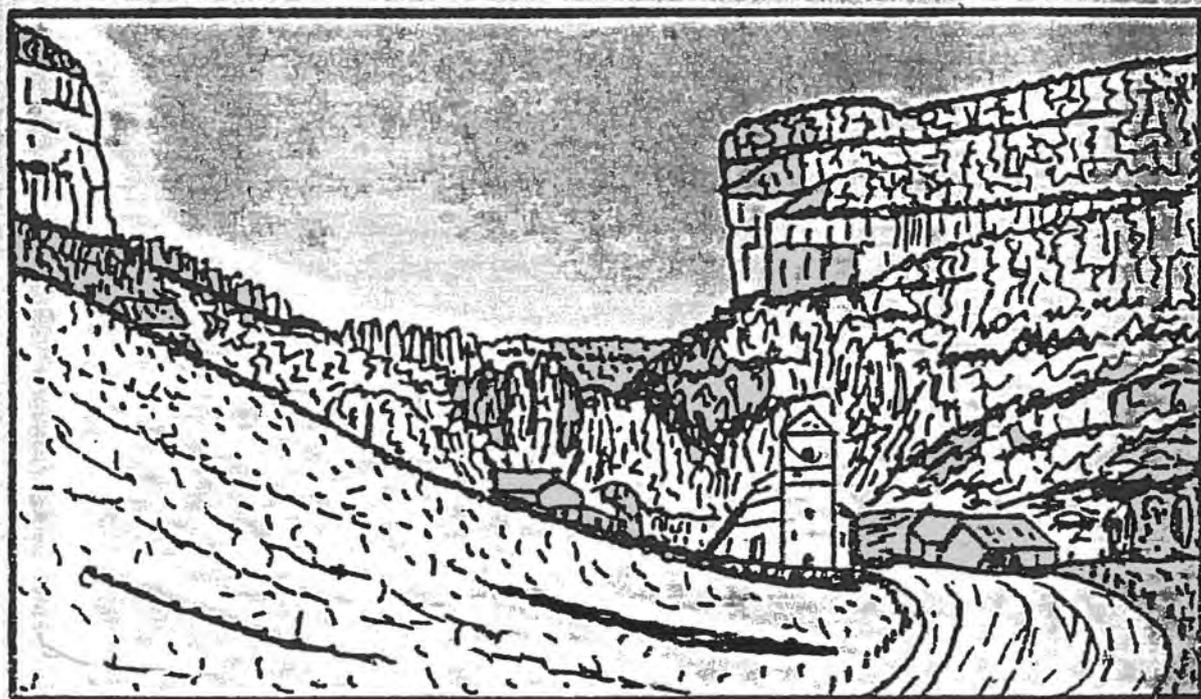


Th. Sc. Besançon
1990-19

Marc SALPERWYCK

**STRUCTURE ET REPNSES HYDROCHIMIQUES
D UN SYSTEME KARSTIQUE DE PLATEAU
(BASSIN DES RECULEES DE LA SEILLE, JURA)**



ANNALES SCIENTIFIQUES de l'UNIVERSITÉ de BESANÇON
Géologie - Mémoire Hors Série, n°10 - 1990

ISSN : 0758 - 7517

THESE

présentée à

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

pour obtenir le

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

par

Marc SALPERWYCK

Maître es Sciences

STRUCTURE ET REPOSES HYDROCHIMIQUES

D'UN SYSTEME KARSTIQUE DE PLATEAU

(BASSIN DES RECULEES DE LA SEILLE, JURA)

Soutenu le 20 Avril 1990 , devant la Commission d'Examen:

MM.	CHAUVE P.	Professeur, Université de Franche-Comté	Président
	MANIA J.	Professeur, Université de Franche-Comté	Rapporteur
	BLAVOUX B.	Professeur, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse	Rapporteur
	BROQUET P.	Professeur, Université de Franche-Comté	Examineur
Mme	GAIFFE M.	Maître de Conférences, Université Franche-Comté	Examineur
MM.	ROSSIER Y.	Chargé de recherche, Université de Neuchâtel	Examineur
	COLIN E.	Directeur du SRAE de Franche-Comté	Invité

TABLE DES MATIERES

	page
AVANT PROPOS	
INTRODUCTION.....	1
1ère Partie GEOLOGIE ET FISSURATION	
CHAPITRE I - Cadre géologique et morphologique.....	3
1.1. Stratigraphie.....	3
1.1.1. Le Trias.....	3
1.1.2. Le Lias.....	5
1.1.3. Le Jurassique moyen.....	7
1.1.3.1. L'Aalénien.....	7
1.1.3.2. Le Bajocien.....	8
1.1.3.3. Le Bathonien.....	9
1.1.4. Le Jurassique supérieur.....	9
1.1.5. Les formations quaternaires.....	11
1.1.5.1. Reculée de Voiteur et Baume-les-Messieurs.....	11
1.1.5.2. Les dépôts de plateau.....	12
1.1.5.3. Synthèse stratigraphique et chronologique.....	12
1.2. Géologie Structurale.....	13
1.3. Géomorphologie.....	15
1.3.1. Les surfaces d'érosion.....	15
1.3.2. Formes karstiques de surface.....	15
1.3.2.1. Formes superficielles.....	16
1.3.2.2. Caractères et évolution des reculées.....	17
1.3.2.3. Rôle des glaciations.....	17
1.3.3. Conclusion.....	18
1.4. Couverture pédologique et végétale.....	18
1.4.1. Méthodologie.....	18
1.4.2. Description des sols.....	20
1.4.3. Répartition des sols.....	21
1.4.4. Couverture végétale du bassin.....	22
CONCLUSION.....	22
CHAPITRE 2 - Etude des champs de Fissuration et de Perméabilité.....	25
2.1. Aspect théorique.....	25

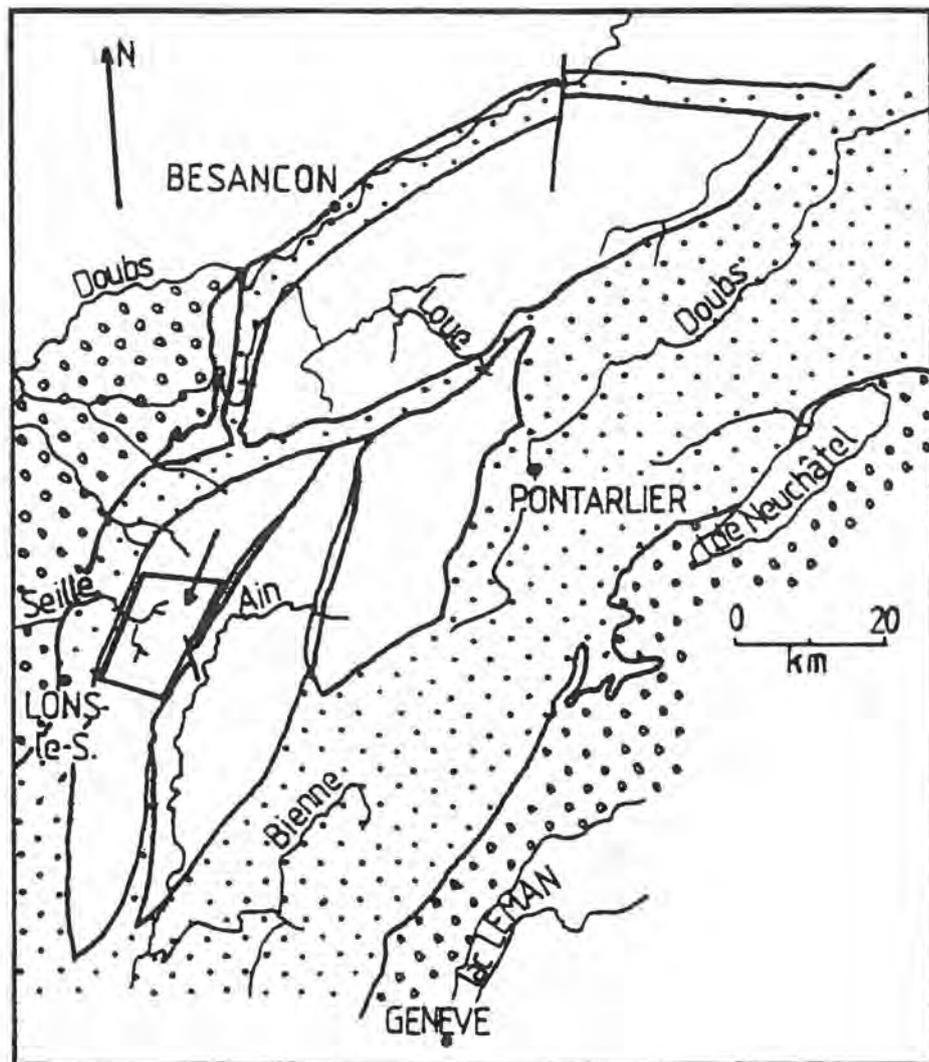
2.1.1. Stations de mesure.....	25
2.1.2. Recherche des orientations préférentielles de la fissuration	27
2.1.3. Fréquence de fissuration.....	27
2.2. Etude de la fissuration sur les reculées de la Seille.....	27
2.2.1. Plan d'échantillonnage.....	27
2.2.2. Champ des orientations préférentielles.....	29
2.2.3. Interprétation des orientations.....	29
2.2.4. Fréquence de fissuration.....	30
2.2.5. Conclusions.....	31
2.3. Distribution des fréquences de fissuration.....	32
2.3.1. Etude qualitative.....	32
2.3.1.1. Aspect théorique.....	32
2.3.1.2. Application.....	32
2.3.2. Etude quantitative.....	35
2.3.2.1. Aspect théorique.....	35
2.3.2.2. Application et résultats.....	35
2.3.3. Conclusion.....	40
2.4. Etude du champ des perméabilités.....	40
2.4.1. Aspect théorique.....	40
2.4.2. Calcul du tenseur de perméabilité.....	42
2.4.2.1. Calcul des ouvertures de fissures.....	42
2.4.2.2. Champ des orientations et des fréquences.....	45
2.4.2.3. Tenseurs de perméabilité.....	45
2.4.3. Analyse des perméabilités.....	45
2.4.3.1. Valeurs des perméabilités.....	46
2.4.3.2. Orientation des perméabilités.....	47
2.4.3.3. Cartographie du champ des perméabilités.....	47
2.4.4. Conclusion.....	53
CONCLUSION.....	53
CHAPITRE 3 - Etude comparative de différentes images de la fissuration.....	55
3.1. Méthodologie.....	55
3.1.1. Analyse d'images.....	57
3.1.2. Comparaison d'images.....	57
3.2. Comparaison des images de la fissuration sur les reculées de la Seille.....	57
3.2.1. Photographies aériennes.....	57
3.2.2. Réseaux karstiques.....	61
3.2.3. Image satellite.....	64
3.2.4. Etude des alignements de dolines.....	66
3.2.4.1. Méthodologie.....	66
3.2.4.1. Résultats.....	66
3.2.5. Synthèse et conclusions.....	68

3.2.5.1. Synthèse.....	68
3.2.5.2. Conclusions.....	69
3.3. Comparaison des images de la fissuration sur le secteur de Briod	72
3.3.1. Stations de mesure.....	72
3.3.1.1. Relevé total.....	72
3.3.1.2. Relevés selectifs.....	74
3.3.2. Etude de la fissuration sur dalle.....	76
3.3.2.1. Acquisition des données.....	76
3.3.2.2. Résultats.....	76
3.3.2.3. Conclusions.....	79
3.3.3. Etude des images satellites.....	79
3.3.4. Photographie aérienne.....	82
3.3.5. Synthèse.....	83
3.3.5.1. Contraintes et structures observées.....	84
3.3.5.2. Synthèse des images et conclusion.....	84
CONCLUSION.....	85
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	86
2ème PARTIE - LE BASSIN VERSANT DE LA SEILLE ET SON FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE.	
CHAPITRE 1 - Le bassin versant de la Seille.....	89
1.1. Hydrogéologie.....	89
1.1.1. Les sources.....	89
1.1.2. Caractéristiques de l'aquifère.....	91
1.1.3. Aspect du karst souterrain.....	93
1.2. Délimitation physique du bassin versant.....	95
1.2.1. Apport des traçages.....	95
1.2.2. Limites physiques du bassin.....	95
CONCLUSION.....	98
CHAPITRE 2 - Bilan climatologique et hydrologique.....	101
2.1. Bilan climatologique.....	101
2.1.1. Mesure des pluies et des températures.....	101
2.1.2. Données climatiques.....	101
2.1.2.1. Précipitations.....	101
2.1.2.2. Températures.....	103
2.1.3. Mesure de l'évapotranspiration.....	105
2.1.3.1. L'évapotranspiration potentielle ETP.....	105
2.1.3.2. L'évapotranspiration réelle ETR.....	106
2.1.4. Conclusion.....	107

2.2. Etude des débits et du fonctionnement hydrologique.....	108
2.2.1. Equipement limnigraphique.....	108
2.2.2. Analyse des modules.....	108
2.2.3. Distribution des débits.....	109
2.2.4. Ajustement des débits maxima à une loi de Gumbel.....	113
2.2.4.1. Méthodologie.....	115
2.2.4.2. Résultats.....	116
2.2.5. Analyse des courbes de récession.....	116
2.2.5.1. Rappel de la méthode.....	116
2.2.5.2. Application à la source du Dard.....	119
2.2.5.3. Application à la Seille à Voiteur.....	122
2.2.6. Conclusion.....	122
2.3. Bilan hydrologique.....	123
2.3.1. Bilan général de la Seille à Voiteur.....	123
2.3.2. Bilan du cycle 1987-1988.....	126
2.3.3. Bilan des sous-bassins.....	127
2.3.3.1. Sous-bassins des reculées Nord et Sud.....	127
2.3.3.2. Sous-bassins des sources.....	127
2.3.4. Conclusion.....	129
CONCLUSION.....	130
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE.....	130
3eme PARTIE - HYDROCHIMIE DU BASSIN DE LA SEILLE	
CHAPITRE 1 - COMPOSITION CHIMIQUE DES SOURCES KARSTIQUES DE LA SEILLE	
1.1. Principes et méthodologie.....	133
1.1.1. L'équilibre calco-carbonique.....	133
1.1.2. Acquisition des données hydrochimiques.....	137
1.1.2.1. Echantillonnage.....	137
1.1.2.2. Mesures physiques et analyses chimiques.....	137
1.2. Composition chimique des sources.....	139
1.2.1. Bilan chimique annuel.....	139
1.2.1.1. Analyse des moyennes.....	139
1.2.1.2. Distribution des fréquences de conductivité.....	144
1.2.1.3. Qualité bactériologique.....	144
1.2.1.4. Etude des isotopes.....	145
1.2.2. Origine des apports.....	146
1.2.2.1. Apport des précipitations.....	147
1.2.2.2. Apport des eaux usées.....	147
1.2.2.3. Apports dûs aux épandages.....	148
1.2.2.4. Bilan chimique des entrées sorties du karst.....	148
CONCLUSION.....	150

CHAPITRE 2 - EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DURANT LE CYCLE HYDROLOGIQUE 1987-1988.....	151
2.1. Evolution des éléments chimiques.....	151
2.1.1. Eléments du système calcocarbonique.....	151
2.1.2. Autres éléments.....	157
2.1.3. Conclusion.....	165
2.2. Analyse statistique.....	167
2.2.1. Principe.....	167
2.2.2. Application de l'ACP aux sources de la Seille (cycle 87-88).....	167
2.2.2.1. Source du Dard.....	167
2.2.2.2. Source d'Aldegrin.....	169
2.2.2.3. Source de Blois.....	171
2.2.2.4. Source de Ladoye.....	173
2.2.2.5. Source de la Fontaine.....	173
2.2.2.6. Synthèse et conclusion.....	176
2.3. Analyse de la crue du 29.09 au 9.10.1988.....	177
2.3.1. Courbes de variation.....	177
2.3.2. Etude par éléments.....	179
2.3.3. Analyse multidimensionnelle.....	183
2.3.3.1. ACP complète.....	183
2.3.3.2. ACP de la crue n°1.....	185
2.3.3.3. ACP de la crue n°2.....	188
2.3.3.4. ACP de la crue n°3.....	188
2.3.4. Conclusion.....	190
2.4. Application de l'ACP à une étude spatiale.....	190
CONCLUSION.....	193
CHAPITRE 3 - ETUDE HYDROCHIMIQUE D'UN BASSIN EXPERIMENTAL.....	197
3.1. Situation et équipement du bassin expérimental.....	197
3.1.1. Situation.....	197
3.1.2. Équipement du bassin.....	197
3.2. Evolution chimique des eaux épikarstiques.....	198
3.2.1. Bilan général.....	198
3.2.2. Evolution chimique des eaux.....	198
3.2.3. Analyse statistique.....	203
3.2.4. Analyse d'une crue.....	205
3.2.4.1. Evolution hydrochimique.....	205
3.2.4.2. Analyse statistique.....	207
3.2.5. Conclusion.....	209
3.3. Hydrochimie des eaux lysimétriques.....	209

3.3.1. Granulométrie.....	209
3.3.2. Evolution chimique des eaux de percolation.....	210
3.3.2.1. Evolution chimique.....	210
3.3.2.2. Analyse statistique.....	214
3.3.3. Conclusion.....	214
3.4. Synthèse et conclusion.....	216
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE.....	217
CONCLUSIONS GENERALES.....	219
BIBLIOGRAPHIE.....	221
ANNEXES	



-  Dépressions périphériques
-  Zones tabulaires
-  Zones plissées
-  Secteur d'étude

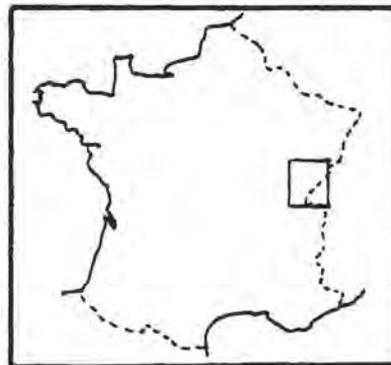


Fig. 1 - Carte de situation régionale

PREMIERE PARTIE

- Cadre géologique et morphologique
- Etude des champs de fissuration et de perméabilité
- Etude comparative des différentes images de la fracturation



0 2 4 6 8 10 km

Fig. 2 - Situation du secteur d'étude

CHAPITRE 1 - CADRE GEOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE

INTRODUCTION

Le plateau lédonien se situe dans le Jura (39), à l'Est d'une ligne reliant Arbois à Lons-le-Saunier (fig.2). D'une altitude moyenne de 500m, il est encadré à l'Ouest par la plaine bressane et à l'Est par la vallée de l'Ain et le plateau de Champagnole.

Notre secteur d'étude concerne la partie sud du plateau, comprise entre une ligne Plasne-Besain au nord, et le village de Publy au sud. Il couvre ainsi une superficie d'environ 150 km². Son extension est limitée au faisceau lédonien à l'Ouest et au relief de l'Heute à l'Est.

Les activités humaines concernent essentiellement l'élevage (bovins et porcs) et dans une moindre mesure la culture (orge, seigle, blé, maïs). La majorité des communes du plateau possède également une fromagerie.

Le plateau draine les eaux de la Seille, dont les multiples sources naissent au fond de reculées de dimensions imposantes. Celles-ci confèrent à la région un grand attrait touristique, symbolisé par le site de Baume-les-Messieurs, réputé pour ses grottes et son abbaye.

1.1. - STRATIGRAPHIE

Les terrains affleurant sur le secteur d'étude concernent les niveaux allant du Trias au Portlandien. Le Trias et la Lias n'affleurent qu'au niveau d'une boutonnière à l'Ouest de Baume-les-Messieurs. Le Jurassique moyen constitue la majeure partie des terrains rencontrés. Le Jurassique supérieur n'est représenté que dans la chaîne de l'Heute. Quelques formations quaternaires, localisées essentiellement dans les reculées, complètent un panorama géologique relativement simple (fig.3).

1.1.1. Le Trias (fig.4)

Le Trias est de faciès germanique. Il n'apparaît dans les reculées qu'au niveau de la vallée de la Peyrouse. Il comprend :

- Le Rhétien (t10). Grès du Boisset : 1m dans le sondage de Baume-les-Messieurs, 0.5m dans le sondage de Briod (A. LEFAVRAIS-RAYMOND, 1961). On distingue ensuite une alternance de calcaires dolomitiques et de marnes schisteuses noires riches en bivalves (Avicula contorta).

- Rhétien moyen : calcaires dolomitiques et marnes noires ; ce niveau est bien développé dans le sondage de Baume-les-Messieurs.

- Rhétien supérieur : grès à écailles de poissons et marnes rouges de Levallois.

Des faciès marins marquent alors le début de la transgression jurassique (N.THEOBALD, 1961).

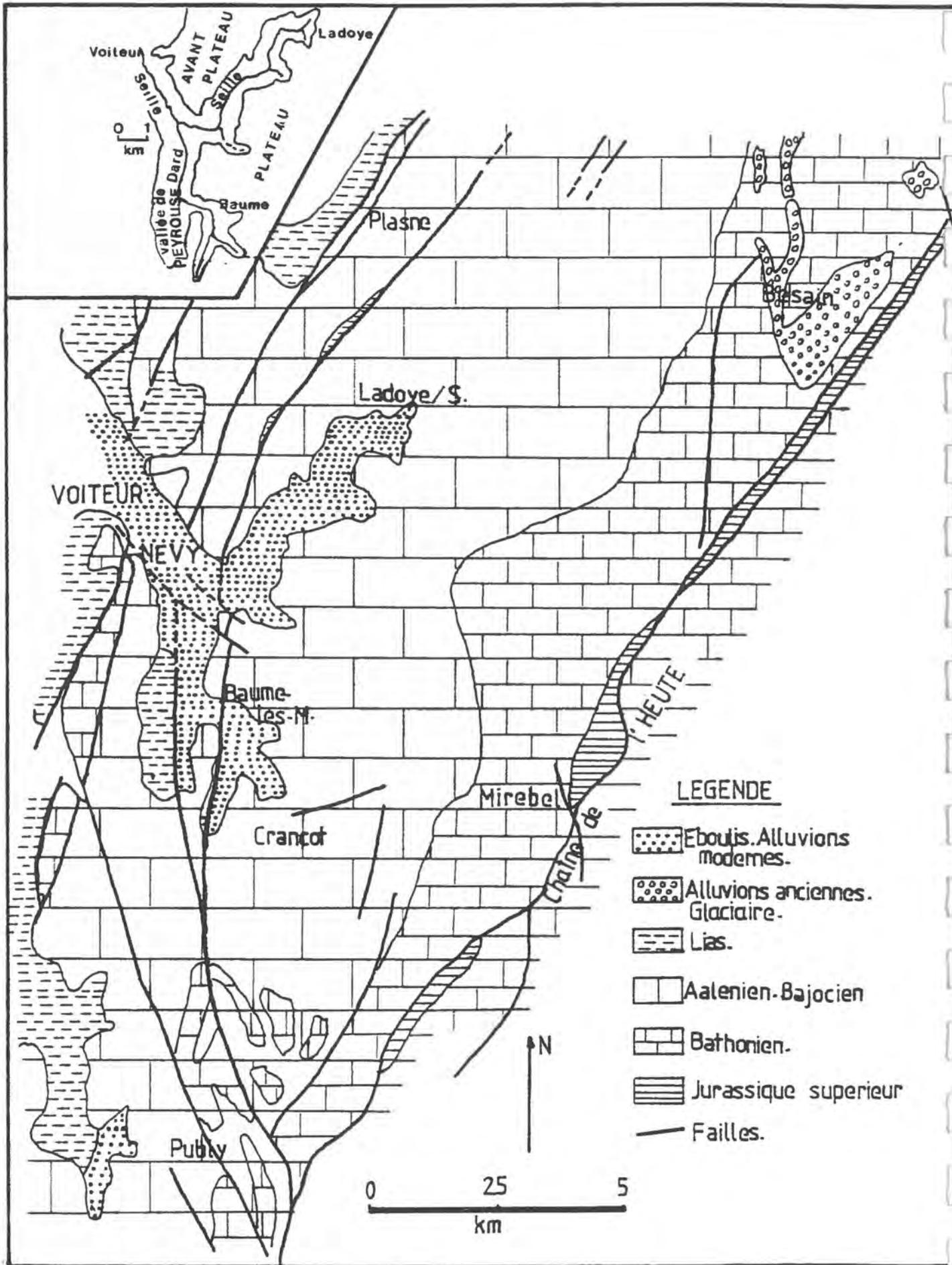


fig. 3 - Carte géologique simplifiée (d'après la feuille au 1/50000 de Lons-le-Saunier)

1.1.2. Le Lias

- Hettangien et Sinémurien

L'Hettangien est peu épais (3 à 6 m). A Baume-les-Messieurs, le sondage révèle 2m de calcaire gréseux (A.BONTE, 1953).

Le Sinémurien est calcaire et d'une épaisseur d'environ 10m. Il présente une base à aspect rognonneux, une partie moyenne de calcaires à Gryphées, une partie supérieure à nodules phosphatés (Arinoceras).

- Lotharingien

On y distingue 10m d'une alternance de calcaires et de marnes, présentant les niveaux à Astoceras, Promicrocera, Oxynoliceras et Echioceras. Les calcaires sont plus clairs dans la zone à Oxynoliceras : ce niveau atteint 4m dans le sondage de Baume-les-Messieurs.

- Pliensbachien

Le Carixien (2.5m) est composé de calcaires fins, glauconieux et riches en ammonites (Prodactylioceras davoci, Aegoceras capricornu et Lytocera frimbiatum), il constitue un bon niveau repère.

- Domérien

* Le Domérien inférieur montre une épaisse série de marnes (90m à Briod, 75m au minimum à Baume-les-Messieurs. Elles renferment Amaltheus margaritatus. A la base, on trouve des marnes peu micacées à Belemnites, puis des marnes à bivalves Les niveaux supérieurs sont plus détritiques, calcaires et gréseux ; Amaltheus margaritatus y est abondant.

* Le Domérien supérieur est formé d'une alternance de calcaires gréseux et de marnes. La partie supérieure est plus cristalline, à Pleuroceras spinatum.

- Toarcien

* Toarcien inférieur

- Bancs de calcaires et marnocalcaires bruns, bitumineux, à écailles de poissons (2.5m).

- 5m de marnes dures conchoïdales : zone à Dactylioceras annulatum et tenuicostatum.

- 10m de schistes à Posydonomies, constitués d'une alternance de fines couches calcaires et de lits marneux à Steimannia bronni. On y rencontre également Dactylioceras (D. annulatum) et Harpoceras falciferum.

* Toarcien moyen

- 15m de schistes à posydonomies, avec lit d'encries à la base.

- 20m de marnes conchoïdales et marno-calcaires schisteux. La faune est riche en Steimannia bronni et en Hildoceras bifrons.

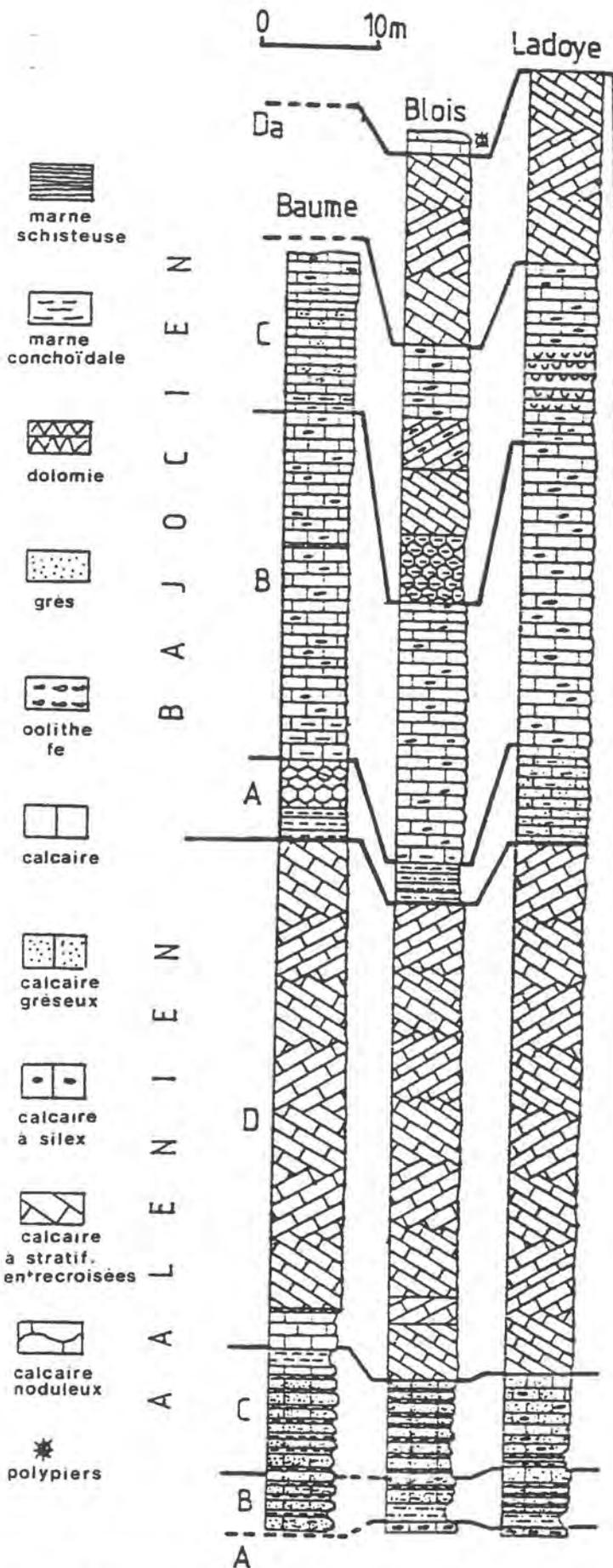


Fig. 5 - Stratigraphie de l'Aalénien et du Bajocien (D. CONTINI, 1970)

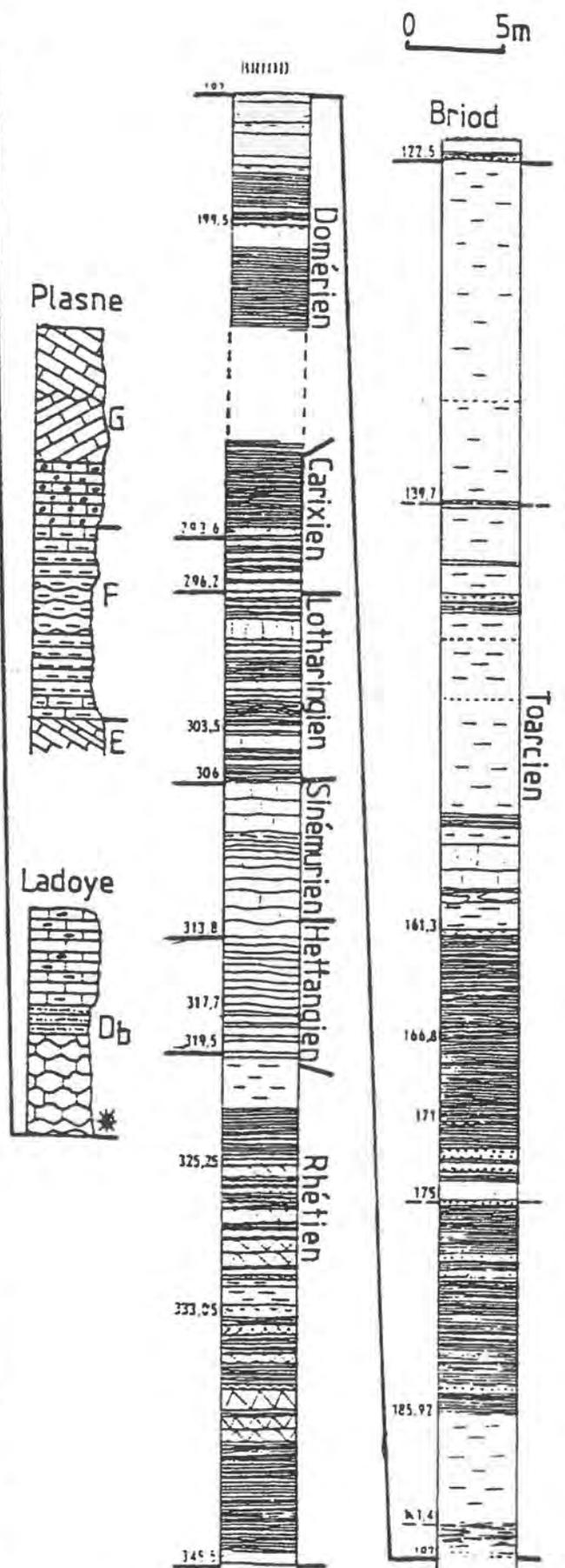


Fig. 4 - Stratigraphie du Trias et du Lias (d'après A. LEFAVRAIS-RAYMOND, 1961)

* Toarcien supérieur

Il est constitué de 20m de marnes conchoïdales à Grammoceras rares.

Le Lias est développé sur le flanc ouest de la vallée de la Peyrouse, où l'ensemble marneux adoucit la morphologie. Il constitue également le support du vignoble réputé de Château Chalon à la sortie de la Seille vers la plaine.

Dans les reculées elles-mêmes, les affleurements sont rares, généralement recouverts par les éboulis de pente. On peut cependant signaler la présence du Sinémurien le long de la route menant de Nevy sur Seille à Baume-les-Messieurs.

Les schistes cartons du Toarcien inférieur sont visibles sur la route de Blois à Ladoye. Le Toarcien supérieur affleure dans un contrefort de la reculée de Ladoye sud (Bobignon) : on y perçoit la limite Toarcien-Aalénien.

1.1.3. Le Jurassique moyen

L'Aalénien et le Bajocien ont été décrits en détail par L.A. GIRARDOT (1896), puis par D. CONTINI (1970).

La figure 5 donne les différentes coupes relevées par cet auteur sur la Seille.

1.1.3.1. Aalénien

A- Niveau de l'Oolithe ferrugineuse supérieure de Blois. Malgré sa faible épaisseur (0.70 à 0.90m sur Blois), l'extension de ce niveau en fait un bon repère. Il s'agit d'un calcaire à pâte fine, à oolithes ferrugineuses assez grandes et de débris de coquilles.

B- Niveau des calcaires à Cancellophycus

Ce niveau débute par un niveau de marnes sableuses (1 à 2m) à Ludwigella arcitenens. Les calcaires sont sableux, parfois micacés, en petits bancs séparés par des lits de marnes sableuses en plaquettes.

Ce niveau atteint 5m à Ladoye, 3.5m à Blois. Il représente les zones à Concavum, Ludwigella et Graphoceras.

C- Niveau des calcaires ferrugineux à rognons de silex inférieurs de Messia.

D'une épaisseur d'environ 8 m, ce niveau comprend des calcaires finement grenus, sableux, à silex, rappelant les calcaires à Cancellophycus. Ils représentent la zone à Concavum.

D- Niveau des calcaires oolithiques et spathiques de Conliège

Il s'agit d'une épaisse série de calcaires roux, spathiques, à petites oolithes et à débris. Présence de stratifications entrecroisées. Cet ensemble atteint 40 à 50m à Ladoye, Blois et Baume-les-Messieurs. Il forme les falaises inférieures tout le long des reculées. La fin de l'Aalénien est marquée par une surface taraudée.

1.1.3.2. Bajocien

Pauvre en fossiles, il surmonte l'Aalénien d'une façon continue. On distingue plusieurs niveaux :

A- Niveau des marnes et calcaires argileux du Bajocien inférieur.

a- Niveau des marnes noires à Bryozoaires.

On distingue des calcaires roux sableux et bioclastiques, à entroques, séparés par des lits de marnes noires à Bryozoaires. Ce niveau est fréquemment masqué par de petits éboulis. Il est peu épais : 2m à Blois.

Age : sous-zone à Discites

b-c- calcaires marneux inférieurs et marnes à Pholadomyes et des calcaires spathiques ferrugineux.

Ce sont des calcaires argileux, noduleux, ferrugineux à lamellibranches. Epaisseur : 1.20m à Blois.

Age : sous-zone à Sowerbyi.

d - Niveau des calcaires noduleux

Ces calcaires, d'une épaisseur très réduite (moins de 1m à Blois) sont très fossilifères ; lamellibranches, gastéropodes, céphalopodes.

Age : sous-zone à Laeviscula, zone à Sauzei.

B- Niveau des calcaires moyens à rognons de silex de Messia

a- Calcaires spathiques à silex

Ces calcaires sont fins, sableux et riches en gros silex. Leur épaisseur est en moyenne de 30m. Les litages sont réguliers et les bancs sont séparés de petits lits de marnes sableuses.

Age : zone à Sauzei.

C- Niveau des calcaires à polypiers de Conliège (2ème niveau à polypiers)

Dans notre secteur d'étude ce niveau présente 25m de calcaires bioclastiques. Il débute par un niveau de calcaire noduleux, riche en fossiles. Il se poursuit par des calcaires gris, grenus, à entroques, contenant encore des silex.

Age : sous-zone à Humphriesianum

D- Niveau des calcaires spathiques du Bajocien moyen

a- calcaires spathiques de St Maur

Ces calcaires forment un ensemble compact, bioclastique à entroques, éventuellement à oolithes. Son épaisseur atteint 17m à Ladoye.

b- Niveau des calcaires de Crançot

A Ladoye, ce niveau comprend des polypiers. L'ensemble vient en continuité des calcaires de St Maur.

Age : sommet de la zone à *Humphriesianum*

E- Marnes et calcaires spathiques de Courbouzon

Vers Plasne, on relève 5m de calcaires oolithiques, bioclastiques à entroques.

Age : zone à *Subfurcatum* et *Garantiana*. Ce niveau marque la fin du Bajocien moyen.

F- Marnes à *Ostrea acuminata* et marnes de Plasne

a- 2 à 3m de calcaires argileux, noduleux, roche en débris d'huitres et brachiopodes

b- 5m de marnes et calcaires argileux à *Ostrea acuminata*

c- Sur Plasne, marnes à grosses gravelles à *Parkinsonia parkinsoni*.

G- Grande Oolithe

Sur Plasne, le niveau de la grande oolithe présente 15 à 20m de calcaires finement oolithiques à débris.

Age : zone à *Parkinsoni*

La partie supérieure de cette coupe n'apparaît pas le long des reculées, le bord de la falaise étant généralement constitué de calcaires spathiques du Bajocien moyen.

1.1.3.3. Le Bathonien (J2)

Bien qu'affleurant sur une grande surface à l'est du plateau, les coupes de référence appartiennent à la chaîne de l'Heute (M. MATHIS, 1973). On n'y relève pas de séries continues de grande épaisseur (L.A. GIRARDOT, 1890) de fait, sa puissance peut être estimée à 80-90m (M. MATHIS, 1973).

D'une façon générale, le Bathonien présente un ensemble calcaire gris-beige graveleux, à tendance argileuse à la base (coupe de Châtillon). On y relève par endroits des niveaux silicifiés (Châtillon, Nogna), ou oolithiques (Nogna).

Le Callovien (J3), très réduit (1 à 2m) est représenté par un faciès "Dalle Nacrée" : calcaire à entroques roulées et Bryozoaires dans un ciment calcitique (M. MATHIS, 1973). Des marno-calcaire à oolithes ferrugineuses traduisent le Callovien moyen et supérieur.

1.1.4. Le Jurassique supérieur

Les niveaux du Jurassique supérieur n'affleurent que dans la chaîne de l'Heute. Nous en rappellerons les principaux faciès pour mémoire :

- Oxfordien s.s. "marnes à *C. renggeri*" (J4)

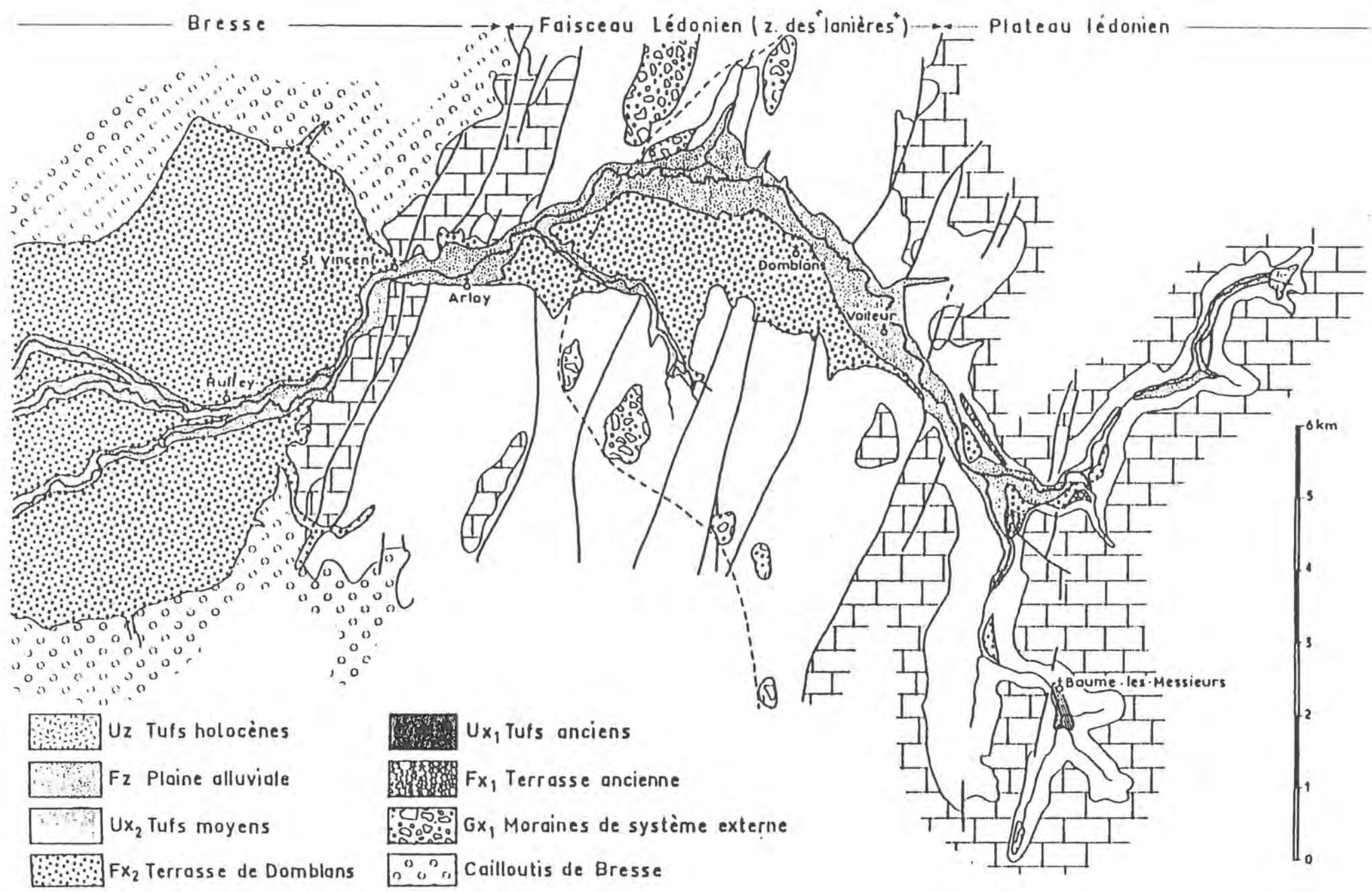


Fig. 6 - Cartographie des formations quaternaires de la reculée de Voiteur et de son débouché (M. CAMPY, 1982)

- Argovien (J5) : alternance de marno-calcaire et de marnes surmontant l'Oxfordien.

