impulsions successives). La remontée de la température est perturbée par des pluies intervenant au cours de la décrue.

Sources latérales

. Source n°7 .

Cette source correspond à la réapparition d'une dérivation dans la grotte de la source du Verneau. Il est logique de constater des variations identiques à celles du Verneau, mais légèrement décalées.

Source n°6 .

L'absence d'hydrogramme ne nous permet pas d'étudier les variations thermiques par rapport à l'évolution du débit. L'interprétation se fera donc à partir de l'hydrogramme du Verneau.

Les résultats des traçages ont montré que cet exutoire appartenait au système du Verneau. Nous pouvons donc mettre en parallèle les variations thermiques à la source du Verneau et à cet exutoire. En particulier il apparaît que les températures en basses eaux sont sensiblement voisines (9°).

En période de crue la température de la source n°6 reste voisine de 9° alors que la température de la source du Verneau s'en écarte de façon notable.

Il semble donc que l'on puisse attribuer l'écoulement à cet exutoire à des eaux de réserve.

Les variations thermiques que l'on observe à certaines crues mettent en évidence l'hétérogénéité thermique de cette réserve.

Les faibles variations thermiques, observées entre les basses eaux et les crues, semblent indiquer une participation très réduite des eaux d'infiltration plus froides au débit de cet exutoire.

CONCLUSION : APPORT DE LA THERMIQUE

L'analyse des variations thermiques aux exutoires du système du Verneau, d'après les trois crues observées, confirme l'hétérogénéité de l'aquifère, mise en évidence lors de l'étude des variations chimiques. De même que nous avons vu l'arrivée successive à l'exutoire de masses d'eau à minéralisation distincte, la thermique montre la participation à l'écoulement de masses d'eau de température différente.

Ces résultats sont en accord avec les observations de terrain, et les conclusions établies par ailleurs (hydrodynamique et hydrochimie), c'est-à-dire une karstification très poussée aboutissant à une grande structuration de l'aquifère karstique. Les images thermiques obtenues ne rendent compte pratiquement que de l'infiltration, mais il semble difficile de dire si le faible volume d'eau des réserves mis en mouvement par l'impulsion de crue, est dû à la réduction du karst noyé, ou à la structuration de l'aquifère.

Il serait par ailleurs intéressant d'étudier par d'autres techniques (traçages, chimie) la liaison de la source n°6 avec les réserves du système du Verneau et éventuellement d'obtenir ainsi des précisions sur le fonctionnement et l'hétérogénéité des zones de réserve.

CONCLUSION

L'analyse des différentes données obtenues dans le cadre de cette étude (données géologiques, climatologiques, hydrométriques, physico-chimiques et thermiques) nous ont permis de définir deux systèmes karstiques indépendants situés de part et d'autre du faisceau salinois, dans la région de Mans-sous-Ste-Anne. Cette étude a également mis en relief un certain nombre de problèmes, qui pourront être précisés et peut-être résolus dans le cadre de travaux ultérieurs.

Nous résumerons donc les résultats obtenus et les problèmes posés, communs aux deux systèmes karstiques et préciserons ensuite les caractéristiques propres à chaque système.

Il faut d'abord noter la relative homogénéité des données climatologiques sur l'ensemble des deux bassins avec cependant quelques réserves pour les stations de Lemuy et Ste-Anne. Les paramètres climatologiques obéissent donc bien à une composante climatique régionale. Nous avons également souligné les problèmes posés par l'évaluation de l'évapotranspiration : en effet les résultats obtenus mettent en évidence des différences importantes suivant les méthodes employées.

CARACTERISTIQUES COMMUNES AUX SYSTEMES KARSTIQUES DU VERNEAU ET DU LISON

L'hydrogéochimie, la chimie isotopique et l'étude thermique ont montré l'hétérogénéité et la structuration des aquifères. Il s'agit donc dans les deux cas de systèmes karstiques au sens défini par A. MANGIN (1976) c'est-à-dire que "le système est représenté par l'ensemble au niveau duquel les écoulements souterrains s'organisent pour constituer une unité de drainage".

Toutes les méthodes employées ont cependant montré que ces deux systèmes présentent des réactions très différentes. Ce phénomène peut être imputé de façon certaine à une différence de taille du bassin (le bassin du Lison est au minimum 10 fois plus étendu que celui du Verneau) et de façon plus hypothétique pour l'instant à une différence dans le degré de karstification.

Cette étude a également mis en évidence, pour les deux systèmes, le rôle primordial de l'infiltration rapide. Cette infiltration rapide a pour origine la hiérarchisation des écoulements des eaux superficielles sur les marnes du Lias dans le cas du Verneau, sur les marnes de l'Argovo-Oxfordien pour le Lison. Nous préciserons le rôle de ce type d'infiltration lors des résultats caractéristiques de chacun des systèmes.

Enfin l'étude des lois de répartition des débits classés a mis en relief les limites de notre connaissance des systèmes karstiques du Verneau et du Lison. En effet dans les deux cas cette méthode fait apparaître une rupture de la droite de répartition des débits classés qui correspond à un déficit à l'écoulement. Les observations de terrain n'ont pas permis de déterminer l'origine de ces anomalies. Il serait alors nécessaire de rechercher si le modèle proposé par A. MANGIN est directement applicable aux systèmes étudiés. Sur le plan purement mathématique, nos connaissances sont insuffisantes pour démontrer la validité ou l'invalidité de la méthode utilisée.

CARACTERISTIQUES PROPRES A CHAQUE SYSTEME

Le système du Verneau

La structure de la bordure méridionale du plateau d'Ornans avec son repli synclinal qui s'abaisse vers Nans-sous-Sainte-Anne et l'écran marneux du faisceau salinois qui le délimite au Sud influent directement sur le développement du réseau spéléologique.

Les expériences des traçages effectués sur le bassin et le calcul du bilan ont permis de délimiter de façon relativement précise le bassin karstique du Verneau.

En effet l'analyse des courbes de décrue et tarissement a montré que le volume dynamique des réserves qui participe à l'écoulement à l'exutoire au cours du tarissement est très faible. Ce résultat est à rapprocher de ceux obtenus au moyen des études physico-chimiques et thermiques.

En effet celles-ci ont mis en évidence, lors de la montée de crue, l'arrivée à l'exutoire d'eaux stockées dans le système karstique. La différence de chimisme et de température entre ces eaux stockées et les eaux d'infiltration rapide se traduit par une importante amplitude des courbes de variation, qui peut alors être attribuée à la réduction du karst noyé et à un haut degré de hiérarchisation.

Enfin l'étude des décrues et tarissements et l'hydrogéochimie, ont permis de mieux cerner les modalités de l'infiltration, dont la participation à l'écoulement à l'exutoire diminue rapidement au cours de la décrue.

Le système du Lison

Les données géologiques et les traçages n'ont pas permis de délimiter de façon précise le bassin versant. Les bilans hydrologiques ont montré que la superficie du bassin tel que nous l'avions tracé était nettement sous-estimée.

Les résultats de l'hydrodynamique ont confirmé le rôle de trop-plein de la Sarrazine vis-à-vis de la source du Lison en soulignant la complexité du fonctionnement de ces deux exutoires.

D'autre part en l'absence de données antérieures au mois de Septembre 1976 au Lison, les étiages 1971 et 1972, disponibles à la station de Myon située plus en aval ont permis d'envisager un important volume dynamique des réserves pour le système karstique du Lison.

Tous les résultats obtenus font apparaître qu'il est nécessaire d'associer des méthodes complémentaires pour étudier un système karstique.

Un certain nombre de contingences matérielles ne nous ont pas permis d'exploiter au mieux les données obtenues à partir des différentes méthodes. C'est pourquoi il serait intéressant de compléter les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire :

- en maintenant sur quelques cycles hydrologiques l'ensemble des stations disposées sur les deux bassins ;

- en équipant la source du Gyps dans la vallée de Nons-sous-Ste-Anne ;
- en étudiant les écoulements sur le bassin marneux de la Vieille-Folle, qui pourrait permettre une approche de l'E.T.R locale ;
- en complétant les expériences de traçages sur le bassin du Lison ;
- en poursuivant les analyses chimiques et isotopiques et les mesures de conductivité et de température réparties sur un ou plusieurs cycles hydrologiques aux différents exutoires.