Ces deux étages sont présents au pied de la chaîne de l'Heute, où ils affleurent largement entre Mirebel et Bonnefontaine.

- Rauracien (J6) : calcaire oolithique gris-roux à stratifications entrecroisées puis calcaire fin en bancs massifs à tendance argileuse (coupe de la Tour de Montrond, M. MATHIS, 1973). Le même auteur note des calcaires fins grumelo-graveleux à Mirebel.

- Séquanien (J7)

Il n'affleure que sur les sommets des buttes (Châtillon) et constitue le niveau terminal de la série de la chaîne de l'Heute.

1.1.5. Formations quaternaires

L'inventaire des formations récentes des reculées de la Seille a été effectué par M. CAMPY (1982).

Les reculées de Voiteur et de Baume-les-Messieurs présentent plusieurs unités lithologiques, retraçant l'histoire quaternaire des reculées. Quelques dépôts de plateaux complètent ce panorama de l'évolution récente.

1.1.5.1. Reculée de Voiteur - Baume les Messieurs (fig.6)

a- Moraines externes (Gx1), elles se localisent en plaquage sur les assises marneuses du Trias et du Lias.

b- Terrasses fluviatiles et fluvioglaciales

1- Terrasses anciennes (Fx1)

Cette terrasse est bien visible au point de jonction des reculées nord et sud de la Seille : elle surplombe la basse vallée d'environ 40m. Son origine proviendrait donc d'un cône fluvioglaciale.

2- Terrasse de Domblans (Fx2)

Son altitude décroît de Nevy à Ruffey/s/Seille, ainsi que son altitude relative par rapport au cours actuel de la Seille (+12m à Voiteur, +1 à 2m à Ruffey). Les caractéristiques morphologiques de cette terrasse la rapprochent d'un cône fluvioglaciale.

c- Tufs

Trois séries de tufs sont représentées dans les reculées :

- Tufs anciens Ux1, rencontrés dans la partie supérieure du sondage de Baume-les-Messieurs sur 16m. Ils se seraient formés durant l'interglaciale suivant la phase associée aux moraines externes.

- Tufs moyens Ux2 : ils affleurent en amont et en aval de Blois/s/Seille, dominant la vallée de 15 à 20m. Cette formation date d'une phase tempérée postérieure au stade glaciaire responsable de la mise en place de la terrasse de Domblans.

- Tufs holocènes Uz, surmontant les cailloutis post-glaciaires : ils sont liés à l'activité actuelle des sources.

d- Eboulis

Ils couvrent les pieds de reculée, on y distingue des brèches massives à éléments anguleux (Ex) et des éboulis plus calibrés non consolidés (E y-z). Les éléments les plus anciens masquent la terrasse, les plus récents assurent le raccord avec la falaise actuelle.

1.1.5.2. Dépôts de plateau

Ces dépôts sont constitués de lambeaux morainiques épars, situés entre le front externe et le front interne des moraines.

Dans le secteur étudié, seule la dépression de Crançot-Vevy, au lieu-dit "La Croix des Tartres" (x = 852.3, y = 191.6), présente une extension non négligeable. M. CAMPY (1982) y distingue deux ensembles lithologiques :

- à la base, 3 à 4m de moraine de fond : gros blocs emballés dans une matrice cohérente (silts sableux calcaires).

- au sommet, 5m de couches horizontales : alternance de couches à gros blocs et petits blocs, dans une matrice sableuse à stratifications entrecroisées.

Le substrat rocheux présente des stries et polissages glaciaires orientés NNW. Ces dépôts semblent correspondre au remplissage fluvioglaciaire d'une dépression antérieurement colmatée par une moraine de fond. Ce comblement serait survenu lors du recul de glacier.

Le même auteur note la présence d'autres lambeaux morainiques :

Le Fied	x = 857.9	y = 204.2
	x = 858.1	y = 202.7
Picarreau	x = 859.6	y = 200.8
Vevy	x = 851.9	y = 190.4
Briod	x = 852	y = 188.7
Publy	x = 854.1	y = 186.7
Verges	x = 855.7	y = 188.4

1.1.5.3. Synthèse stratigraphique et chronologique

L'histoire quaternaire de la région de Voiteur peut se résumer en 3 étapes :

1) le stade de l'avancée maximale glaciaire se manifeste par la moraine de St Germain-les-Arlay (Gx1). Il s'agit là d'un reliquat réduit et altéré, le cône fluvioglaciaire ayant été détruit. A cette phase peut être associée le surcreusement de Baume-les-Messieurs et son remplissage. Un lac a vraisemblablement existé avant qu'il ne soit comblé. Les tufs interglaciaires (18 mètres supérieurs du sondage) viennent ensuite sceller les dépôts.

Ce stade correspond donc à la glaciation rissienne, qui atteint les reculées externes du Jura (voir fig.7)

2) Une phase alluviale importante survient ensuite, correspondant à la terrasse de Domblans et Nevy, par le dépôt d'un important cône

fluvioglaciaire (Fx2). Le réchauffement climatique suivant cette phase provoque le creusement dans la terrasse et le dépôt de tufs associés à cette dernière.

Le second stade correspond à la glaciation wurmienne. Contrairement à la précédente, la calotte glaciaire n'atteint pas les reculées externes (fig.7) ce qui se traduit par une absence de dépôts morainiques.

3) La troisième étape concerne la nappe alluviale actuelle et les dépôts de tufs à l'extrémité des reculées.

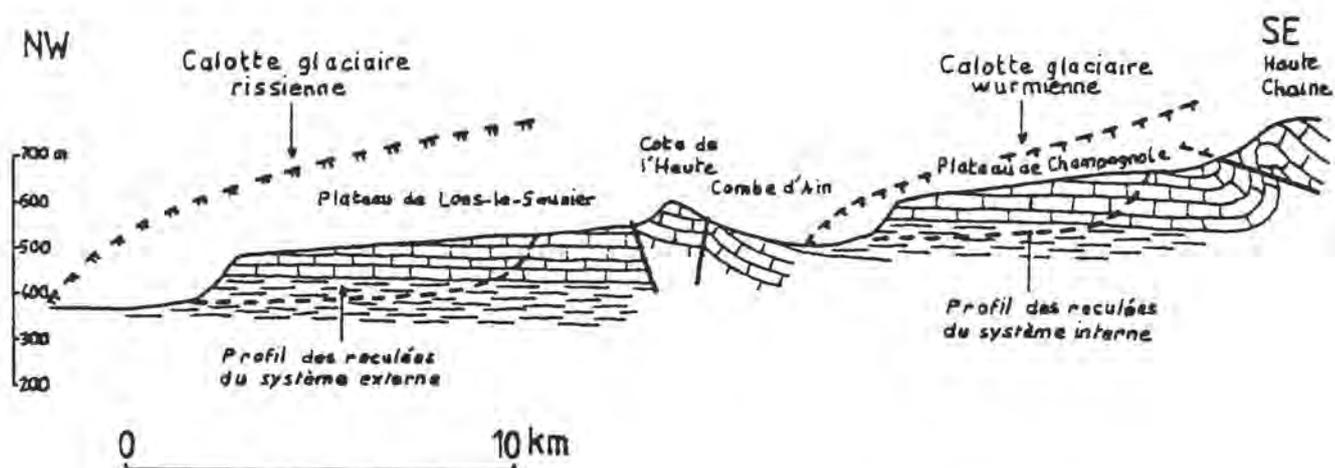


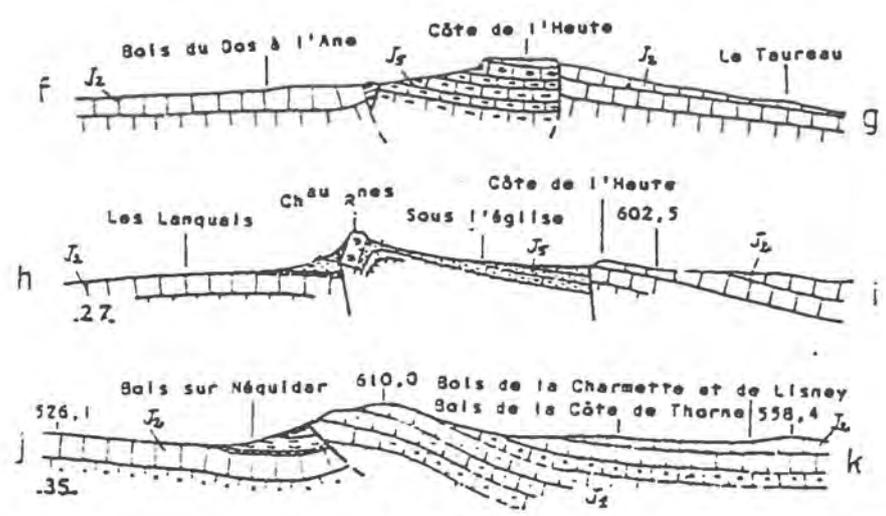
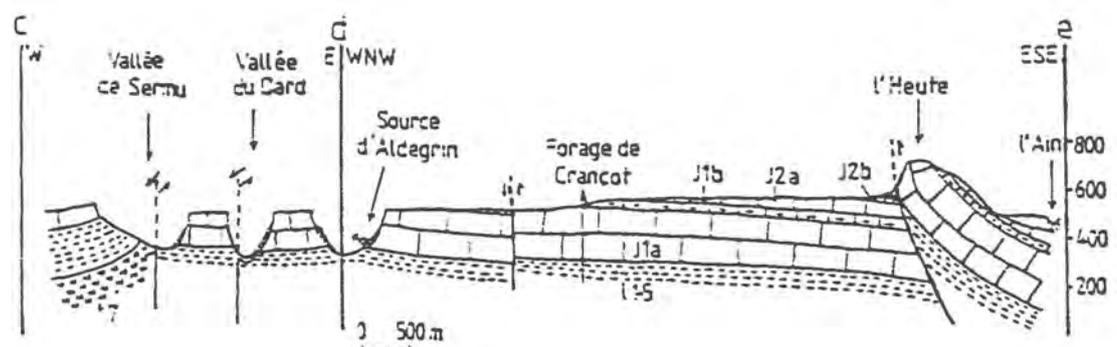
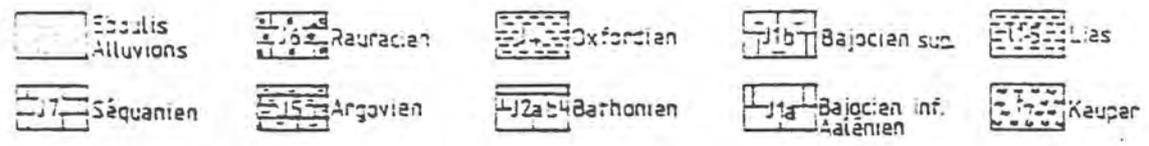
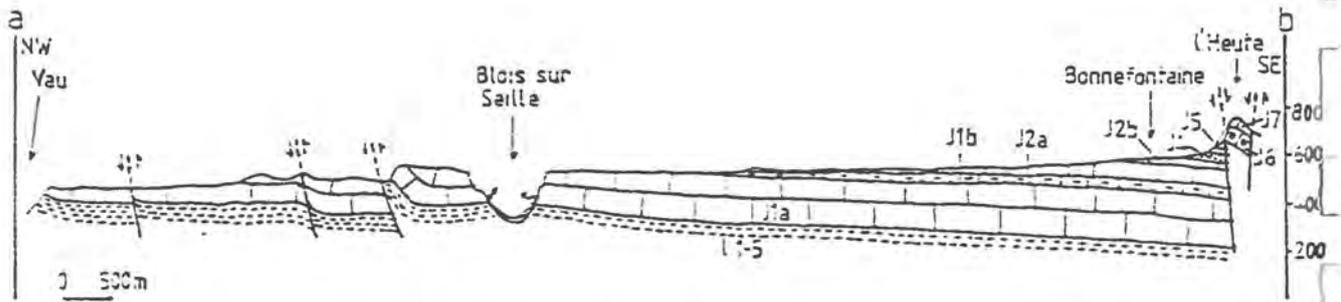
Fig. 7 - Localisation des extensions glaciaires par rapport aux systèmes des reculées externes et internes (M. CAMPY, 1982)

1.2. - GEOLOGIE STRUCTURALE

Le plateau lédonien apparait comme un ensemble tabulaire calme, légèrement incliné vers l'Est. Sa régularité contraste avec le faisceau lédonien à l'Ouest, front du charriage jurassien sur la Bresse (G. LIENHARDT, 1962), ainsi qu'avec la pincée de l'Heute à l'Est, accident rectiligne séparant le plateau de la vallée de l'Ain.

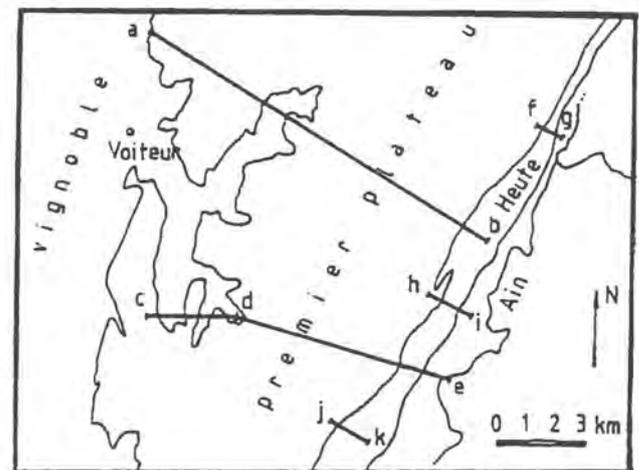
Au Nord du plateau, les accidents sont de direction N 20-30, parallèles à la chaîne de l'Heute. Cette direction a été identifiée comme celle des accidents de socle (P. CHAUVE et al, 1988, E. PETITJEAN, 1990, à paraître).

Vers le Sud, une série d'accidents de direction N150-160 (fig.8) encadre une légère dépression du plateau. Cet étranglement correspond à la zone de raccourcissement maximum du faisceau lédonien (E. PETITJEAN, 1990, à paraître).



Coupes FG, HI, JK : Chaîne de l'Heute d'après M. Mathis, 1973.

Fig. 3 - Coupes géologiques du plateau de la Chaîne de l'Heute



Vers l'Ouest, le plateau s'interrompt au niveau d'un accident mettant en contact le Bathonien avec le Lias du faisceau ; toute cette partie ouest est découpée en panneaux faillés, les plus externes chevauchant la Bresse.

Vers l'Est, le relief de l'Heute est constitué par une zone déformée entre deux failles longitudinales (pincée). Il en résulte plusieurs types de structures (voir les coupes en fig.8, d'après M.MATHIS, 1973).

La même figure montre la structure simple du plateau.

En première approximation, l'histoire tectonique peut se ramener à deux étapes principales :

- une phase de distension oligocène, responsable de la mise en place du fossé bressan et du découpage du socle.

- une phase de compression, pontienne, marquée par le charriage du Jura sur la Bresse.

1.3. GEOMORPHOLOGIE

Les caractères géomorphologiques du plateau ont hérité des conditions géologiques et géographiques : le massif calcaire a donc été soumis dans son évolution récente à une karstification qui régit en grande partie les observations pouvant être faites actuellement.

1.3.1. Les surfaces d'érosion

La morphologie des plateaux fut tout d'abord expliquée par l'existence de deux surfaces d'érosion emboîtées : une supérieure (surface d'Ornans), démantelée par une surface inférieure correspondant aux plateaux de Lons-le-Saunier et Champagnole (G. CHABOT, 1927). A. CAIRE (1955) admettait une pédiplaine, "surface formée par juxtaposition de glacis développés en climat semi-aride".

Pour d'autres, les plateaux encadrant la chaîne de l'Heute seraient l'aboutissement d'une seule surface d'érosion qui aurait arasé toute la région (J. MARTIN, M. MATHIS, 1974). Cette érosion aurait alors abouti à un dégagement structural des niveaux marneux de l'Argovien et de l'Oxfordien, laissant en relief la chaîne de l'Heute. Certaines buttes de la chaîne, non conformes à la surface d'érosion, en constitueraient des reliefs résiduels.

1.3.2. Formes karstiques de surface

Le plateau ne présente qu'une faible variété de formes exokarstiques ; dolines, diaclases élargies et puits de faible profondeur résumant en totalité ces formes superficielles de petit développement.

En revanche, les reculées de grande ampleur témoignent de façon spectaculaire de l'érosion du plateau.

1.3.2.1. Formes superficielles

Les dolines, petites dépressions fermées, représentent un réseau dense sur la totalité du plateau. Elles résultent de l'élargissement en entonnoir des fissures et se développent fréquemment le long de diaclases (D. AUBERT, 1969) ou à la limite marnes-calcaire (contact Oxfordien-Bathonien du pied de la chaîne de l'Heute).

Ce type de dolines peut être associé à des pertes : le ruissellement de l'eau sur les marnes assure ainsi leur activité.

L'absence de drainage superficiel sur le reste du plateau entraîne une réduction d'activité des dolines, occasionnant leur comblement. Les eaux météoriques s'infiltrent donc sur place, ceci d'autant plus facilement que la faible épaisseur du recouvrement pédologique leur permet de gagner rapidement le substrat calcaire.

D'une façon plus générale, de bonnes conditions d'infiltration de l'eau et la structure tabulaire expliquent l'absence de formes superficielles de grande ampleur, tels les gouffres ou avens profonds.

Un seul puits atteint 50m de profondeur et livre l'accès à un réseau actif de 200m : le gouffre des Frittes est situé au Nord-Est de Ménétru le Vignoble, en une partie du plateau d'épaisseur considérablement réduite.

Les autres puits connus, qui n'excèdent pas 25 ou 30m de profondeur, sont obstrués et secs (J. COLIN, 1966).

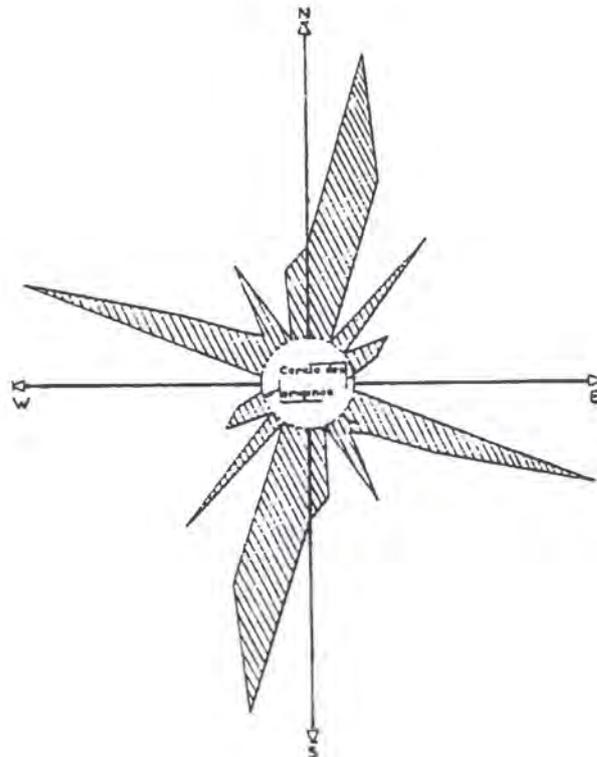


Fig. 9 - Diagramme polaire des directions des reculées
(D. DUPLESSIS-KERGOMARD, J. MARTIN, 1968)

1.3.2.2. Caractères et évolution des reculées

Les reculées de la Seille totalisent une vingtaine de kilomètres dans leurs diverses ramifications. Elles se scindent au Sud-Est de Nevy en deux tronçons d'importance sensiblement équivalente.

Leurs directions principales d'extension sont orientées N10-20, en conformité avec les accidents géologiques principaux. Leur développement est donc étroitement lié à la fracturation du plateau calcaire et montre l'adaptation du réseau des reculées à la structure tectonique (D. DUPLESSIS-KERGOMARD, J. MARTIN, 1968).

Ces auteurs ont reporté sur diagramme polaire les directions en longueurs cumulées des flancs des reculées : deux directions majeures, N10 et N110, s'en dégagent (voir fig.9). L'étude de la fracturation (chapitres suivants) confirmera la liaison existant entre ce développement et la fracturation.

La structure permet également d'expliquer l'importance du développement des reculées.

On constate en effet, aussi bien au Nord qu'au Sud du plateau, l'existence d'une remontée structurale du Lias à l'Ouest des reculées. Vers Baume-les-Messieurs, il s'agit de l'anticlinal de la Peyrouse ; au Nord de Nevy, d'une remontée des marnes liasiques au contact d'une faille majeure.

Ces niveaux marneux forment un barrage, s'opposant à l'écoulement général est-ouest commandé par le drainage du plateau. Les reculées se seraient alors développées parallèlement à ce barrage d'orientation nord-sud. Ce schéma s'illustre particulièrement bien dans le cas de la reculée de Blois-Ladoye, qui s'achève en aval par un défilé étroit, point de passage obligé des écoulements. Ce défilé représente le point de rupture du barrage.

Le développement des reculées résulterait donc de deux phénomènes conjoints :

- l'effet du creusement occasionné par le réseau hydrographique de surface, en érosion régressive,
- l'effet du surcreusement occasionné par l'abaissement continu du niveau de base, lié à l'érosion du barrage marneux au niveau de Nevy sur Seille.

L'évolution du système va dans le sens de l'enfouissement des eaux dans la table calcaire à l'amont : un drainage souterrain et une karstification en résultent.

1.3.2.3. Rôle des glaciations

Les reculées de la Seille, dites externes au même titre que celles de Poligny, d'Arbois ou de Lons, se situent à la périphérie de la calotte glaciaire rissienne (D. AUBERT, 1965, M. CAMPY, 1982). Celle-ci a joué un rôle prépondérant dans leur développement (cf stratigraphie du sondage de Baume-les-Messieurs), bien que la morphologie actuelle résulte d'une érosion récente purement karstique. A l'inverse des reculées du système interne où les traces de la dernière glaciation (würmienne) sont présentes sous forme d'usure glaciaire encore bien marquée (polis-stries), les parois rocheuses des reculées externes

présentent un aspect cryoclastique caractéristique de l'évolution karstique à laquelle elles sont soumises depuis l'interglaciaire.

Les caractères des reculées de la Seille illustrent parfaitement leur évolution récente : grandes dimensions horizontales et verticales, nombreuses ramifications, parois rocheuses abruptes et cryoclastiques.

La genèse des reculées apparaît donc postérieure à la phase pontienne (charriage sur la Bresse), mais bien antérieure aux périodes glaciaires.

L'érosion actuelle, de type karstique se poursuit activement avec plus ou moins d'importance selon les endroits :

- importante dans le cirque du Bois Sautelard : fond du cirque en angle aigu, parois hautement instables présentant des dièdres à angles vifs.

- importante dans le cirque des grottes de Baume : la reculée est longue (2km) et étroite (300 à 400m). L'activité de la source a dégagé les éboulis de pente de la falaise, qui est verticale et surplombe l'entrée des grottes.

- moyenne dans le cirque de Blois et Ladoye. L'extrémité de ces cirques est arrondie et le pied de falaise est recouvert par un talus d'éboulis que l'eau ne peut dégager.

- faible dans le cirque du ruisseau de Jouisse : talus d'éboulis étendu et de faible pente, masquant la presque totalité de la falaise. La source ne possède qu'un faible débit.

1.3.3. Conclusion

La morphologie actuelle des reculées de la Seille et de son plateau résulte de 2 types d'activités :

- les effets de la glaciation rissienne
- l'érosion karstique inter et post-glaciaire.

La description de ces reculées nous a amenés à constater à nouveau le lien étroit existant entre les structures géologiques et le façonnement du relief.

1.4 - COUVERTURE PEDOLOGIQUE ET VEGETALE

L'étude pédologique effectuée sur le bassin de la Seille comporte une description des principaux sols et une cartographie sommaire de leur répartition.

La nature des sols est semblable à ceux décrits par F. DUBREUCQ (1987) ; ce sont pour la plupart des sols bruns, développés exclusivement sur calcaire.

1.4.1. Méthodologie

L'étude des documents topographiques et géologiques a permis dans une première étape de discerner les éléments morphologiques témoins de la diversité des différentes unités pédologiques :

- nature du recouvrement végétal (forêts, cultures, prairies),
- nature géologique du substratum, contrôlé par trois unités : Bajocien Inférieur et Moyen, Bajocien Supérieur et Bathonien,

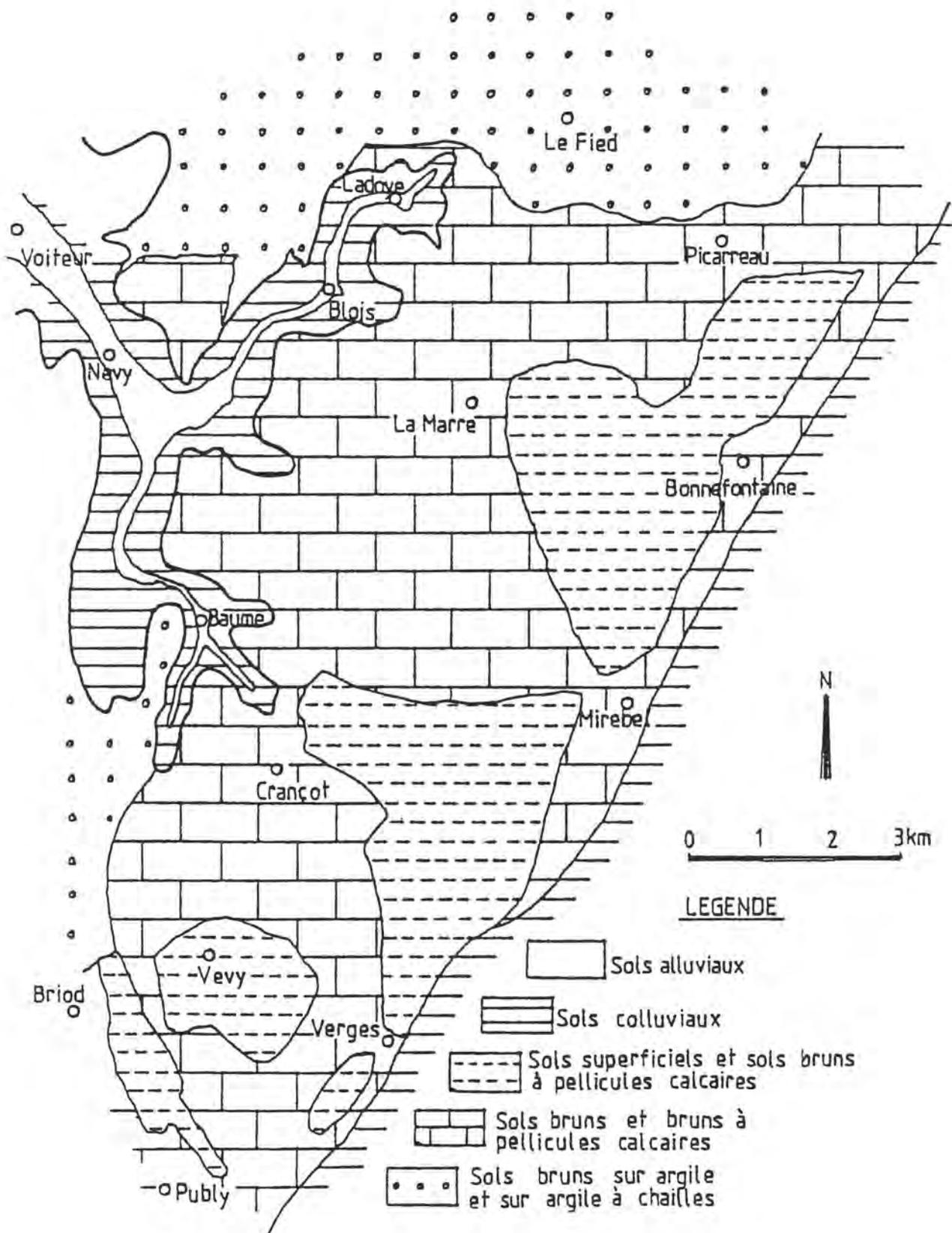


Fig. 10 - Carte de répartition schématique des sols

- densité des formes kastiques de surface, essentiellement représentées par les dolines.

Cette première approche a permis de distinguer une quinzaine de secteurs de caractéristiques différentes. Elle a abouti à la reconnaissance de terrain par l'exécution de 80 sondages à la tarière. Leur densité est plus élevée dans les zones déboisées qu'en forêts.

Chaque sondage a fait l'objet d'une description de plusieurs paramètres :

- nombre d'horizons
- profondeur
- charge en éléments grossiers
- effervescence à l'acide chlorhydrique
- structure
- texture
- couleur
- substrat

Cette description permet d'attribuer un nom génétique aux sols.

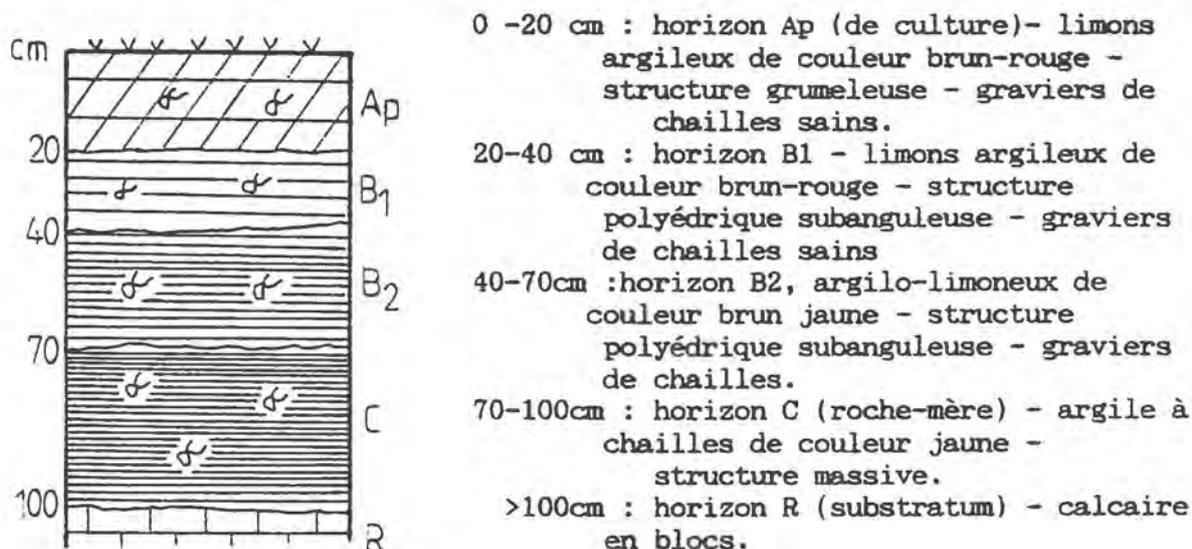
La cartographie pédologique a été effectuée sur la base de ces entités génétiques des sols. Des unités complexes (regroupement de plusieurs types de sols) ont été formées lorsque ceux-ci s'associent de façon étroite ou ne peuvent faire l'objet d'une représentation cartographique spécifique.

La carte des sols (fig.10) regroupe 5 unités de sols.

1.4.2. Description des sols

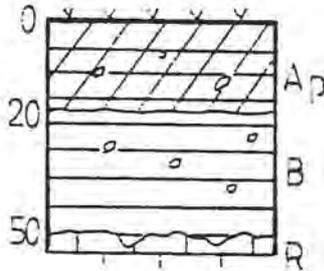
a- sols bruns à chailles

Ce type de sol a été essentiellement rencontré dans la partie nord-ouest du secteur (partie du plateau située au Nord de Château-Chalon). L'épaisseur reste supérieure à 50cm et varie relativement peu avec la topographie. Les horizons sont assez peu différenciés.



b) sols bruns sur calcaire

Leur épaisseur est variable (30-100cm), ils présentent des similitudes avec les sols bruns à chailles dans leur développement.

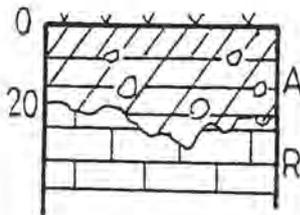


0 -20 cm : horizon Ap - limons argileux - bruns à ocre - structure grumeleuse

20-50 cm : limons argileux bruns plus clairs, pouvant passer à de l'argilo-limoneux brun jaune - structure polyédrique subanguleuse.

c) sols bruns superficiels à pellicules calcaires

Leur épaisseur est faible ; elle peut varier de quelques centimètres à une trentaine de centimètres. Ils se caractérisent par la présence dans le profil ou à sa base de cailloux calcaires laissant des pellicules blanches (S. BRUCKERT, 1980). Leur taux de saturation est élevé.



0 -20 cm : horizon A : brun-ocre plus ou moins organique - argilo-limoneux - Eléments grossiers

20-30 cm : horizon B : brun-ocre - argilo-limoneux - blocs calcaires peu altérés

Nous n'avons pas représenté certains types de sols peu fréquents sur le bassin, en particulier les sols bruns calcaires, localisés sur calcaire dur ou en bas de pente. Ils se caractérisent par une carbonatation de tout le profil.

1.4.3. Répartition des sols (voir fig.10)

Les sols épais (sols bruns ou bruns sur argile à chailles) sont les seuls aptes à la culture. Leur présence adoucit le relief. Ils ont été essentiellement rencontrés au nord d'une ligne Ménétru-Picarreau, comprenant la partie sud de la forêt de Poligny.

Toute la partie sud du plateau est occupée par des sols bruns moins épais et par des sols bruns à pellicules calcaires. Ces derniers se situent préférentiellement sur les sommets des buttes ou occupent des étendues au relief "moutonné", caractérisées par une végétation pauvre.

Les dépressions ou les dolines sont tapissées de sols bruns d'accumulation, généralement plus argileux ou limoneux (fig.11).

En forêt, les sols peu épais se présentent fréquemment sous forme de lésine, couverture composée de blocs affleurants de façon irrégulière. Les creux sont comblés de sols plus épais.

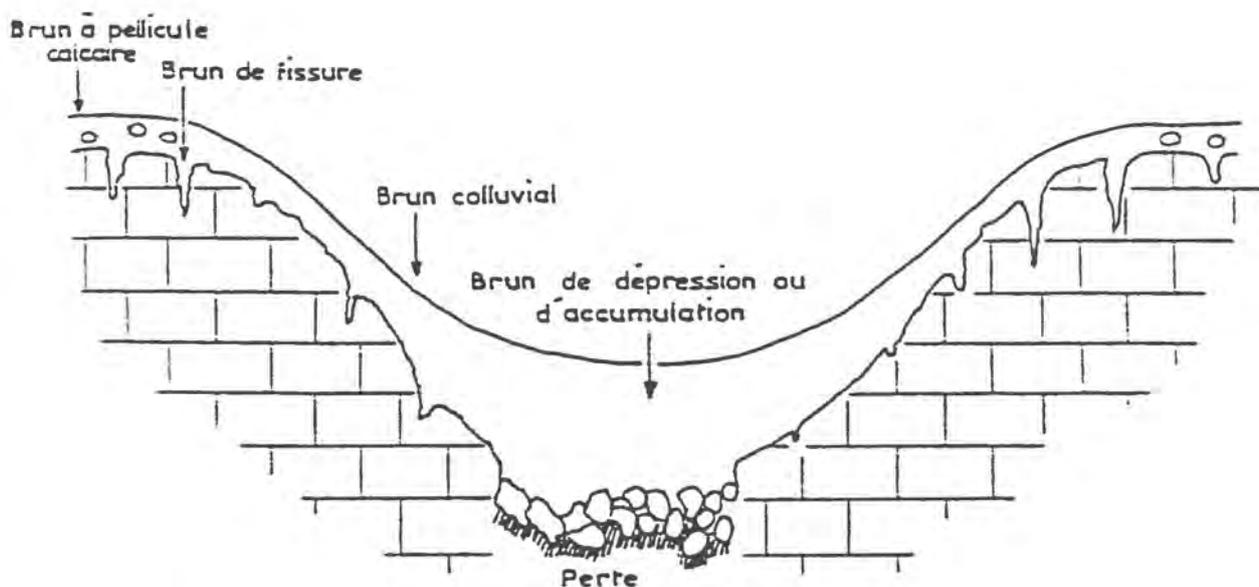


Fig. 11 - Répartition des sols dans le paysage.

1.4.4. Couverture végétale du bassin

Les forêts couvrent 45 % de la surface du bassin. D'après l'inventaire de Th. BEAUFILS (1983), les forêts communales représentent 60 % de l'ensemble, les forêts domaniales 14 % et les forêts privées 26%.

Les espèces dominantes sont le chêne pédonculé (25 %), puis le hêtre et le charme (12 et 15 %).

Le taillis sous-futaie présente un développement important (plus de 50 % de la surface boisée).

Les secteurs cultivés sont dominés par les prairies naturelles et artificielles. Les cultures, peu développées (5% de la surface totale), se localisent principalement sur les sols favorables, à l'Ouest et au Nord du plateau. Elles se composent d'orge, de seigle, de blé et de maïs.

CONCLUSION

Le Sud du plateau de Lons-le-Saunier est constitué des calcaires aaléniens, bajociens et bathoniens présentant un léger pendage vers l'Est et reposant sur un épais substratum marneux. Les faciès rencontrés se résument à une alternance de calcaires bioclastiques et de calcaires à silex. L'activité glaciaire est concentrée dans les reculées et à leur sortie.

L'histoire tectonique est liée à celle de la bordure Ouest du Jura : formation du fossé bressan et charriage Ouest-Est de la couverture sédimentaire.

La morphologie apparait conditionnée par les structures géologiques (développement des reculées) et par l'histoire quaternaire de la région (érosion glaciaire et karstique). La couverture pédologique est réduite (grande extension des sols bruns de faible épaisseur), à l'exception du Nord du plateau où les sols bruns sur argile prédominent.



CHAPITRE 2 - ETUDE DES CHAMPS DE FISSURATION ET DE PERMEABILITE

INTRODUCTION

L'objet de ce travail est une représentation cartographique des champs de fissuration et de perméabilité. L'étude a été menée essentiellement sur les reculées, dont les falaises constituent un support de choix pour l'aquisition des données : 73 stations de mesure, réparties sur une surface d'environ 20 km², ont fait l'objet des relevés.

La méthode utilisée pour les levés de terrain, ainsi que pour le traitement des données, est l'application des travaux de l'école neuchâteloise, décrits et illustrés depuis une vingtaine d'années par L.KIRALY (1969, 1978), D.JAMIER (1975)...

Le travail se décompose en 3 parties :

- la première relève de l'analyse classique de la fissuration (détermination des orientations préférentielles et des fréquences de fissuration).

- la seconde intègre une analyse qualitative (étude statistique des facteurs géographiques et géologiques susceptibles d'influencer la fréquence de fissuration) avant d'aboutir à une analyse quantitative de la fissuration (reconstitution du champ des fréquences par la méthode des variables régionalisées).

- la troisième constitue l'étude du champ des perméabilités, déterminé par les tenseurs calculés sur chaque station.

2.1. ASPECT THEORIQUE

2.1.1. Stations de mesure

Une station de mesure de la fissuration (L. KIRALY, 1969) est constituée de deux plans formant entre eux un angle aussi proche que possible de 90°. Sur chacun de ces plans, on détermine une ligne fictive oblique et on mesure toutes les fissures la recoupant. Chaque fissure fait l'objet d'une mesure d'azimut de la direction (compté à partir du Nord magnétique, de 0 à 360°) ainsi que de pendage.

Remarque : les conventions adoptées pour les mesures d'azimut de la direction en fonction du pendage sont les suivantes :

- 0 à 180° pour les fissures de pendage 90°
- pour les fissures de pendage < 90°, l'azimut retenu est celui de la convention de l'hémisphère supérieur.

(Ex : azimut N O pour un plongement Est, ou N90 pour un plongement Sud.)

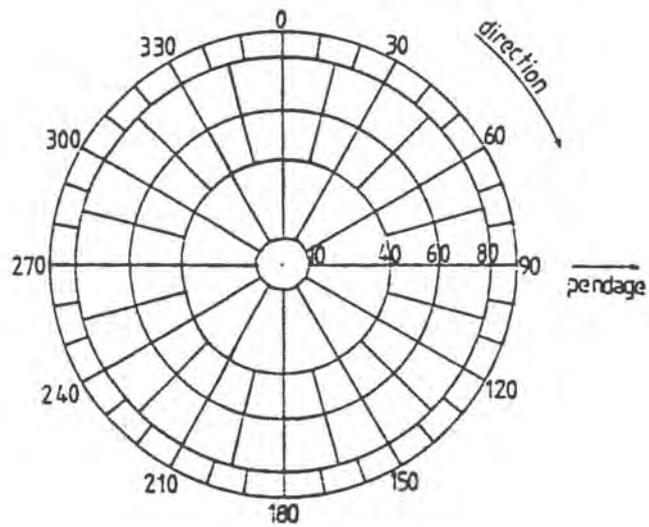


Fig. 12 - Classes de pendage et de direction du dépouillement des stations de mesure

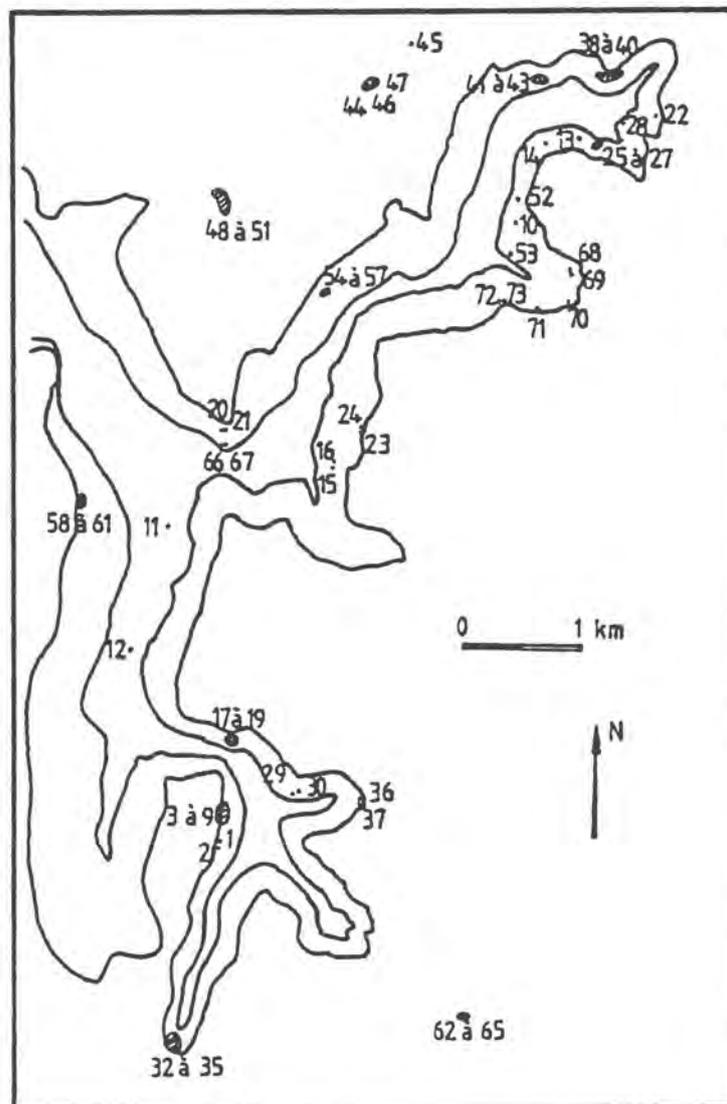


Fig. 13 - Plan d'échantillonnage de la fissuration

2.1.2. Recherche des orientations préférentielles de la fissuration

En raison du grand nombre de mesures, le traitement informatique a été préféré au dépouillement graphique classique (détermination des pôles sur canevas de Schmidt, comptage, etc...). La première étape du calcul est la recherche pour chaque station de mesure des directions préférentielles de la fissuration. La demi-sphère supérieure d'un stéréogramme de Schmidt est découpée en 97 classes de pendage et de direction (voir fig.12). Pour chacune d'elle, on calcule la valeur de la densité théorique dans le cas d'une distribution normale des fissures. La comparaison entre la densité théorique et la densité observée est effectuée au moyen du test de VISTELLIUS (1966). Les classes s'éloignant de plus de +2 écarts-type par rapport à la moyenne sont considérées par définition comme représentant une orientation préférentielle de la fissuration (un exemple est présenté en annexe 1).

2.1.3. Fréquence de fissuration

La fréquence de fissuration d'une orientation préférentielle s'exprime en nombre de fissures par mètre. Par définition, elle représente le nombre de fissures de même orientation rencontrées sur un mètre de la direction perpendiculaire de l'orientation considérée.

Elle s'exprime ainsi par :

$$F_i = \frac{d_i}{l_i \cos E_{Ci}}$$

où

- i = orientation préférentielle
- F_i = fréquence de fissuration
- d_i = nombre de fissures observées
- l_i = longueurs de la ligne de levé
- E_{Ci} = écart angulaire avec la ligne de levé

Pour chaque orientation préférentielle et pour chaque station, on dispose ainsi d'une valeur de la fréquence de fissuration.

2.2. ETUDE DE LA FISSURATION SUR LES RECOULEES DE LA SETILLE

2.2.1. Plan d'échantillonnage

La figure 13 représente le plan d'échantillonnage adopté pour l'étude : 73 stations de mesure ont été effectuées, la majorité se regroupant sur les falaises des reculées. Ce plan répond à une préoccupation essentielle, celle d'une représentativité globale vis à vis du site et de ses caractéristiques géologiques et morphologiques. Il

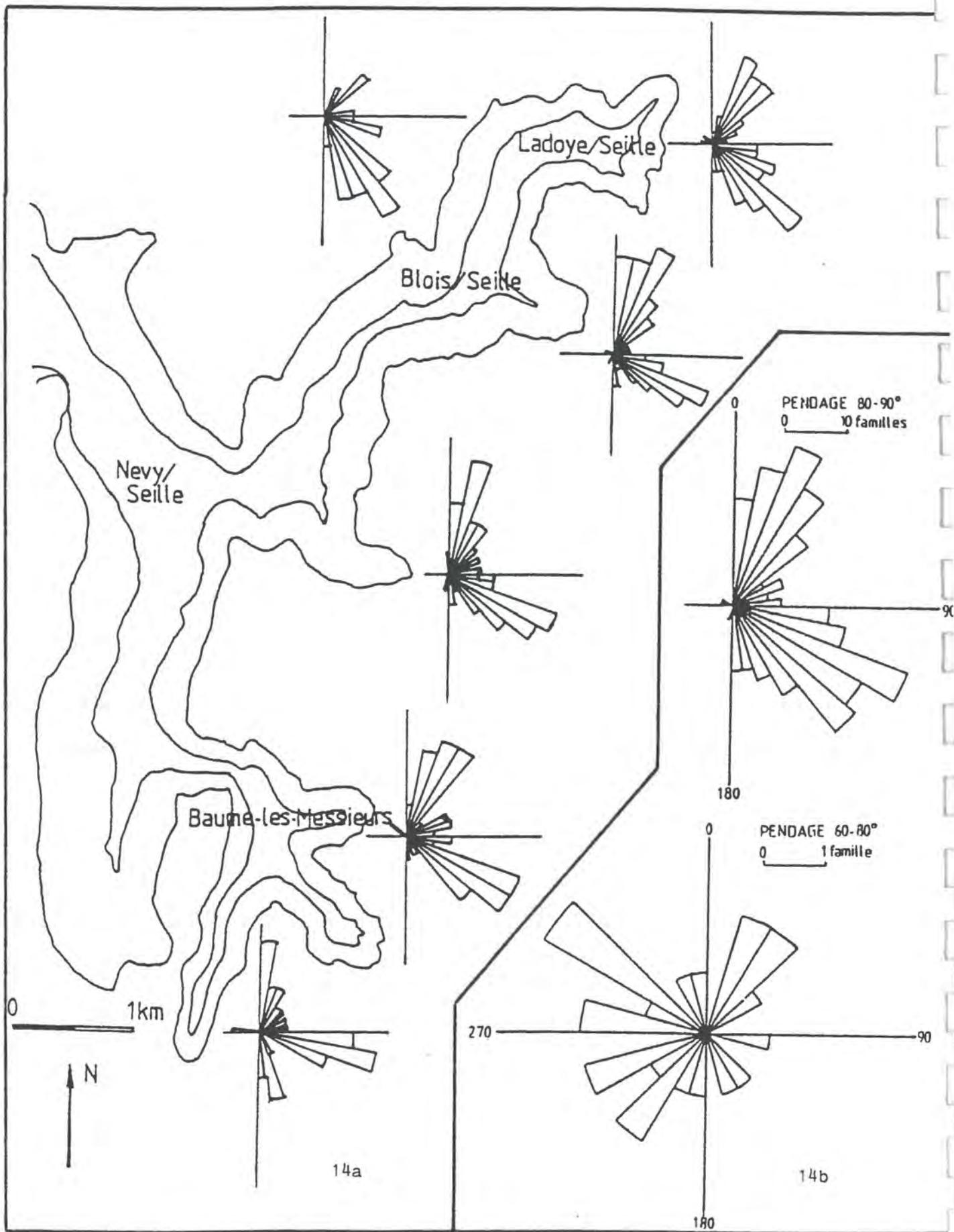


Fig. 14 - Rosaces locales (14a) et régionales (14b) de la fissuration sur stations

a donc été tenté de prendre en compte le plus grand nombre possible de situations, codifiées selon des critères que nous détaillerons au paragraphe 2.3.

2.2.2. Champ des orientations préférentielles

Le cumul des orientations préférentielles déterminées sur chaque station de mesure permettent de dresser des rosaces régionales de la fissuration. La figure 14b représente le cumul total des 73 stations de mesure pour toutes les fissures subverticales (pendage $\geq 80^\circ$), ainsi que pour les fissures de pendage $60-80^\circ$. Trois directions se dégagent de l'ensemble (fig 14b) :

- N 20-30
- N 110-120
- N 130-140

Ce résultat régional peut être précisé en discrétisant le domaine en plusieurs secteurs (fig.14a) ; les rosaces par domaine font ressortir avec une grande régularité les directions N 20-30 et N 110-120. Les secteurs les plus septentrionaux présentent néanmoins un décalage avec l'apparition de directions N 130-140 et N 140-150.

Dans la partie sud ce décalage semble inverse, avec deux directions N 0-10 et N 100-110 : il pourrait être dû au serrage maximum du faisceau lédonien.

2.2.3. Interprétation des orientations

Les directions préférentielles mises en évidence dépendent étroitement de l'histoire tectonique de la région. Rappelons en les principaux enseignements :

- un découpage du socle suivant des directions N 30 et N 130,
- un raccourcissement principal orienté N 125 (J.P. SOPENA, J.P. SOULAS, 1973) ; sur la chaîne de l'Heute, il serait de N 105-120 (M. MATHIS, 1973).

L'adéquation des résultats de la fissuration à l'histoire tectonique apparaît dès lors assez claire, les directions du socle (N 30 et N 130) ressortant nettement. En ce qui concerne la réponse à la contrainte N 110-120, on ne peut qu'émettre des hypothèses d'après des modèles théoriques ; en effet, les indices de déplacements (stries) ou les signes de contraintes (stylolithes) sont rares.

Le modèle théorique proposé est donné en fig.15.

La direction de σ_1 (raccourcissement) est soulignée par des fentes de tension transversales.

Les cisaillements sont obliques (30°) par rapport à σ_1 et induisent un déplacement.

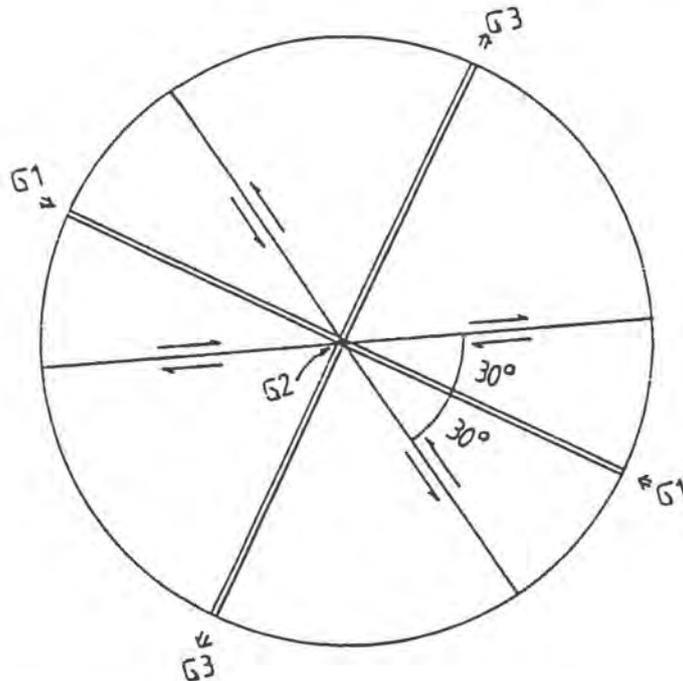


Fig. 15 - Modèle théorique de la fissuration

Un tel modèle pourrait être ajusté aux résultats de la fissuration en ne soulignant que les directions des fentes de tension. Dans ce cas, on aurait :

$$\sigma_1 = N 110-120$$

Il est donc intéressant de constater, dans cette hypothèse, la double origine de la direction N 20-30. On peut également remarquer que les directions correspondant aux cisaillements (N 90 et N 150) ne sont pas décelables, au moins à cette échelle.

2.2.4. Fréquence de fissuration

Les fréquences de fissuration ont été calculées à partir des directions préférentielles déterminées au niveau régional : N 15-35 , N 105-125 et N 125-145. Elles ont été regroupées dans le tableau 1, pour les 73 stations de mesure.

Les valeurs moyennes sont, en fissures/m, de 1.47 (N 15-35), 1.77 (N 105-125), 1.51 (N 125-145).

N°	1	2	3	N°	1	2	3	N°	1	2	3
1	2.54	1.41	1.46	26	2.64	0.87	2.63	51	0.19	0.20	0.56
2	0.78	0.61	0.24	27	1.45	3.31	4.55	52	1.35	10.6	7.79
3	0.79	1.22	0.87	28	6.87	1.16	3.84	53	1.15	2.06	4.17
4	0.63	1.36	1.11	29	1.64	6.97	4.45	54	1.00	4.18	0.58
4	0.66	1.01	0.65	30	1.40	4.87	3.02	55	0.29	0.26	0.33
6	0.71	2.17	2.13	31	3.67	2.04	0.66	56	1.09	1.13	0.38
7	3.06	1.03	0.11	32	0.16	2.20	5.66	57	1.62	0.40	0.34
8	1.87	1.07	1.75	33	1.13	0.31	0.18	58	1.14	3.90	3.08
9	1.85	0.51	0.28	34	1.08	1.53	0.62	59	1.69	0.64	2.43
10	1.54	0.96	1.27	35	1.27	2.87	0.24	60	1.10	1.62	3.30
11	0.00	0.75	0.00	36	1.20	0.95	0.65	61	2.78	1.31	1.53
12	0.45	1.57	0.00	37	1.58	1.86	1.58	62	1.55	1.39	0.00
13	3.60	9.83	6.97	38	2.50	1.84	0.68	63	0.42	1.78	0.66
14	1.93	1.42	4.40	39	0.29	0.53	1.00	64	1.62	1.18	0.32
15	1.51	3.01	1.12	40	0.94	0.12	0.27	65	0.20	1.07	0.81
16	0.85	2.34	0.17	41	2.40	1.84	2.35	66	0.96	1.12	0.21
17	1.68	1.13	1.40	42	1.84	4.68	3.12	67	2.57	1.59	0.63
18	2.11	0.64	1.49	43	2.57	2.67	1.78	68	2.71	1.44	0.23
19	0.88	2.08	1.66	44	1.01	0.24	0.39	69	0.19	1.99	0.94
20	0.89	0.37	1.18	45	0.81	0.46	0.86	70	1.37	2.28	1.85
21	0.69	0.37	0.00	46	0.57	0.15	0.15	71	1.13	1.08	2.07
22	1.20	2.68	2.18	47	2.14	0.72	1.70	72	0.73	2.90	1.37
23	5.54	1.37	1.07	48	0.20	0.00	0.26	73	1.94	0.32	0.10
24	1.76	1.75	2.51	49	0.42	0.41	1.47				
25	0.13	1.15	0.32	50	1.41	0.66	0.00				

Tabl. I - Fréquences de fissuration des 73 stations -
orientations N15-35 (1), N105-125 (2), 125-145 (3)

2.2.5. Conclusions

L'étude de la fissuration, menée sur 73 stations de mesure sur les reculées de la Seille et à leurs abords, permet de montrer qu'il existe 3 directions majeures sur la région :

N 20-30
N 110-120
N 130-140

Ces orientations se calquent aux connaissances tectoniques de la région, à savoir une direction de découpage du socle (N 30 et N 130), et une direction de raccourcissement tertiaire (N 120).

En outre, une valeur de la fréquence de fissuration peut être calculée pour chaque station et chaque orientation préférentielle.

Ce travail constitue l'étape préliminaire à l'étude de la distribution de ces fréquences dans le massif.

2.3. DISTRIBUTION DES FREQUENCES DE FISSURATION

La démarche adoptée pour l'étude de la distribution des fréquences de fissuration est double :

a) une étude qualitative

On peut en effet supposer que nombreux sont les paramètres qui interviennent dans les valeurs des fréquences, tant géologiques (lithologie, structure d'épaisseur des bancs, distance aux failles) que géographiques (station de plateau ou de falaise). Dans une première étape, nous tenterons donc d'identifier les phénomènes perturbateurs de l'homogénéité de la fissuration : un modèle de classification ou analyse de la variance a été utilisé.

b) une étude quantitative

Compte tenu des facteurs affectant l'homogénéité de la fissuration, il est ensuite possible d'élaborer des représentations cartographiques de la répartition des fréquences : des méthodes relatives aux variables régionalisées et au krigeage ont été utilisées.

2.3.1. Etude qualitative

2.3.1.1. Aspect théorique

L'influence des différents facteurs géologiques et morphologiques sur la fréquence de fissuration a été étudiée par le test statistique de l'analyse de variance (C.W.SNEDECOR, 1956, D.SCHWARTZ, 1980).

Chaque facteur comprend plusieurs modes : ainsi le facteur "lithologie" a été étudié sous les aspects "calcaire bioclastique" et "calcaire à silex" (classes 1 et 2 du tableau 2).

On sélectionne ainsi chaque station selon le mode qu'elle présente. Chaque mode constitue une classe.

On applique ensuite le test de Fischer, en calculant sa valeur F, rapport de la variance moyenne à l'intérieur des classes à la variance moyenne entre les classes.

Lorsque la valeur de F calculée est supérieure à la valeur de F tabulée, à un seuil de tolérance donné, on valide l'hypothèse proposée, dans notre exemple l'influence de la lithologie.

2.3.1.2. Application

Six critères géologiques et morphologiques ont été retenus pour le modèle de classification. Le tableau 2 résume ces facteurs et les classes adoptées .

facteur	classe 1	classe 2	classe 3
Lithologie	calcaire bioclastique	calcaire à silex	-
Distance aux failles	proche (<100m)	moyenne (100m à 1 km)	lointaine (> 1 km)
Position dans la falaise	plateau et haut de falaise	pied et milieu de falaise	-
Stratification	régulière	entrecroisée	-
Epaisseur des bancs	peu épais	épais	-
Régularité des bancs	irréguliers ou peu marqué	moyen	régulier ou bien marqué

tabl.2 - facteurs et modes de l'analyse de variance

Une fois défini le mode opératoire de l'analyse de variance, à savoir les hypothèses que l'on se propose de vérifier ou d'infirmer, l'application est effectuée sur chacune des orientations préférentielles ou classe de direction de la fissuration.

Neuf classes de direction et de pendage ont fait l'objet de l'analyse. Les résultats du test de Fischer sont rassemblés dans le tableau 3.

On constate que la position des stations dans la falaise influence la fréquence de fissuration (familles subverticales majeures). Les différences de lithologie n'affectent que la famille N 105-125 et deux familles de pendage 60-80 (N 270-285 et N 300-315).

Ce type d'anomalie a été montrée dans des études sur le Jura neuchâtelois (Y. ROSSIER, P. WEXSTEEN, 1988), (Y. ROSSIER, 1986). On peut cependant souligner qu'aucune influence de la distance des stations aux failles n'a pu être mise en évidence ici, contrairement à l'exemple de la "vue des Alpes" (Y. ROSSIER, 1986), ou du plateau d'Ornans (G.FORESTIER, C.VEREZ, 1978).

Les résultats de l'analyse de variance nous amènent donc à scinder le domaine initial en sous-domaines aux caractéristiques homogènes. Ainsi, la répartition des fréquences de fissuration de la famille N 15-35 sera envisagée suivant la position des stations dans la falaise. Les sous-domaines définis feront séparément l'objet de l'étude quantitative, que constitue la représentation cartographique du champ des fréquences.

Caractères	Distance aux failles	Lithologie	Position dans la falaise	Régularité des bancs	Epaisseur des bancs	Stratification
N15-35 p.80-90	NS	NS	S 5%	NS	NS	NS
N105-125 p.80-90	NS	S 5%	S 5%	NS	NS	NS
N125-145 p.80-90	NS	NS	S 1%	NS	NS	S 5%
N170-180 p.80-90	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N20-40 P.60-80	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N210-225 p.60-80	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N240-255 p.60-80	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N270-285 p.60-80	NS	S 5%	NS	S 5%	NS	NS
N300-315 p.60-80	NS	S 1%	NS	S 1%	NS	S 5%

Tableau 3 : Tests de Fischer

NS : tests pour lesquels $F \text{ tabulé} > F \text{ calculé}$: on admet l'homogénéité de la région vis à vis de l'orientation et du caractère testés.

S 5% ou S 1% : tests pour lesquels $F \text{ calculé} > F \text{ tabulé}$ aux seuils correspondants : on rejette l'hypothèse d'homogénéité

2.3.2. Etude quantitative

2.3.2.1. Aspect théorique

La méthode utilisée relève de la technique des variables régionalisées, désormais connue (G. MATHERON, 1962, A. GUILLAUME, 1977). La démarche présente deux aspects :

1) la construction des variogrammes, qui permet de visualiser dans l'espace la structure d'un phénomène. Dans notre cas, il s'agit de déterminer l'évolution de la variable "fréquence de fissuration" dans l'espace, à partir d'un point donné connu.

2) le krigeage permet, d'après les variogrammes définis précédemment, d'attribuer une valeur à la fréquence de fissuration en tout point du domaine étudié. Le krigeage établit donc, pour chaque sous-domaine de fissuration homogène, une carte de l'isodensité de la variable "fréquence de fissuration".

Le traitement statistique a été effectué par informatique (programme BLUEPACK) au Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (Suisse).

2.3.2.2. Application et résultats

1 - Les variogrammes

Pour chaque orientation préférentielle et chaque sous-domaine homogène, le variogramme est calculé par le programme. Un exemple est donné en figure 17, portant en abscisse la distance en km et en ordonnée la fonction variogramme $\gamma(h)$. Les traits en pointillés représentent le variogramme expérimental et le trait en continu le modèle théorique pouvant s'ajuster à la courbe expérimentale.

Dans l'exemple présenté, le modèle théorique révèle une structure sphérique, retrouvée sur tous les variogrammes (fig.16).

Les enseignements apportés par les variogrammes sont de 3 ordres:

- le fort effet de pépité à l'origine, conséquence du faible nombre de points de mesure,
- la variance du système est atteinte très rapidement la portée n'excède pas 1000m, voire 500m pour d'autres cas,
- en conséquence de la remarque précédente, il n'existe pas de structure établie sur de plus grandes distances : les stations éloignées de plus d'un kilomètre sont indépendantes vis à vis de leur fréquence de fissuration, qui se révèle alors variable aléatoire.

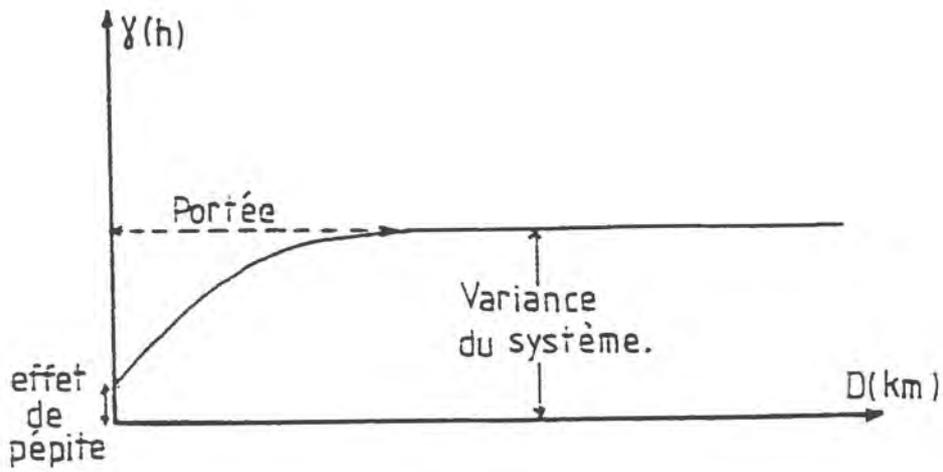


Fig. 16 - Modèle théorique de variogramme : la structure sphérique

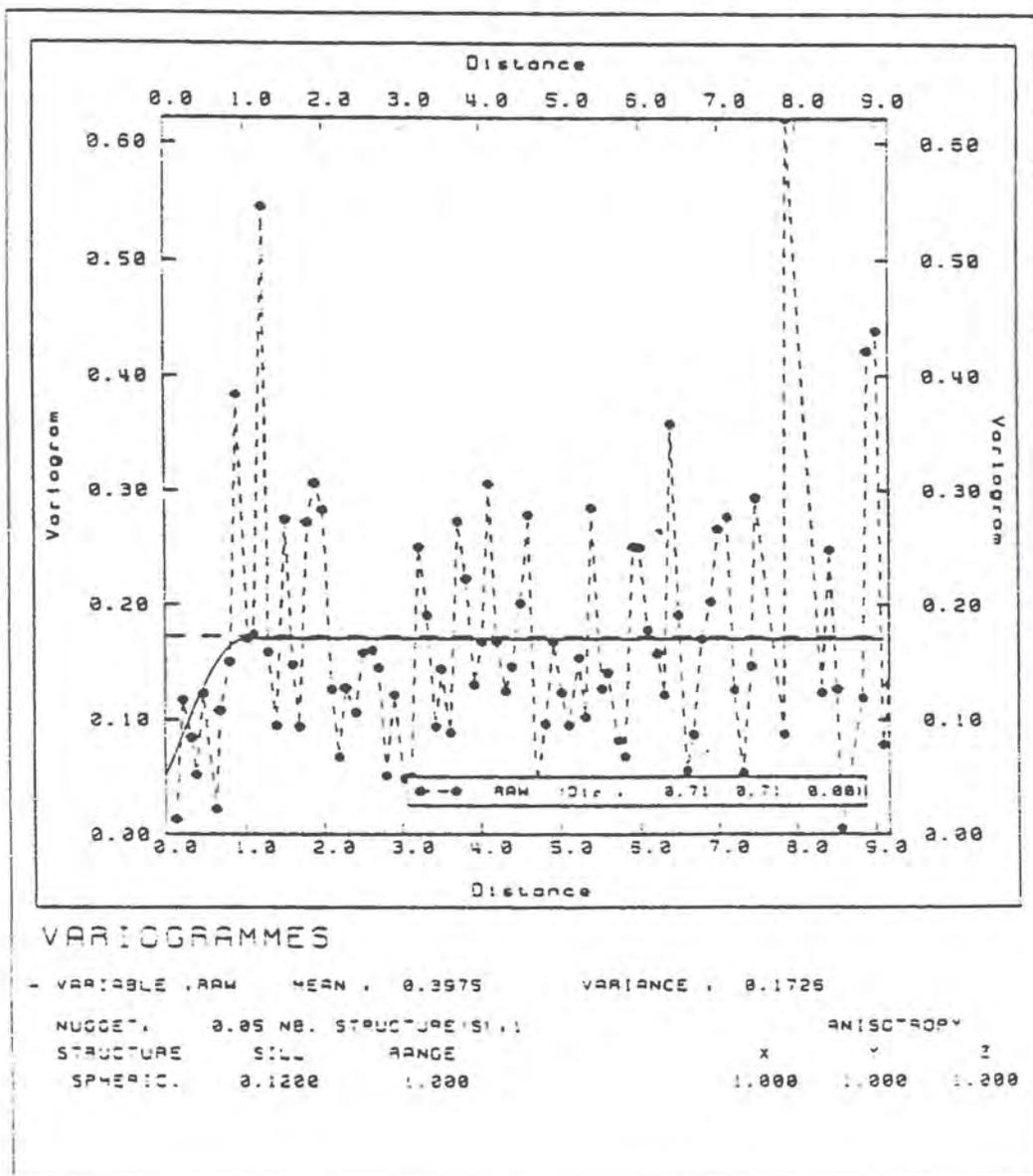


Fig. 17 - Variogramme expérimental

2- Cartographie krigée

Le support de calcul du krigeage est constitué par les variogrammes et les valeurs de fréquence en chaque station. Le krigeage fournit deux types de documents :

- une carte isofréquence de la fissuration, pour chaque orientation et chaque sous-domaine homogène,
- une carte de l'erreur associée en tout point.

Cette erreur est nulle aux points de mesure, elle s'accroît avec l'éloignement des stations.

Nous présentons ici 4 exemples de cette reconstitution du champ des fréquences sur les reculées de la Seille (fig.18), les autres figurant en annexe 2. Les valeurs des fréquences de fissuration sont exprimées en fissures/m, ainsi que les valeurs de l'erreur associée.

En théorie, on peut dresser une carte pour chaque orientation préférentielle et chaque sous-domaine mis en évidence par l'analyse de variance ; en pratique, certains sous-domaines ne possèdent que peu ou pas du tout de stations. Par exemple, la famille N 125-145 a été traitée en sélectionnant les stations selon leurs caractéristiques :

- stations de bas et milieu de falaise, calcaire bioclastique
- stations de haut de falaise et plateau, "
- stations de bas et milieu de falaise, calcaire à silex
- station de haut de falaise et plateau, "

Ce dernier sous-domaine ne regroupe aucune station.

D'autres sous-domaines ne possèdent que peu de stations ; l'interprétation de la cartographie devient alors délicate en raison de la trop faible densité des points de mesure.

Les cartographies obtenues sont étroitement liées aux variogrammes précédemment calculés : l'absence de structure à longue portée se retrouve sur les cartes où la majorité d'entre elles présente des "pôles" de fissuration plus intenses, sans aspect de structure d'ensemble.

L'interprétation des différentes cartes est donc basée sur la répartition de ces pôles de fissuration. Il convient néanmoins de vérifier qu'un nombre suffisant de stations assure la crédibilité de l'interprétation. Une station isolée ne reste en effet représentative que d'elle-même, et l'on ne saurait généraliser l'information dont elle est porteuse, en raison de l'indépendance des fréquences de fissuration à l'échelle kilométrique.

Les deux cartes relatives à la famille N 15-35 (fig.18a : bas et milieu de falaise, fig.18b : haut de falaise et plateau) ne présentent pas les mêmes pôles de fissuration.

La première montre deux pôles centrés sur l'extrémité de la reculée de Ladoye et à l'entrée du défilé de Baume-les-Messieurs. La seconde fait ressortir l'entrée de la reculée du Dard et la reculée nord entre Nevy et Blois.

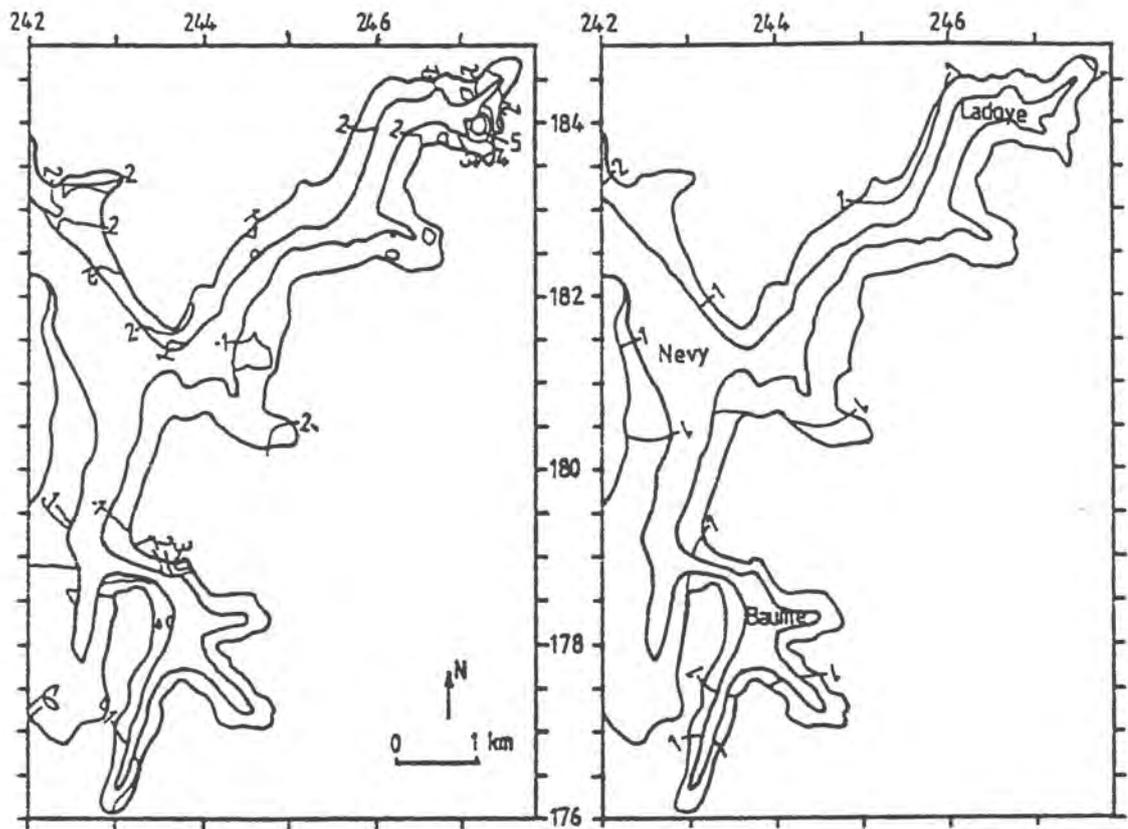


Fig. 18a- Carte en isofréquence (fissure m^{-1})

Carte de l'erreur

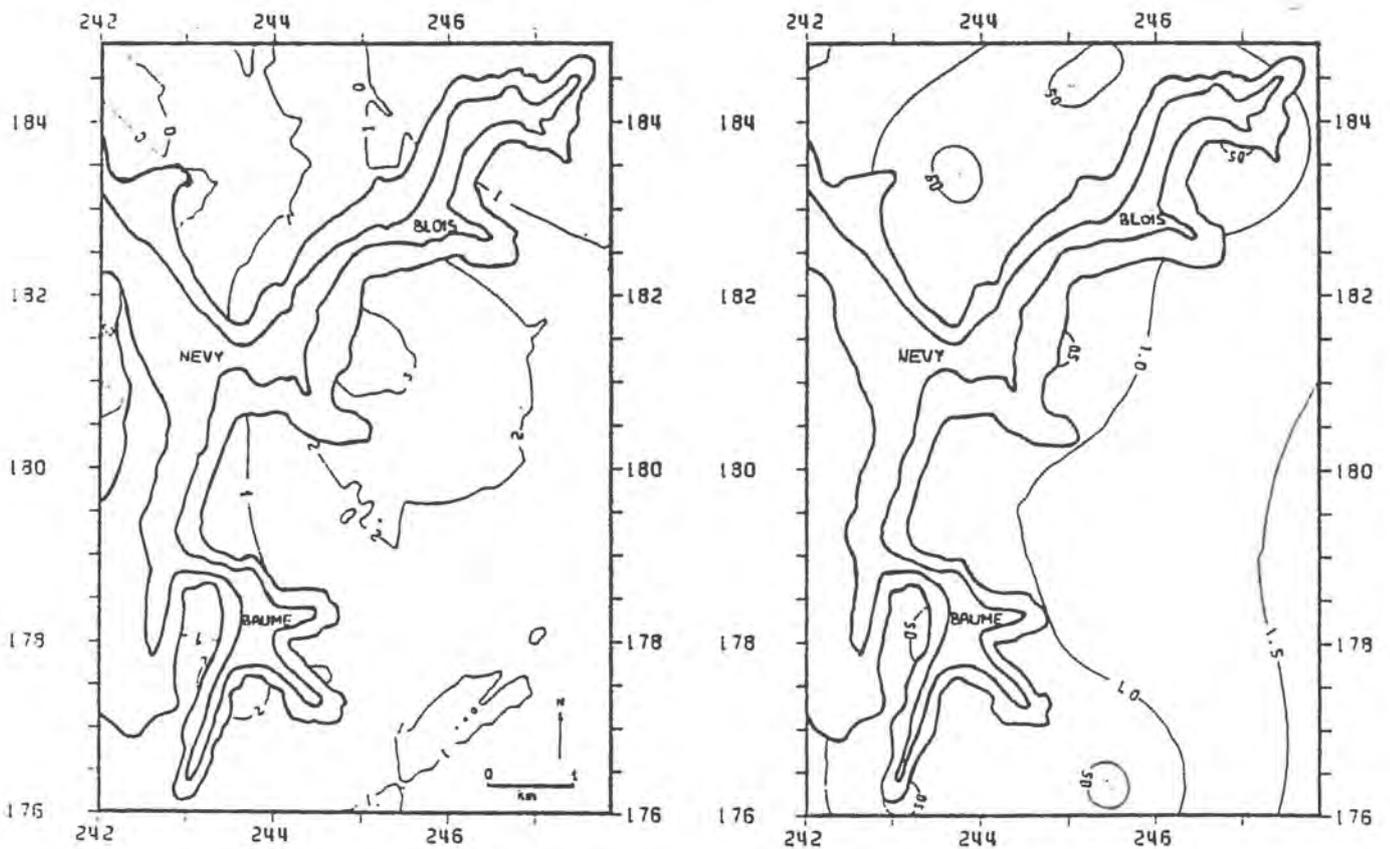


Fig. 18b- Carte en isofréquence

Carte de l'erreur

Fig. 18 - Cartographie krigée ; orientation 15-35, pendage 80-90
 18a : Pied et milieu de falaise, 18b : haut de falaise et plateau

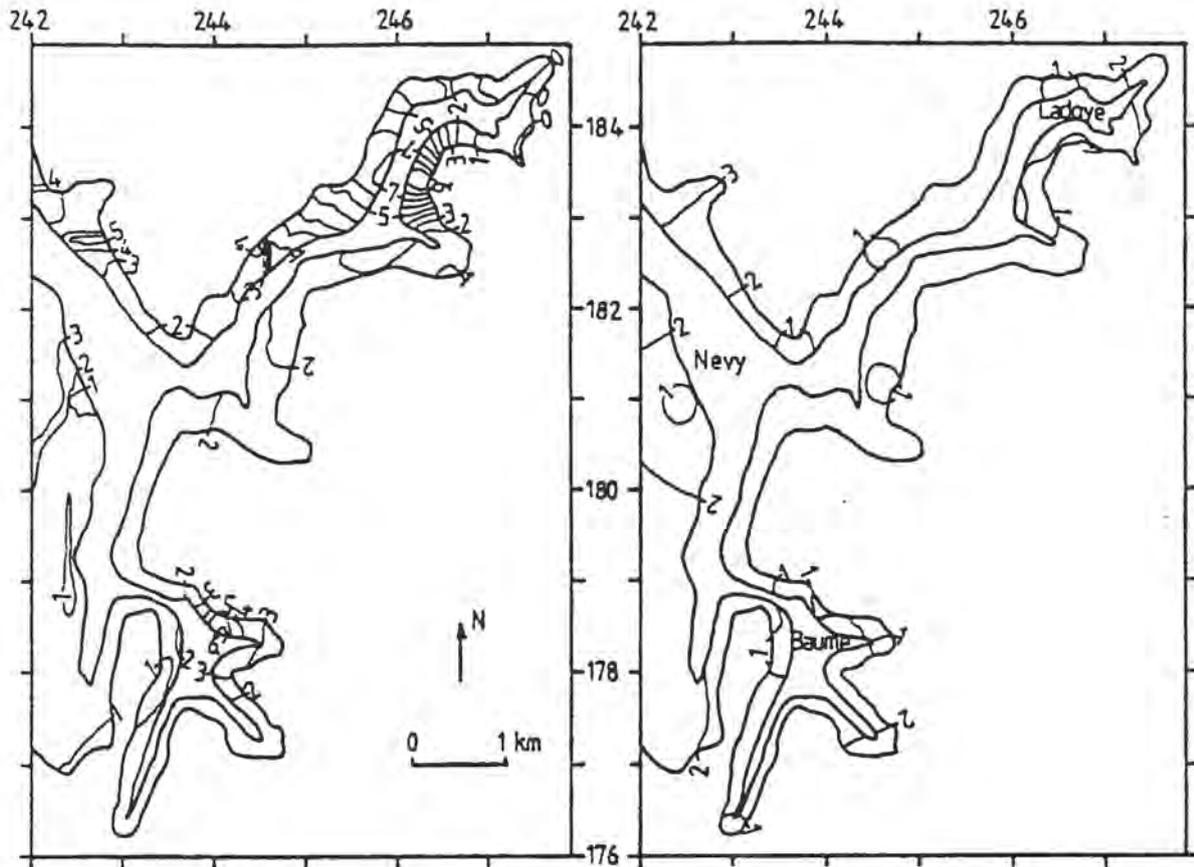


Fig. 18c : Carte en isofréquence

Carte de l'erreur

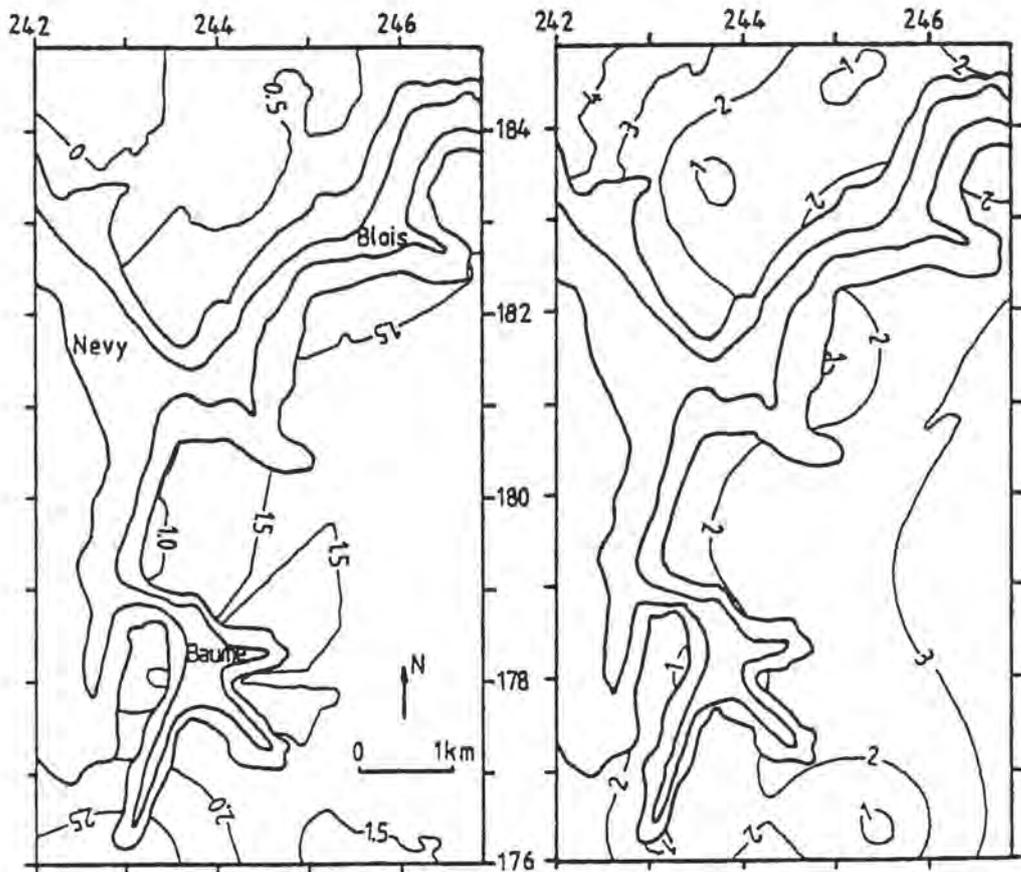


Fig. 18 d - Carte en isofréquence

Carte de l'erreur

Fig. 18 - Cartographie krigée ; orientation N 105-125, pendage 80-90

18c : Calcaire bioclastique , pied et milieu de falaise

18d : Calcaire bioclastique, haut de falaise et plateau

Les deux cartes relatives à la famille N 105-125, calcaire bioclastique (fig.18c : bas et milieu de falaise, fig.18d : haut de falaise et plateau) montrent un axe préférentiel de fissuration situé respectivement :

- sur le village de Baume-les-Messieurs et la reculée Nord entre Blois et Ladoye.
- sur les grottes du Dard et d'une façon générale le plateau à l'est des reculées.

Pour des raisons d'interprétation évoquées précédemment, la synthèse globale des résultats reste difficile à faire. On ne peut donc formuler qu'un jugement qualitatif général ; les secteurs les plus fissurés apparaissent donc localisés :

- à l'extrémité des reculées (Dard, Ladoye)
- aux points de ramification des reculées (Baume-les-Messieurs, Ladoye).

2.3.3. Conclusion

Le krigeage permet de déterminer, pour chaque orientation préférentielle et chaque sous-domaine homogène, une valeur de la fréquence de fissuration en tout point du massif. Conformément aux enseignements apportés par la construction des variogrammes, l'évolution de la fréquence de fissuration dans l'espace possède un caractère aléatoire, au moins à l'échelle plurikilométrique.