B I B L I O G R A P H I E

- AMINOT A. (1974) - Géochimie des eaux d'aquifères karstiques.
2 : Les analyses chimiques en hydrogéologie karstique.
Ann. Spéléol., 29, 4, p. 461-483.
- AMINOT A. (1975) - Géochimie des eaux d'aquifères karstiques -4-. Le pH :
aspect théorique, mesure et interprétation géochimique.
Ann. Spéléol., 30, 1, p. 7-20.
- ANDRIEUX C. (1972) - Le système karstique du Baget. Sur la thermique des
eaux au niveau de l'exutoire principal. *Ann. Spéléol.*, 27, 3,
p. 525-541.
- ANDRIEUX C. (1976) - Le système karstique du Baget. Géothermie des eaux
à l'exutoire principal selon les cycles hydrologiques 1974
et 1975. *Actes du Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire
Besançon*, p. 1-26.
- ANDRIEUX C. (1977) - Etude du climat des cavités naturelles dans les roches
calcaires (grotte de Niaux). *Gallia Préhistoire*, t. 20, fasc. 1,
p. 301-322.
- A.P.H.A. (1971) - Standard methods for examination of water and waste water.
A.P.H.A., Inc. 13e ed.
- AUBERT J. (1972) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de
la région d'Orgelet. *Thèse 3ème cycle Besançon*, 162 p.
- AUCANT Y., FOLTETE J., PRACHON J.C., PETREQUIN P. (1970) - Le plateau
d'Amancey (Doubs). Inventaire spéléologique et contexte géolo-
gique. *Bull. A.S.E.*, n°7, p. 7-27.
- AUCANT Y., FOLTETE J., PETREQUIN P. (1971) - Le bassin d'alimentation de
la source du Lison. Inventaire spéléologique et contexte géolo-
gique. *Bull. A.S.E.*, n°11, p. 6-47.
- AUCANT Y., PETREQUIN P., URLACHER J.P. (1972) - Coloration et crue de la
perte de la Vieille Folle. *Spelunca*, n°4, p. 111-114.
- AUCANT Y., PETREQUIN P., URLACHER J.P. (1974) - La grotte de Chauveroché
à Ornans (Doubs). *Bull. A.S.E.*, n°11, p. 103-132.
- BADIN L., MAYA C. (1971) - Etude des circulations souterraines par Fluo-
rimétrie. *Conférence, Fac. Sciences Besançon*, 26 Mars.
- BAKALOWICZ H. (1970) - Hydrodynamique karstique : étude du bassin d'alimen-
tation de la Manavgat (Taurus occidental, Turquie). *Thèse 3ème
cycle, Paris*.
- BAKALOWICZ H., BLAVOUX B., MANCIN A. (1973) - Apports du traçage isotopique
naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système kar-
stique - teneurs en oxygène -18 de trois systèmes des Pyrénées,
France. *J. of Hydrology*, 23, 1974, p. 141-159.

- BAKALOWICZ M. (1974) - Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. 1 : Relation entre minéralisation et conductivité. *Ann. Spéléol.*, t. 29, F. 2, p. 167-173.
- BAKALOWICZ M. (1974) - L'évapotranspiration réelle. *Bull. Techn. Génie Rural*. Etude n° 2.
- BAKALOWICZ M., AMINOT A. (1974) - Géochimie des eaux d'aquifères karstiques - 2 premiers résultats obtenus sur le système karstique du Baçet durant le cycle 1973. *Ann. Spéléol.*, 29, 4, p. 484-492.
- BAKALOWICZ M., ANDRIEUX C. (1974) - Le système karstique du Baçet. Les éléments du climat. *Ann. Spéléol.*, 29, 3, p. 267-282.
- BAKALOWICZ M. (1976) - Géochimie des eaux karstiques. Une méthode d'étude de l'organisation des écoulements souterrains. *Actes du Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire Besançon*, p. 49-58.
- BERTHOMIER C., MAILLOT J., MARTIN J. (1971) - Etude d'un projet de lac à Nans-sous-Ste-Anne (Doubs). *Rapport inédit, Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, Besançon*.
- BLAVOUX B., CHAIVE P., CLAUDON G., METTETAL J.P., MUDRY J., PASQUIER C. (1976) - Premiers résultats d'expérience de traçage isotopique par l'oxygène 18 dans le karst du premier plateau jurassien, au Sud et à l'Est de Besançon. *Actes du Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Besançon*, p. 71-77.
- BROUILLARD J.F. (1974) - Les applications de la spectrofluorimétrie à l'hydrologie. *Communication au Congrès Suisse de Spéléo.*
- BURGER A., MARCE A., MATHEY B., OLIVE P. (1971) - Tritium et oxygène -18 dans les bassins de l'Areuse et de la Serrière (Jura neuchâtelois, Suisse). *Actes du Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Besançon*.
- CASTANY G. (1937) - Aperçu hydrogéologique du Creux-Billard, Pont du Diable. *Bull. Soc. Hist. Nat. du Doubs*, n° 48.
- CASTANY G. (1939) - Etude stratigraphique et tectonique de la région comprise entre Cernans, Saizenay et Levier. *D.E.S., Besançon*.
- CASTANY G. (1963) - *Traité pratique des eaux souterraines*. Dunod, Paris, 657 p.
- CAIRE A. (1967) - Notice explicative de la feuille géologique de Salins-Bains au 1/50000e.
- CELET P. (1975) - Notice explicative de la feuille géologique de Quingey au 1/50000e.
- CHAIVE P., DREYFUSS M. (1971) - Excursion hydrogéologique au Marais de Saône et à la source du Lison. *Actes du Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Besançon*, p. 265-276.

- CHAUVE P. (1971) - Rôle des failles dans les circulations souterraines du Jura. Exemples et applications. *Actes du Colloque d'Hydrologie en Frys Calcaire*, Besançon.
- CHAUVE P. (1975) - Guides géologiques régionaux : le Jura, 215 p., 126 fig., 6 pl., Masson et Cie Edt., Paris.
- DELAZOIERE O. (1968) - Contribution à l'étude du bassin du Doubs : climatologie, hydrologie et déficit d'écoulement rapportés aux unités géologiques. *Thèse de 3ème cycle*, Paris.
- DROGUE C. (1969) - Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'après l'exemple de quelques karst périméditerranéens. *C.E.R.H. Thèse Doct. Etat Sc. Nat.*, 487 p., Montpellier.
- DROGUE C. (1972) - Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques. *Journal of Hydrology*, Vol. XV, n° 1, p. 49-68.
- EBERENTZ P. (1975) - Apport des méthodes isotopiques à la connaissance de l'aquifère karstique. *Thèse 3ème cycle*. Géol. Dyn. Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- FOLTETE J. (1968) - Etude hydrogéologique du plateau d'Anancy. *Thèse de 3ème cycle*, Besançon.
- FONTES J.C. (1976) - Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles. *La Houille Blanche*, 3-4, p. 205-221.
- FOURNIER E. (1923a) - Grottes et rivières souterraines. *Imp. La Solidarité*, Besançon.
- FOURNIER E. (1923b) - Les gouffres. *Imp. Jacques et Demontond*, Besançon.
- FOURNIER E. (1926) - Les eaux souterraines. *Imp. de l'Est*, Besançon.
- GIACOMINI E., LASTANDES J.P., LEBRUN J. (1970) - Etude géologique de la région de Levier. *Rapport inédit, Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée*, Besançon.
- GEZE B. (1973) - Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie. *Ann. Spéol.*, 28, 1, p. 1-20.
- GLEIZES C. (1969) - Techniques rurales en Afrique : évaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations. *Rapport inédit, Ministère de l'Agriculture, Ministère de la Coopération*.
- GUERIN R. (1973) - Rôle de la tectonique dans la géométrie des écoulements karstiques fossiles et actuels. *Thèse de 3ème cycle, Tectono-Physique*, Montpellier.
- HAUBERT M. (1976) - Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne : la Dranse de Bellevaux (Brévan), Haute-Savoie. *Bull. B.R.G.M., Section III, n° 1/2, p. 5-30.*