Les différentes cartographies établies présentent l'avantage d'étudier séparément chaque direction préférentielle et chaque critère géographique ou morphologique ; en revanche, elles ne permettent pas une synthèse générale des données qui pourrait s'exprimer sous une forme cartographique simple.

L'étude d'une autre variable, la perméabilité, issue des données de la fissuration, va nous permettre la réalisation de cette synthèse.

2.4. ETUDE DU CHAMP DES PERMEABILITES

2.4.1. Aspect théorique

Les équations de base de l'écoulement en terrain anisotrope sont données par :

- SCHEIDEGGER (1960), LIAKOPOULOS (1965) : les champs vectoriels vitesse de filtration (\vec{v}) et pertes de charge (grad \vec{J}) sont liés par un champ tensoriel K :

$$\vec{v} = \bar{k} \text{ grad } \vec{J}$$

- WITKE et LOUIS (1968) : dans une fissure d'ouverture d, l'écoulement se fait dans une direction \vec{J}_p avec une vitesse moyenne \vec{v}_m :

Fig. 19 - Décomposition du vecteur de filtration (L. KIRALY, 1978)

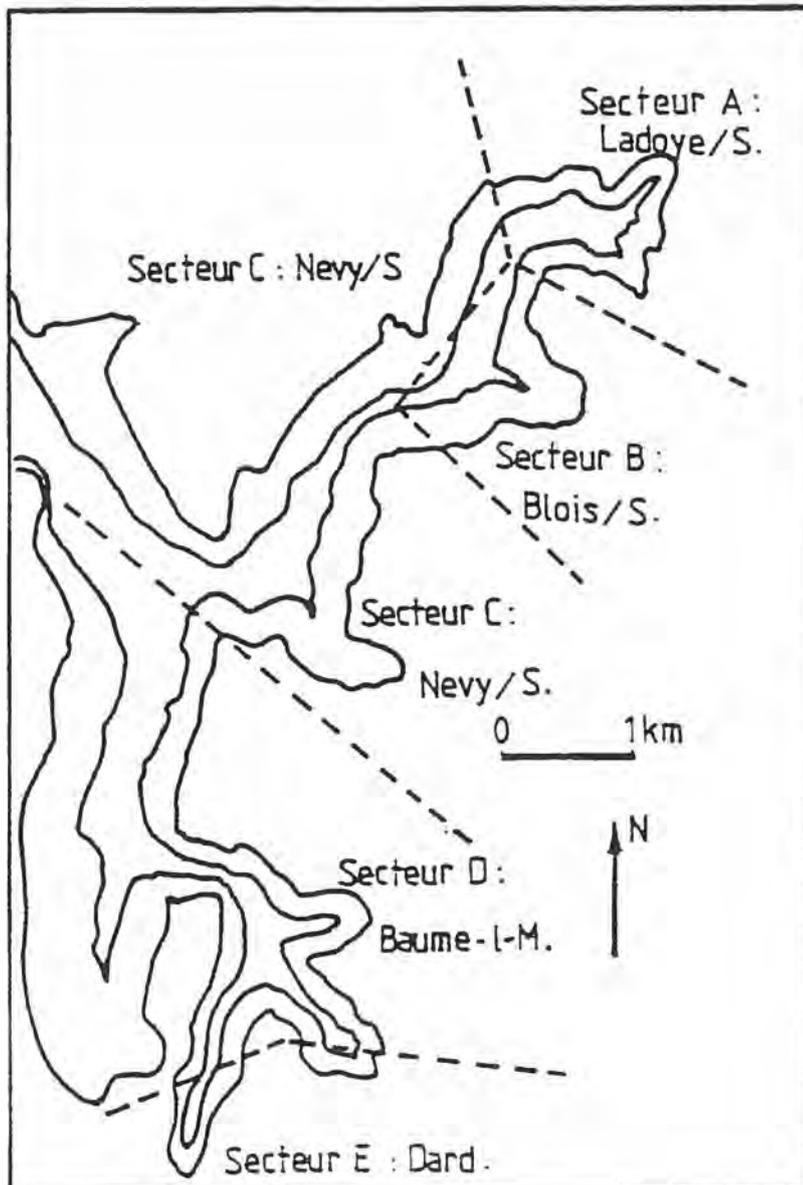
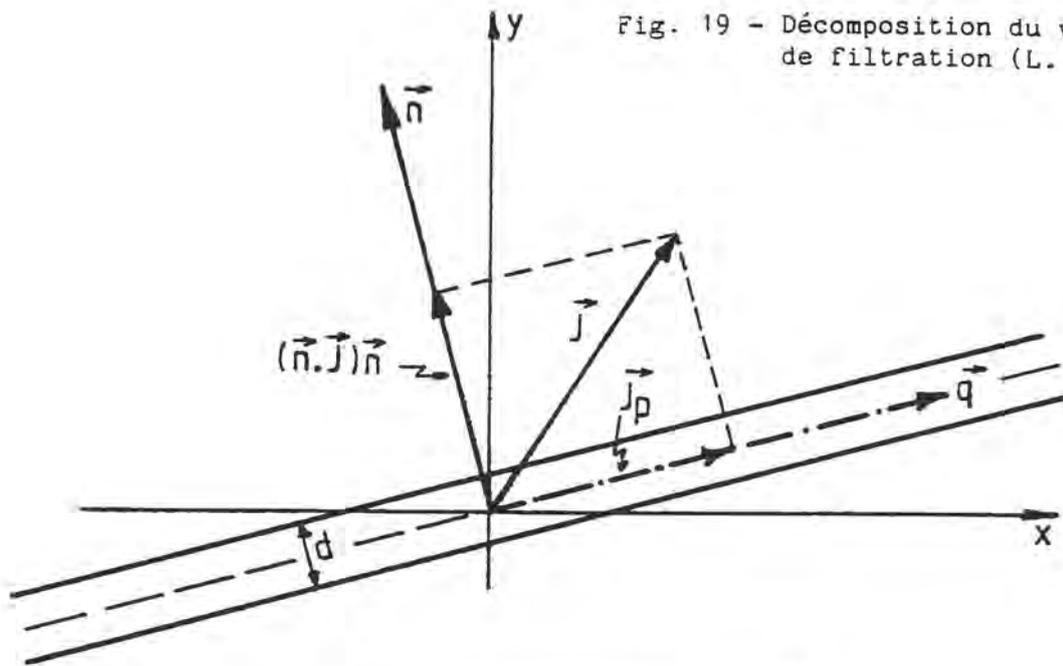


Fig. 20 - Zonation du champ d'étude (calcul de perméabilité)

$$\vec{V}_m = \frac{g}{12\eta} \cdot d^2 \cdot \vec{J}_p$$

Le vecteur \vec{J}_p pouvant se décomposer suivant le gradient général \vec{J} et la normale \vec{n} des fissures $\vec{J}_p = I - \vec{n} * \vec{n} \cdot \vec{J}$, (fig.19, d'après L. KIRALY, 1978).

En multipliant par la section d'écoulement effective $f_i \cdot d_i$, où f_i est la fréquence de fissuration de la direction i , on obtient le vecteur vitesse de filtration \vec{V} (L. KIRALY, 1969) :

$$\vec{V} = \frac{g}{12\eta} \cdot f_i \cdot d_i^3 (I - \vec{n} * \vec{n}) \cdot \vec{J}$$

On en tire l'expression du tenseur de perméabilité \bar{K} :

$$\bar{K} = \frac{g}{12\eta} \cdot f_i \cdot d_i^3 (I - \vec{n} * \vec{n})$$

Pour N systèmes de fissures de fréquences respectives F_i et d'ouverture d_i , il suffit de sommer les tenseurs :

$$\bar{K} = \frac{g}{12\eta} \sum_{i=1}^{i=N} F_i \cdot d_i^3 (I - \vec{n}_i * \vec{n}_i)$$

2.4.2. Calcul du tenseur de perméabilité

Le tenseur de perméabilité est connu lorsque les paramètres orientation des fissures, fréquence de fissuration et ouverture des fissures sont déterminés.

Si les deux premiers termes (orientation et fréquence) ont été calculés lors de l'étude de fissuration, la connaissance de l'ouverture des fissures pose en revanche plus de problèmes. Outre la difficulté de mesure de l'ouverture des fissures sur le terrain, la décompression et l'altération superficielle rendent les mesures peu représentatives du milieu fissuré en profondeur.

Il convient cependant de connaître ce paramètre afin de calculer le tenseur de perméabilité : ceci nous amène donc à formuler sur les ouvertures des hypothèses simplificatrices (Y. ROSSIER, N. SANDMEIER, 1983).

Nous avons repris la démarche de ces deux auteurs, en l'adaptant aux contraintes et aux connaissances dont nous disposons sur les reculées de la Seille.

2.4.2.1. Calcul des ouvertures de fissures

La méthode de calcul des ouvertures de fissures est la suivante :

- à partir du débit fourni par les sources de la Seille, retrouver la perméabilité équivalente du milieu poreux par l'application de la loi de Darcy,

- à partir de cette perméabilité équivalente, calculer l'ouverture moyenne des fissures par la formule de L. KIRALY développée précédemment.

a- Calcul des perméabilités équivalentes

Pour le calcul de ces perméabilités, les reculées de la Seille ont été divisées en cinq tronçons (fig.20) afin de tenir compte du maximum d'informations hydrologiques dont nous disposons (voir partie hydrologie). Pour chaque tronçon, le débit moyen est connu.

On applique ensuite la loi de Darcy : $Q = SKi$

$$\text{d'où } K = \frac{Q}{S \cdot i}$$

Sur chaque tronçon des reculées, le calcul est fait avec :

Q = débit d'exhaure moyen de la zone

S = surface d'interception des falaises

i = gradient maximum : 1 par définition, le gradient réel étant inconnu.

On obtient ainsi des valeurs de K minimales, puisque i est maximum.

b) calcul des ouvertures moyennes

$$\text{Puisque } K = \frac{g}{12\gamma} d^3$$

$$d = \frac{K \cdot 12\gamma^{1/3}}{g}$$

Le tableau 4 résume les données de calcul sur les cinq tronçons considérés : on constate ainsi que les perméabilités équivalentes minimisées varient relativement peu d'une zone à une autre ($K = 0.81$ à $3.21 \cdot 10^{-6}$ m/s), ainsi que les ouvertures moyennes en conséquence ($d = 1.09$ à $1.72 \cdot 10^{-4}$ m).

c) Répartition des ouvertures selon les directions

A partir de l'ouverture moyenne des fissures déterminées précédemment, on peut envisager deux hypothèses :

secteur	A	B	C	D	E	
Q(m ³ /s)	1.125	0.270	0.855	1.73	0.520	E=4.50m ³ /s
S(10 ⁵ .m ²)	3	2.25	10.5	8.75	3.5	E=28.10 ⁵
K(10 ⁻⁶ .m/s)	3.21	1.2	0.81	1.98	1.48	
d(10 ⁻⁴ m)	1.72	1.20	1.09	1.47	1.33	

Tab.4 - Données du calcul des ouvertures de fissures

- accorder à toutes les fissures la même ouverture quelque soit leur orientation ;

- répartir différentiellement cette ouverture selon les directions des fissures ; cette distinction peut alors se fonder sur des critères tectoniques (jeu de fractures ayant joué en distension ou en compression) ou hydrologiques (directions préférentielles des réseaux de galeries karstiques par exemple).

Nous avons retenu cette seconde solution comme hypothèse de travail.

Le tableau 5 résume les ouvertures adoptées selon les directions, pour chaque tronçon de la zonation. De manière synthétique, les directions suivantes ont été privilégiées :

secteur	A	B	C	D	E
N 0-10	30	10	5	10	20
N 10-20	10	15	15	20	10
N 20-30	5	25	15	20	0
N 30-40	30	10	10	7	0
N 40-50	40	5	5	0	0
N 50-60	0	0	5	5	0
N 60-70	0	0	0	5	0
N 70-80	0	0	0	0	0
N 80-90	0	0	0	5	10
N 90-100	0	0	0	10	30
N 100-110	10	10	5	10	10
N 110-120	10	20	10	30	8
N 120-130	5	20	5	20	5
N 130-140	7	5	5	5	10
N 140-150	25	0	10	5	0
N 150-160	0	0	10	0	0
N 160-170	0	0	0	0	15
N 170-180	0	0	9	5	15
Σdi	172	120	109	147	133

Tab.5 - Hypothèses des ouvertures de fissures (10⁻⁶ m)

- N 100-130 : axe de raccourcissement principal et direction de socle,
- N 0 - 30 : axe de direction du socle susceptible d'avoir rejoué et d'entraîner la dissolution (les directions des rejeux déterminent fréquemment les directions d'écoulement, J.C. GRILLOT, 1979).

Plus localement, en fonction des directions principales observées dans les réseaux karstiques (voir chapitre suivant), nous avons attribué une épaisseur plus importante aux directions :

- N 30-50
- N 80-100
- N 140-160
- N 170-180

2.4.2.2. Champ des orientations et des fréquences

Le calcul du champ des orientations et des fréquences est effectué pour chaque direction préférentielle mise en évidence sur chaque station de mesure.

Le champ des orientations s'obtient en exprimant en coordonnées rectangulaires (système d'axes x, y, z) le pôle de chaque groupe d'orientation, défini par une direction et un pendage.

Le champ des fréquences est celui défini lors du calcul des fréquences de chaque direction préférentielle pour chaque station.

2.4.2.3. Tenseurs de perméabilité

Les 73 tenseurs de perméabilité correspondant aux stations de mesures peuvent être calculés. Sous leur forme brute, une matrice à 9 termes, ils ne sont pas directement exploitables. Il convient alors de calculer :

- les valeurs propres du tenseur, représentant les modules des perméabilités principale, secondaire et intermédiaire,
- les vecteurs propres du tenseur, qui correspondent aux directions principale, secondaire et intermédiaire de la perméabilité.

2.4.3. Analyse des perméabilités

L'analyse des perméabilités a donc été effectuée en termes de :

- modules de perméabilités
- orientation des perméabilités

Les résultats pourront ensuite être synthétisés par l'étude de la conductivité hydraulique et des directions d'écoulement.

2.4.3.1. Valeurs des perméabilités

Les perméabilités principales présentent des valeurs faibles :

$$K1 = 3.79.10^{-8} \text{ m/s en moyenne}$$

Perméabilité secondaire moyenne :

$$K2 = 4.27.10^{-9} \text{ m/s}$$

On notera également dans les deux cas, l'importante dispersion des valeurs (fig.21), qui varient dans un rapport de 10^6 . La majorité des valeurs se situe néanmoins dans un rapport de 1 à 1000.

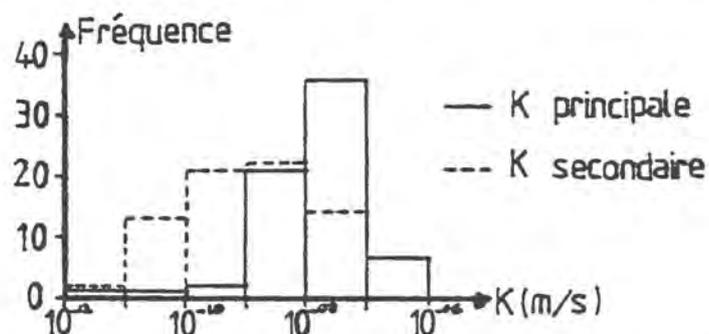


Fig. 21 - Dispersion des modules de perméabilité

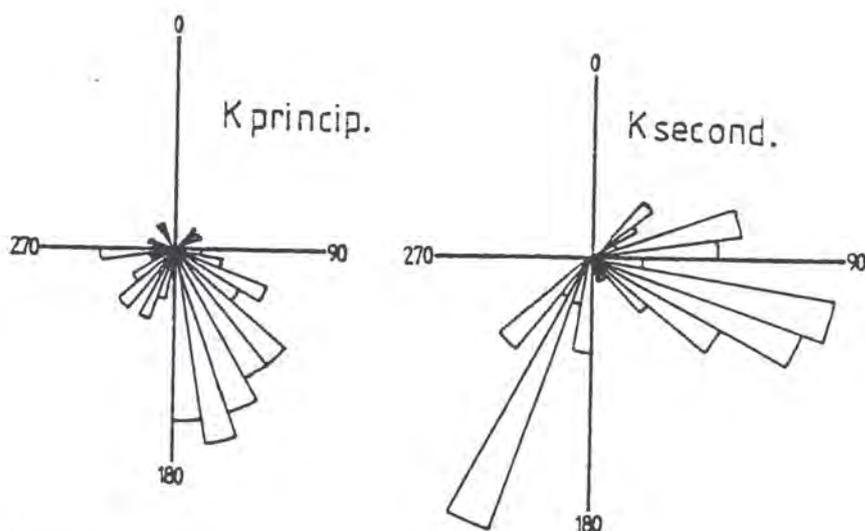


Fig. 22 - Dispersion des orientations de perméabilité

2.4.3.2. Orientation des perméabilités

La figure 22 résume les dispersions des orientations des perméabilités principale et secondaire, dont les distributions sont relativement larges :

- pour les perméabilités principales, la majorité des stations s'inscrit dans un intervalle N 130-180,
- les perméabilités secondaires sont principalement comprises dans des intervalles N 100-120 et N 200-210.

L'orientation des perméabilités principales (K3) forme un angle de 90° avec l'horizontale, celle des perméabilités secondaires (K1) et intermédiaire (K2) un angle de 0°.

La dispersion autour de ces valeurs est faible.

Ces données peuvent être synthétisées par le calcul d'un tenseur régional, dont les valeurs et les vecteurs propres sont les suivants :

K1 = 1.23 10 ⁻⁸ m/s	Direction N 135	Pendage 0°
K2 = 2.34 10 ⁻⁸ m/s	Direction N 45	Pendage 0°
K3 = 3.55.10 ⁻⁸ m/s	Direction N 149	Pendage 90°

2.4.3.3. Cartographie du champ des perméabilités

La cartographie des perméabilités impose l'utilisation d'un paramètre synthétique : nous avons utilisé la valeur de la conductivité hydraulique :

$$K = \sqrt{K1^2 + K2^2 + K3^2}$$

définie à partir des valeurs propres K1, K2, K3, calculées auparavant sur chaque station de mesure.

Les valeurs de K ainsi établies sont regroupées dans le tableau 6. De la même manière que pour les perméabilités principales, elles sont largement dispersées (de 1.6.10⁻¹² à 5.5.10⁻⁷ m/s).

La valeur moyenne est de 4.8.10⁻⁸ m/s.

La cartographie a été effectuée de deux façons :

- par interpolation linéaire
- par variogramme et krigeage

Ce traitement a été réalisé au centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, à l'aide du programme UNIRAS, opérationnel sur le système VAX.

CHIN - TROUSIER M. SALLERVILLE, 04/11/70

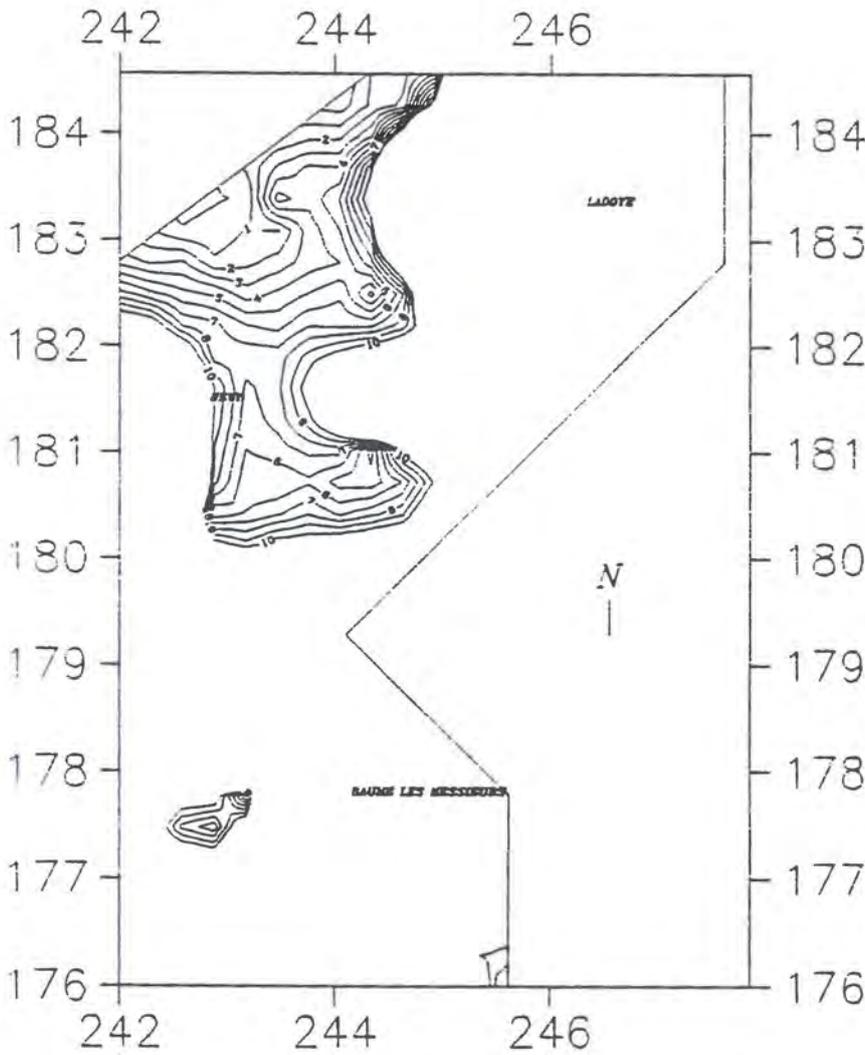


Fig. 23a-

PERMEABILITE [M/S]
(* 10-9)

RECULEES DE LA SEILLE

CLASSE 1 A 10 m/s 10-9

Coordonnees LAMBERT

CHIN - TROUSIER M. SALLERVILLE, 04/11/70

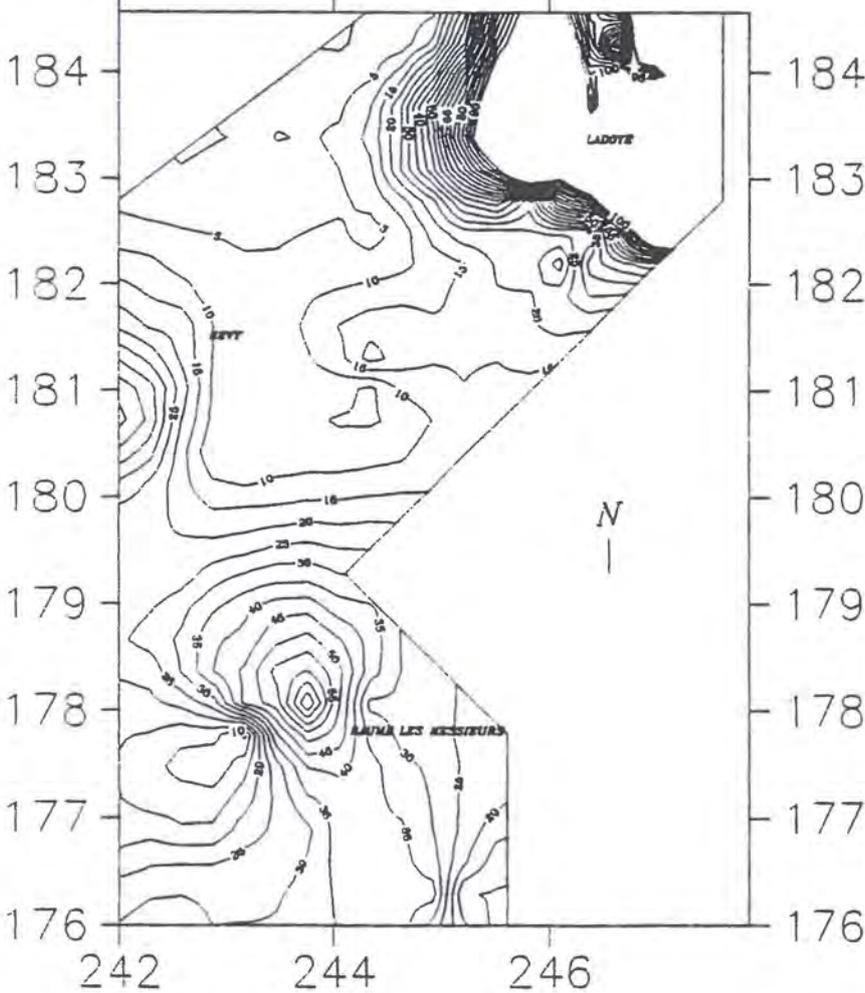


Fig. 23b-

PERMEABILITE [M/S]
(* 10-9)

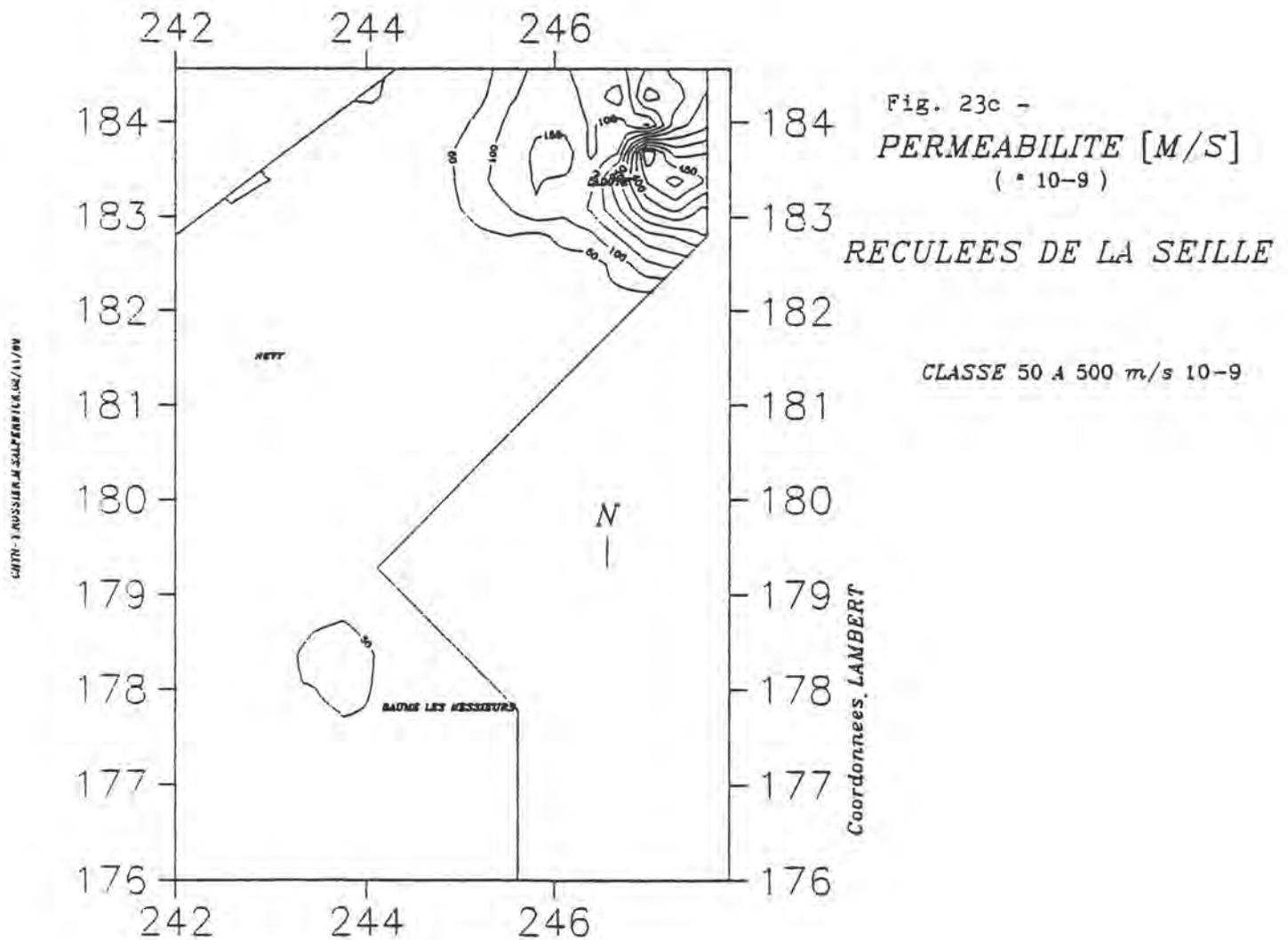
RECULEES DE LA SEILLE

CLASSE 10 A 100 m/s * 10-9

Coordonnees LAMBERT

7.3060402E-09	4.7581752E-09	4.0724036E-08	7.8534775E-08
7.4713256E-11	4.8821320E-09	1.5927557E-12	1.7418119E-08
3.2511871E-08	3.7858943E-08	2.1025976E-07	4.4503555E-08
1.9033639E-07	2.3923201E-08	4.3571191E-08	4.7825679E-08
1.5223669E-10	2.0343213E-08	1.3093391E-07	4.0534569E-08
5.3916480E-08	1.7953128E-09	1.4710180E-09	4.9230561E-08
3.2598123E-08	3.0265025E-07	3.9950279E-09	1.0300920E-08
9.2981767E-10	1.0199422E-07	1.9838005E-09	2.2403233E-08
1.5480426E-08	5.4894707E-07	3.2551357E-09	4.8649098E-09
7.2730724E-09	2.6194963E-08	1.6456806E-09	1.1335005E-08
5.1865428E-09	1.2374375E-07	2.3041920E-10	1.7003943E-08
2.0362071E-08	6.7332103E-08	5.4565206E-09	3.2544214E-08
7.1572387E-08	5.5988775E-08	1.1321242E-10	3.7653209E-08
1.8353975E-07	1.8988789E-08	1.4719464E-07	1.2483500E-08
5.3871174E-09	4.6757247E-08	3.2577734E-08	1.7222607E-08
1.8277579E-09	2.6391040E-09	9.3185415E-09	
1.7911201E-08	2.5026500E-08	2.2921554E-09	2.9472663E-08
2.4618222E-08	3.2645257E-08	9.0252472E-11	
5.6421282E-08	2.2306916E-07	5.1883076E-09	

Tabl. 5 - Valeurs des conductivités hydrauliques



1) Cartographie par interpolation

La grande dispersion des valeurs nous a amené à réaliser 3 cartes des iso-perméabilités, complémentaires les unes des autres :

- de 10^{-9} à 10^{-8} m/s (équidistance 1.10^{-9} m/s) : fig 23a
- de 10^{-8} à 10^{-7} m/s (équidistance 5.10^{-9} m/s) : fig 23b
- de 5.10^{-8} à 10^{-6} m/s (équidistance 5.10^{-8} m/s) : fig 23c

L'ensemble de ces cartes permet de dégager quelques traits principaux :

- Un secteur de forte perméabilité centré sur Ladoye et Blois (fig.23c) et un autre de bonne perméabilité sur Baume-les-Messieurs. Les bonnes perméabilités obtenues ici corroborent les observations faites précédemment sur les cartographies du champ de fissuration (cf.paragraphe 2.3).

- Les perméabilités les plus faibles sont situées sur le centre des reculées (Nevy sur Seille, fig.23a) et s'étendent au plateau situé au nord du village.

2) Cartographie krigée

De la même manière que pour l'étude des fréquences de fissuration, la cartographie krigée de la variable perméabilité nécessite préalablement la construction du variogramme.

Nous avons pu adapter le variogramme expérimental à un type modèle sphérique, de portée 3.5 km. D'autres choix de modèle théorique auraient pu être effectués en raison de la complexité du variogramme expérimental ; aussi n'en tirerons-nous pas de conclusions quant à la valeur de la portée choisie.

La carte obtenue (fig.24) est semblable dans ses grands traits à la précédente.

Elle présente cependant l'avantage de représenter la meilleure estimation possible de la perméabilité en tout point, en lui associant une valeur d'erreur (fig.24). La carte de l'erreur présente des valeurs n'excédant pas 70.10^{-9} m/s ; cette erreur reste faible si l'on considère les secteurs de bonne perméabilité ($> 10^{-7}$ m/s) mais devient très élevée pour les zones à moyenne ou faible perméabilité ($< 10^{-7}$ m/s).

3) Cartographie des directions d'écoulement

La cartographie des directions principales de l'écoulement fig.25 (en courbes d'iso-direction de pas 20° , fig.25a, en directions locales, fig.25b) met en évidence plusieurs zones :

CHIV-F PROSIEP.M SALPERVILAUM/11/89

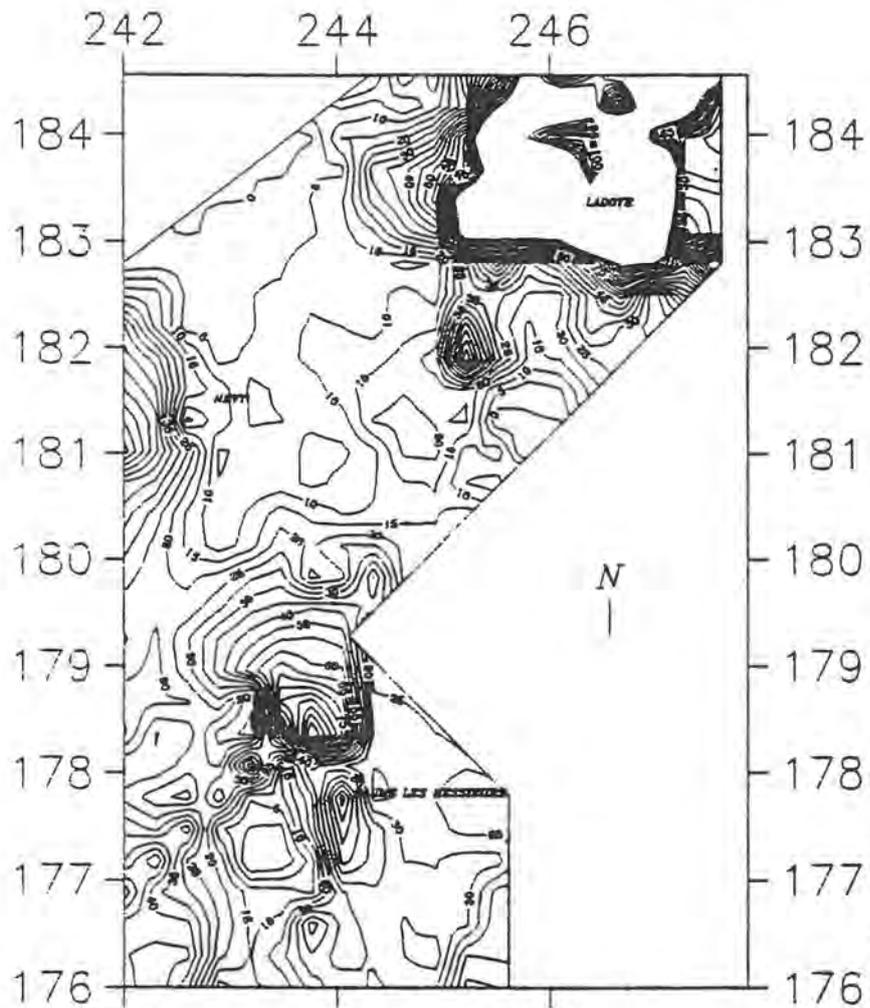
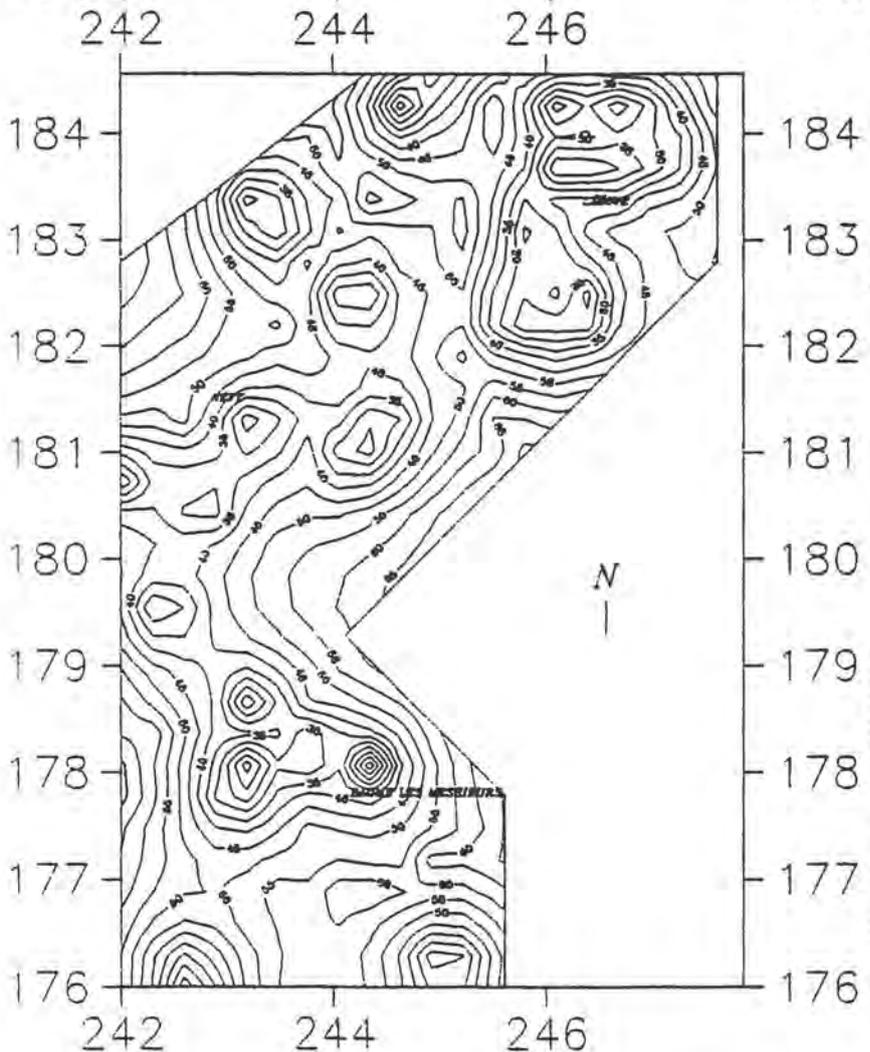


Fig. 24 -
PERMEABILITE [M/S]
 (* 10-9)
RECULEES DE LA SEILLE

CLASSE 10 A 100 m/s * 10-9
 carte krigee
 modele spherique
 portee= 3.5 km
 palier= 6500

Coordonnees LAMBERT

CHIV-F PROSIEP.M SALPERVILAUM/11/89



CARTE DES ERREURS
COMMISES SUR LA
PERMEABILITE [M/S]
 (* 10-9)
RECULEES DE LA SEILLE

CLASSE 10 A 100 m/s * 10-9
 carte krigee
 modele spherique
 portee= 3.5 km
 palier= 6500

Coordonnees LAMBERT

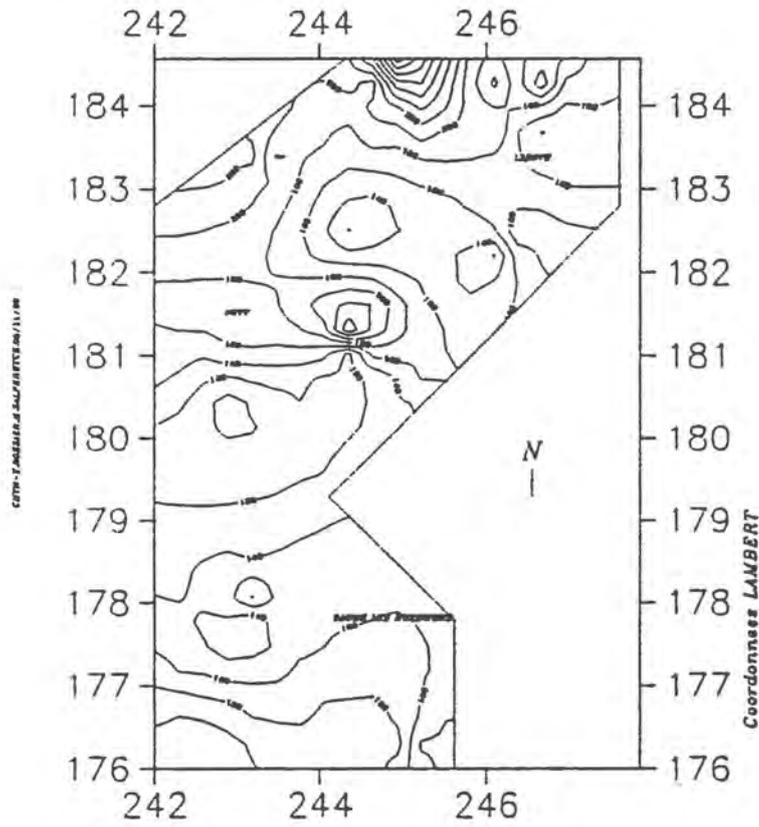
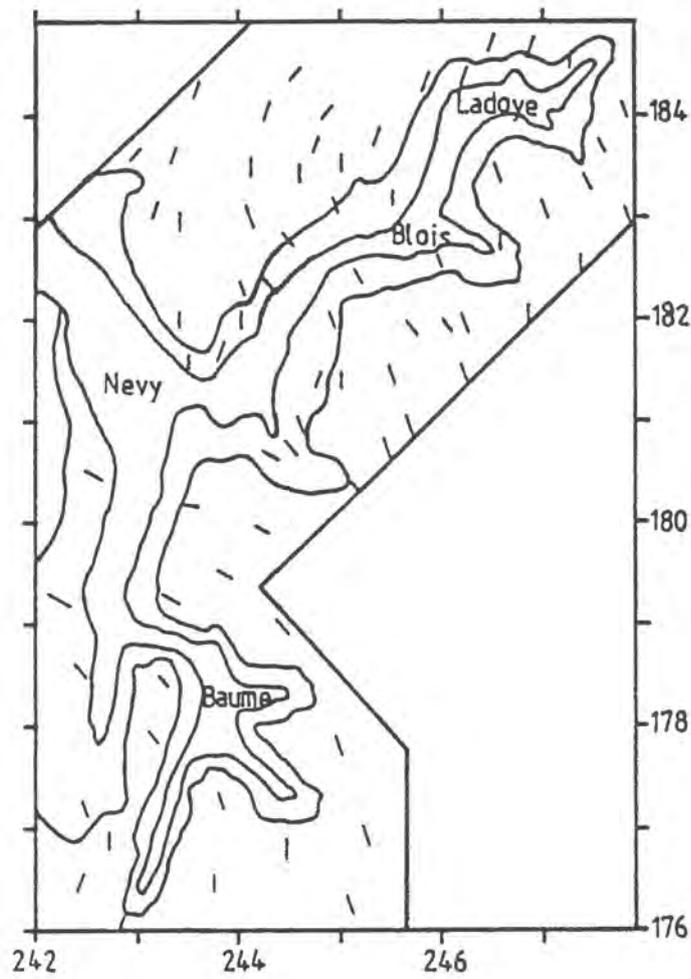


Fig. 25 -

Cartographie des directions
des perméabilités
principales.

Reculées de la Seille



- des écoulements de direction SSE à Sud (N 160-180) sur le plateau au droit des principales sources (Dard, St Aldegrin, Blois, Ladoye),
- des écoulements de direction ESE à SE (N 100-140) dans la partie située entre Baume et Nevy,
- des écoulements de direction SSE à SSW (N 160-220), sur l'avant plateau situé au nord de Nevy.