- KIRALY L. (1968) - Eléments structuraux et alignements de phénomènes karstiques. *Bull. Soc. neuchâteloise des Sciences Nat.*, 91, p. 127-146.
- KIRALY L. (1969) - Statistical analysis of fractures. *Geol. Rundschau*, 59, I, p. 125-151.
- LABORATOIRE SOUTERRAIN DU C.N.R.S., MOULIS (1975) - Etude quantitative et qualitative des aquifères karstiques. *Rapport A.T.P., C.N.R.S.*, 95 p.
- LACAS J.L. (1976) - Introduction à la méthodologie d'étude et d'utilisation des champs hydrothermiques des aquifères karstiques d'après l'exemple du site de l'exurgence de la source du Lez. *Thèse Doct. Spécial. Géol. Appl. U.S.T.L., Montpellier*, 68 p., 26 pl.
- LAFFITTE P. (1972) - *Traité d'informatique géologique*. Masson, Paris, 624 p.
- LAMOTTE M. (1962) - *Initiation aux méthodes statistiques en biologie*. Masson et Cie, Paris, 144 p.
- LION Ph., GALEA G. (1976) - Propositions d'aménagement du jaugeage chimique des débits des rivières. Méthode utilisant les colorants alimentaires. *La Houille Blanche*, n° 5, p. 381-389.
- MANGIN A. (1970) - Le système karstique du Baget (Ariège). Note préliminaire. *Ann. Spéléol.*, 25, 3, p. 561-560.
- MANGIN A. (1970) - Etude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Ann. Spéléol.*, 25, 3, p. 581-610.
- MANGIN A. (1971a) - Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Ann. Spéléol.*, t. 26, F. 2, p. 283-329.
- MANGIN A. (1971b) - Sur la notion d'exurgence et de résurgence à partir de travaux récents d'hydrodynamique dans les karsts. *Actes du Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Besançon, 8 et 9 Oct.*, p. 1-5.
- MANGIN A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Ann. Spéléol.*, 1974, 29, 3 et 4 ; 1975, 30, 1.
- MANGIN A. (1976) - Les systèmes karstiques et leur méthodologie d'investigation. *Actes du Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Besançon*, p. 263-271.
- MARTEL E.A. (1913) - Sur l'étude des températures des eaux souterraines, dans les captages pour l'alimentation publique. *C.R. Ac. Sc.*, t. 156, p. 741.

- MATTAUER M. (1973) - Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. Hermann, Paris.
- MISEREZ J.J. (1973) - Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse Doct. es Sciences, Institut de Géologie, Université Neuchâtel, 313 p.
- MUDRY J., ROSENTHAL P. (1976) - Rôle de la structure et de la micro-structure dans le drainage karstique des zones synclinales de la Haute-Chaine jurassienne. Actes du Deuxième Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Besançon.
- MUFFER R. (1972) - Hydrologie souterraine des bassins de la Haute Lône et du Lison. Bull. A.S.E., n° 9, p. 9.
- OLIVE Ph. (1970) - Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère nord par la méthode du tritium. Thèse d'Etat, 138 p., 54 fig., 20 tabl., Paris.
- PASQUIER C. (1975) - Contribution à l'étude des bassins karstiques de la région de Champlive (Doubs). Thèse de 3ème cycle, Besançon.
- PERIERES J. (1976) - Diagramme général d'équilibre des eaux. Diagramme de Guigues. Bull. Centre Belge d'Etude et de Documentation des Eaux, n° 386, p. 22-35.
- PONÇOT F. (1974) - La Baume des Cures. Bull. l'Excentrique. Bull. du Joyeux Niphargus, p. 16-19.
- PUECH C. (1971) - Débits du Lison à Mans-sous-Sainte-Anne. C.E.R.A.P.E.R. Div. travaux hydrauliques, 23 p., 45 graph.
- PUYOÛ S. (1976) - Etude hydrogéologique du massif karstique d'Arbas (Haute-Garonne). Thèse 3ème cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 193 p.
- REMEMIERAS G. (1965) - L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles, Paris, 456 p.
- ROCHE M. (1963) - Hydrologie de surface. Gauthier-Villars, Paris, 430 p.
- RODIER J. (1971) - Analyse chimique et physico-chimique de l'eau. Dunod, Paris.
- ROQUES H. (1972) - Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux souterraines. Ann. Spéléol., 27, 1, p. 79-92.
- SALADO J., MARJOLIST G. (1975) - Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la source du Lez (Hérault). Etude du chimisme des eaux de la source du Lez et de son bassin. Mém. C.E.R.G.A., Montpellier, t. IX, F. II.
- SCHOELLER H. (1949) - La température des eaux souterraines. Travaux du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences, Bordeaux, 1 vol., 162 p., 69 fig.

- SCHOLLER H. (1962) - Les eaux souterraines. Masson, Paris, 642 p.
- SERVICE REGIONAL D'AMENAGEMENT DES EAUX (1976) - Annuaire hydrologique 1969 à 1974. Rapport inédit, S.R.A.E. Franche-Comté, Besançon.
- S.H.A.G. (1977) - Inventaire des plongées souterraines. Département du Doubs. Bull. Enfonçure, n° 3, p. 114.
- SIRI J.B. (1964) - Etude géologique de la région de Quingey (Doubs). Thèse 3ème cycle, Besançon.
- SOPENA J.P., SOULAS J.P. (1973) - Etudes microtectoniques dans le Jura : déformations des calcaires sous contrainte tectonique ; essais d'interprétation et de corrélation des résultats pour l'ensemble de la chaîne. Thèse 3ème cycle, Besançon.
- STRAHLER A.N. (1952) - Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography. Bull. Geol. Soc. of America, p. 117-142.
- TRIPET J.P. (1972) - Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Aréuse (Jura neuchâtelois). Thèse Fac. Sc. Univ. Neuchâtel, 13 Décembre.
- VERDIER P., FOURMENTRAUX M., PERRIN G. (1971) - Etude de la fracturation naturelle dans la montagne d'Alaric. Rapport inédit S.B.F.A., 33 p., 16 fig., 8 pl.

- ANNEXES -

PRECIPITATIONS MENSUELLES
(D'APRES LA METEO NATIONALE)

ANNEXE I

(en mm)

1971	AMANCEY	LEVIER	VILLENEUVE d'AMONT
Janvier			105,2
Février	41,8		50,2
Mars	71,7		87,0
Avril	64,9	Station	75,4
Mai	63,6	installée en	66,9
Juin	171,5	Décembre 1971	224,2
Juillet	12,7		15,7
Août	103,0		103,5
Septembre	40,4		40,5
Octobre	51,0		37,9
Novembre	157,6		215,7
Décembre	55,1	67,3	49,5

1972	AMANCEY	LEVIER	VILLENEUVE d'AMONT
Janvier	102,5	52,9	69,4
Février	100,3	81,0	90,6
Mars	51,9	64,4	63,3
Avril	114,4	151,7	129,3
Mai	94,2	94,1	91,9
Juin	157,5	134,6	136,6
Juillet	96,4	43,3	62,1
Août		49,9	68,6
Septembre	39,7	27,6	57,7
Octobre	57,2	54,5	61,9
Novembre	266,6	313,9	300,0
Décembre	74,8	89,4	82,9

1973	AMANCEY	LEVIER	VILLENEUVE d'AMONT
Janvier	70,8	75,7	77,4
Février	105,6	100,7	107,1
Mars	44,7	31,0	19,4
Avril	114,3	125,5	119,8
Mai	117,5	149,5	112,1
Juin	76,6	115,4	96,0
Juillet	91,5	136,4	117,1
Août	52,9	54,5	64,5
Septembre	83,2	97,9	82,5
Octobre	95,0	154,3	151,0
Novembre	157,2	198,5	209,8
Décembre	88,0	136,3	140,4

PRECIPITATIONS MENSUELLES
(D'APRES LA METEO NATIONALE)
(en mm)

1974	AMANCEY	LEVIER	VILLENEUVE d'AMONT
Janvier	76,3	95,0	60,4
Février	69,8	114,5	103,6
Mars	110,5	150,0	169,1
Avril	25,5	77,6	15,2
Mai	109,4	143,1	119,2
Juin	85,4	100,5	100,2
Juillet	91,6	91,4	90,9
Août	65,3	70,5	65,0
Septembre	196,7	242,5	203,5
Octobre	208,7	325,9	291,3
Novembre	170,7	224,4	196,0
Décembre	102,0	163,1	166,2

1975	AMANCEY	LEVIER	VILLENEUVE d'AMONT
Janvier	134,7	196,1	181,5
Février	36,6	26,6	27,3
Mars	101,4	126,5	120,5
Avril	125,7	104,2	106,1
Mai	142,0	132,4	110,8
Juin	75,6	103,1	84,1
Juillet	56,7	61,0	46,0
Août	176,6	153,3	169,7
Septembre	157,7	175,5	201,4
Octobre	72,0	75,1	71,4
Novembre	185,0	202,4	206,0
Décembre	52,4	45,9	65,7

1976	AMANCEY	LEVIER	VILLENEUVE d'AMONT
Janvier	101,1	122,8	123,4
Février	72,2	69,6	91,4
Mars	27,0	13,5	25,6
Avril	38,5	35,1	47,5
Mai	119,6	98,9	79,6
Juin	11,5	9,5	10,6
Juillet	87,0	118,3	108,7
Août	66,0	79,3	63,7
Septembre	193,3	141,9	189,0
Octobre	47,5	54,8	54,6
Novembre	140,5	173,7	146,2
Décembre	146,9	152,9	162,1

(en mm)

1977	AMANCEY	LEVIER	VILLENEUVE d'AMONT
Janvier	144,1	170,1	180,0
Février	219,1	213,7	286,3
Mars	59,5	76,7	73,8
Avril	197,2	247,0	187,9
Mai	116,6	136,3	92,7
Juin	137,0	155,3	184,5
Juillet	219,6	202,5	200,8
Août	110,3	144,5	130,7
Septembre	27,6	22,9	21,1
Octobre	132,0	151,7	90,9
Novembre	150,7	179,8	219
Décembre	146,0	152,9	162,1

PRECIPITATIONS MENSUELLES

1977	SAINTE ANNE	VILLERS/CHALAMONT	LEMUY
Janvier	135,5	188,3	133,9
Février	331,8	373,9	200,6
Mars	97,1	102,9	59,6
Avril	194,3	216,5	181,1
Mai	222,6	142,4	109,4
Juin	212,3	199,7	127,6
Juillet	214,6	180,6	201,1
Août	155,2	152,9	103,5
Septembre	25,2	24,3	8,9
Octobre	145,4	162,4	128,4
Novembre	170,4	202,6	160
Décembre	165,6	162,3	163,5

1976	SAINTE ANNE	VILLERS/CHALAMONT	LEMUY
Janvier			
Février			
Mars			
Avril			
Mai			
Juin			
Juillet		129,7	54,4
Août	63,1	62,2	79,9
Septembre	157,8	186,6	211,1
Octobre	64,9	64,4	74,6
Novembre	137,7	168,6	138,6
Décembre	139,4	164,7	119,6

TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES
(d'après la Météorologie Nationale)
(en °C)

	1971		1972	
	AMANCEY	LEVIER	AMANCEY	LEVIER
Janvier	0,7		2,2	1
Février	-6,1		3,6	3
Mars	1,8		6,8	4,9
Avril	9,9		7	6,1 a
Mai	14		9	9,7
Juin	14,1		12,7	13,2
Juillet	19,5		17,3	16,5
Août	20,7		16,3 a	15,5
Septembre	14,4		11,2	10,8
Octobre	10,5		9,3	8,8
Novembre	2,7		5,6	4,7
Décembre	2,8		9,6	1

	1973		1974	
	AMANCEY	LEVIER	AMANCEY	LEVIER
Janvier	1,8	-1,8	3,9	3,6
Février	-0,0	-1,3	3,5	2,3
Mars	3,1	1,4	6,8	5,3
Avril	5,4 a	4,4	7,7	6,6
Mai	15,3	12,9	10,8	10,1
Juin	18,1	15,2	13,5	13,3
Juillet	18,7	16,2	15,9	15,2
Août	18,8	18,5	17,5	17,3
Septembre	15,1	14	12,9	12,5
Octobre	8,9	7,2	3,8	3,1
Novembre	4,4	4,1	5	2,8
Décembre	1,4	0,2	4,7	3,7

	1975		1976	
	AMANCEY	LEVIER	AMANCEY	LEVIER
Janvier	4,3	3,4	1,3	0,8
Février	3,6	3,8	3,5	2,6
Mars	7,9	2,5	4,3	4
Avril	7,3	6,5	7,7	7,6
Mai	11,1	10,7	13,2	11,3
Juin	13,2	14,1	18,2	16,8 a
Juillet	17,4	16,9	18,9	18,2
Août	18,2	17,7 a	16,9	16,2
Septembre	15,2	15,1	12,9	11,1
Octobre	8,1	7,7	11	10,4
Novembre	4,5	4,8	4,2	4,3
Décembre	-0,5 a	-1,5	1	0,7

	1977	
	AMANCEY	LEVIER
Janvier	2,05	3,6
Février	5,1	4,9
Mars	7,8	7,2
Avril	5,95	5,4
Mai	11,4	11
Juin	14,4	13,4
Juillet	15,6	15,4
Août	15,8	13,9
Septembre	12,5	11,2
Octobre	12,9	10,2
Novembre	4,7	3,5
Décembre	3,7	2,3

Les valeurs de températures, marquées d'un a, ont été obtenues à partir de la corrélation AMANCEY-LEVIER.

PRINCIPE DE CALCUL

Lors de l'établissement de ce programme, nous nous sommes inspirés du principe de calcul des programmes ARIMA du ministère de l'Agriculture.

Les résultats obtenus par cette méthode sont sensiblement différents de ceux obtenus en faisant la transformation hauteur-débit, point par point, et en intégrant l'hydrogramme ainsi obtenu.

Comme nous disposons de plusieurs années de débits moyens journaliers, calculés par le ministère de l'Agriculture, nous avons choisi ce type de calcul dans un souci d'homogénéisation des données.

Si $Q(T)$ est le débit à l'instant T , entre deux instants T_1 et T_2 , le volume V écoulé peut s'écrire :

$$\frac{V}{T_2 - T_1} = \int_{T_1}^{T_2} Q(T) dT \quad (1)$$

D'autre part, si on choisit ces instants T_1 et T_2 tels qu'entre ces deux points, le limnigramme puisse être assimilé à un segment de droite, on pourra écrire :

$$T = aH + b \quad \text{ce qui implique que } dT = a dH \quad (2)$$

En effectuant dans (1) le changement de variable, (2), on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{V}{T_2 - T_1} &= a \int_{H_1}^{H_2} Q(H) dH \\ &= a \left(\int_0^{H_2} Q(H) dH - \int_0^{H_1} Q(H) dH \right) \end{aligned}$$

Or, d'après la relation (2), on peut écrire :

$$a = \frac{T_2 - T_1}{H_2 - H_1}$$

$\int_0^{H_2} Q(H) dH$ est l'intégrale de la courbe de tarage entre l'origine et H_2 , cette intégrale est notée "KXP2".