Il ressort donc de ces résultats une certaine zonation dans les directions d'écoulement (fig.25b). En ce qui concerne la partie Nord des reculées, les directions sont orientées majoritairement SSW à l'ouest et SSE à l'Est. La partie centrale des reculées, entre Baume et Nevy, s'oriente E-W. Enfin, les reculées au Sud de Baume possèdent des écoulements en éventail SSE à SSW.

2.4.4. Conclusion

L'étude des perméabilités du massif calcaire aux abords des reculées de la Seille a été effectuée à partir des directions préférentielles de la fissuration déterminées sur chaque station de mesure. Le calcul des tenseurs de perméabilité nous a néanmoins imposé de formuler des hypothèses sur les ouvertures de fissures, fondées sur l'observation des fissures karstifiées. On peut souligner que d'autres choix auraient été possibles, en particulier un calcul d'ouverture à partir de l'anisotropie sismique des calcaires qui est directement liée à leur fréquence de fissuration et aux ouvertures des fractures (P.BROQUET et al, 1978).

Dans le cadre des hypothèses choisies, deux types de représentations cartographiques ont été dressées :

- une carte des conductivités hydrauliques
- une carte des directions d'écoulement

Ces cartes permettent de dégager les secteurs les plus perméables (Ladoye sur Seille, Baume-les-Messieurs), situés à des points de ramification des reculées. Les secteurs les moins perméables s'étendent à l'avant-plateau situé au nord de Nevy sur Seille et au point central des reculées situé à l'Est de ce village. Il convient cependant de comparer ces cartes aux secteurs où la perméabilité effective est élevée, à savoir les zones d'émergence : on constate alors que la concordance est médiocre, à l'exception du secteur de Ladoye. Dans les autres cas (secteurs des sources du Dard, d'Aldegrin et de Blois), les tenseurs de perméabilité établis sur la base de la petite fissuration ne rendent absolument pas compte de la perméabilité en grand dirigeant les écoulements. En conséquence, la liaison entre perméabilité de fissure et perméabilité en grand ne peut être démontrée dans ces trois exemples, alors qu'elle apparaît clairement pour Ladoye.

La carte des directions des plus grandes perméabilités fait ressortir une direction privilégiée, SSE à Sud, sauf au Nord de Nevy (SSW) et au Nord de Baume (ESE).

CONCLUSION

Les différentes étapes de l'étude des champs de fissuration et de perméabilité au droit des reculées de la Seille, sur la base de 73 stations de mesure, nous a permis de mettre en évidence :

- des directions principales orientées N 20-30, N 110-120, N 130-140.

- une influence de la position des stations sur la valeur des fréquences de fissuration pour les directions majeures. D'autres anomalies ont pu être détectées ponctuellement sur d'autres directions. Il est cependant difficile de les interpréter. En revanche, l'influence de la lithologie n'est pas apparue clairement, contrairement à d'autres études effectuées dans le Jura (Y.ROSSIER, 1986, G.FORESTIER, C.VEREZ, 1978).

- le caractère aléatoire de l'évolution de la fréquence de fissuration dans l'espace, au delà d'une portée de 500m ou 1km environ. Les secteurs les plus fissurés apparaissent localisés à l'extrémité ou aux points de ramification des reculées.

- ces mêmes secteurs apparaissent en conséquence les plus perméables. L'avant-plateau et la partie médiane des reculées sont de moindre perméabilité (en relation avec la réduction d'épaisseur de l'aquifère?). Ce mode de représentation ne permet cependant pas de tenir compte de la perméabilité en grand de l'aquifère, qui subordonne les écoulements. Une direction principale des perméabilités se dégage, orientée SSE à Sud.

CHAPITRE 3 : ETUDE COMPARATIVE DE DIFFERENTES IMAGES DE LA FRACTURATION

INTRODUCTION

L'étude de la fissuration telle qu'elle a été envisagée dans le chapitre précédent ne faisait appel qu'aux relevés de terrain de la fissuration. L'information qu'ils apportent est discrète et nécessite un traitement complexe; il a également été montré que la précision de la méthode impose de ne considérer qu'un secteur géographique restreint.

D'autres techniques sont cependant couramment utilisées en hydrogéologie, telles que le dépouillement de photographies aériennes ou d'images satellites : elles donnent à différentes échelles d'autres images de la fracturation. La confrontation des images à des échelles diverses paraît nécessaire afin de mieux cerner la représentativité de chacune d'entre elles (J. SARROT-REYNAULD, 1988).

La finalité de ce chapitre est donc une comparaison des diverses images de la fissuration, démarche adoptée par de nombreux auteurs (M. CRUCHET, 1983 ; G. MASSONAT, 1981 ; G. FORESTIER, C. VEREZ, 1978). Dans ce dernier travail concernant le plateau d'Ornans (Doubs), la fracturation est étudiée à toutes les échelles depuis l'image satellite jusqu'au relevés de carrière.

Nous avons donc procédé au traitement des documents à notre disposition à savoir :

- les images satellite
- les photos aériennes
- les plans des réseaux karstiques du bassin de la Seille

Nous reprendrons également les données issues des stations de fissuration (voir chapitre précédent). Enfin, nous avons tenté de définir les relations entre le développement de certaines formes exokarstiques (dans notre cas les dolines, très nombreuses) et la fracturation générale.

3.1. METHODOLOGIE

Le traitement des images dont il est question dans ce chapitre relève du dépouillement des linéaments au sens large au terme.

Ce traitement a été effectué pour la plus grande partie à l'aide d'un logiciel d'analyse des linéaments, mis au point au laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée de Besançon par Y. ROSSIER (1988). Ce logiciel permet :

- la saisie et l'analyse d'une image
- la comparaison d'images

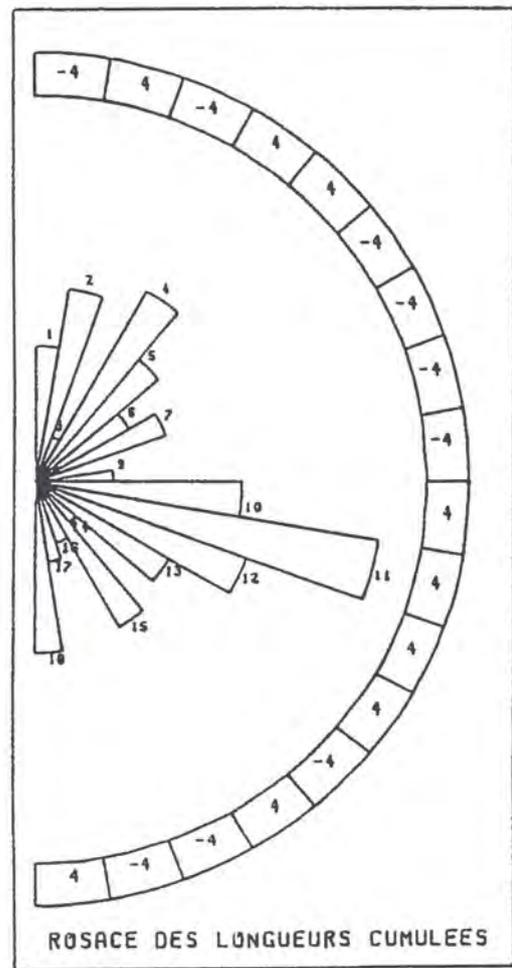
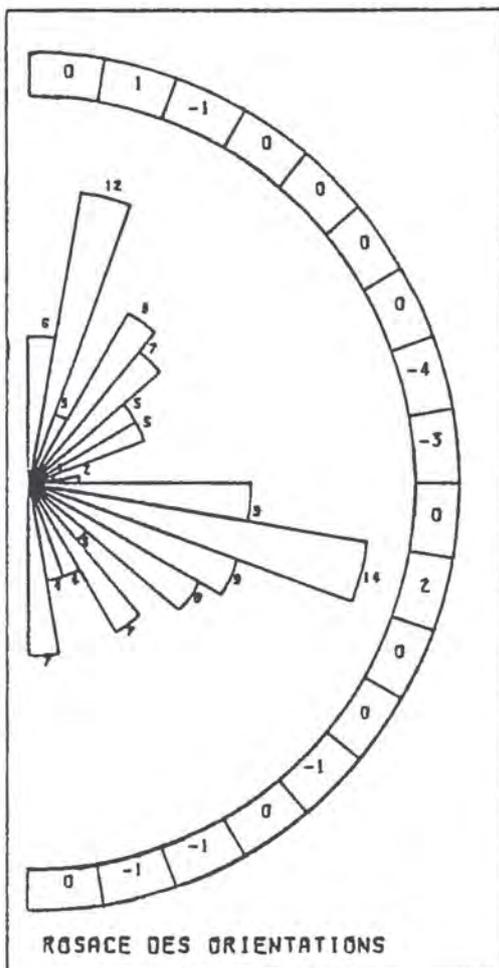
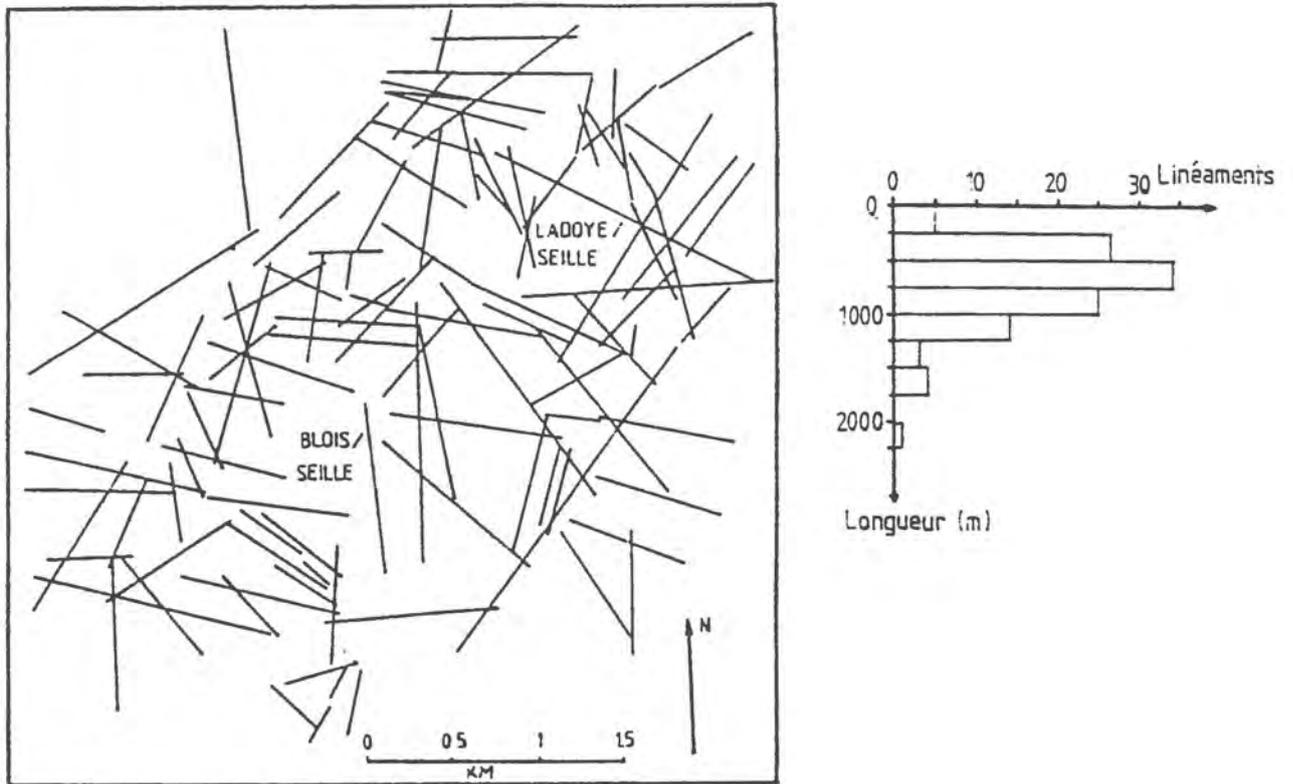


Fig. 26 - Photo-interprétation : image de Blois-Ladoye

3.1.1. Analyse d'images

La procédure d'analyse de l'image est classique : celle-ci est d'abord digitalisée avec contrôle simultané sur écran, puis restituée sur table traçante. Le logiciel permet ensuite de dresser :

- l'histogramme des longueurs des linéaments
- la rosace des directions en nombre
- la rosace des directions en longueurs cumulées

Les données sont également conservées dans un système de coordonnées régionales (Lambert par exemple), ce qui permet leur traitement dans un cadre plus général.

3.1.2. Comparaison d'images

Différents types de comparaison sont possibles :

- entre plusieurs images ou instantanés
- entre les représentations d'une image pour différents utilisateurs
- entre différentes fenêtres d'une image ou d'une région.

La comparaison repose sur le test statistique de l'analyse de variance entre les rosaces ou les distributions de longueurs. Le principe de ce test a été développé dans le chapitre précédent.

La comparaison peut également se faire de manière sélective :

- entre plusieurs rosaces pour une classe de longueur donnée
- entre plusieurs distributions de longueurs pour une classe de direction donnée.

3.2. COMPARAISON DES IMAGES DE LA FRACTURATION SUR LES RECULEES DE LA SKILLE

3.2.1. Photographies aériennes

Trois images de photographies aériennes ont été dépouillées :

- secteur de Blois-Ladoye (fig.26)
- secteur de Baume-les-Messieurs (fig.27)
- secteur de Briod (fig.28)

Les deux premières images relèvent de secteurs à couverture végétale importante (prairies, cultures, forêts), la troisième se limite à une zone nettement plus pauvre.

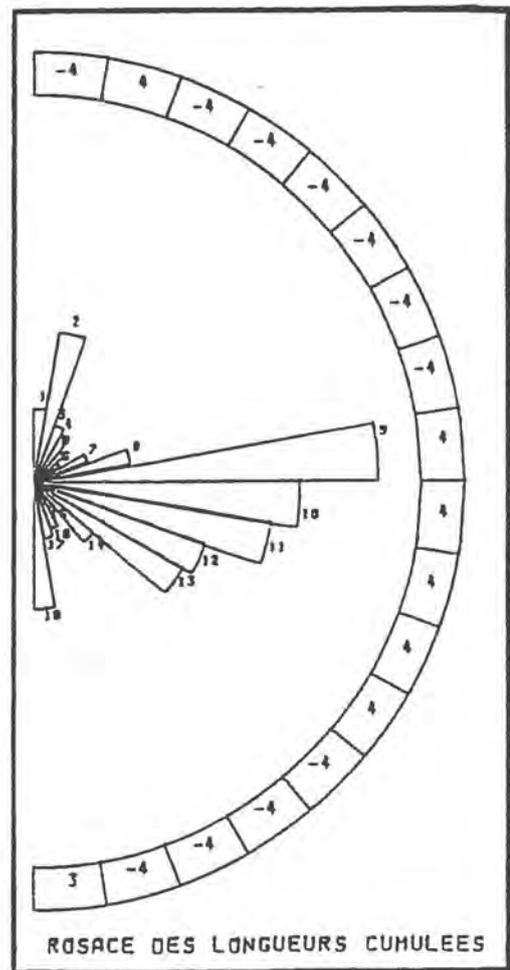
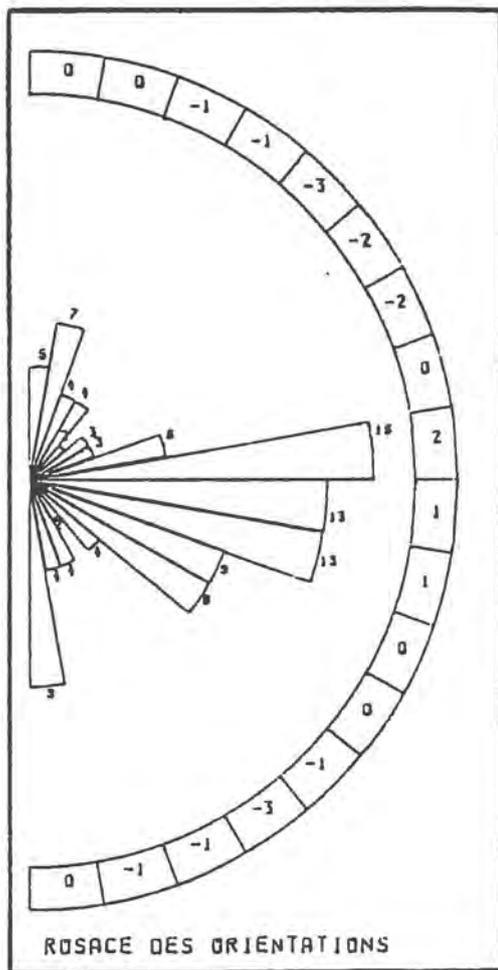
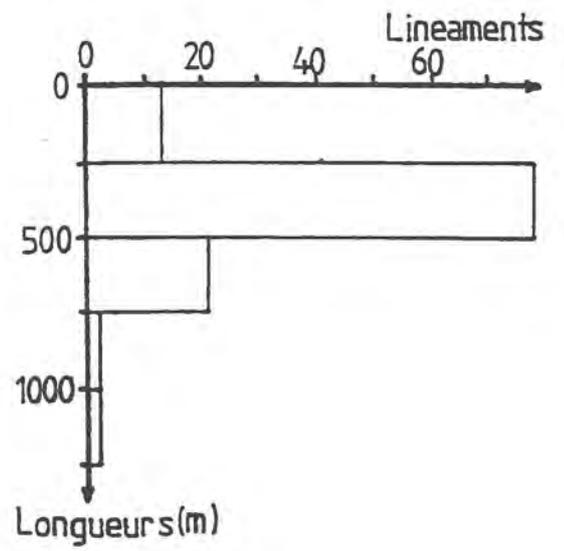
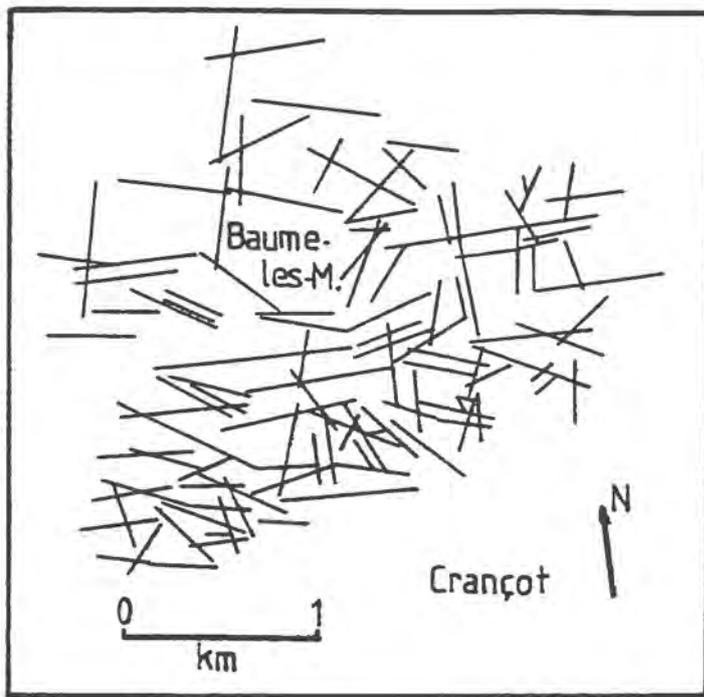


Fig. 27 - Photo-interprétation : image de Baume-les-Messieurs

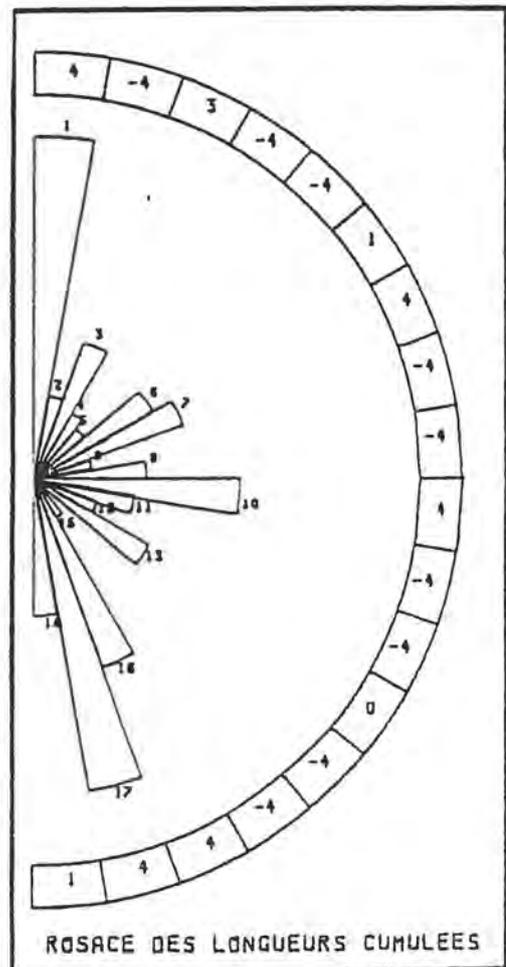
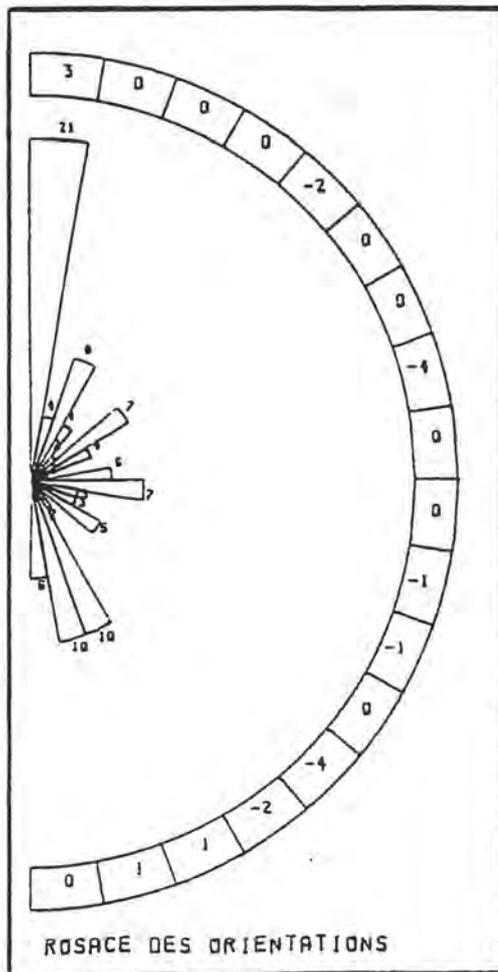
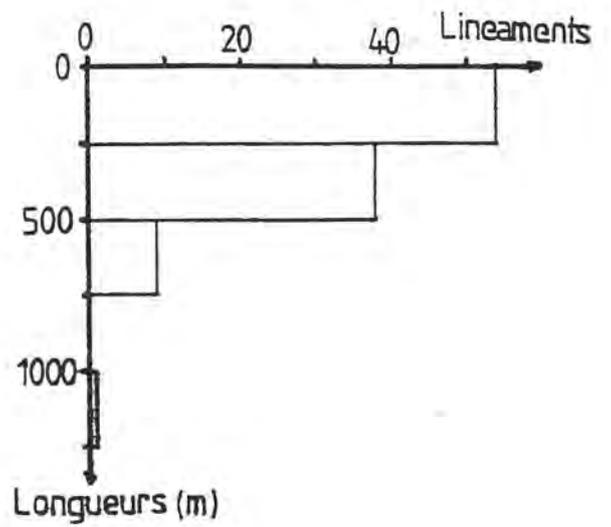
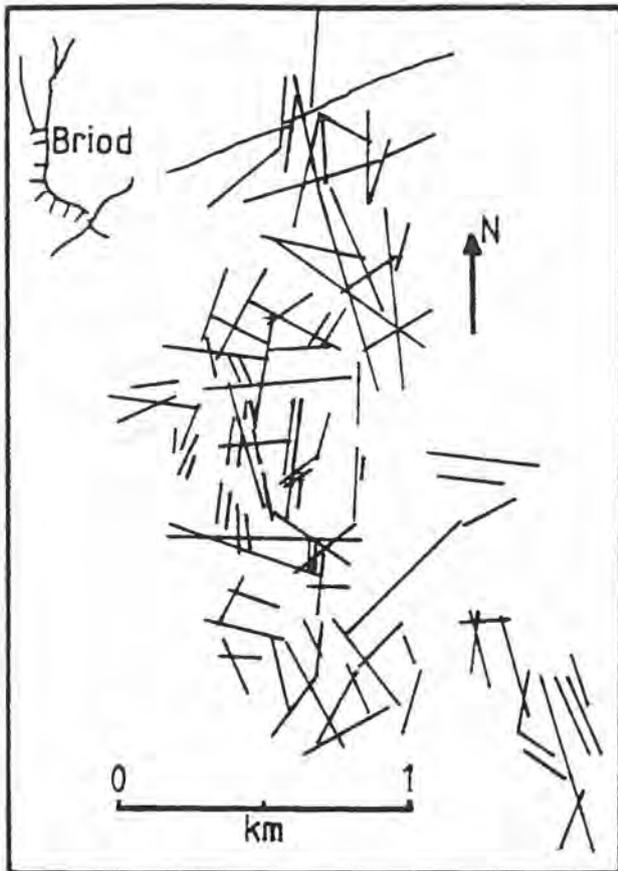


Fig. 28 - Photo-interprétation : image de Briod

Les principaux résultats peuvent être résumés dans le tableau suivant (tab.7) :

Image	Directions principales		Directions secondaires
		Nombre	N 10 - 20 N 100-110
LADOYE	long. cum.	N 100-110	N10-20 N30-90 N90-130 N140-150 N170-180
	Nombre	N 80-90	N90-130 N10-20 N170-180
BAUME	long. cum.	N 80-90	N90-130 N10-20 N170-180
	Nombre	N 0-10	N150-170
BRIOD	long. cum.	N 0-10 N160-170	N20-30 N60-70 N90-100 N150-160

Tab.7 : Directions observées en photo-interprétation

Les directions principales obtenues sur ces 3 images diffèrent sensiblement ; une analyse de variance confirme ce résultat (F calculé = 13.44 ; F tabulé au seuil 1% = 5.06).

On peut cependant souligner :

- pour Ladoye, une prédominance de la direction N 100-110 et une importance très relative de la direction N 10-20 si on la considère en longueurs cumulées,

- pour l'image de Baume, l'importance d'une direction globalement E-W, suivie de directions subméridiennes

- pour l'image de Briod, la différence entre les rosaces en nombre et longueurs cumulées s'exprime par la direction N 160-170, d'importance nettement affirmée en longueurs cumulées.

Les histogrammes de longueurs accordent des dimensions réduites aux linéaments sur Briod (moins de 250m en majorité), plus longues sur Baume (250 à 500m) et sur Ladoye (250-750m).

En conclusion, l'étude des photographies aériennes ne permet pas de dégager de traits communs à l'ensemble des reculées et du plateau. Les caractéristiques de chacune des images devront être étudiées dans un contexte plus limité.

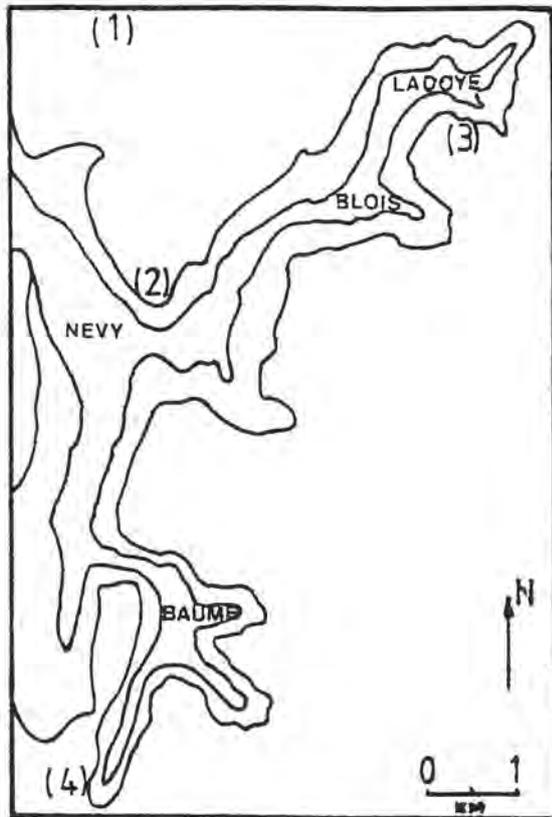


Fig. 29 - Situation des réseaux karstiques

3.2.2. Réseaux karstiques

L'étude des directions de tronçons rectilignes des réseaux karstiques apporte une information supplémentaire à l'étude de la fracturation, les réseaux de galeries représentant les directions préférentielles de la dissolution. Outre la comparaison générale avec les directions de la fracturation, les directions des réseaux peuvent être comparées au modèle de contrainte proposé, la dissolution intervenant sur des familles de direction bien précises, liées à l'état de contrainte du milieu (B.MIJATOVIC,1988).

Nous disposons des plans de 4 réseaux karstiques, de développements très divers (situation en fig.29).

- le Gouffre des Frites (1), s'ouvrant à la surface du plateau : 333m,
- le réseau de la Borne aux Cassots (2) à Nevy/Seille de grande extension : 10511m,
- la grotte de Bobignon (3) à Ladoye/Seille : 197m,
- le réseau des grottes du Dard (4) à Baume-les-Messieurs : 1428m

Les résultats figurent sous forme de rosaces en longueurs cumulées des galeries (fig.30).

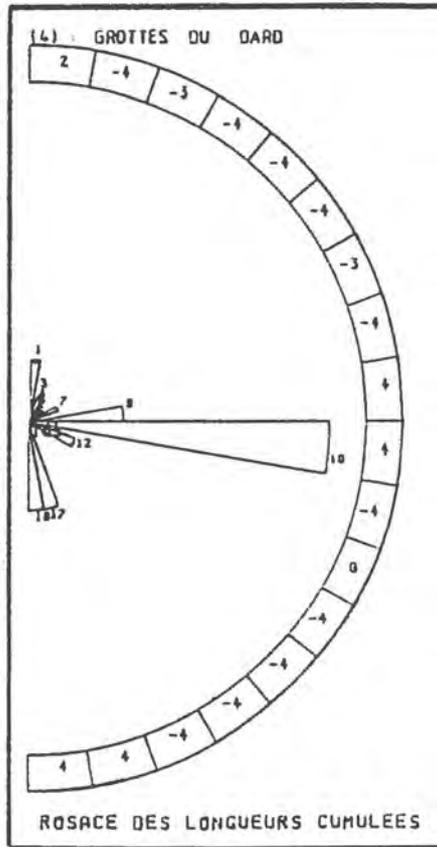
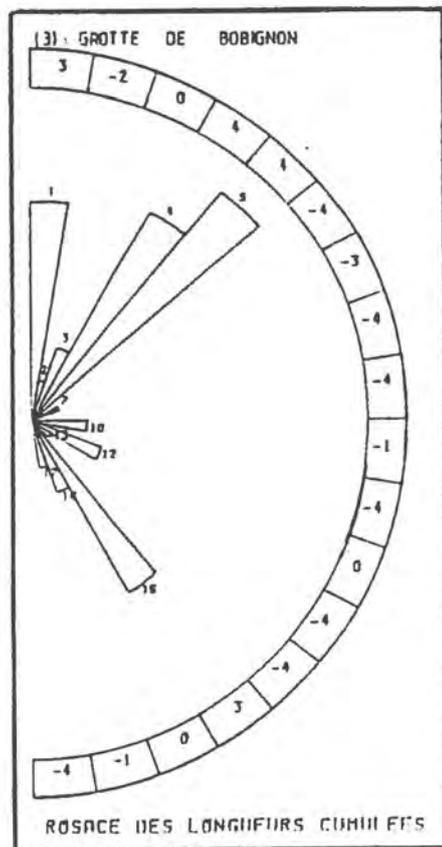
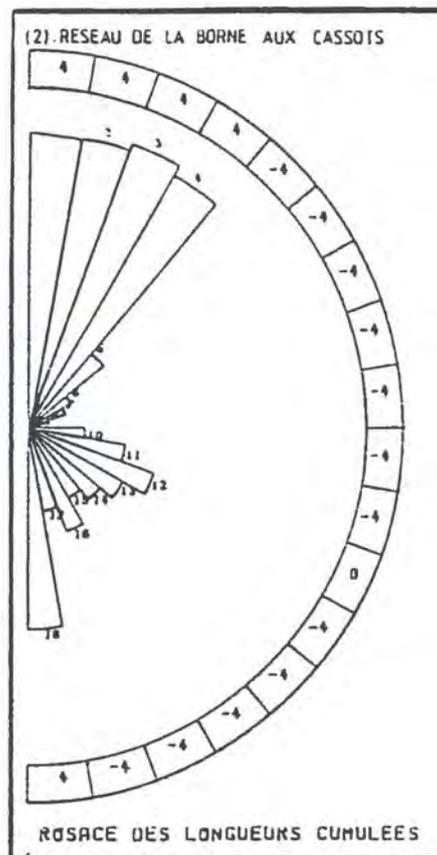
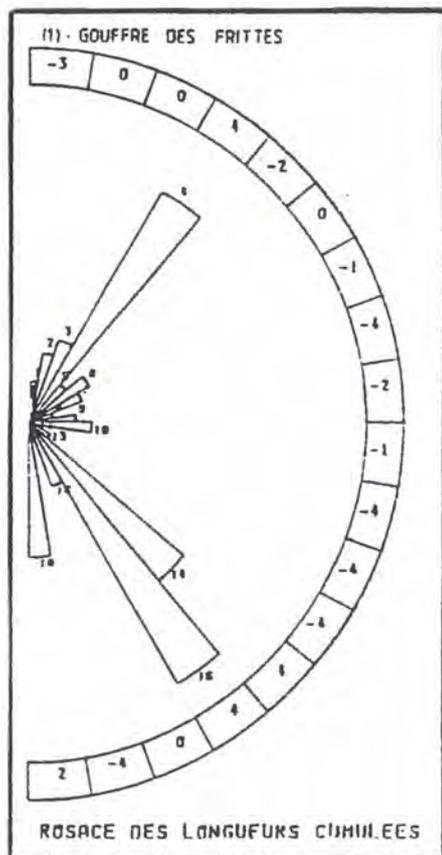


Fig. 30 - Directions des réseaux karstiques

On peut résumer dans le tableau suivant (tab.8) les directions principales :

Réseau	Directions principales	Directions secondaires
1 - Frites	N 140-150	N30-40 N130-140 N170-180
2 - Borne aux Cassots	N 0-40	N110-120 N170-180
3 - Bobignon	N 40-50	N0-10 N30-40 N140-150
4 - Grottes du Dard	N 90-100	N0-10 N160-180

Tab.8 : Directions des réseaux karstiques

Bien que statistiquement différentes (analyse de variance et test de Fischer : F calculé = 25.6, F tabulé au seuil de 1% = 4.08) ces diverses rosaces semblent présenter des similitudes :

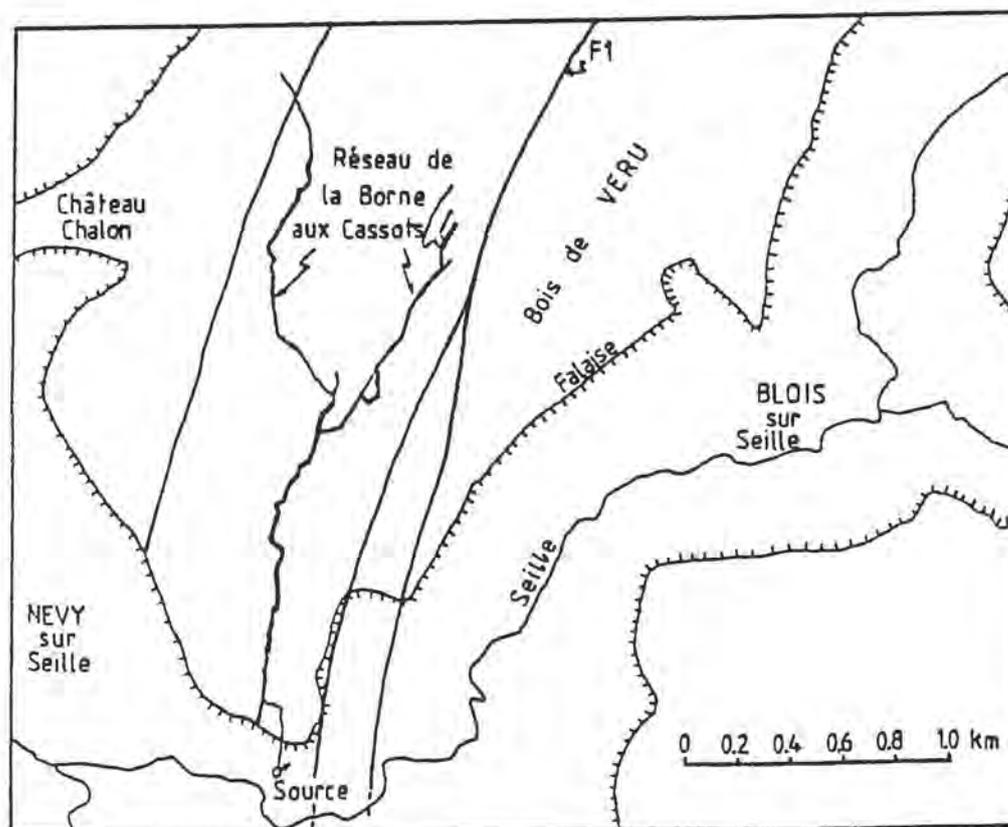


Fig. 31 - Adaptation du réseau karstique de la Borne aux Cassots à la structure géologique

- pour les 2 réseaux les plus septentrionaux (1 et 3), deux directions conjuguées N30-40 et N140-150 apparaissent nettement,
- pour les 4 réseaux, une direction subméridienne (N170-180 ou N0-10) apparaît de façon principale ou secondaire.

En ce qui concerne le réseau de la Borne aux Cassots (2), la direction principale s'étend sur une plage de 40° de N0 à N40. Le simple examen du plan du réseau montre qu'il s'agit en fait d'une incurvation générale des principales galeries : N0-10 vers l'entrée (au Sud) à N30-40 vers le fond du réseau (au Nord). Cette incurvation se fait parallèlement à la faille F1 (voir fig.31) et constitue un exemple parfait d'adaptation du réseau à la structure géologique.

On peut également constater qu'aucune direction transverse ne se dégage.

De la même manière, le développement des grottes du Dard est pratiquement unidirectionnel (E-W), mais cette fois perpendiculaire à l'axe N-S des failles majeures. Il n'existe donc pas de convergence à ce niveau dans la formation des réseaux karstiques.

3.2.3. Image satellite

L'image étudiée a été fournie par le satellite LANDSAT-1, à l'échelle du 1/100 000 environ. Le dépouillement a été effectué par J. MARTIN sur le document brut (fig.32).

Cette image fait apparaître une certaine zonation du plateau :

- un secteur situé au nord d'une ligne Mirebel-Voiteur,
- un secteur centré sur Baume-les-Messieurs,
- un secteur s'étendant au Nord et au Nord-Est de Briod.

Il paraît important de constater que cette zonation corrobore les observations effectuées au niveau des photographies aériennes, en montrant que le plateau ne présente pas d'homogénéité dans son ensemble. A cette échelle, l'image satellite permet de le mettre en évidence de façon simple.

Les résultats du dépouillement sont présentés en fig.32.

Les directions principales sont subméridiennes :

- N160-180 en nombre, privilégiant N170-180 en longueurs cumulées
- N10-20 et de moindre ampleur N30-40

Comme le remarquent J. ITTY, J. VINTAER (1987), ainsi que G. FORESTIER et al (1978), l'échelle de l'image satellite permet de souligner des directions directement héritées de la morphologie (axes de vallées ou de plis, reliefs de faille). L'image analysée présente ces mêmes caractéristiques, avec toutefois une prédominance de la direction N160-180, que la simple analyse morphologique ne permettait pas de soupçonner. On peut néanmoins rappeler que cette direction représente

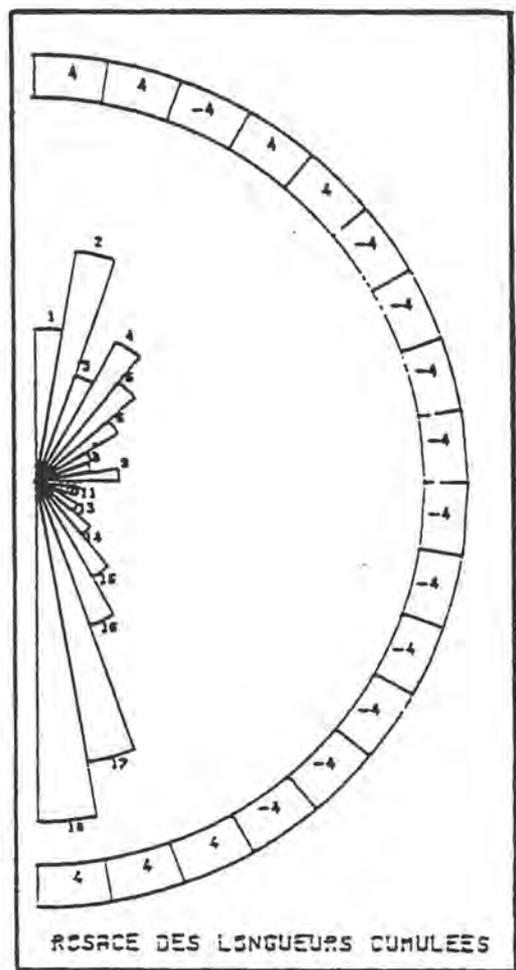
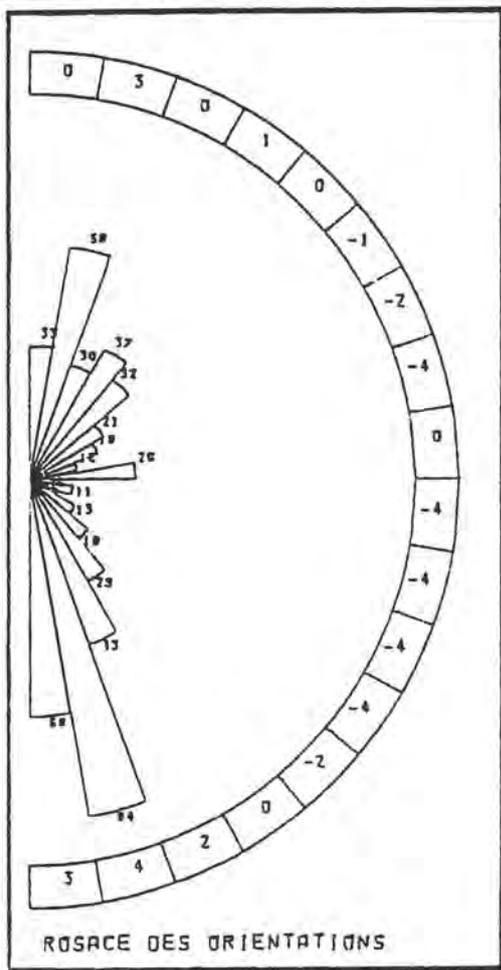
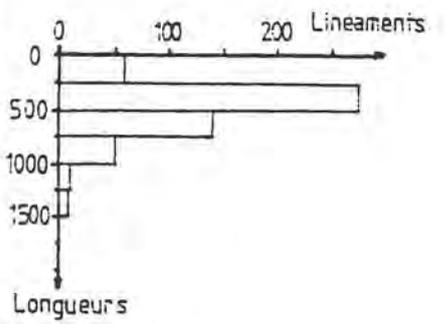
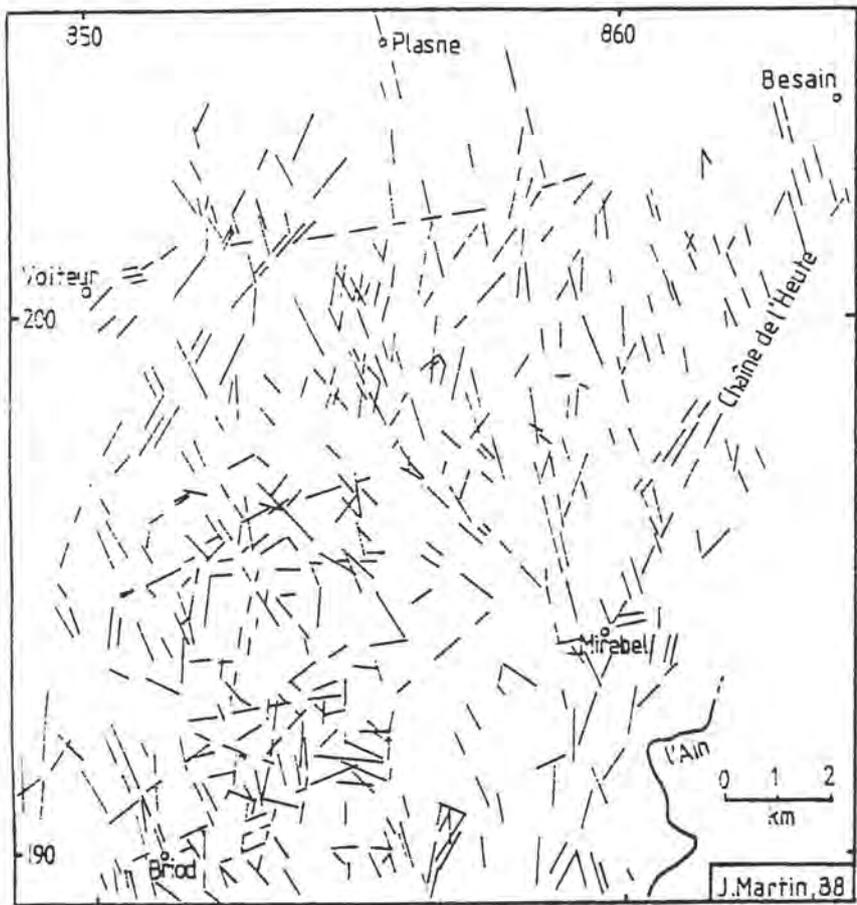


Fig. 32 - Photo-interpretation : image satellite du plateau

majoritairement celle de l'écoulement aux abords des reculées (voir chapitre 2).

Si cette direction est bien représentée vers le Sud du plateau (faisceau de failles entre Briod, Vevy, Publy), elle est peu marquée au Nord. Une comparaison de 2 fenêtres, l'une nord, l'autre sud, permet cependant de constater que cette direction N160-180 prédomine largement au Nord. Au Sud, des directions plus diverses sont représentées.

La comparaison de deux fenêtres est et ouest, offre les résultats suivants :

- la direction N160-180 est dominante vers l'Est,
- vers l'Ouest, N10-20 et une plage N140-180 apparaissent.

L'étude de l'image satellite a donc permis :

- de visualiser l'ensemble du plateau et d'observer qu'à cette échelle (1/100000) des différences apparaissent entre certaines parties du plateau,
- de quantifier ces résultats : les directions subméridiennes sont affirmées sur tout le plateau. Seules les directions secondaires varient suivant les secteurs. Très peu représentées à l'Est et au Nord, ces directions sont principalement représentées par des N140-160 vers l'Ouest et le Sud.

3.2.4. Etude des alignements de dolines

3.2.4.1. Méthodologie

A partir des cartes topographiques au 1/25000 du plateau (Lons le Saunier 3-4, 7-8 ; Champagnole 1-2), l'inventaire des dolines et dépressions fermées de petites dimensions (<50m) a été effectué : nous en avons recensé environ un millier.

Le tracé des alignements a ensuite été dressé. Afin d'en réduire la subjectivité, nous avons tracé des segments reliant au minimum 3 dolines voisines les unes des autres. Nous avons cependant considéré qu'une même doline pouvait appartenir à deux segments différents.

3.2.4.2 Résultats

Le tracé des segments pour l'ensemble du plateau est représenté en fig.33. Il apparaît plusieurs zones de densités différentes, la partie médiane du plateau présentant la plus forte densité de dolines et de segments. Soulignons que la limite sud de ce secteur coïncide avec la limite des feuilles au 1/25000 ; il semble donc exister à ce niveau une différence purement cartographique.

Les rosaces directionnelles des segments ont pour directions principales :

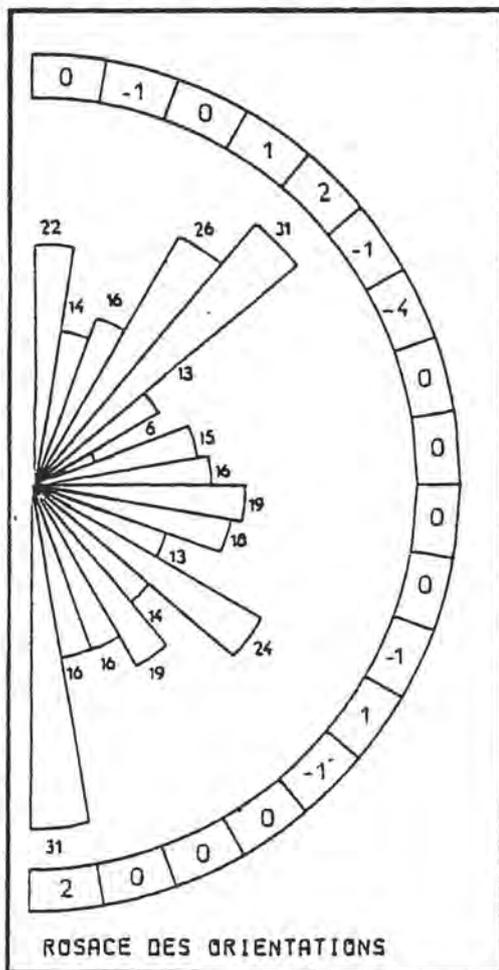
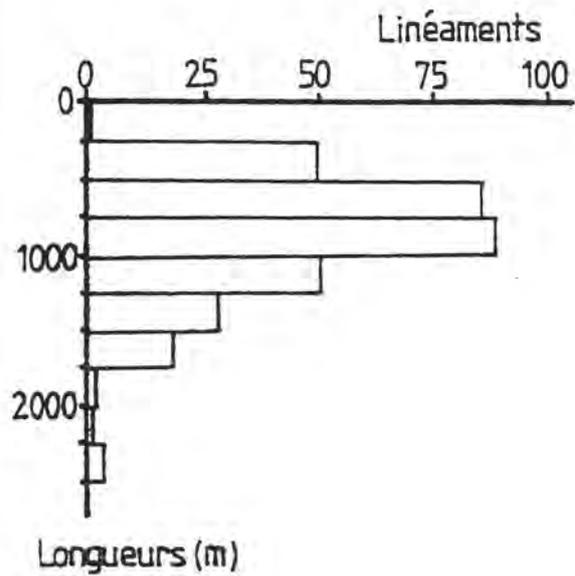
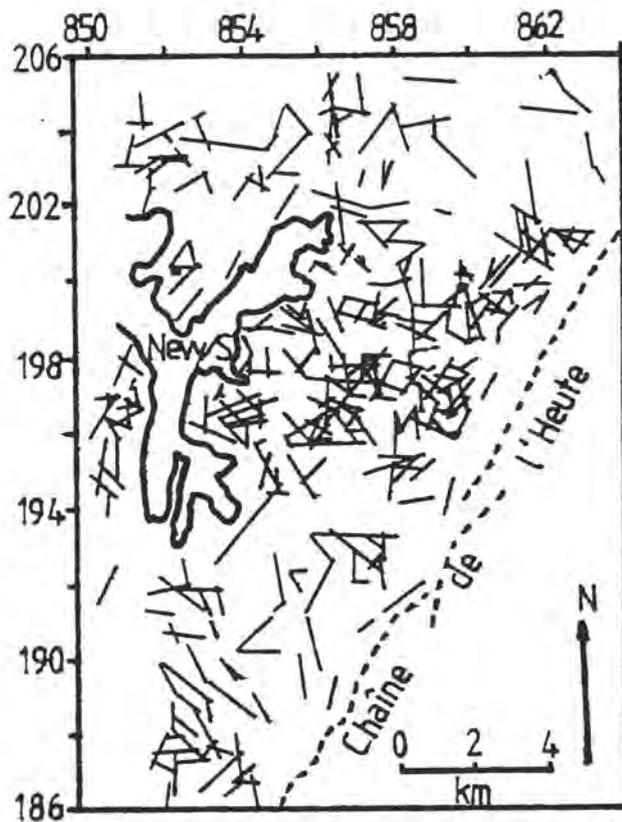


Fig. 33 - des alignements de dolines

- N30-50
- N0-10 et N170-180

et pour direction secondaire :

- N120-130

Afin d'affiner ce résultat global, la comparaison de 2 fenêtres, nord et sud séparant le plateau au niveau de Nevy/Seille nous permet de mettre en évidence les différences suivantes (Tab.9) :

	Directions principales		Directions secondaires	
Fenêtre Nord	N30-50	N170-180	N90-110	N120-130
Fenêtre Sud	N40-50 N170-180	N140-150	N0-10 N120-140	N70-80 N150-170

Tab.9 : Directions des alignements de dolines

La partie sud regroupe donc essentiellement les directions N130-180, ainsi que la direction N70-90, pourtant très secondaire globalement ; la direction N90-110 est plus affirmée au nord.

3.2.5. Synthèse et conclusions

3.2.5.1. Synthèse

La synthèse des résultats obtenus sur les différents types d'images nous amène à formuler quelques remarques.

La seule direction ayant été relevée comme d'importance majeure ou moyenne sur toutes les représentations et l'ensemble du plateau est subméridienne (N0-10 ou N170-180). Elle est majeure dans le cas de l'image satellite et des alignements de dolines, secondaire pour les photographies aériennes et les réseaux de galeries. Malgré cette inégale importance selon les types d'images, cette direction nous semble la seule à être d'importance régionale, par ailleurs parfaitement exprimée par les lanières du faisceau lédonien.

Les autres directions doivent ensuite être étudiées à l'échelle de secteurs plus restreints. Cette démarche s'est traduite par la comparaison de fenêtres, pour l'image satellite et les alignements de dolines permettant une comparaison locale des différentes images.

Nous considérons dans un premier temps deux fenêtres, nord et sud du plateau, avec une limite fixée à la latitude de Nevy/Seille.

a) Nord du plateau

Les directions se dégagent de ce secteur sont :

- N30-50 et N130-150 pour la partie la plus au Nord : les mesures des stations de terrain (secteurs Ladoye et Nevy nord), les réseaux de galeries (Bobignon, les Frittes), ainsi que les alignements de dolines ont fourni des résultats similaires.

- Un peu plus au Sud, une légère rotation de ces directions se traduit par des directions tendant à revenir N-S et E-W : affleurements de Blois et Nevy Est, photographie aérienne de Blois-Ladoye, réseau de la Borne aux Cassots, alignements de dolines présentent tous des directions N 0-30 et N 100-130. Cette rotation est bien exprimée par les cumuls partiels des familles rencontrées sur les affleurements (voir chapitre 2).

b) Sud du plateau

Cette partie du plateau peut à nouveau être étudiée selon 2 subdivisions : le secteur des reculées de Baume-les-Messieurs d'une part et l'extrême Sud du plateau d'autre part, conformément aux observations faites sur l'image satellite.

Les résultats obtenus sur les reculées de Baume présentent de grandes similitudes : la direction E-W est dominante, aussi bien sur les photographies aériennes (80-90) que sur les réseaux de la grotte du Dard (N90-100)

La partie extrême sud du plateau est caractérisée par des directions SE à S : photographie aérienne de Briod (N150-170), partie sud-ouest de l'image satellite (N150-180), partie sud des alignements de dolines (N150-180). Ce dernier secteur fera l'objet d'une étude plus approfondie dans la deuxième partie de ce chapitre.

3.2.5.3. Conclusions

Les résultats exposés doivent être reconsidérés selon les caractères inhérents aux différentes représentations, à savoir :

- l'échelle des images
- la nature des images

Cette nature est constituée soit de fissures observées (affleurements), soit de fractures ayant subi une dissolution de façon préférentielle (réseaux de galeries), soit de linéaments (photographies aériennes et image satellite), soit d'alignements de dolines, indices morphologiques cartographiés.

Il a déjà été souligné qu'à l'échelle régionale, l'image satellite rend compte de directions liées à la morphologie (J. ITTY,

J.VINTAER, 1987, G. FORESTIER, C. VEREZ, 1978) : ces directions sont elles-mêmes calquées sur celles des accidents régionaux. L'image satellite du plateau observée au 1/100000 n'échappe pas à la règle (direction subméridienne N0-20 et N160-180 en accord avec les failles principales et les directions N-S du faisceau lédonien). L'image des alignements de dolines aboutit aux mêmes observations.

Ces deux types de représentation donnent donc une vision régionale des directions : c'est le premier effet de l'échelle. On constate cependant que l'information apportée est incomplète.

L'image satellite peut ensuite permettre de différencier plusieurs secteurs apparemment indépendants.

Les observations à l'échelle inférieure, hectométrique, (photographies aériennes et réseaux de galeries) présentent de bonnes similitudes : les liaisons entre l'image de Baume-les-Messieurs et le réseau du Dard ont été soulignées.

Une liaison similaire existe entre l'image de Ladoye et les réseaux de la partie nord : N30-50 et N140-150.

L'échelle des photos aériennes permet donc d'affiner les observations faites à l'image du satellite et de les compléter.

A petite échelle, celle des affleurements, les résultats peuvent être interprétés différemment selon les regroupements que l'on peut opérer sur les stations de mesure.

L'interprétation ponctuelle des résultats d'une station est difficile, voire impossible, en raison de la variabilité importante pouvant exister entre des stations très proches. Il s'agit de l'effet d'hétérogénéité à petite échelle, mis en évidence d'une autre manière lors de la construction des variogrammes (voir chapitre 2). Il en résulte que seule une synthèse des résultats sur plusieurs affleurements est capable de fournir une approche acceptable de la réalité. On peut donc souligner le rôle fondamental du nombre total d'affleurements étudiés : trop peu de stations sur une trop grande surface (en pratique une station par km²) ne permet pas de tirer de conclusions satisfaisantes.

D'une manière quantitative, les principaux résultats apportés par la comparaison des différentes images peuvent être résumés de la façon suivante : aux conjuguées N30-40 - N130-140 du secteur nord (Ladoye), succèdent des conjuguées N10-30 - N110-130 vers le centre du plateau, puis des N0-10 - N100-110 vers le sud de Baume-les-Messieurs.

Cette relation suit l'incurvation générale des directions structurales du nord vers le sud : il apparaît donc qu'à toutes les échelles, la fissuration est liée de façon étroite aux conditions structurales.

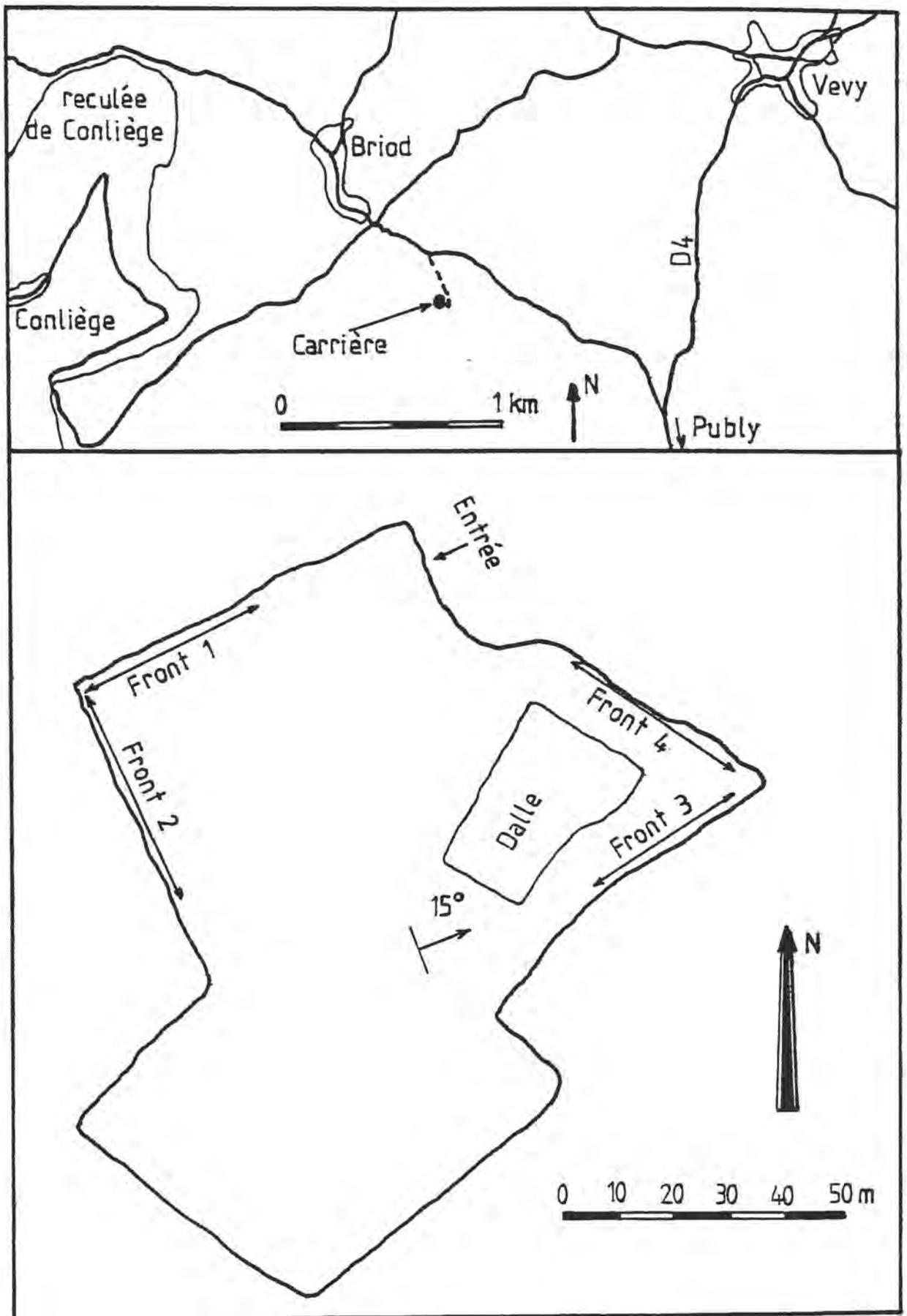


Fig. 34 - Situation et plan de la carrière de Briod

3.3. COMPARAISON DES IMAGES DE LA FISSURATION SUR LE SECTEUR DE BRIOD

On a décrit précédemment les aspects de la fracturation à diverses échelles, tout en soulignant l'intérêt d'une comparaison à un niveau local, (hectométrique ou tout au plus de quelques kilomètres).

Nous avons donc repris cette démarche, appliquée au secteur de Briod, situé au Sud du plateau.

L'analyse porte tout d'abord sur 2 types de données, relevées dans la carrière de Briod (voir fig.34).

- des stations de mesure de la fissuration, sur les fronts de taille de la carrière,
- le relevé des fissures de la dalle constituant le fond de la carrière.

Nous avons également analysé deux images en photo-interprétation

- la photographie aérienne du secteur de Briod, précédemment étudiée (cf chap. 3.2.)
- une image satellite LANDSAT, à l'échelle du 1/55000 environ,
- l'image satellite précédemment dépouillée (cf chap. 3.2.), limitée au secteur de Briod.

Le travail de comparaison porte sur les directions, mais aussi sur les longueurs (comparaison sélective selon les directions).

3.3.1. Stations de mesure

La mesure des fissures en carrière présente l'avantage de fronts de taille dégagés et facilement accessibles ; en revanche, on peut constater qu'une partie de la fissuration est liée aux tirs de mines, occasionnant par endroits des broyages ou des zones intensesment fracturées de façon artificielle.

Afin de minimiser les effets de cette contrainte inhérente aux conditions de terrain, deux démarches ont été adoptées :

- un relevé classique de fissuration, selon la méthode utilisée sur les reculées de la Seille,
- deux relevés sélectifs sur les longueurs : seules les fissures ou fractures de plus de 50cm de longueur ont été retenues.

3.3.1.1. Relevé total

Les résultats du relevé total des fissures sur une station sont présentés sous plusieurs formes :

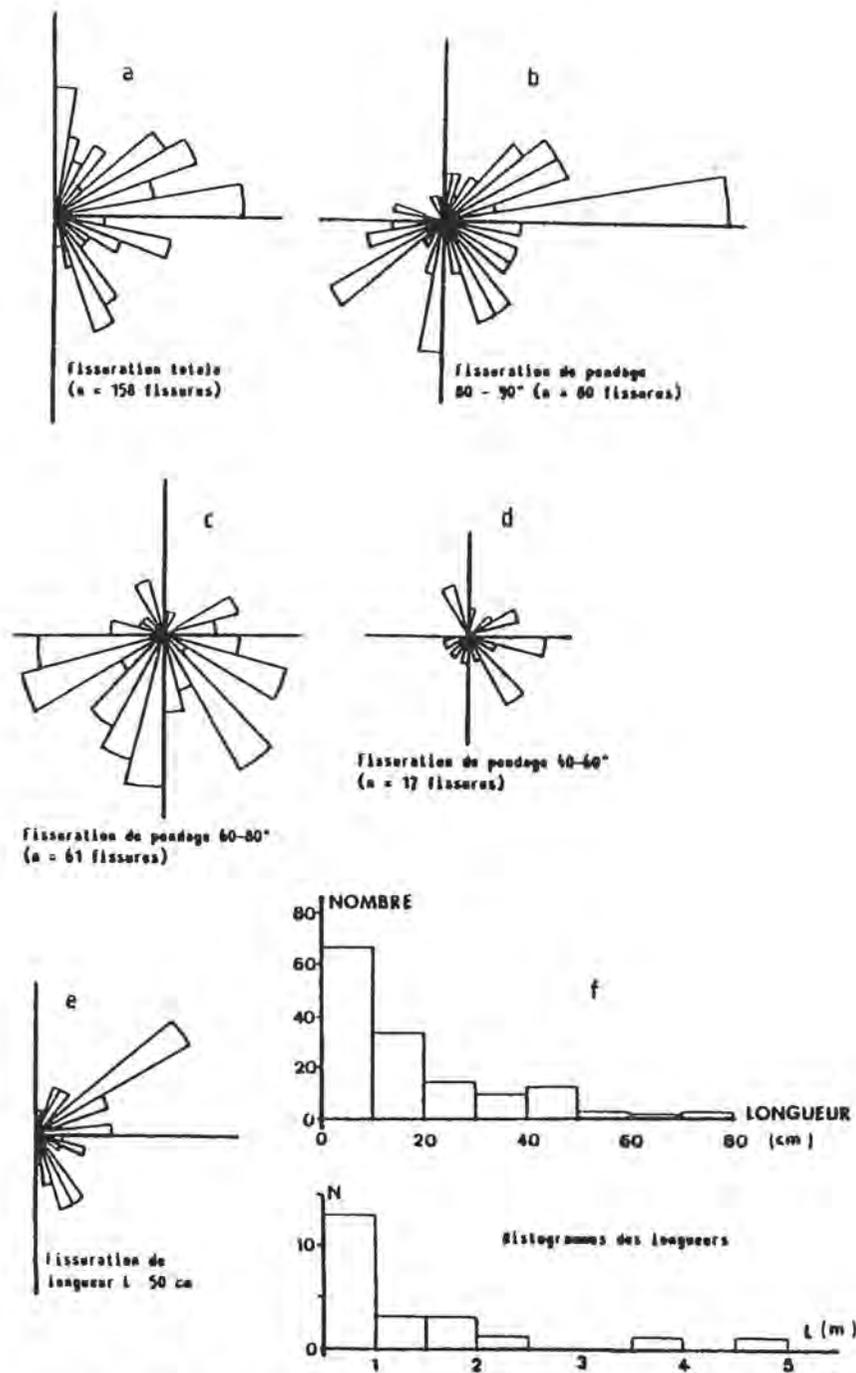


Fig. 35 - Station de mesure de la fissuration totale (carrière de Briod)

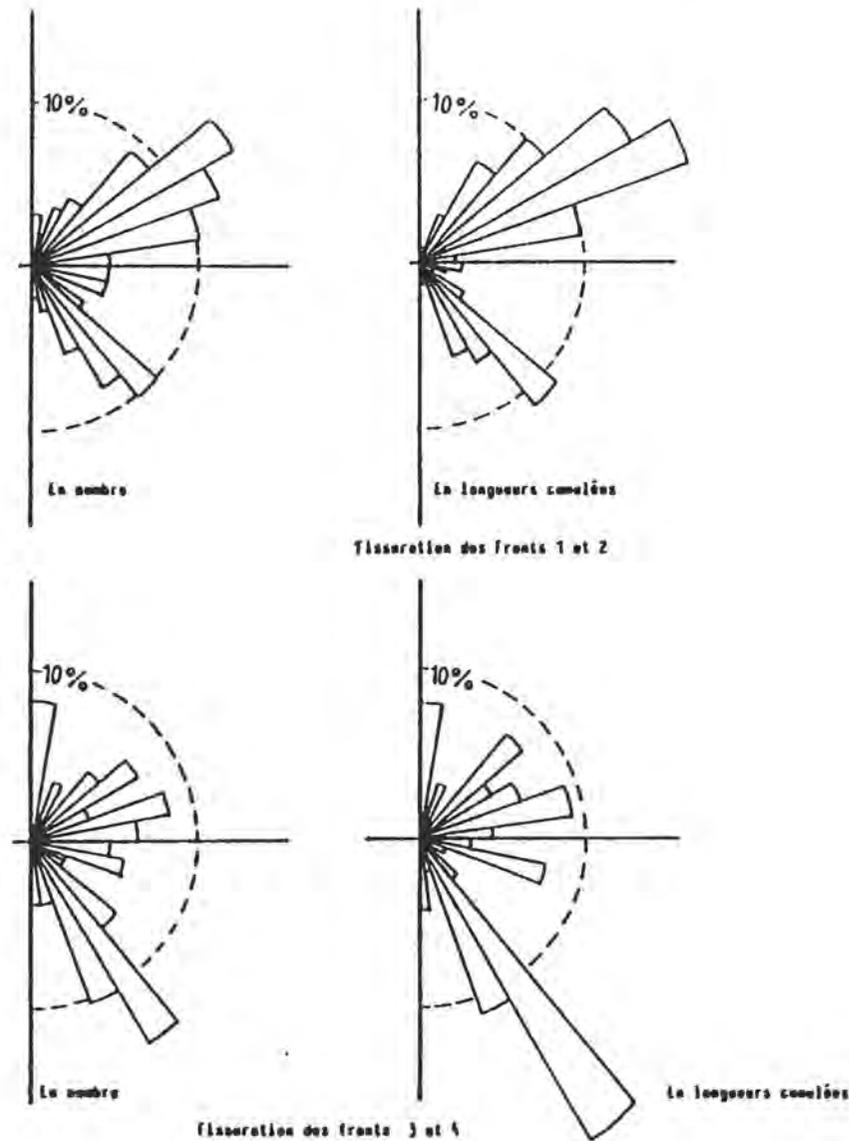


Fig. 36 - Stations de mesure de la fissuration (relevés sélectifs sur les longueurs (L = 50 cm) ; carrière de Briod.

- une rosace en nombre des directions de fissures de 0 à 180°, sans distinction des pendages (fig.35a)
- trois rosaces en nombre des directions de fissures de 0 à 360°, pour des classes de pendages 80-90°, 60-80° et 40-60° (fig.35b,c,d)
- une rosace en nombre des directions de fissures de longueur $\geq 50\text{cm}$ (fig.35e)
- deux histogrammes des longueurs de fissures (fig.35f).

Ces différents graphiques montrent :

- une orientation principale N80-90 et des orientations secondaires : 0-10, N60-70, N100-110 et N150-160.
- l'importance de l'orientation N80-90 pour les fissures de pendage subvertical (80-90°). Pour les fissures de pendage 60-80°, les directions N135-150, N180-195 et N240-255 prédominent,
- en ce qui concerne les fissures les plus longues ($> 50\text{cm}$), la direction N50-60 est la mieux représentée,
- une prédominance des petites fissures ($< 10\text{cm}$) et une décroissance régulière du nombre de fissures en fonction de leur longueur.

En conclusion, cette première approche permet déjà de classer les directions des fissures en fonction de leurs pendages et de leurs longueurs, en constatant que des différences apparaissent. La direction N80-90 est représentée par des fissures subverticales de petites dimensions, la direction N50-60 étant constituée de fissures de pendages variés et de longueurs plus importantes.

3.3.1.2. Relevés sélectifs

Deux relevés de fissuration ont été effectués en opérant une sélection des longueurs (seules les longueurs supérieures à 50 cm ont été mesurées). Chacun de ces relevés, situés sur deux parties opposées de la carrière, est constitué de 2 fronts de taille sensiblement orthogonaux de longueurs 30m environ.

Les résultats sont présentés en fig.36.

On constate :

- pour les fronts 1 et 2, deux directions principales orientées N50-60 et N140-150. Les fissures de pendage $\leq 80^\circ$ ne soulignent pas d'autres directions. En longueurs cumulées, N60-70 est la direction la plus importante.

- pour les fronts 3 et 4, une direction principale N140-160 et plusieurs directions secondaires : N0-10, N50-60, N70-80. Les fissures de pendage $\leq 80^\circ$ dégagent N255-270. En longueurs cumulées, N140-150 prédomine nettement : les directions secondaires sont alors N150-160, N0-10, N40-50, N70-80 et N100-110.

On peut souligner dans les deux cas que les directions faiblement représentées en nombre le sont encore moins en longueurs cumulées.

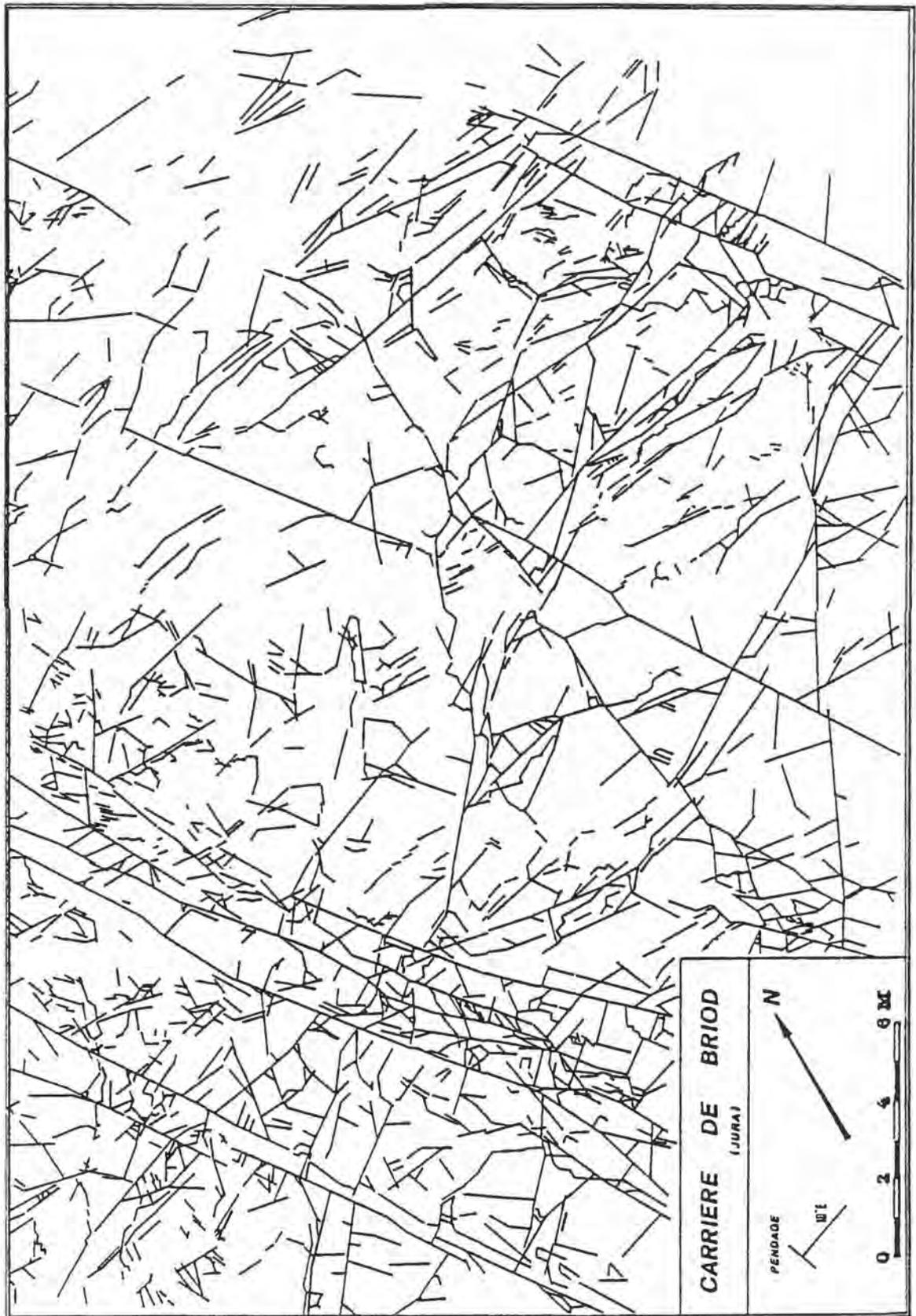


Fig. 37 - Fissuration de la dalle de la carrière de Briod

L'histogramme des longueurs de fissures montre une majorité de fissures courtes ($\leq 1m$), avec une décroissance en fonction de la longueur.

3.3.2. Etude de la fissuration sur dalle

3.3.2.1. Acquisition des données

La partie est de la carrière de Briod s'étend sur le platier du toit d'un banc calcaire, de direction N 340 et affecté d'un léger pendage (10° Est) (fig.37).

Une surface de 657m² a été nettoyée et photographiée à partir d'une nacelle de chantier élevée à une quinzaine de mètres au dessus du sol. Chaque cliché représentant une couverture de 9x5.6m = 50.4m² a été tiré sur papier au format 18x13, ramenant ainsi l'échelle de l'image au 1/50°.

L'étude de la fissuration sur dalle présente plusieurs avantages:

- il s'agit d'une image plane (plan horizontal, du type photographie aérienne), difficilement accessible dans les conditions naturelles (présence de la végétation) ; elle se situe à l'échelle de la petite fracturation,
- elle permet d'obtenir un échantillonnage de taille importante (2151 fissures ont été traitées), dont l'intérêt statistique est évident,
- la nature de l'image permet le traitement par logiciel d'analyse des linéaments, d'où une facilité accrue de dépouillement.

Pour des raisons de commodité dans la saisie des données, l'image originale a été subdivisée en six fenêtres qui nous permettront également des comparaisons.

3.3.2.2. Résultats

L'examen du document brut révèle que la dalle est découpée en panneaux par des fissures de grandes longueurs orientées N140-150 (fig.37). Cette observation prévaut nettement dans la partie Sud-Ouest de la dalle. Dans la partie NE, une fissuration N70-90 prédomine ; elle est cependant recoupée par de rares fissures N140-150.

Les résultats du traitement (fig.38) permettent d'obtenir :

- une vision générale de la fissuration de la dalle, en direction, longueurs cumulées et répartition des longueurs,
- une vision détaillée par fenêtres, selon les mêmes modalités.

La rosace générale des directions en nombre (fig.38) fait apparaître une répartition bimodale, centrée sur les directions N80-90

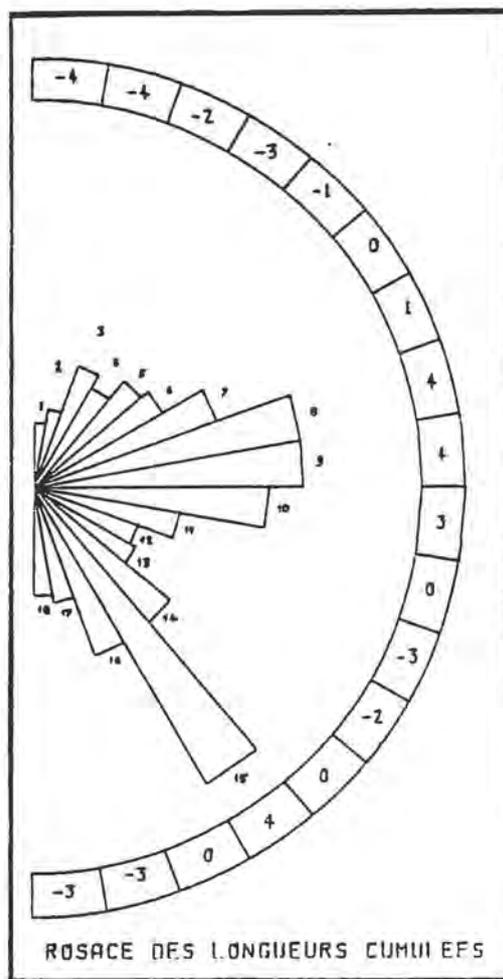
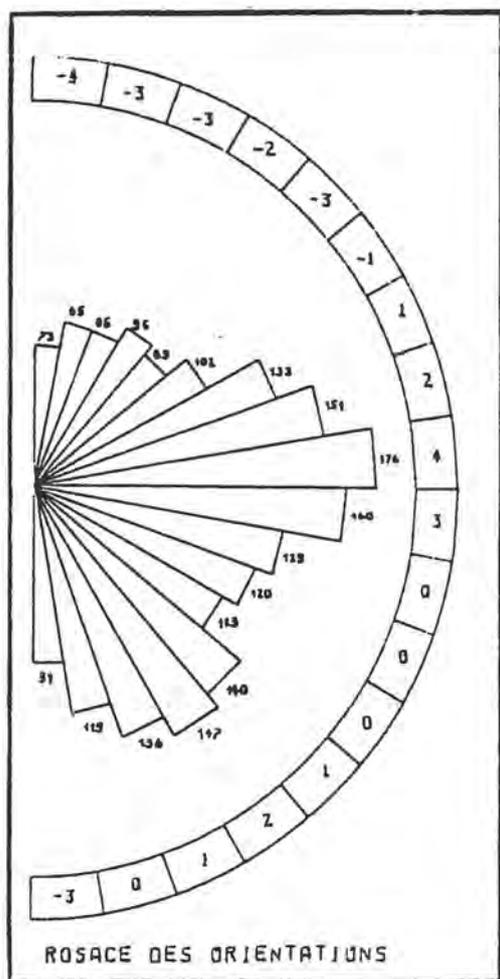
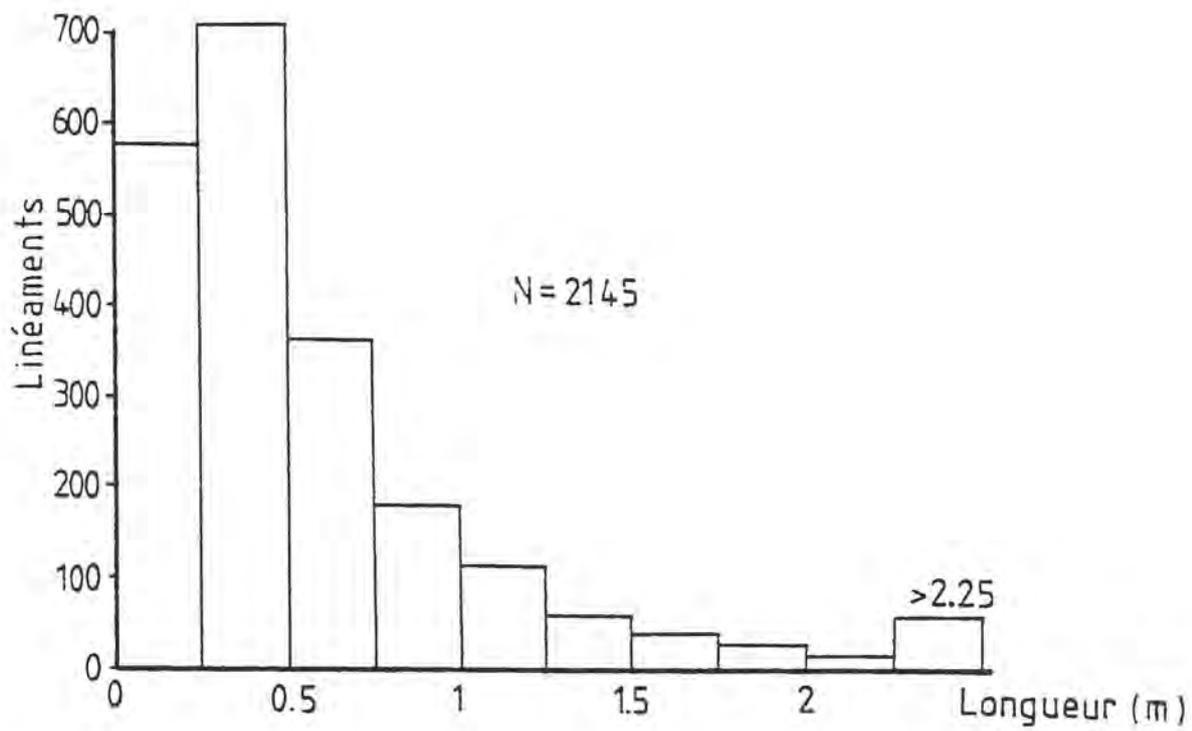


Fig. 38 - Traitement de la fissuration sur dalle

et N140-150. La rosace générale en longueurs cumulées introduit une ségrégation plus marquée entre les directions, privilégiant la direction N140-150.

Pour mieux quantifier cette différence, nous avons calculé la longueur moyenne des fissures pour chaque direction (fig.39), sous forme d'histogramme. Il en ressort que la direction N140-150 possède les fractures les plus longues (1.04m en moyenne), suivie des directions N70-80 (0.79m) puis N40-50 et N80-90 (0.68m).