De même $\int_0^{H_1} Q(H) dH$ est notée "HYP1"

Le volume $V_{T_1}^{T_2}$ peut donc s'écrire :

$$V_{T_1}^{T_2} = a(HYP2 - HYP1)$$

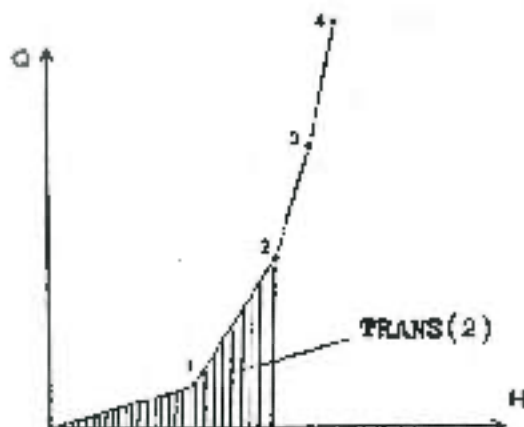
Dans le cas où $H_2 = H_1$, le volume écoulé est égal à

$$V_{T_1}^{T_2} = Q(H_1) \cdot (T_2 - T_1)$$

$Q(H_1)$ étant le débit correspondant à la hauteur H_1 , donné par la courbe de tarage.

Calcul des valeurs de HYP

Pour une station donnée, le tableau des valeurs de HYP est calculé une fois pour toutes (dans le programme, l'identificateur de ce tableau est Trans).



La courbe de tarage est ici assimilée à une succession de segment de droite. TRANS (1) sera égal à la surface comprise entre l'axe des hauteurs et le segment joignant l'origine au point 1, ce qui dans le cas traité n'a représenté qu'une faible approximation.

Il serait néanmoins possible d'effectuer une correction en fonction de H_0 , hauteur en-dessous de laquelle le débit est nul. TRANS (2) sera égal à Trans (1) augmenté de la surface comprise entre le segment joignant les points 1 et 2, et l'axe des hauteurs.

Et ainsi de suite pour Trans (3)...Trans(4).

Dans ce type de calcul, il est nécessaire de prévoir une hauteur maximale de la courbe de tarage, supérieure ou égale à celle atteinte lors de la plus haute crue.

Au Lison et à la Sarrazine, les jaugeages effectués lors de la crue la plus importante du cycle, nous ont évité des extrapolations qui se sont avérées nécessaires au Varneau et à Myon.

CONSTITUTION DES BLOCS DE DONNEES

A chaque changement de courbe de tarage, remplacer dans le programme principal, et les sous programmes les cartes DIMENSION D(), HC(), TRANS(). D(I), HC(I) étant respectivement le débit, la hauteur d'un point I de la courbe de tarage. Cette dimension est donc le nombre de points de la courbe de tarage, à partir desquels on calcule le tableau des valeurs de HYP.

Il faudra donc reproduire 3 cartes DIMENSION D(), HC(), TRANS() et une carte DIMENSION D(), HC() et les remplacer dans le programme (cf. listing).

SOURCE DU VERNEAU

DATE	HEURE	Ca ⁺⁺	MgO ₃	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ⁼⁼	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁼⁼⁼	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	pH	cond
19.1.77		92,3	286	2,08	3,54	3,34	13,47	0,038		1,60	0,004	7,70	445
22.2.77		69,8	212	1,47	1,96	2,98	9,86	0,008		1,43		8,35	365
8.5.77	9h45	78,0	282	1,00	2,35	3,81	13,47	0,068	0,18	5,30	0,057	7,62	396
8.5.77	14h	90,5	287	1,00	2,13	3,71	10,6	0,055	0,35	5,65	0,059	7,47	396
8.5.77	17h30	76,8	279	1,05	2,28	4,19	6,39	0,042	0,13	5,60	0,087	7,40	396
8.6.77	10h15	80,0	288	1,05	2,18	3,86	6,67	0,056	0,56	5,82	0,076	7,62	405
9.5.77	7h	71,5	232	1,30	2	4,95		0,056	0,01	4,08	0,068	7,30	355
9.5.77	10h30	65,0	211	1,20	1,6	6,43	15,14	0,062	0,34	3,56	0,107	7,35	323
22.5.77	15h30	89,5	277	1,20	2,33	4,00	10,28	0,064	0,09	4,27	0,142	8,10	389
1.6.77	15h	91,3	305	0,85	1,83	4,48	9,72	0,027	0,28	5,71	0,030	8,18	426
13.6.77		93,5	308	1,90	2,48	4,81	9,03	0,076	0,30	5,06	0,045	7,82	427
23.9.77		103,4	355	2,08	2,75	4,08	6,88			1,70			

SOURCE DU LISON

26.8.75		51,0	290					0,96	0,12	6,2	0,051	6,94	405
15.7.76	14h10	92,0	293	2,5	1,5		9,40	0,059	0,17	6,9	0,032	8,3	395
19.1.77		90,6	268	1,15	0,85	2,96	8,71	0,008		1,28	0,000	7,29	403
22.2.77		75,4	224	0,95	0,58	2,28	7,42			0,79		7,81	344
22.5.77	15h45	87,5	268	0,6	0,7	3,48	7,22	0,100	0,34	3,64	0,042	7,10	392
1.6.77	15h10	61,4	276	0,6	0,83	3,76	9,00	0,026	0,19	3,75	0,034	7,53	396
13.6.77		95,0	277	1,35	1,10	4,33	8,82	0,050	0,21	4,15	0,041	7,85	407
23.8.77	11h30							0,020	0,07	4,25	0,027	6,95	390
23.9.77		106,0	327	1,23	0,87	3,32	6,86			1,01			

SOURCE DE LA SARRAINE

19.1.77		91,7	268	1,07	0,79	2,42	9,35	0,006		1,20	0,000	7,43	406
22.2.77		74,9	225	0,94	0,55	2,26	7,26			0,78		8,01	336
22.5.77	6h	83,0	256	0,6	0,88	3,48	8,07	0,050	0,20	3,16	0,045	7,10	379
1.6.77	15h20	77,7	264,1	0,6	0,90	4,00	9,86	0,037	0,24	3,31	0,042	7,68	369
13.6.77		94,0	278,2	1,4	1,13	4,57	9,66	0,040	0,21	4,13	0,044	7,10	415
23.9.77		104,8	321	1,13	0,50	3,14	6,50			0,97			

ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX (TENEURS EXPRIMEES EN mg/l)

CRUE DU 1er AVRIL 1977 - SARRAZINE (TENEURS EXPRIMEES EN mg/l)

DATE	HEURE	Ca ⁺⁺	Mg	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ⁻⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻⁻⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	pH	cond
1/4	14h50	86,5		245	1,25	0,90	3,09	8,3	0,028	0,392	3,70	0,030	7,40	365
2/4	7h20	85		241,5	1,10	0,98	3,43	8,65	0,020	0,196		0,028	7,33	365
2/4	10h35	83	4,5	241,5	1,15	1,00	3,62	9	0,036	0,156	3,67	0,045	7,69	364
2/4	10h30	84,5		240,5	1,15	0,98	3,19	9,25	0,023	0,200	3,68	0,051	7,48	356
2/4	13h05	84,5	2	241,5	1,15	0,90	3,62	8,3	0,033	0,236	3,49	0,049	7,50	372
2/4	15h10	84,5	2	243	1,10	0,85	3,38	8,55	0,027	0,404	3,67	0,046	7,45	370
2/4	16h35	85	2,50	244	1,15	0,85	3,57	8,65	0,026	0,204	3,81	0,055	7,48	372
2/4	17h20	86	1,5	245	1,20	0,83	3,62	8,55	0,027	0,228	3,81	0,064	7,45	372
2/4	18h25	86,5	1,5	246,5	1,15	0,85	3,47	9,5	0,052	0,264	3,77	0,057	7,49	375
3/4	6h55	83,5		239	1,20	1,25	3,47	9,35	0,042	0,304		0,058	7,48	365
3/4	7h40	80	1,5	229,5	1,10	1,10	3,62	8,9		0,240	3,74	0,075	7,58	344
3/4	9h05	82,5	5	240,5	1,15	1,25	4,67	10,85	0,021	0,268	3,96	0,084	7,59	362
3/4	10h03	81,5	4,5	236,5	1,25	1,25	4,80	10,65	0,041	0,284		0,082	7,66	352
3/4	11h03	81,5	2	236,5	1,15	1,15	4,28	10,85	0,049	0,320	3,99	0,090	7,66	351
3/4	12h	80	3,5	235,5	1,10	1,10	3,90	10,65	0,042	0,316	4,14	0,079	7,68	359
3/4	13h55	81	1,5	233	1,15	1,08	4,62	10,25	0,045	0,316	4,09	0,081	7,67	356
3/4	14h55	81	1,5	233	1,15	1,10	4,62	9,25	0,046	0,300	3,50	0,074	7,69	355
3/4	16h30	79,5	4,5	229,5	1,15	1,13	4,33	10,4	0,036	0,452	3,89	0,067	7,67	352
3/4	17h	78	4,5	229,5	1,10	1,10	4,47	10,85	0,052	0,508	3,88	0,073	7,67	349
3/4	17h55	78	3	228	1,10	1,10	4,43	10,65	0,043	0,488	3,82	0,079	7,71	347
3/4	20h25	77,5	2,5	224,5	1,10	1	4,09	9,45	0,039	0,208	2,25	0,077	7,73	345
4/4	5h50	76,5	3,5	223,5	1,05	0,95	3,71	9,1		0,180	3,35	0,045	7,48	341
4/4	6h55	76	2	223,5	1,00	0,93	3,00	8,3	0,013	0,188	3,54	0,043	7,67	341
4/4	8h35	77	1,5	224,5	1,00	0,90	3,62	9,45	0,035	0,232	3,42	0,036	7,64	341
4/4	9h25	77,5	2	224,5	1,05	0,88	3,52	9,1	0,051	0,200	3,42	0,063	7,60	341
4/4	10h45	78	0,5	223,5	1,00	0,90	3,62	9,70	0,037	0,200	3,15	0,046	7,72	341
4/4	12h30	78	1,5	223,5	1,00	0,90	3,47	9,1	0,029	0,164	2,86	0,028	7,46	341
6/4	17h30	83,5		234	1,05	0,73	3,19	8,9	0,032	0,140	3,26	0,027	7,89	356
7/4	9h15	83		236,6	1,05	0,70	3,60	8,2	0,023	0,140	3,39	0,026	7,30	362