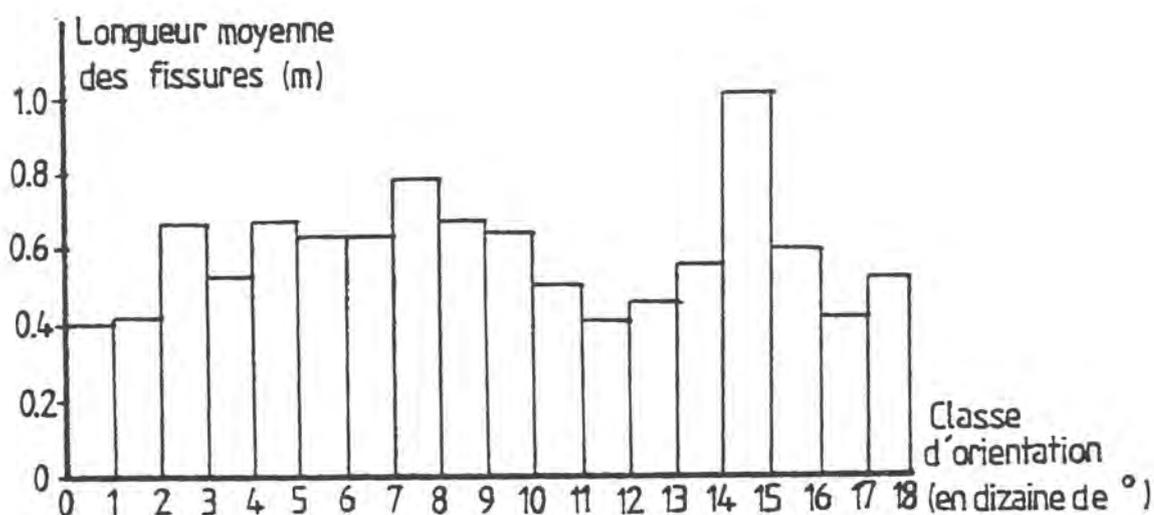


Fig. 39 - Fissuration sur dalle : longueurs moyennes des fissures

Les différentes fenêtres présentent des résultats relativement similaires, à quelques différences près :

- la fenêtre 5 (partie Sud) estompe la direction N80-90 et la fenêtre 4 (partie Nord) la direction N140-150. On retrouve ainsi quantifiée la traduction des observations préliminaires.

- les directions majeures peuvent légèrement varier : N130-140, prédomine dans la fenêtre 5, N70-80 dans la fenêtre 3, N90-100 dans la fenêtre 6

- des directions secondaires peuvent apparaître localement : N20-30 dans la fenêtre 6.

En terme de densité (tabl.10) en nombre de fissures par m², les valeurs varient dans un rapport de 1 à 2.4 (4.47 pour la fenêtre 1, 1.82 pour la fenêtre 4) et dans la même proportion pour la densité en longueur cumulée par m² (2.77 pour la fenêtre 5, 1.17 pour la fenêtre 4).

image	1	2	3	4	5	6	Total
nombre fiss/m ²	4.47	4.09	3.35	1.82	4.46	2.96	3.27
long.cum. m/m ²	2.53	2.15	2.13	1.17	2.77	1.97	1.98

tab.10 : Densité de la fissuration sur la dalle

3.3.2.3. Conclusions

L'étude de la fissuration sur la dalle de la carrière de Briod a permis de mettre en évidence deux directions principales :

- N70-90
- N140-150

dont l'une (N140-150) semble être sensiblement plus développée d'après l'étude des longueurs : elle correspond à un réseau de fissures découpant la dalle en panneaux.

Des différences spatiales ont pu être mises évidence :

- dans l'apparition des directions principales
- dans la densité des fissures sur la dalle.

3.3.3. Etude des images satellites

Le traitement a été effectué sur deux images d'échelles différentes, pour une délimitation géographique identique (Sud du plateau, incluant le secteur de Briod).

Ce sont :

- l'image du plateau au 1/100000
- l'image du secteur, au 1/50000 pour le document à notre disposition, ayant subi un traitement des couleurs. Ce traitement met l'accent sur les différences de couvertures végétales, mais aussi sur les variations de relief : certains accidents accompagnés de reliefs de faille sont ainsi nettement ressortis.

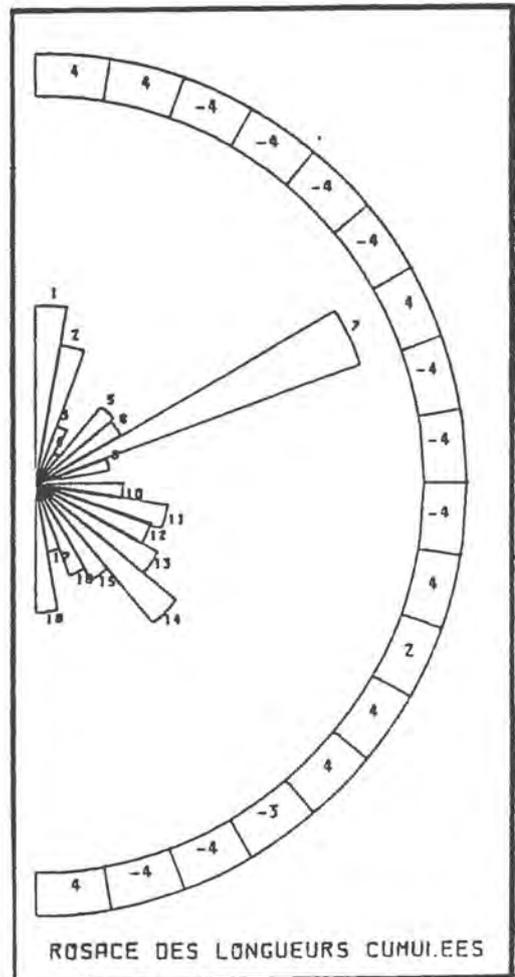
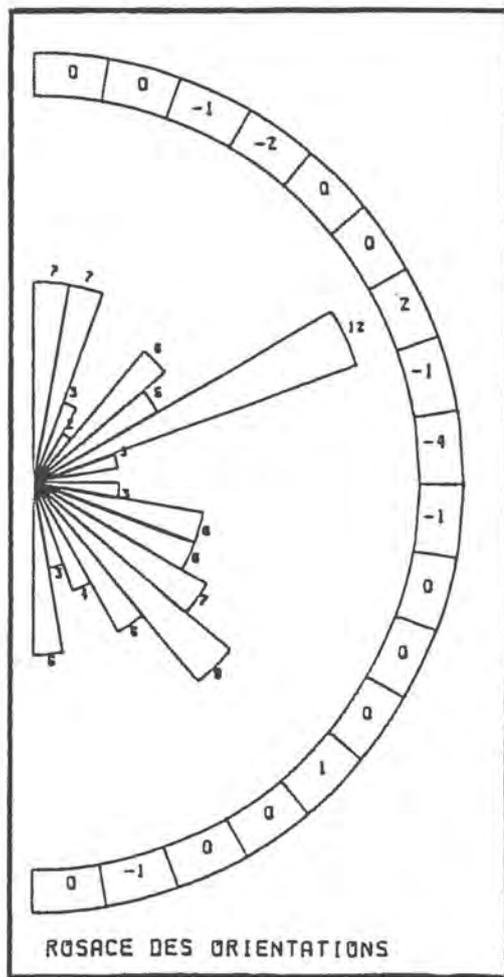
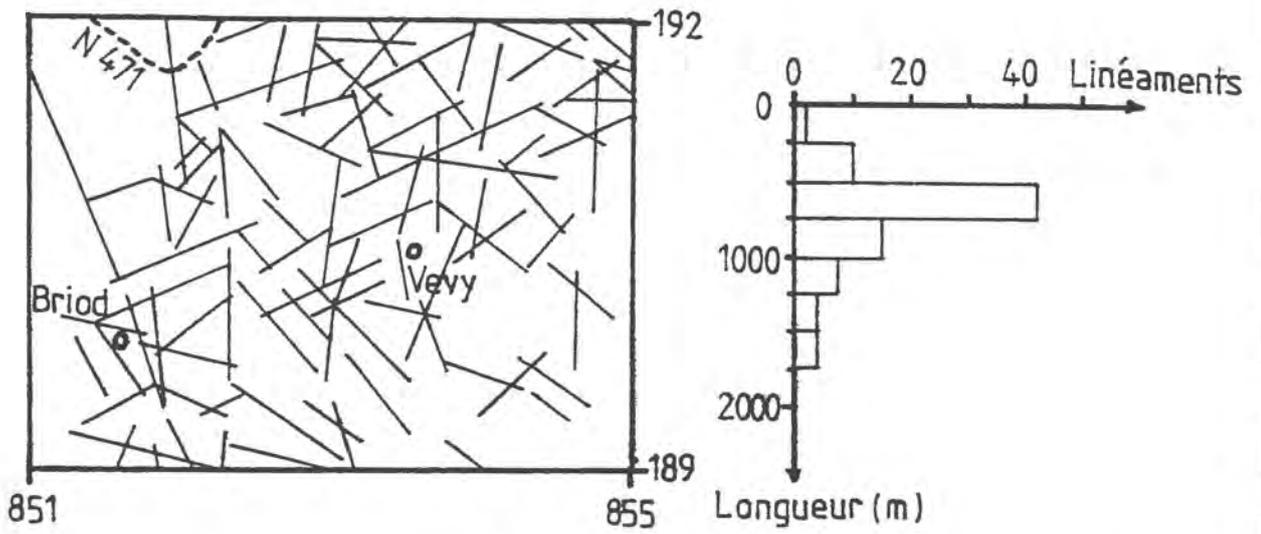


Fig. 40a - Photo-interprétation : image satellite au 1/50 000 du secteur de Briod

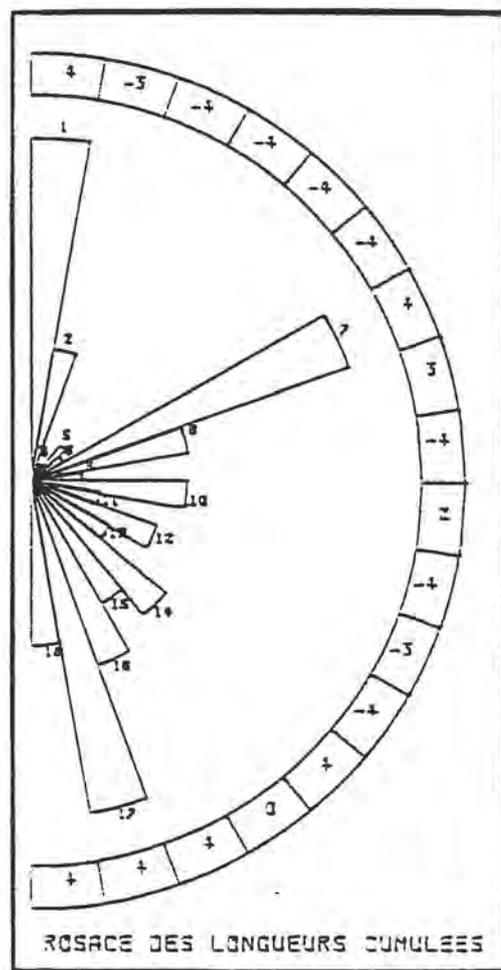
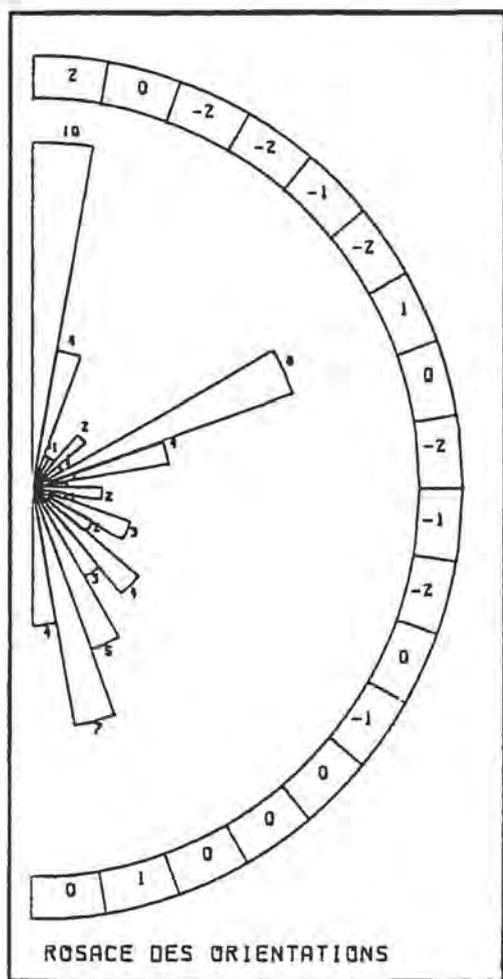
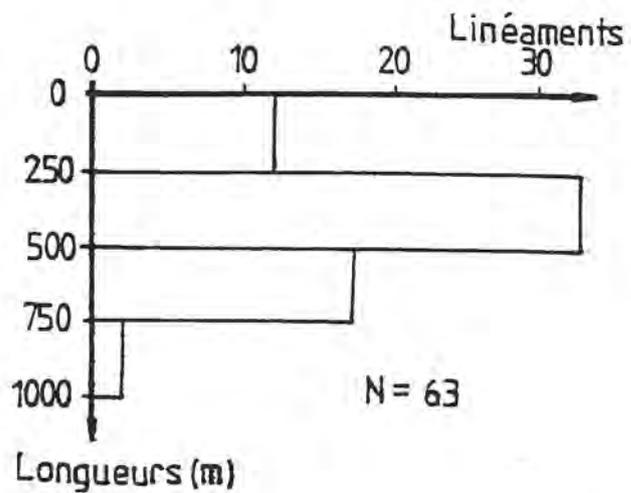
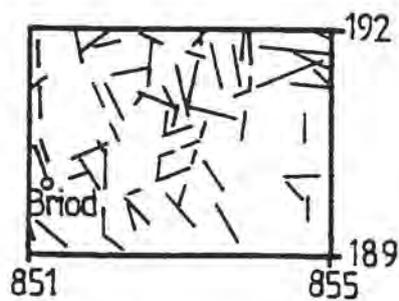


Fig. 40b - Photo-interprétation : image satellite au 1/100 000 du secteur de Briod

Les résultats, présentés en fig.40a et 40b, sont synthétisés dans le tableau suivant (tab.11):

Image	Directions principales	Directions secondaires
1/100000	N0-10; N60-70 ; N160-170	N130-140 ; N150-160, N170-180
1/50000	N60-70	N0-20 ; N100-110 ; N130-150 N170-180

Tab.11 : Résultats du traitement des images satellite (Briod)

Une direction apparaît donc commune : N60-70. Dans les deux cas, il s'agit de linéaments longs, comme l'indique la comparaison entre rosaces en nombre et en longueurs cumulées. La même remarque prévaut pour la direction N160-170 de l'image au 1/100000.

La direction N0-10, bien que principale en nombre, présente des longueurs cumulées plus faibles.

Le tableau 12 résume ces observations :

Classe	Image 1/100000
N 0-10	335
N 60-70	406
N160-170	471

Tabl.12 : longueurs moyennes (m) des linéaments des classes de directions préférentielles

En ce qui concerne les histogrammes des longueurs, l'image au 1/50000 possède une distribution plus étalée que celle au 1/100000; On peut attribuer ce résultat aux différences d'utilisateurs.

Un test de comparaison montre cependant qu'il n'existe pas de différences significatives entre les deux dessins, aussi bien du point de vue des directions que des longueurs.

3.3.4. Photographie aérienne

La photographie aérienne de Briod, analysée précédemment (cf chap. 3.2.1.), a mis en évidence des directions : N 0-10 et N160-170. La direction N60-70 est cette fois secondaire. il est cependant intéressant de constater que les directions N60-70 et N160-170 se caractérisent par des longueurs moyennes de linéaments supérieures à la direction N0-10 (tabl.13)

Classe	photo A. Briod
N 0-10	196
N 60-70	473
N160-170	381

Tabl.13 : longueurs moyennes (m) des linéaments pour les classes de directions préférentielles

3.3.5. Synthèse

En synthèse des résultats présentés précédemment, nous avons tenté de :

- donner une interprétation en fonction des contraintes ayant généré les discontinuités observées
- comparer les différents résultats en fonction de l'échelle.

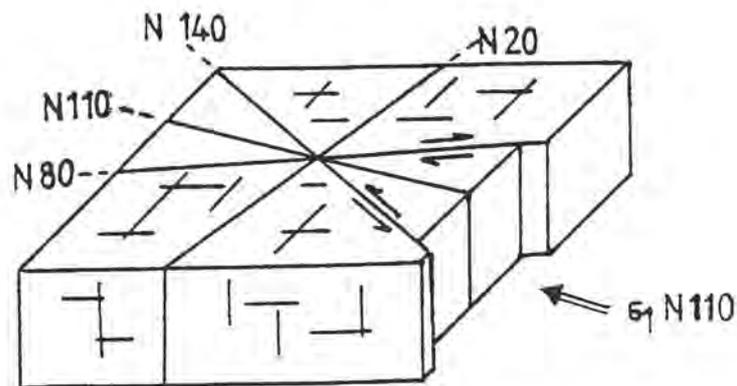


Fig. 41 - Interprétation des directions de la fissuration

3.3.5.1. Contraintes et structures observées

Bien que peu nombreuses, des traces de déplacement ont pu être observées sur les fronts de taille de la carrière : elles concernent essentiellement les directions N140-160 (6 observations dont 5 révélant un mouvement sénestre) et N60-80 (5 observations dont une dextre).

On peut dès lors proposer un schéma simple, conforme aux connaissances tectoniques de la région, (exposées dans le chapitre précédent) d'une contrainte principale orientée N110 (fig.41). Cette hypothèse d'une tectonique monophasée ne rend pas compte en totalité de la réalité, mais elle concorde de façon satisfaisante avec les observations faites sur la carrière.

Dans cette hypothèse, les directions N80 et N140 correspondent à un système de cisaillement conjugué ; les directions N110 et N20 aux fentes de tension.

3.3.5.2. Synthèse des images et conclusion

Les principaux résultats obtenus, en longueurs cumulées, sont résumés dans le tableau suivant :

Image	Directions principales	Directions secondaires
Station de la petite fissuration	N 80-90	N0-10 ; N60-70 ; N100-110 ; N150-160
station GF1-GF2	N50-70 ; N130-140	N40-50 ; N70-80
station GF3-GF4	N140-160	N0-10 ; N40-50 N70-80 ; N100-110
Dalle	N140-150 ; N70-90	
Photo aérienne Briod	N0-10 ; N160-170	N60-70 ; N90-100
Satellite 1/50000	N60-70	N0-20 ; N100-110 N130-150 ; N170-180
Satellite 1/100000	N0-10 ; N60-70, N160-170	N130-140 ; N150-160 N170-180

Tab.14 : Fissuration du secteur de Briod. Synthèse des résultats.

Ces résultats soulignent :

- dans presque tous les cas, la présence de deux directions conjuguées ENE et SE, qui correspondent à un jeu de cisaillement. La direction SE est par ailleurs parfaitement soulignée par les accidents cartographiés sur cette partie du plateau, plus tectonisée.

Le secteur de Briod se singularise donc par l'apparition de ce jeu, qui n'existe pas sur le reste du plateau.

- de ce fait, les autres directions observées sur le reste du plateau, l'une subméridienne et l'autre ESE, apparaissent dès lors secondaires.

La comparaison entre les rosaces en nombre et en longueurs cumulées a permis de distinguer différents comportements selon les directions : les fractures principales orientées ENE et SE apparaissent plus longues dans la majorité des cas. Les autres directions possèdent des caractères inverses.

CONCLUSION

L'étude de la fissuration et la comparaison à différentes échelles nous a permis de mesurer la représentativité et l'intérêt pratique de chaque type d'image.

Les images satellites, en fournissant une vision générale de la région, mettent l'accent sur les directions morphologiques et les directions structurales majeures. Elles permettent une distinction des différentes unités composant la région : trois ensembles ont ainsi été dégagés sur le plateau.

L'étude des alignements de dolines a fourni des résultats assez comparables à ceux de l'image satellite. Elle constitue donc une approche simple puisque liée à la morphologie, mais tributaire de la cartographie et du type de région étudiée.

Les photographies aériennes de moyenne échelle ont permis de mettre en évidence les caractéristiques de chaque secteur ; ces informations ont bien été relayées par l'étude des réseaux karstiques.

A toutes les échelles, l'adéquation entre les directions observées et les structures a pu être vérifiée. Dans le détail, les directions de la fissuration sont liées à une histoire tectonique polyphasée, pouvant expliquer également leur variabilité spatiale.

Au Nord du plateau, les structures principales identifiées par les accidents N30 et les pincées sont relayées à plus petite échelle par les résultats des stations de mesure. Les directions principales sont N30 et N150, cette dernière ayant pu jouer en décrochement senestre (pincée de Plasne, P. de LUCA, 1976). En confirmation, ce jeu a bien dirigé la karstification dans le secteur (gouffres des Frittes, de Bobignon, de la Borne aux Cassots). Soulignons enfin que la vallée de la Seille s'inscrit sur cette direction N150.

Un schéma similaire peut être repris pour expliquer les observations faites tout au Sud du plateau. La direction N150 prédomine nettement, elle semble de plus avoir été réactivée par la compression tertiaire.

C'est au centre du plateau que cette phase tectonique s'exprime le mieux, avec une direction N110 bien affirmée, très présente sur les stations de mesure et sur le réseau du Dard.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

1. Le plateau de Lons-le-Saunier représente un ensemble calcaire aalénien et bajocien d'une puissance de 150m environ, affecté d'un léger pendage est. Ses limites sont constituées à l'Ouest par le faisceau lédonien et à l'Est par la chaîne de l'Heute.

2. L'étude de la fissuration de ce massif a été abordée par le biais de 73 stations de mesure implantées le long des reculées. Elles ont tout d'abord permis d'identifier des directions préférentielles orientées NNE, ESE et SE (fig.14).

Un modèle de classification a ensuite été utilisé pour détecter les phénomènes perturbateurs de l'homogénéité de la fissuration sur le domaine : il a ainsi été démontré que la fréquence de fissuration des directions préférentielles est influencée par la position des stations dans la falaise.

La reconstitution des divers champs de fissuration a été effectuée par le développement des méthodes des variables régionalisées (variogrammes et krigeage). L'étude a été complétée par le calcul des tenseurs de perméabilité sur chaque station : en fonction des hypothèses émises pour l'ouverture des fissures, on a pu constater une grande dispersion dans les valeurs des conductivités hydrauliques, variant pour la majorité entre 5.10^{-7} et 10^{-9} . La cartographie du champ des perméabilités discerne des domaines perméables (Ladoye sur Seille, Baume les Messieurs, secteurs précédemment identifiés comme plus fissurés, fig.18) et d'autres nettement moins (avant-plateau de Nevy et partie centrale des reculées, fig.23 et 24). Les directions d'écoulement prépondérantes sont orientées quant à elles SE à Sud (fig.25).

Les résultats obtenus restent néanmoins dépendants des hypothèses émises au cours du développement, en particulier pour les ouvertures des fissures. D'autres choix auraient permis une comparaison instructive de cartes des perméabilités. La prise en considération des longueurs de fissures aurait également apporté un gain d'information.

3. Une étude générale de la fracturation du plateau a été conduite à partir d'images de natures différentes (aériennes et cartographiques) et à des échelles différentes (niveau régional à local).

Au niveau régional, à partir de l'image satellite et des alignements de dolines, une fracturation subméridienne prédomine. On a également mis en évidence une sélection des secteurs à étudier de manière plus fine.

Au niveau local, les résultats sont divergents :

Secteur	Photo-interprétation	Réseaux	Affleurements
Nord (Ladoye)	N 10-20 N 100-110	N 0-40 N 130-150	N 20-30 N 110-150
Milieu (Baume)	N 80-100	N 90-100	N 0-10 N 90-110
Sud (Briod)	N 0-10 N 170-180	-	N 70-90 N 140-150

Malgré cette variabilité spatiale des résultats, on a pu souligner :

- l'adéquation de la fracturation à la structure (la fissuration sur affleurements suit l'incurvation des reculées ; les réseaux karstiques sont parallèles aux failles).

- une certaine homogénéité des résultats pour des délimitations spatiales restreintes.

En l'absence d'une étude tectonique détaillée, on ne peut que formuler des hypothèses à partir des connaissances régionales des contraintes et des déplacements :

- le découpage du socle en panneaux N 30-N 130 (P. CHAUVE et al, 1988) est à mettre en liaison avec la direction des failles au Nord du secteur.

- la direction de raccourcissement tertiaire, estimée à N 125 (J.P. SOPENA, J.P. SOULAS, 1973), peut expliquer la direction N 110-120 ; seuls les secteurs de Briod (carrière) et de Crançot fournissent des indices permettant d'étayer cette hypothèse.

DEUXIEME PARTIE

- Le bassin versant de la Seille
- Bilan climatique et hydrologique

INTRODUCTION

Les reculées de la Seille drainent les eaux d'infiltration du premier plateau jurassien, dont nous précédemment décrit les caractéristiques physiques. L'étude hydrologique va nous permettre de définir le contexte hydrogéologique, puis les limites du bassin versant. Un bilan climatologique et hydrologique pourra ensuite être proposé, ainsi qu'une approche du comportement hydrodynamique de l'aquifère.

CHAPITRE 1- LE BASSIN VERSANT DE LA SEILLE

1.1. HYDROGEOLOGIE

1.1.1. Sources (fig.42)

Les sources apparaissent au pied des reculées, au contact des marnes du Lias (niveau imperméable, mur des calcaires aquifères). Le plateau calcaire (Aalénien, Bajocien, Bathonien) est aquifère dans son ensemble, aucun niveau imperméable important n'interrompant la série.

Le tableau 15 donne en coordonnées Lambert la position des principales sources, par ordre d'importance décroissante.

Source	X	Y	Z
1- St Aldegrin	853.85	193.94	348
2- Ladoye	856.22	201.56	385
3- Dard (Grottes de Baume)	852.35	193.10	409
4- Blois	855.50	199.54	375
5- Blois Sautelard	856.10	200.70	390
6- Nevy	852.62	198.10	280

Tableau 15 : Situation des principales sources des reculées de la Seille.

Outre ces principales émergences, dont le tarissement complet demeure exceptionnel, on relève de nombreuses autres émergences de moindre importance, dont le débit n'excède pas quelques l/s ; leur pérennité est très variable.

Les sources les plus importantes possèdent des caractères communs :

- la structure du plateau (monoclinale, légèrement inclinée vers l'Est) confère aux émergences une nature de sources de débordement à contre pendage.

- A l'exception du Dard (Grotte de Baume), les sources apparaissent toutes dans le talus d'éboulis situé au pied de la falaise. Ceci signifie que l'émergence est "diffuse" : l'eau circule sous les éboulis avant d'apparaître à l'air libre. Lors de la mise en charge de la source, l'émergence apparente s'étend vers le haut des éboulis.

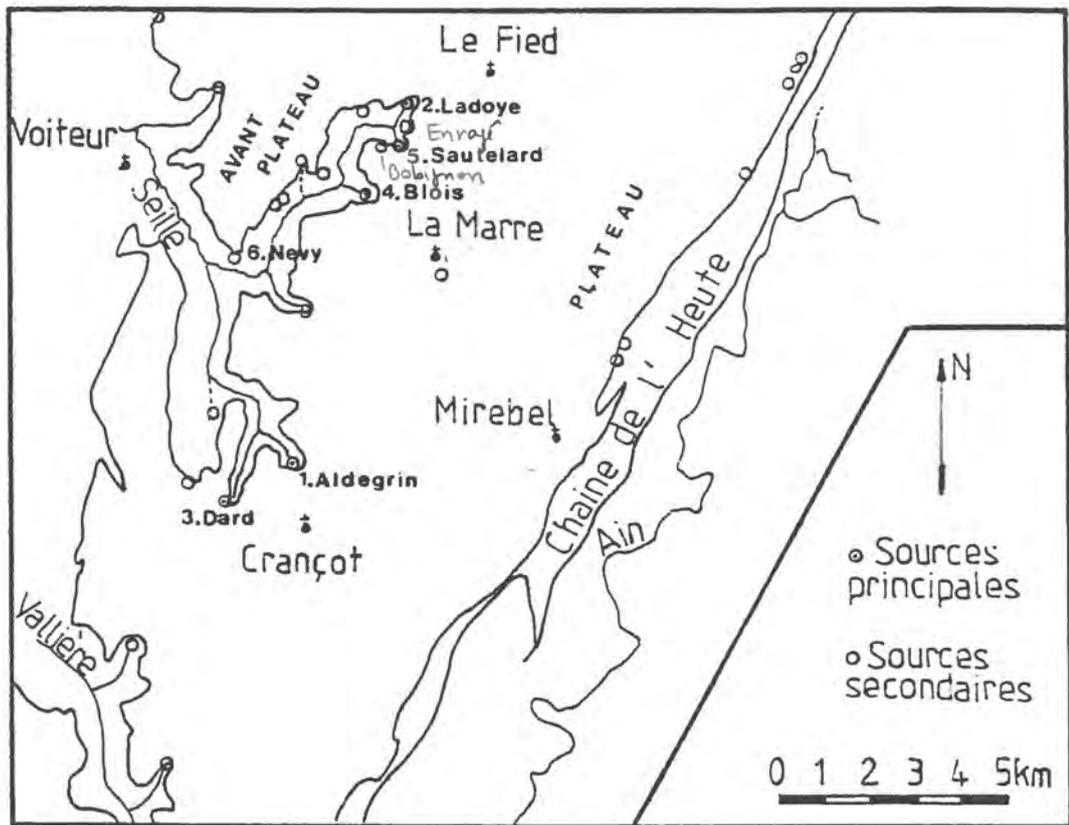


Fig. 42 - Localisation des sources

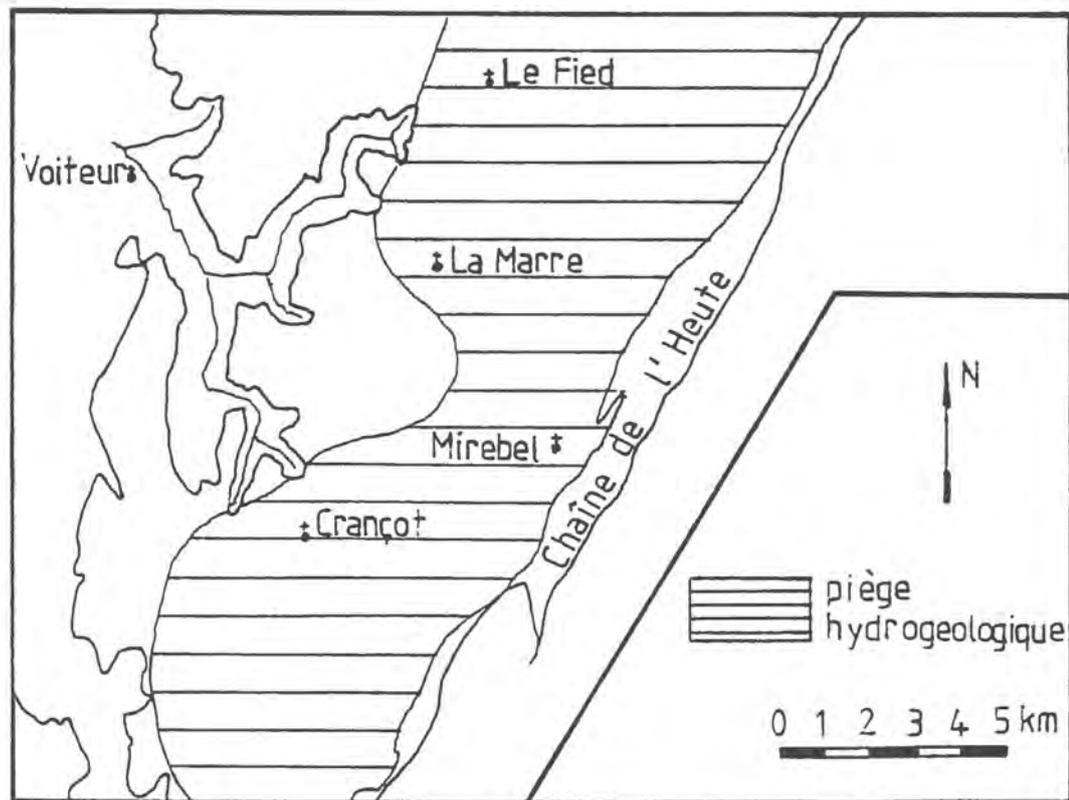


Fig. 43 - Carte du piège hydrologique

Chaque source est sans doute constituée de plusieurs griffons masqués par les éboulis.

Lors des périodes de crue, des exutoires temporaires situés beaucoup plus haut dans les falaises sont remis en charge : la cascade de Bobignon (X = 855.6, Y = 200.8, Z = 500) constitue ainsi un trop plein des sources de Ladoye.

Les sources principales drainent toutes la partie Est du plateau par le biais des reculées, à l'exception de la source de Nevy/Seille (exurgence du réseau de la Borne aux Cassots) qui apparaît à l'extrémité d'un contrefort rocheux et draine une partie de l'avant-plateau situé au Nord de Nevy.

La chaîne de l'Heute renferme un second système aquifère d'extension très limitée : les calcaires du Jurassique supérieur, qui surmontent les marnes et calcaires marneux de l'Oxfordo-Argovien, livrent de petites sources, réparties sur le versant ouest de la chaîne. Ces eaux se perdent dans les calcaires bathoniens après avoir ruisselé sur les marnes.

1.1.2. Caractéristiques de l'aquifère du plateau

Un simple examen de la carte géologique permet de dégager les caractères principaux de l'aquifère ; l'enfoncement du substratum imperméable vers l'Est et le blocage occasionné par la chaîne de l'Heute sont responsables de la formation d'un piège hydrologique au sein du plateau (J.J. COLLIN et al, 1967). La carte du piège probable donnée par ces auteurs (fig.43) fait ressortir l'existence d'un dôme dans la partie centrale du plateau, lié au relèvement de l'imperméable dans ce secteur.

En terme d'aquifère, il semble probable que son épaisseur se trouve réduite dans cette zone ; l'absence de source importante entre Blois et St-Aldegrin confirme cette hypothèse. Ceci impliquerait une diffluence des eaux vers les parties terminales des reculées (sources de Bois-Ladoye d'une part, et de Baume-les-Messieurs d'autre part).

Les seules données piézométriques disponibles intéressent le forage de Crançot (X = 856,20, Y = 193.48, Z = 526.3m). Ce forage a atteint le Lias à la cote +269NGF.

On peut résumer ainsi les principaux enseignements apportés par cet ouvrage (rapport CTGREF, 1973) :

- Variations du niveau statique : de -77m à -104m/sol, soit un battement de nappe de 27m.
- Transmissivités calculées d'après les essais de pompage : de 2 à $3.4.10^{-5}$ m²/s.
- Rabbatements spécifiques : de 3.7 à 5.35 m/m³/h avant acidification, de 2.76 à 3.25 m/m³/h après acidification.

Le forage a donc mis en évidence :

- une importante zone noyée (150 à 180m), dont les niveaux statiques les plus faibles (422m) se révèlent à une cote bien plus élevée que celle de la source la plus proche (St Aldegrin Z = 348m), soit un gradient apparent de 3.3 %.

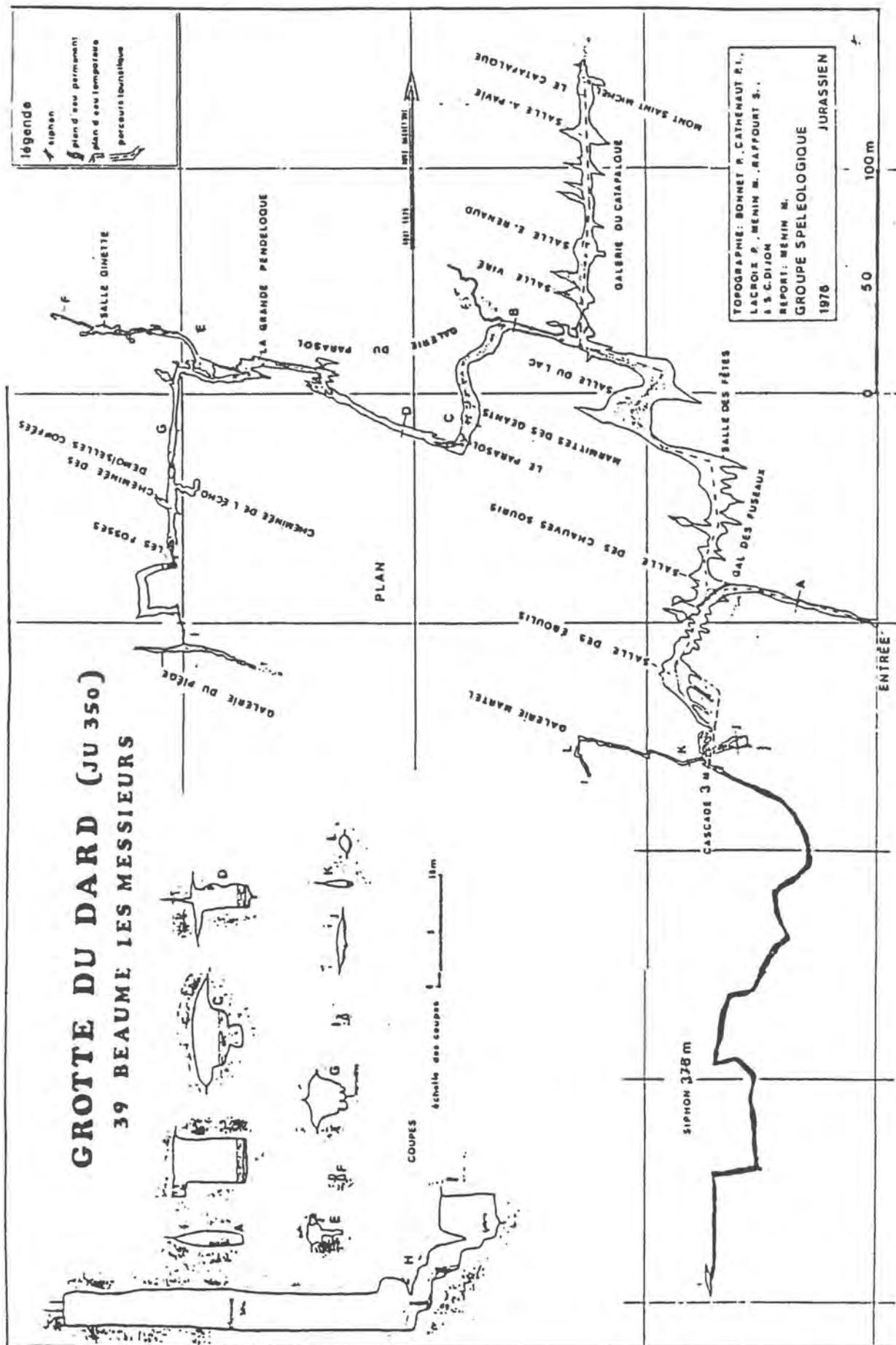


Fig. 44 - Plan de la grotte de Baume-les-Messieurs

- des caractéristiques hydrodynamiques médiocres, révélant un milieu de fissures fermées que les acidifications successives n'ont guère réussi à améliorer (P. CHAUVE et al, 1976).

Il semble donc difficile de tenter une quelconque généralisation à partir de ces résultats représentatifs d'une zone de faible perméabilité de fissures.

1.1.3. Aspect du karst souterrain

Un inventaire des différentes grottes et cavités souterraines a été dressé par J. COLIN (1966), d'après les travaux de reconnaissance des spéléologues jurassiens. On peut les regrouper en deux ensembles :

- les gouffres et cavités s'ouvrant à la surface du plateau,
- les grottes et ouvertures situées dans les falaises des reculées, inactives
- les grottes et exurgences

Le premier groupe n'offre qu'un ensemble de cheminées et de puits peu profonds, parfois prolongés de conduits obstrués. A l'exception du gouffre des Frites (Frontenay) et de la Grande Borne (Publy), ces puits sont secs et demeurent inactifs;

Le second groupe comprend en majorité des couloirs ou boyaux de petites dimensions, obstrués. Ils sont généralement situés en milieu de falaise, à des cotes variant de 420 à 500m. Leur fossilisation témoigne de l'approfondissement des eaux.

La grotte de Bobignon constitue cependant une exception à ce groupe, en raison de ses dimensions (200 mètres de développement) et de son activité temporaire lors d'épisodes pluvieux de grande intensité. Elle n'est explorable qu'en temps de sécheresse, ce qui contraste avec sa position élevée dans la falaise (z = 500, le sommet de la falaise étant situé à 530m).

Le troisième groupe ne comprend que deux réseaux de galeries reconnues associés à une exurgence : la grotte de Baume-les-Messieurs (source du Dard), et le réseau de la Borne aux Cassots (Nevy sur Seille).

La grotte de Baume-les-messieurs (fig.44) présente de hautes salles (20 à 30m), issues de la dissolution de diaclases orientée N110. Le réseau se divise en deux parties :

- une partie sud, siège de l'écoulement de la source. Un griffon assure la pérennité de l'écoulement ; la cascade et divers exutoires dans la falaise fonctionnent en trop plein en moyennes et hautes eaux.

- une partie nord, actuellement aménagée pour les visites, présente des concrétions et de grandes salles.

Le développement total de la grotte est de 1400m. Les différents segments s'achèvent par des siphons terminaux.

Le réseau de la Borne aux Cassots (fig.45) n'a été reconnu qu'après une désobstruction récente (1968). Une grotte de dimensions imposantes (10 km de galeries) a ainsi été mise à jour (G. CHORVOT, P. TRESSE, 1979). Le réseau est constitué d'une galerie principale, active,

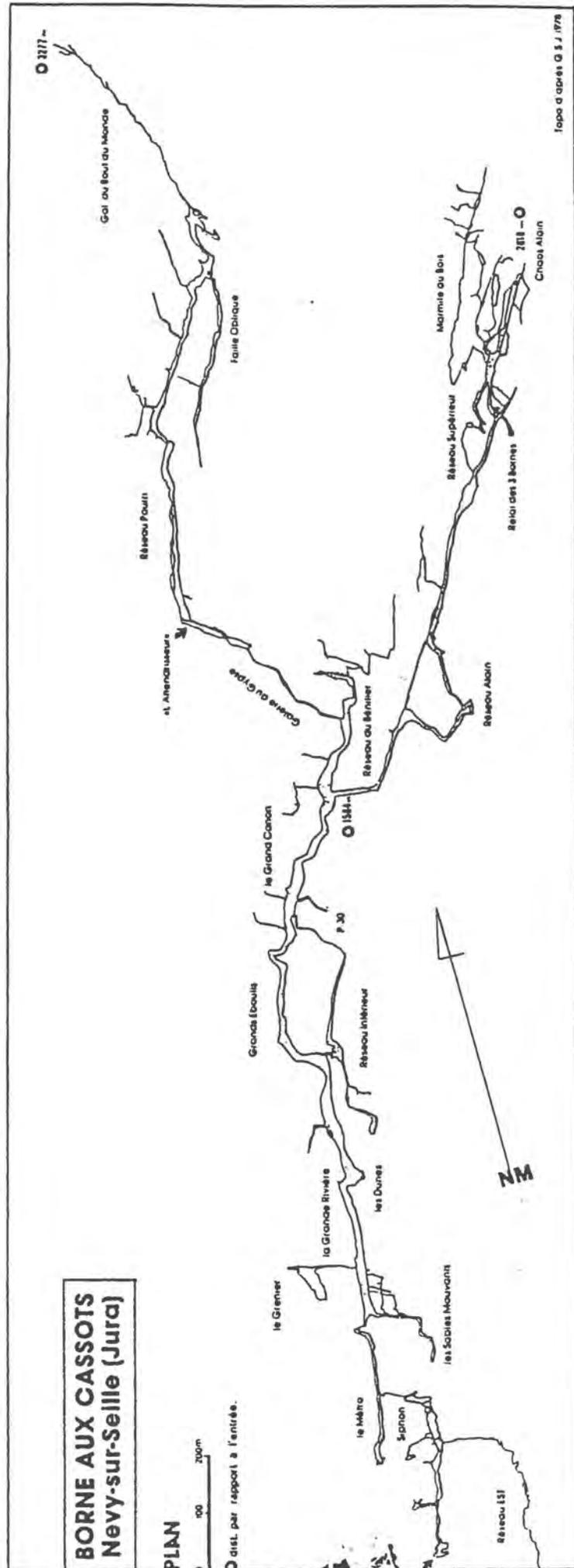


Fig. 45 - Plan du réseau de la Borne aux Cassots

et de galeries fossiles, pouvant dominer de plusieurs dizaines de mètres le lit du ruisseau.