DATE	HEURE	Ca ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ⁺⁺	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻⁻⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	pH	cond
2/11	9h30	89	305	1,35	2,63	6,14	5,3	0,102	0,52	7,31	0,119	7,95	307
2/11	15h30	92,5	287	1,25	2,38	6,29	9	0,039	0,51	6,85	0,110	8,15	405
3/11	11h	98	299	1,45	2,45	5,38	7,4	0,034	0,39	7,69	0,084	7,10	444
3/11	12h	101	311	1,55	2,40	5,38	8,6	0,095	0,37	7,17	0,077	7,42	442
3/11	16h	98,5	299	1,35	2,16	5,38	7	0,136	0,56	7,38	0,070	7,35	441
3/11	24h	99	299	1,40	2,25	5,23	7,4	0,070	0,44	7,04	0,072	7,25	440
4/11	6h	97,5	311	1,40	2,21	5,38	7	0,036	0,44	6,92	0,072	7,35	435
4/11	9h	100	299	1,35	2,18	5,38	7,4	0,077	0,44	5,67	0,077	7,20	433
4/11	10h	96,5	299	1,33	2,18	5,38	7	0,025	0,44	6,41	0,074	7,30	433
4/11	11h	97,5	311	1,40	2,23	5,23	7	0,029	0,46	6,41	0,074	7,35	435
4/11	12h40	95	311	1,58	2,35	5,23	6,6	0,031	0,48	6,36	0,039	7,47	447
4/11	13h15	101	305	1,63	2,40	5,09	6,6	0,029	0,48	6,50	0,041	7,47	453
4/11	13h45	100	317	1,59	2,18	3,31	7	0,031	0,51	5,71	0,043	7,76	441

DATE	HEURE	Ca ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ⁺⁺	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻⁻⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	pH	cond
4/11	14h15	91	293	1,30	3,75	5,95	9,29	0,009	0,60	5,73	0,081	7,40	423
4/11	14h45	81	244	1,48	3,13	7,01	12,4	0,048	0,65	5,42	0,090	7,35	370
4/11	15h45	75,5	232	1,08	2,38	7,34	13,3	0,036	0,65	4,75	0,100	7,40	340
4/11	16h45	77	238	1,05	2,23	7,20	12,9	0,036	0,62	5,25	0,102	7,50	354
4/11	17h45	79	244	1,03	2,33	7,01	13,3	0,029	0,62	4,77	0,102	7,42	353
4/11	18h45	81,5	244	1,00	1,98	7,78	12,4	0,029	0,62	4,87	0,104	7,62	364
4/11	19h45	81,5	256	1,15	2,35	7,49	12,4	0,036	0,65	5,64	0,097	7,45	372
4/11	20h45	82	256	1,43	2,93	7,63	12,4	0,097	0,72	5,04	0,097	7,45	379
4/11	21h45	82	256	1,35	3,25	7,49	12,0	0,128	0,74	6,85	0,100	7,62	376
4/11	22h45	81,5	256	1,30	3,30	7,49	12,9	0,121	0,72	5,36	0,079	7,50	372
4/11	23h45	81	250	1,28	3,15	7,49	12,4	0,106	0,76	5,70	0,104	7,50	374
5/11	0h45	82	252	1,23	3,13	7,49	12,9	0,085	0,79	6,76	0,102	7,60	376
5/11	1h45	81,5	256	1,19	3,05	7,63	13,6	0,075	0,81	5,85	0,104	7,60	377

DATE	HEURE	Ca ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ⁺⁺	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻⁻⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	pH	cond
5/11	2h45	81	250	1,30	2,95	6,40	11,5	0,055	1,00	6,80	0,078	7,70	376
5/11	3h45	83,5	256	1,25	2,85	6,34	11,9	0,055	0,80	6,64	0,074	7,65	378
5/11	4h45	84	256	1,25	2,65	6,24	10,7	0,053	0,80	6,89	0,071	7,70	382
5/11	5h45	85,5	268	1,25	2,50	6,19	11,7	0,056	0,41	6,86	0,068	7,70	382
5/11	6h45	84,5	268	1,25	2,43	5,95	11,0	0,052	0,47	6,79	0,067	7,68	382
5/11	7h45	86,5	268	1,20	2,53	6,05	10,3	0,048	0,40	6,57	0,074	7,72	385
5/11	8h45	86	281	1,23	2,25	4,86	10,4	0,052	0,36	6,16	0,071	7,73	388
5/11	9h45	87,5	276	1,20	2,3	5,95	10,7	0,061	0,43	6,02	0,063	7,65	390
5/11	10h45	89,5	281	1,25	2,25	5,95	10,7	0,052	0,39	6,36	0,068	7,70	388
5/11	11h45	89	291	1,23	2,25	5,86	10,1	0,045	0,42	6,44	0,058	7,70	393
5/11	12h45	89	287	1,25	2,35	5,47	9,7	0,048	0,36	6,17	0,067	7,50	396
5/11	14h45	89	287	1,20	2,05	5,52	9,7	0,042	0,35	5,74	0,070	7,68	391
5/11	15h45	91	293	1,28	2,0	5,52	9,7	0,048	0,38	6,30	0,064	7,70	399

DATE	HEURE	Ca ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ⁺⁺	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻⁻⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	pH	cond
5/11	22h45	90	297	1,28	2,20	5,42	10,0	0,086	0,34	5,87	0,059	7,51	377
5/11	2h45	92	299	1,35	2,10	5,76	9,0	0,073	0,34	6,16	0,063	7,50	390
6/11	7h45	94	299	1,40	2,05	5,42	9,0	0,054	0,40	6,38	0,055	7,45	399
6/11	17h30	95,5	305	1,40	2,30	5,14	8,3	0,054	0,36	5,77	0,056	7,17	402
6/11	18h	96	305	1,40	2,20	5,28	8,3	0,045	0,38	6,43	0,051	7,36	397
7/11	10h	100	317	1,50	2,23	5,04	7,7	0,040	0,35	5,99	0,050	7,02	416
7/11	16h	100,9	328	1,03	3,15	6,49	16,4	0,090	0,48	5,54	0,083	7,45	191

* Eaux prélevées au ruisseau de Jérusalem avant sa perte

DATE	HEURE	Ca ⁺⁺	Mg	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	pH	cond
30/3	17h15	81	4,5	239	1,15	0,98	4,20	10,3		0,180	4,23	0,096	7,80	373
1/4	14h45	85	3	246,5	1,20	0,93	3,62	8,3		0,272		0,074	7,80	376
1/4	21h05	86,5	1,5	246,5	1,10	0,88	3,23	7,35	0,029	0,196	4,47	0,052	7,39	379
2/4	1h55	87	0,5	247,5	1,15	0,93	3,42	6,5	0,08	0,220	4,26	0,059	7,41	379
2/4	7h15	87		247,5	1,15	0,93	3,56	7,00	0,027	0,228	4,76	0,058	7,19	370
2/4	8h20	84,5	2,5	247,5	1,15	0,95	4,05	6,6	0,039	0,228	3,93	0,055	7,35	381
2/4	8h50	85,5	1	246,5	1,10	1,00	4,20	8,3	0,052	0,208	4,61	0,071	7,40	377
2/4	12h35	86,5	1	245	1,15	0,93	3,58	7,35	0,031	0,232	4,12	0,050	7,29	377
2/4	14h15	86	0,5	245	1,10	0,95	3,48	7,95		0,196	4,16	0,038	7,40	381
2/4	16h30	82,5	6,5	245	1,10	0,88	3,75	9,25	0,034	0,232	4,27	0,053	7,55	379
2/4	18h20	83	6	244	1,10	0,88	3,08	8,6	0,039	0,264	4,24	0,050	7,41	377
3/4	6h45	83,5	1	239	1,15	1,25	5,15	12,05	0,066	0,374	7,54	0,097	7,50	369
3/4	9h05	81	3,5	237,5	1,15	1,25	5,42	12,85	0,066	0,780	3,99	0,106	7,59	369
3/4	10h	82,5	3,5	238	1,10	1,18	4,29	12,3		0,296	4,31	0,109	7,41	366
3/4	11h05	82	3	236,5	1,10	1,18	4,15	10,3		0,392	4,35	0,090	7,29	367
3/4	12h	81,5	4,5	238	1,15	1,11	4,58	9,46	0,050	0,352	4,17	0,009	7,30	364
3/4	13h55	82,5	3	236,5	1,10	1,12	3,80	9,85	0,049	0,224	4,37	0,070	7,34	366
3/4	15h	81	3	236,5	1,15	1,15	4,48	9,7	0,051	0,680	4,31	0,060	7,41	365
3/4	16h30	80	1,6	234	1,10	1,15	4,00	8,9	0,042	0,344	4,14	0,038	7,87	357
3/4	17h	79	5	233	1,15	1,15	5,35	9,7	0,051	0,352	4,02	0,028	7,67	356
3/4	17h55	79,5	2,5	230,5	1,10	1,13	4,00	12,05	0,055	0,328	4,44	0,077	7,71	355
3/4	19h40	78,5	3,5	229,5	1,10	1,08	3,90	9,95		0,264	3,56	0,070	7,32	343
3/4	20h25	79	6,5	230,5	1,05	1,05	3,86	11,35	0,048	0,388	4,26	0,053	7,45	353
4/4	5h55	78	3,5	229,5	1,05	0,90	3,52	9,35	0,037	0,208	3,81	0,052	7,36	351
4/4	6h55	77	6	229,5	1,05	0,89	3,52	9,25	0,028	0,196	3,67	0,044	7,24	351
4/4	8h35	77,5	3,5	228	1,05	0,88	3,52	9,1	0,036	0,200	3,74	0,057	7,45	347
4/4	9h25	79	1,5	230,5	1,05	0,93	4,00	8,9	0,031	0,356	3,70	0,045	7,43	350
4/4	10h45	77	3	230,5	1,05	0,85	3,28	7,46	0,027	0,192	3,47	0,055	7,25	350
4/4	12h30	78	2	232	1,10	0,85	3,28	7,7	0,027	0,180	4,93	0,060	7,46	350
6/4	15h30	82		236,6	1,05	0,73	4,58	6,75	0,028	0,176	3,36	0,027	7,25	361
7/4	9h45	86,5		235	1,10	0,73	2,56	5,65	0,043	0,112	3,192	0,023	7,39	365

CRUES DU 1^{er} AVRIL 1977 - SOURCE DU LISON (TENEURS EXPRIMEES EN mg/l)

LISON - CRUE DU 1er AVRIL 1977

	Ca ²⁺	TAC	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	cond.
Ca ²⁺	1	0.92	0.58	-0.11	-0.37	-0.43	0.20	0.12	0.21	-0.06	0.91
TAC		1	0.61	-0.10	-0.34	-0.44	0.13	0.10	0.22	0.02	0.98
Na ⁺			1	0.51	0.44	0.04	0.48	0.50	0.42	0.53	0.64
K ⁺				1	0.73	0.76	0.65	0.63	0.60	0.79	0.00
SiO ₂					1	0.58	0.48	0.67	0.39	0.68	0.02
SO ₄ ²⁻						1	0.48	0.49	0.38	0.67	-0.30
NH ₄ ⁺							1	0.39	0.30	0.61	0.22
PO ₄ ³⁻								1	0.72	0.56	0.14
NO ₃ ⁻									1	0.55	0.23
NO ₂ ⁻										1	0.09
cond.											1

Matrice de corrélation K

axes variables	I	II	III	IV	V
Ca ²⁺	0.214	0.935	0.0095	0.066	0.139
TAC	0.230	0.951	0.000	-0.053	-0.063
Na ⁺	0.717	0.512	0.124	-0.218	-0.137
K ⁺	0.869	-0.317	0.157	-0.005	-0.059
SiO ₂	0.782	-0.251	0.027	-0.453	0.171
SO ₄ ²⁻	0.623	-0.644	0.072	0.163	-0.037
NH ₄ ⁺	0.730	-0.003	0.465	0.351	0.307
PO ₄ ³⁻	0.799	-0.067	-0.474	-0.132	0.227
NO ₃ ⁻	0.711	0.064	-0.956	0.355	-0.075
NO ₂ ⁻	0.955	-0.216	0.138	0.022	-0.361
cond.	0.514	0.411	0.073	0.017	-0.056
λ	44.40	76.34	83.61	88.64	92.15

Matrice factorielle A

λ = % cumulé d'explication de la variance totale

SARRAZINE - CRUE DU 1er AVRIL 1977

	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	cond.
Ca ²⁺	1	0.958	0.680	-0.279	-0.421	-0.365	-0.373	-0.131	0.320	-0.239	0.951
HCO ₃ ⁻		1	0.785	-0.499	-0.276	-0.229	-0.322	-0.011	0.477	-0.074	0.982
Na ⁺			1	0.317	0.177	0.081	0.070	0.325	0.473	0.357	0.723
K ⁺				1	0.856	0.766	0.366	0.540	0.423	0.771	-0.125
SiO ₂					1	0.747	0.504	0.554	0.298	0.840	-0.263
SO ₄ ²⁻						1	0.572	0.500	0.387	0.767	-0.233
NH ₄ ⁺							1	0.446	0.093	0.589	-0.299
PO ₄ ³⁻								1	0.373	0.545	-0.077
NO ₃ ⁻									1	0.361	0.448
NO ₂ ⁻										1	-0.045
cond.											1

Matrice de corrélation S

axes variables	I	II	III	IV	V
Ca ²⁺	-0.601	0.773	0.076	0.071	
HCO ₃ ⁻	-0.455	0.817	-0.009	0.039	
Na ⁺	0.038	0.901	0.215	0.182	
K ⁺	0.834	0.312	-0.301	0.155	
SiO ₂	0.904	0.154	-0.144	0.193	
SO ₄ ²⁻	0.671	0.160	-0.144	-0.029	
NH ₄ ⁺	0.693	-0.021	0.596	-0.046	
PO ₄ ³⁻	0.638	0.353	0.297	-0.389	
NO ₃ ⁻	0.252	0.702	-0.328	-0.482	
NO ₂ ⁻	0.843	0.341	0.039	0.254	
cond.	-0.452	0.865	0.022	0.073	
λ	42.85	77.47	84.17	89.24	

Matrice factorielle S

λ = % cumulé d'explication de la variance totale.

SOURCE DU LISON

DATE	HEURE	Ca ²⁺	CO ₃ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Pb	Mg ²⁺
3.11.77	10h30	100,1	309,0	1,32	1,46	3,24	07,06	2,47	1,21	-9,29	099±16 ^a	2,51
4.11.77	10h45	099,2	303,0	1,14	1,17	3,14	06,73	2,06	1,09	-9,13	083±14	2,41
4.11.77	11h30	039,5	305,5	1,38	1,23	3,03	06,05	2,11	1,28	-8,87	071±12	2,51
4.11.77	13h00	100,1	305,0	1,32	1,15	3,03	06,52	2,06	1,09	-9,03	075±13	2,47
4.11.77	15h	100,6	306,5	1,19	1,11	3,17	06,64	2,07	1,00	-9,23	125±20	2,51
4.11.77	16h00	038,6	306,5	1,07	1,23	3,08	06,60	1,98	1,08	-9,02	126±20 ^a	2,36
4.11.77	10h	099,6	306,5	1,17	1,13	3,36	07,02	2,18	1,09	-9,31	109±14	2,34
4.11.77	19h	150,4	306,0	1,07	1,12	3,37	06,64	2,17	1,05	-9,31	093±16	2,35
4.11.77	21h55	150,4	304,5	1,07	1,19	3,32	06,56	1,99	1,12	-9,33	087±14	2,31
5.11.77	1h	102,9	316,2	2,49	1,22	6,50	06,88	1,33	0,63	-9,26	105±17 ^a	2,43
5.11.77	6h15	100,4	306,5	1,11	1,15	3,14	06,60	2,07	1,07	-9,10	077±13	2,31
5.11.77	9h	101,2	317,0	1,11	1,19	3,16	06,64	2,03	1,07	-9,00	090±16	2,31
5.11.77	13h50	101,2	307,4	1,12	1,15	3,12	06,56	2,01	1,12	-8,50	119±20	2,29
5.11.77	13h	100,9	305,5	1,40	1,17	3,48	06,48	1,98		-8,52	130±21	2,29
5.11.77	17h	100,9	308,4	2,39	2,21	3,38	07,14	3,04	1,08	-8,64	107±18	2,37
5.11.77	23h	099,2	306,0	1,14	1,20	3,12	06,89	2,05	1,10	-8,70	092±16	2,27
6.11.77	9h.5	099,2	303,5	1,10	1,19	3,10	06,56	1,94	1,11	-8,79	104±10	2,29
6.11.77	13h15	098,9	300,3	1,05	1,15	3,00	06,27	1,00	1,05	-8,85	077±13	2,27
7.11.77	16h50	101,1	305,6	1,06	1,03	2,52	06,35	1,87	1,08	-8,74	101±17	2,12
8.11.77	10h	100,1		1,04	0,96	2,58	06,35	1,55	1,04	-9,70	086±15	2,32
SOURCE DE LA SARRAZINE												
5.11.77	4h	99,2	308,4	1,61	1,21	4,62	6,79	2,21	0,67	-8,56	71±12 ^a	2,39
4.11.77	12h	100,1	306,0	1,15	1,31	3,16	6,85	2,15	1,09	-9,03	83±15	2,33
5.11.77	23h	99,0	300,3	1,10	1,27	3,08	7,06	2,03	1,08	-8,79	73±13	2,24
LE MUY A FOUR A MOUJARD												
4.11.77	10h	85,3	260,1	0,86	1,31	3,08	7,72	1,68	0,50	-8,07	87±15	1,7
PLUJE A DESERVILLEPS												
4.11.77		0,86	6,34	0,41	1,11	0,76	2,48	2,76	0,06	-5,04	14±2 ^a	0,16

CRUE DU 6 NOVEMBRE 1977 - SYSTEME DU LISON

- * Echantillons ayant subi une concentration avant le comptage de Tritium
- * Echantillons conservés dans des bouteilles de verre

Les ²¹⁰Pb sont donnés par rapport au SCKM.

Les teneurs des ions Ca²⁺, HCO₃⁻, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, Mg²⁺, et de la silice sont exprimées en mg/l.

VERNEAU - CRUE DU 4 NOVEMBRE 1977

	Ca ²⁺	TAC	Na ⁺	K ⁺	SiO ₂	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	
Ca ²⁺	1	0,951	0,671	-0,443	-0,661	-0,962	-0,328	-0,635	0,463	-0,609	
TAC		1	0,655	-0,430	-0,691	-0,932	-0,232	-0,691	0,465	-0,589	
Na ⁺			1	0,246	-0,532	-0,626	-0,003	-0,196	0,313	-0,442	
K ⁺				1	0,529	0,472	0,542	0,696	-0,037	0,410	
SiO ₂					1	0,885	0,423	0,638	-0,395	0,763	
SO ₄ ²⁻						1	0,403	0,644	-0,477	0,607	
NH ₄ ⁺							1	0,325	0,097	0,337	
PO ₄ ³⁻								1	-0,202	0,562	
NO ₃ ⁻									1	-0,167	
NO ₂ ⁻										1	
cond.											1

Matrice de corrélation R

variables	I	II	III	IV
Ca ²⁺	-0,966	0,123	0,005	0,065
TAC	-0,951	0,137	0,076	-0,059
Na ⁺	-0,629	0,629	-0,377	-0,022
K ⁺	0,529	0,766	-0,257	0,028
SiO ₂	0,940	0,079	0,027	0,049
SO ₄ ²⁻	0,967	-0,066	-0,014	-0,131
NH ₄ ⁺	0,412	0,609	0,346	-0,550
PO ₄ ³⁻	0,729	0,382	-0,213	0,332
NO ₃ ⁻	-0,457	0,430	0,646	0,281
NO ₂ ⁻	0,733	0,339	0,265	0,330
cond.	-0,943	0,219	-0,085	0,382
s	60,74	77,23	85,18	90,98

Matrice factorielle A

s = 5 cumulés d'explication de la variance totale.

LISON - CRUE DU 4 NOVEMBRE 1977

	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TAC	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Tril.
SiO ₂	1	0,055	0,239	0,750	0,008	0,617	0,002	0,308	0,247	0,091	0,254
Ca ²⁺		1	0,130	0,273	0,141	0,219	-0,054	0,717	-0,188	0,063	0,360
Mg ²⁺			1	0,098	0,137	0,175	0,429	0,119	0,598	0,300	0,041
Na ⁺				1	0,963	0,984	0,584	0,390	0,008	0,371	0,223
K ⁺					1	0,570	0,661	0,279	0,192	0,394	0,185
Cl ⁻						1	0,669	0,417	0,068	0,706	0,242
SO ₄ ²⁻							1	0,376	0,552	0,073	0,260
TAC								1	-0,058	-0,087	0,417
NO ₃ ⁻									1	0,775	0,022
NO ₂ ⁻										1	0,054
cond.											1

Matrice de corrélation R

variables	I	II	III	IV	V
SiO ₂	0,878	-0,131	-0,130	-0,286	-0,025
Ca ²⁺	0,283	0,735	0,350	0,279	-0,186
Mg ²⁺	0,336	-0,315	0,667	0,181	-0,345
Na ⁺	0,910	0,375	-0,349	0,150	-0,070
K ⁺	0,936	-0,103	-0,294	0,101	-0,005
Cl ⁻	0,948	0,051	-0,266	0,061	-0,068
SO ₄ ²⁻	0,909	-0,293	0,220	-0,402	-0,015
TAC	0,508	0,670	0,330	-0,119	-0,172
NO ₃ ⁻	0,290	-0,630	0,534	-0,113	0,158
NO ₂ ⁻	0,343	-0,303	0,382	0,833	0,215
Tritium	0,356	0,440	0,317	-0,107	0,706
s	43,73	61,35	74,22	84,46	91,36

Matrice factorielle A

s = 5 cumulés d'explication de la variance totale.