A environ 1350 m de l'entrée, le réseau se subdivise en deux tronçons : la galerie de droite, rectiligne, suit un trajet parallèle à une faille majeure (voir fig.31, p.63). Le tronçon de gauche s'oriente sur un axe S-N. En projection, ces galeries s'enfoncent respectivement de 2.75 km et 2.45 km sous ce compartiment du plateau.

L'aperçu du karst souterrain met donc en évidence deux phénomènes

1- une karstification développée dans les niveaux superficiels du plateau. Bien qu'apparemment fossile, elle est susceptible de jouer encore un rôle dans les écoulements actuels.

2- les réseaux mis à jour témoignent d'une organisation des écoulements, et de la mise en place d'"unités de drainage" au sens défini par A. MANGIN (1975).

Les sources principales autres que Nevy et le Dard n'ont quant à elles pas livré le passage à des réseaux explorables. Les traçages constitueront un second moyen de reconnaissance des écoulements souterrains.

1.2. DELIMITATION PHYSIQUE DU BASSIN VERSANT

1.2.1. Apport des traçages (fig.46)

Plusieurs traçages, dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau 16, ont été effectués sur le plateau, antérieurement à cette étude.

Les premiers traçages ont été réalisés dans le cadre de l'étude du piège hydrologique du plateau (J.J. COLLIN et al, 1965 et 1967).

D'autres ont été réalisés dans le cadre des reconnaissances spéléologiques (Frontenay, Nevy) ou de l'étude des rejets polluants (La Marre). Nous avons complété cette série par le traçage de la source de La Marre (des résultats apparemment négatifs avaient été auparavant enregistrés sur le réseau d'eaux pluviales de la Marre).

Les divers résultats font ressortir la complexité des écoulements. Le drainage général s'effectue vers l'Ouest, au profit des sources de la Seille. L'existence d'un drainage Nord-Sud au sein même du plateau paraît être attestée par les colorations de Crançot et de La Marre : ces circulations "croisées" paraissent néanmoins surprenantes et peuvent mettre en doute la validité de certains résultats.

Les vitesses apparentes de circulation des eaux sont élevées : de 56 à 210 m/h. Elles traduisent des écoulements de type karstique et confirment l'existence de chenaux au sein du massif calcaire.

1.2.2. Limites physiques du bassin

Les limites du bassin versant de la Seille à Voiteur peuvent être définies de la manière suivante :

n°	INJECTION						REPARTITION						
	Lieu	x	y	z	Date	Colorant	Lieu	x	y	z	Dist	Vapp (m/h)	
1	Publy	853.22	186.63	533	19.07.81	Fluo 10kg	Baume.Dard	852.35	193.07	420	6400	64	Htes eaux
2	Bonnefontaine la Vermillière	862.30	199.18	610	11.10.82	Fluo 10kg	ladoye Sce N ladoye Enragé ladoye Sautel Blois/S	856.22 856.18 855.93 855.93	201.58 201.03 200.80 199.54	390 390 375 390	6500 6500 6500 6800	120 120 120 120	Crue
3	Crançot (sondage) (-100m)	856.65	193.50	445	1970	Fluo 2kg	Baume:St Al. Baume: Dard Blois	853.64 852.35 855.50	193.94 193.10 199.57	348 410 380	2800 4300 6100	125 148 210	
4	La Marre Porcherie	857.67	198.34	530	25.06.80	Fluo 5kg	Baume (St Aldegrin)	853.84	193.94	348	5800	80	Crue
5	La Marre Fromagerie	856.75	198.40	525	14.01.87	Fluo	Blois/S	855.50	199.67	300	2000	80	
6	La Marre Perte	857.32	197.92	519	19.04.88	Fluo 2kg	Blois	855.50	199.57	380	2400	56	Moyennes eaux
7	Frontenay Gouf. Frites	852.46	203.37	492	29.07.51	Fluo 0.4kg	Menetru Sce du Latet	851.85	201.70	352	1800	64	-
8	Nevy/Seille Perte Borne aux Cassots	852.66 852.56	198.23 198.40	305 295	20.02.66	Fluo	Source captage	852.52	198.19	280	250	125	

Tabl. 16 - Traçages effectués sur le bassin de la Seille.

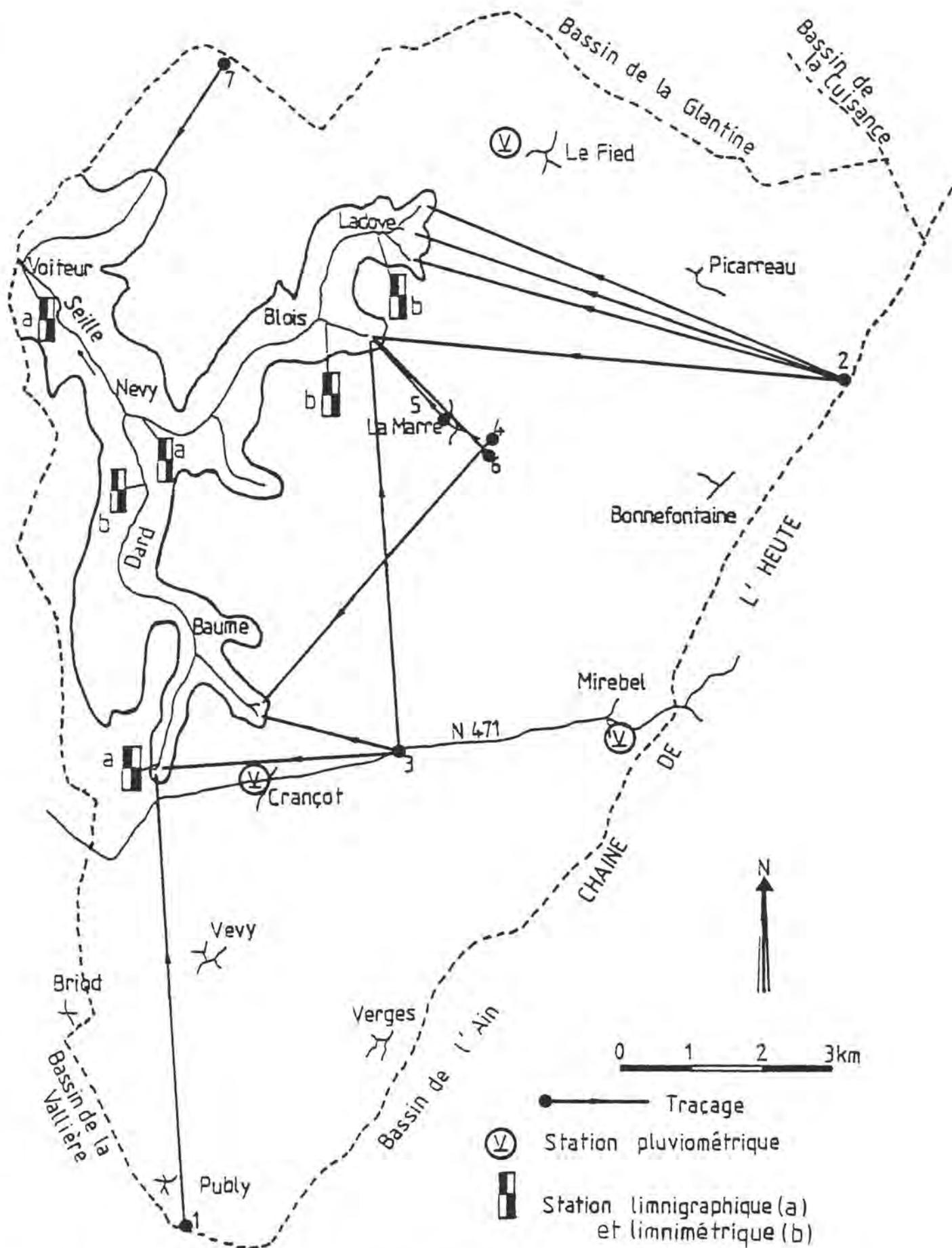


Fig. 46 - Carte des traçages et des limites du bassin versant de la Seille à Voiteur

- Au Sud par le coin du plateau s'inscrivant au nord d'une ligne Briod - Publy - Binans - Verges : il est ainsi tenu compte des limites du bassin de la Vallière (reculées de Lons le Saunier, rapport CPGF, 1988), et des limites prévisibles du bassin de la source de la Doye à Nogna, situé plus au Sud. J. AUBERT (1972) attribue ce secteur au bassin du Haut Valouson.

- A l'Ouest par l'anticlinal liasique de la Peyrouse, dont le ruisseau est affluent de la Seille. A l'Ouest de cette limite, les eaux échappent à la Seille et sont drainées par le Serein. Au Nord, les limites sont moins précises : les eaux peuvent rejoindre soit la Brenne le long de la pincée de Plasne-Poligny, soit la Glantine plus au nord. Le manque d'informations concernant ces bassins, lié à l'absence de colorations sur le secteur (faute de perte de lésines), nous amène à tracer une limite prévisible, en considérant les deux bassins précités ainsi que celui de la Cuisance (F. DUBREUCQ, 1987).

- A l'Est, la chaîne de l'Heute constitue une barrière continue en raison de sa structure. L'affaissement de la pincée met en contact le Bathonien du plateau avec l'ensemble Oxfordien-Argovien de la chaîne. Plus au sud, c'est la remontée structurale des marnes liasiques qui entraîne un autre effet de blocage.

Seul le secteur de Mirebel peut constituer un point faible de cette barrière : outre la réduction du rejet de la faille principale qui remet en contact deux compartiments : Bajocien - Bathonien, l'existence d'un accident transverse à la chaîne pourrait favoriser un drainage ouest-est, de la même façon qu'à Montrond où le colorant a traversé la chaîne et a été observé au Bief du Moulin.

Ainsi défini, le bassin versant représente une superficie de 155 km².

CONCLUSION

Le bassin versant de la Seille, déterminé sur la base des traçages ainsi que sur l'extension des bassins voisins, couvre une superficie de 155 km². La morphologie apparaît conditionnée par les structures géologiques (développement des reculées) et par l'histoire quaternaire de la région (érosion glaciaire et karstique).

Les traçages ont fait apparaître un aquifère karstique possédant une zone noyée importante, et au sein duquel les écoulements sont complexes : on peut présager d'une forte imbrication des différents sous-bassins composant cette partie du plateau, à l'exemple du bassin de la Cuisance. L'étude du bilan et du fonctionnement hydrologique du bassin versant vont nous permettre de détailler ces différentes caractéristiques.

y'avait une page blanche!

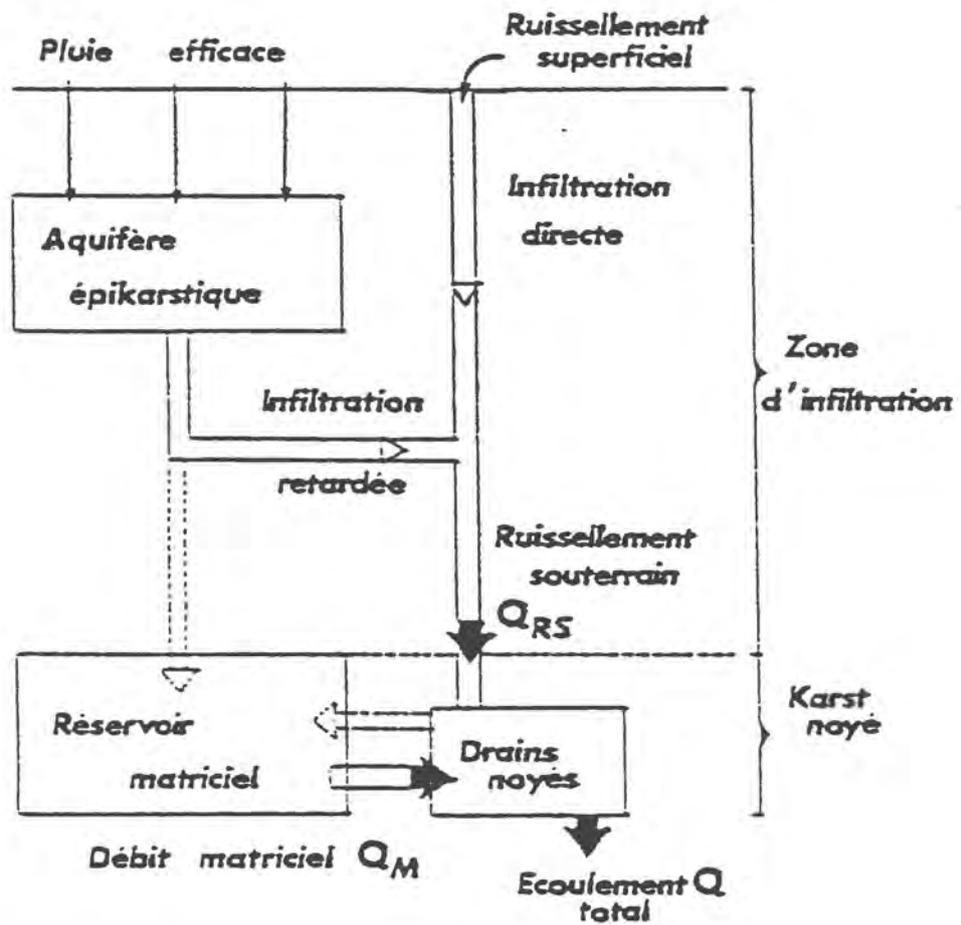


Fig. 47 - Modèle de fonctionnement du karst (B. BLAVOUX, J. MUDRY, 1983)

CHAPITRE 2 - BILAN CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE

Le fonctionnement hydrodynamique des systèmes karstiques présente des analogies avec les bassins versants : aussi peut-il être schématisé de la manière présentée en figure 47 (d'après B.BLAVOUX et J.MUDRY, 1983). Le modèle synthétise à la fois les travaux de C.DROGUE (1969) (drains et systèmes annexes capacitifs), ceux de A.MANGIN (1975) (unités de drainage, aquifère épikarstique) et ceux de B.BLAVOUX (1980).

Ce modèle nécessite de connaître les entrées (bilan climatologique) ainsi que les sorties (débits). L'étude des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sera abordée par l'application de méthodes classiques en hydrogéologie (débits classés, débits cumulés, étude des décrues et tarissements).

2.1. BILAN CLIMATOLOGIQUE

2.1.1. Mesures des pluies et des températures

La Météorologie Nationale dispose d'une station climatologique sur la partie du plateau proche des reculées de la Seille : la station de Crançot, équipée d'un pluviomètre. La station de Besain, située au Sud du bassin de la Cuisance, a été prise en considération pour les températures. En admettant une relative homogénéité des températures sur l'ensemble du plateau, les mesures de cette station demeurent exploitables.

Les autres stations pluviométriques les plus proches n'ont pas été retenues en raison de leur situation : Marigny dans la vallée de l'Ain à l'Est, et Domblans dans la plaine à l'Ouest.

Nous avons donc complété cet équipement par deux autres pluviographes à enregistrement hebdomadaire, situés respectivement sur le plateau (voir situation en fig.46) :

- au Fied (secteur des reculées nord)
x = 857.06 ; y = 202.55 ; z = 530
- à Mirebel (pied de la chaîne de l'Heute)
x = 859.17 ; y = 194.06 ; z = 584

2.1.2. Données climatiques

2.1.2.1. Précipitations

Les précipitations enregistrées à Crançot durant 30 ans (1959-1988) ne font pas ressortir de grandes variations saisonnières de la pluviométrie : le mois le plus sec reste juillet (90.8 mm en moyenne), les plus arrosés novembre et décembre (134 et 130mm).

Le rapport de l'année la plus humide à l'année la plus sèche est de $1813/832 = 2.2$

Sur trente ans, le module annuel moyen est de 1391mm ; l'écart-type de cette distribution est 245mm (voir fig.48 et tab.17).

Les mois présentant en moyenne interannuelle la plus grande variabilité sont ceux du printemps (mai et juin) et ceux de l'automne

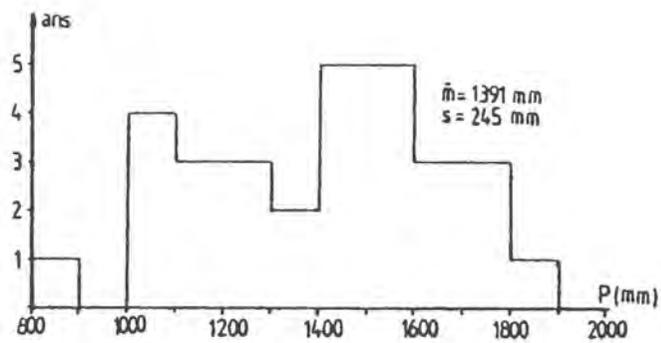


Fig. 48 - Répartition des modules pluviométriques annuels à Crançot.

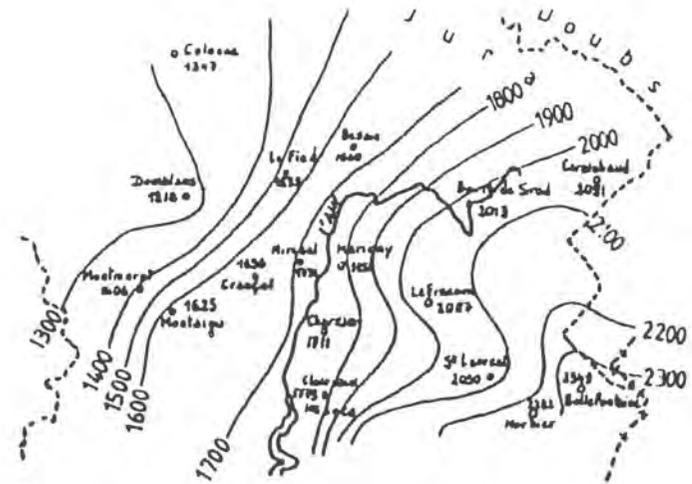


Fig. 49 - Carte des précipitations du Jura (1988)

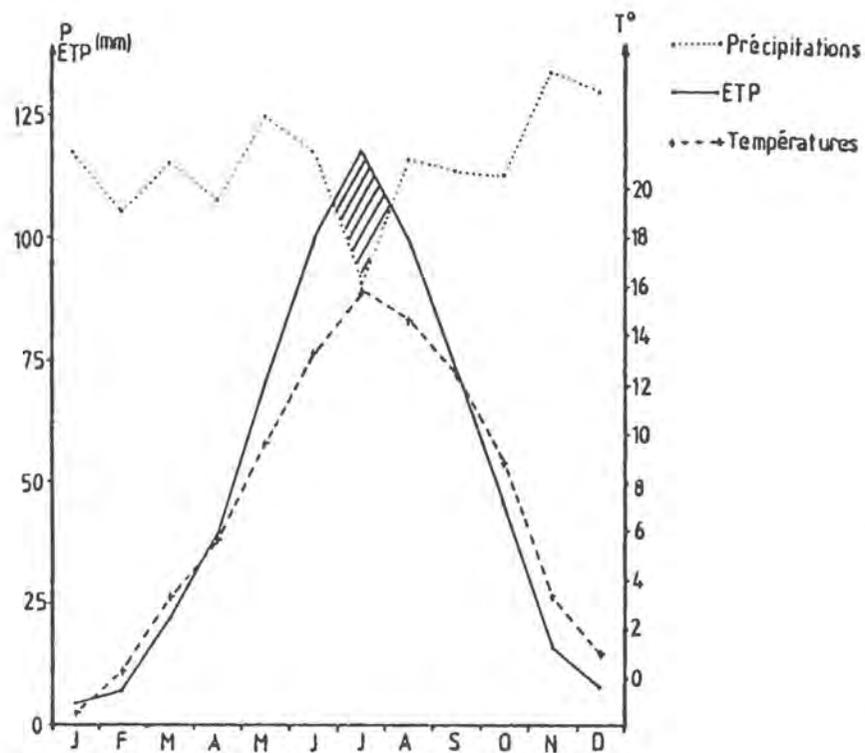


Fig. 50 - Bilan hydrique moyen (12 ans) sur le premier plateau

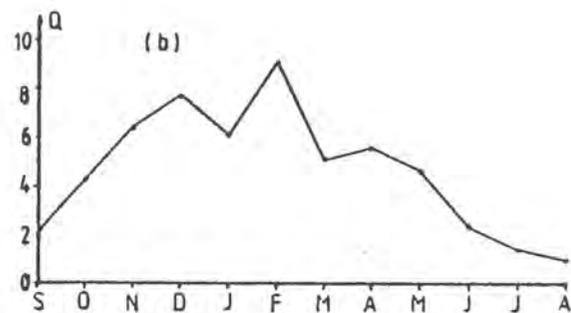
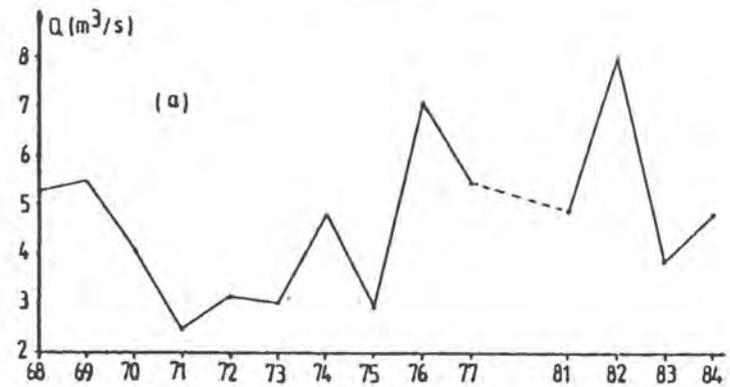


Fig. 51 - Modules annuels (a) et mensuels (b) des débits de la Sella à Volteur

(septembre et octobre). Les mois les plus réguliers en quantité précipitée sont janvier et juillet.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moyenne	118.1	105.6	115.5	108.2	125.8	118.0	90.8	116.3	114.5	113.0	134.7	130.3	1391
Ecart type	44.8	57.8	51.5	60.7	66.9	65.8	48.7	51.3	67.2	64.7	58.5	60.4	245
Maxima (année)	216.2 (86)	269.5 (77)	229.8 (88)	287.2 (83)	370.2 (83)	282.9 (87)	187.3 (65)	270.5 (60)	238.5 (65)	280.3 (74)	268.0 (63)	279.6 (66)	1813 (65)
Minima (année)	51.1 (63)	4.6 (59)	18.8 (73)	16.2 (82)	42.0 (61)	4.1 (76)	3.9 (64)	39.6 (84)	8.0 (59)	1.7 (69)	25.5 (78)	5.6 (63)	832 (64)

Tab.17 - Précipitations enregistrées à Crançot (1959-1988, 30 ans)

La carte des précipitations annuelles du Jura présente un gradient général ouest-est, conforme à l'augmentation d'altitude de la région dans cette direction.

Bien que cette loi ne semble pas respectée dans le détail des unités morphologiques (le second plateau ne présente pas en effet de liaison très marquée entre pluviosité et altitude, J. ITTY, J. VINTAER, 1988), le premier plateau est l'objet d'une augmentation régulière des précipitations de l'Ouest vers l'Est. A cette échelle, on remarque cependant qu'il s'agit plus d'une question de longitude que d'altitude, le plateau lui-même ne possédant aucun relief autre que la chaîne de l'Heute.

A titre d'illustration, la figure 49 donne les modules pluviométriques de l'année 1988 et les isohyètes associées pour le premier plateau : celles-ci se situent entre 1200 (Domblans) et 1700 (Marigny).

La neige ne représente qu'une faible partie des précipitations, se répartissant essentiellement en janvier et février. A Besain, le rapport neige-pluie varie de 7.5 % à 25.7 %. Pour l'année 1988, nous avons pu estimer à 207mm la quantité de neige tombée à Mirebel, soit 12% des précipitations totales.

2.1.2.2. Températures

Le seul poste équipé d'un thermographe se situe à Besain (altitude 530m). Les postes les plus proches ne se localisent plus sur le plateau ; Montmorot (275m sur le faisceau) et Clairvaux-les-Lacs (530m, vallée de l'Ain).

mois	moyenne	mini (année)	maxi (année)	écart-type
janvier	-0.5	-6.3 (85)	3.9 (82)	2.74
Février	1.3	-3.9 (86)	5.0 (77)	2.41
Mars	4.3	2.3 (84)	7.6 (81)	1.57
Avril	6.6	5.1 (78)	8.8 (87)	1.12
Mai	10.6	8.7 (84)	13.2 (86)	1.25
Juin	14.4	13.1 (78)	16.4 (76)	1.12
Juillet	16.8	14.3 (80)	21.1 (83)	1.75
Aout	15.7	14.3 (78)	17.5 (83)	0.87
Septembre	13.5	11.2 (77)	16.4 (87)	1.46
Octobre	9.8	8.1 (80)	11.7 (87)	1.17
Novembre	4.3	1.2 (85)	7.7 (84)	1.55
Décembre	2.0	-1.8 (80)	3.5 (87)	1.37
Année	8.3	7.5 (80)	9.27 (82)	0.51

Tab.18 : Températures moyennes à Besain (1976-1987 : 12ans)

Les températures enregistrées à Besain sur une période de 12 ans présentent un minima en janvier et un maxima en juillet. Leur moyenne interannuelle est de 8.24°.

La plus grande variabilité des modules mensuels est enregistrée en janvier, la plus faible au mois d'août.

La température moyenne dépend de l'altitude du lieu : le gradient thermique sur le haut bassin de l'Ain, à l'Est du premier plateau est de -0.8°C/100m.

Plus à l'Ouest, la station de Montmorot (275m) présente une moyenne interannuelle de 10.5°C ; de la même manière que dans le cas des précipitations, le climat du premier plateau constitue une transition entre la plaine et la Haute Chaîne.

2.1.3. Mesure de l'évapotranspiration

2.1.3.1. L'évapotranspiration potentielle ETP

L'évapotranspiration représente la quantité d'eau, à l'état de vapeur d'eau, rejetée par évaporation au niveau du sol et par transpiration des végétaux. De nombreux facteurs régissent l'évapotranspiration : les facteurs climatiques (intensité et durée de la radiation solaire, vent, humidité relative, couverture nuageuse...), les facteurs végétatifs (espèces, densité) et les sols (nature, épaisseur).

L'évapotranspiration potentielle se définit comme la quantité maximale de vapeur d'eau susceptible d'être reprise par l'atmosphère, pour des conditions de climat et de morphologie données.

Différentes formules donnent la valeur de l'évapotranspiration potentielle ; celles de Turc et de Penmann font appel à des paramètres dont nous ne disposons pas (durée d'insolation, degré hygrométrique, vitesse du vent). D'autres, sous condition d'utiliser des pas de temps longs et des surfaces étendues, ne font intervenir qu'un nombre réduit de paramètres : la formule de Thornthwaite, dans notre cas, utilise la température moyenne de l'air et la durée d'insolation dépendante de la latitude et de la saison.

$$ETP = 1.6 \cdot \frac{10t^a}{I} \cdot F(\lambda)$$

avec t = température moyenne mensuelle de la période considérée en °C.

$$I = \text{Indice thermique annuel} = \sum_{1}^{12} \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0.492$$

F(λ) = terme correctif mensuel de la latitude.

Le tableau 19 regroupe les valeurs de l'ETP calculée d'après cette formule pour une période de 12 ans.

Mois	Température (°C)	ETP moyen (mm)	Ecart-type	Mini (mm)	Maxi (mm)
Janvier	-0.5	4	5	0	14
Février	1.3	7	7	0	20
Mars	4.3	22	8	12	39
Avril	6.6	38	6	31	49
Mai	10.6	71	8	58	88
Juin	14.4	100	7	92	113
Juillet	16.8	118	11	103	146
Août	15.7	100	5	93	106
Septembre	13.5	73	7	51	87
Octobre	9.8	46	5	40	53
Novembre	4.3	16	6	4	31
Décembre	2.0	8	3	3	14
Année	8.2	602	14	578	623

tabl.19 - ETP mensuelles interannuelles à Besain pour 12 ans
(1976-1987)

Dans les conditions d'application de la formule, on constate que l'ETP est régulière au fil des années. Le graphique du bilan hydrique moyen (fig.50) sur 12 ans indique un déficit au mois de juillet, déjà constaté par F. DUBREUCQ (1987). Ce déficit est cependant difficilement quantifiable dans la mesure où il peut être remis en cause par les quelques précipitations estivales, généralement concentrées.

2.1.3.2. L'évapotranspiration réelle ETR

L'évapotranspiration réelle représente la quantité de vapeur d'eau effectivement exportée vers l'atmosphère par les sols et les végétaux. Elle fait intervenir la réserve facilement utilisable (RFU), quantité d'eau nécessaire aux plantes et retenue dans le sol par les forces capillaires.

Comme dans le cas de l'évapotranspiration potentielle, nous utiliserons des lois empiriques, de formulation réduite. Deux méthodes peuvent être proposées :

- la méthode de Thornthwaite
- la méthode de Turc

a) la méthode de Thornthwaite

A partir des calculs de l'évapotranspiration potentielle au pas de temps mensuel, on compare les précipitations (P) et l'ETP

. Si $P \geq ETP$, alors $ETR = ETP$

. Si $P \leq ETP$, l'ETR puise dans la RFU. Si la RFU est nulle, alors $ETR \leq ETP$.

b) la méthode de Turc

La formule de Turc est indépendante de la RFU, en ne faisant intervenir que les précipitations et les températures. Elle n'est exploitable que pour des pas de temps annuels.

Elle s'exprime :

$$ETR(mm) = \frac{P}{\sqrt{0.9 + (P^2/L^2)}}$$

avec P : précipitations annuelles en mm
 L : $300 + 25t + 0.05t^3$
 t : température moyenne annuelle en °C

Les résultats du calcul de l'ETR par ces deux méthodes sont regroupées dans le tableau 20. Les précipitations sont celles de Crançot, les températures celles relevées à Besain, pour 12 ans (1976-1987).

Le calcul de l'ETR, à partir de l'ETP de Thornthwaite et faisant intervenir la RFU, indique une moyenne interannuelle de 546mm, en mettant l'accent sur les années sèches (1976). L'ETR semble assez variable selon les années d'après ces résultats (plus de 30 %).

année	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	m	σ	min	max
ETP Thorn*	611	610	578	599	582	603	623	619	583	596	605	616	602	14	578	623
ETR Thorn*	416	589	578	536	568	586	606	499	467	628	565	616	546	57	416	616
ETR/ETP(%)	68	96	100	89	97	97	97	81	80	88	93	100	905	9	68	100
ETR Turc	490	525	481	501	484	500	542	531	493	480	503	517	504	20	480	542
ETR/ETP(%)	80	86	83	84	83	87	86	84	81	83	84	84	84	2	80	87

Tab.20 - ETR annuelles par les méthodes de Thornthwaite et de Turc.

* Remarque : nous avons adopté une valeur de la RFU assez faible, 20mm, en raison de la faible épaisseur des sols recouvrant la plus grande partie du bassin versant.

La formule de Turc donne en revanche des résultats plus réguliers au fil des ans, et en moyenne inférieurs à ceux de la méthode précédente (504mm contre 546mm à la méthode de Thornthwaite).

2.1.4. Conclusion

Avec une température moyenne de 8.2° et une lame d'eau de 1391mm, le bassin versant de la Seille possède les caractéristiques climatiques de la zone des plateaux, formant une transition entre la plaine et la Haute Chaîne.

Le bilan hydrique fait apparaître un faible déficit au mois de juillet ; l'évapotranspiration réelle a pu être estimée à 500-550mm suivant la méthode utilisée. Elle représente 90% de l'évapotranspiration potentielle.

2.2. ETUDE DES DEBITS ET DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

2.2.1. Equipement limnigraphique

Un limnigraphe, installé à Voiteur et exploité par le SRAE Franche-Comté, a fonctionné du 14.09.1967 au 16.05.1979 et du 17.04.1981 au 31.12.85. Quatorze cycles hydrologiques (considérés de début septembre à fin août) et quinze années civiles restent exploitables pour cette période.

Le même site a été retenu pour l'étude entreprise en 1987 ; les coordonnées du limnigraphe installé par le laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée sont :

$$x = 850.05$$

$$y = 200.90$$

$$z = 249$$

Nous avons donc considéré dans cette étude ce point comme exutoire du bassin versant amont de la Seille.

Dans le but de déterminer les débits respectifs des reculées nord et sud, nous avons procédé à l'installation :

- d'un limnigraphe à la sortie de la reculée nord (Blois - Ladoye) ($x = 852.00$; $y = 198.22$; $z = 272.0$)
- d'une échelle limnimétrique à la sortie de la reculée sud (Baume-les-Messieurs) ($x = 852.10$; $y = 197.47$; $z = 274.5$)

Les sources principales ont fait l'objet d'un suivi durant quelques mois :

- source du Dard (limnigraphe en $x = 852.52$; $y = 193.25$; $z = 365$) ;
- source des Blois (échelle limnimétrique en $x = 854.85$; $y = 199.75$; $z = 325$).
- sources de Ladoye (échelle limnimétrique en $x = 855.62$, $y = 201.16$; $z = 355$).

Les échelles limnimétriques ne fournissent pas le relevé en continu des hauteurs d'eau : les mesures ponctuelles déterminées permettront cependant une estimation de la superficie sous-bassins, que nous envisagerons dans les paragraphes suivants. Le traitement des données de débit concerne donc les séries enregistrées sur les limnigraphes de Voiteur.

2.2.2. Analyse des modules

Les moyennes mensuelles et annuelles sont reportées dans le tableau 21 pour la période 1968-1985, à l'exception des cycles

incomplets ou manquants : 1978-1979 à 1980-1981. Ces données sont reprises par cycles et par mois dans la figure 51.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
Moyenne	2.26	4.31	6.40	7.68	6.14	9.11	5.14	5.60	4.66	2.42	1.45	1.04	4.68
Écart-type	2.06	3.66	2.38	3.47	2.45	5.57	2.27	4.07	4.56	1.48	1.21	1.10	1.52

Tab.21 - Moyennes mensuelles interannuelles des débits à Voiteur (14 ans)

Les débits maximum sont enregistrés en février (9.11 m³/s). On constate également que le débit moyen de janvier est le plus faible de l'hiver, avec cependant des précipitations plus importantes qu'en février. Quoique peu importante, l'influence du manteau neigeux peut en être la cause.

Les modules annuels extrêmes observés sont 2.51 m³/s (minima) pour le cycle 1971-1972 et 7.98 m³/s (maxima) pour le cycle 1982-1983.

Le rapport maxi/mini est de 3.2.

2.2.3. Distribution des débits

La courbe des débits classés permet de traduire la dispersion des débits moyens journaliers. Deux types de représentation peuvent être utilisés :

- l'histogramme des débits, associant à chaque classe de débit une fréquence d'apparition ;
- la courbe cumulée des débits classés, définissant des débits caractéristiques dépassés 1, 3, 6 et 9 mois par an, ainsi que 10 jours (DCM) ou 355 jours (DCE).

La méthode a été appliquée pour :

- les débits à Voiteur durant quatorze cycles (5100 valeurs moyennes journalières),
- les débits à Voiteur durant le cycle 1987-1988 (4 valeurs journalières durant 365 jours, soit 1460 valeurs) ;
- les débits du Dard entre le 7/05/1988 et le 6/05/1989 (seule période d'observation, le cycle 1988-1989 n'ayant pas été entièrement enregistré).

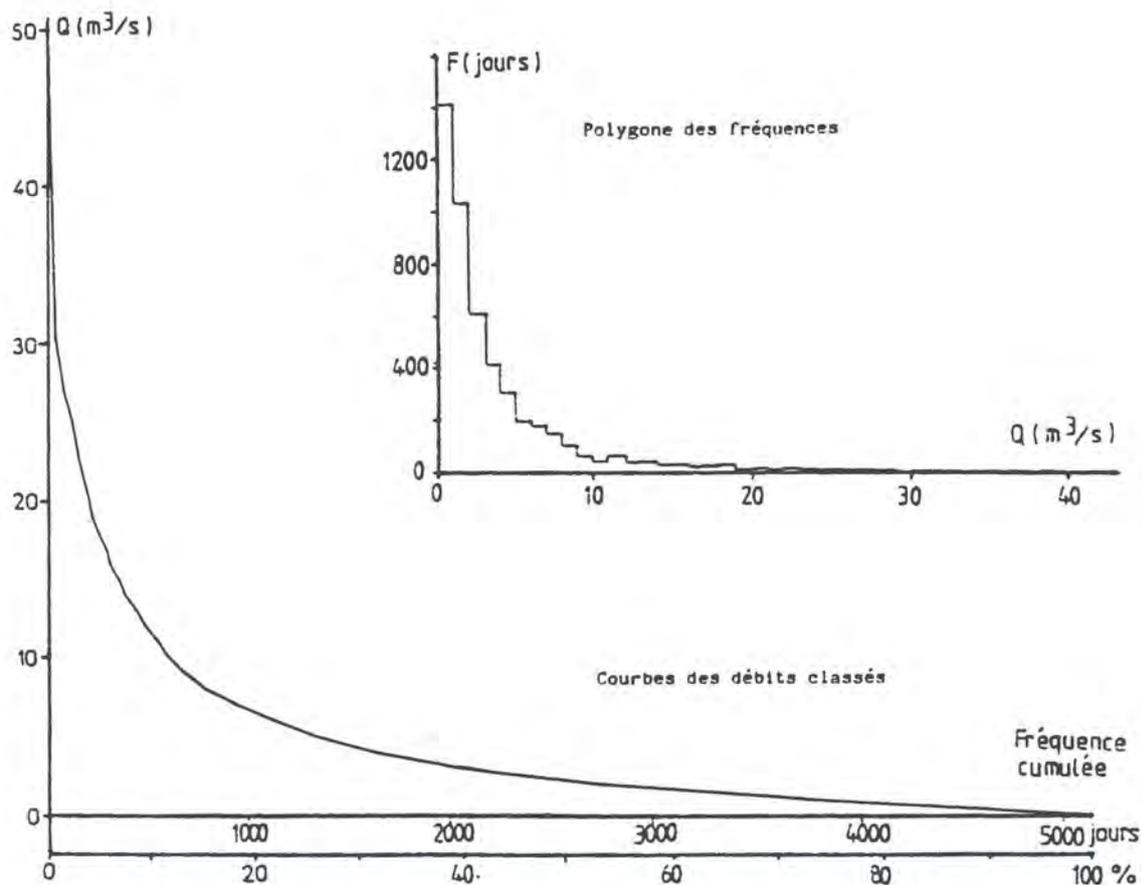


Fig. 52 - Débits de la Seille à Voiteur (cycle 68-78 et 81-85) : fréquence d'apparition des débits et courbe des débits classés

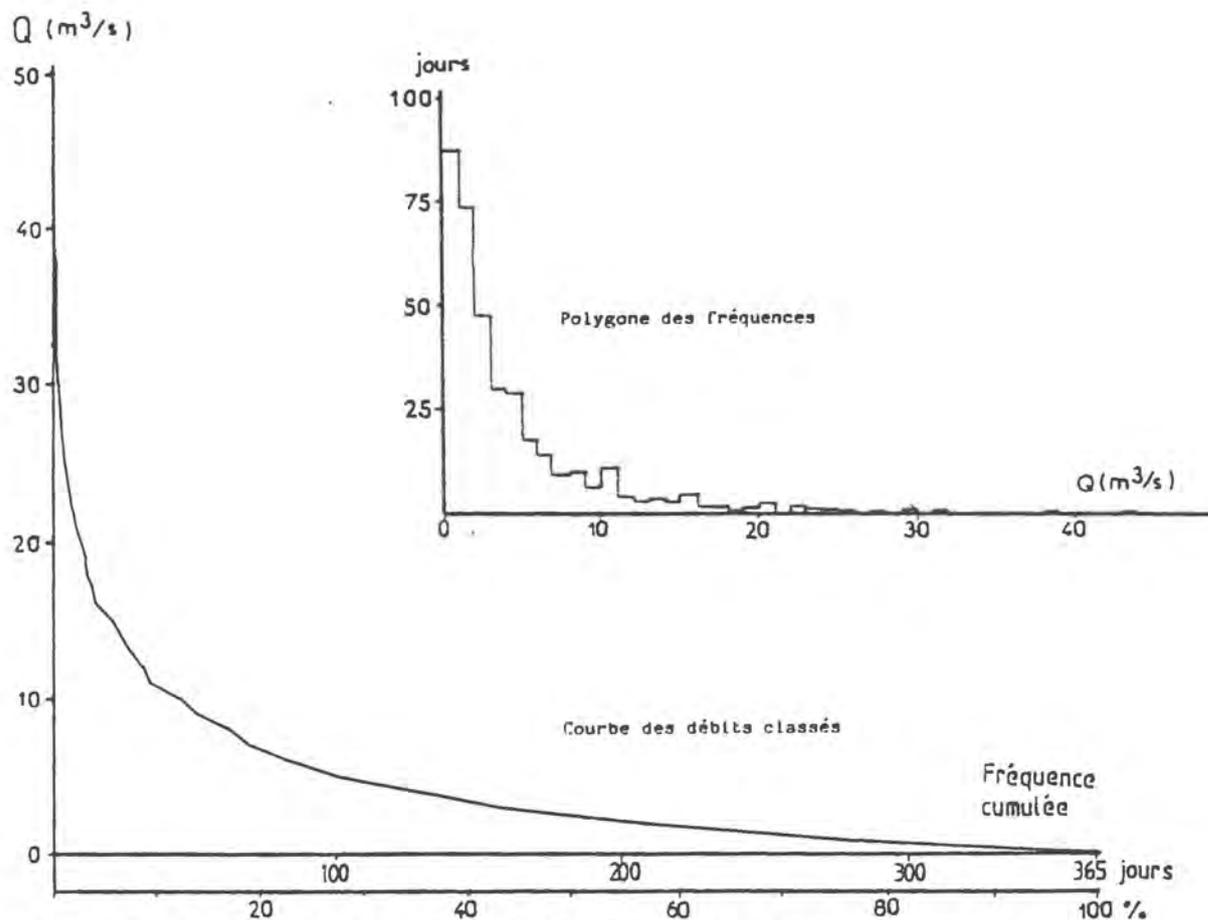


Fig. 53 - Débits de la Seille à Voiteur (cycle 87-88) : fréquence d'apparition des débits et courbes des débits classés

Le tableau 22 regroupe les débits caractéristiques obtenus :

Station	DC1	DC3	DC6	DC9	DCM	DCE
Dard 1988-1989	1.25	0.40	0.13	0.066	2.2	0.020
Voiteur 1987-1988	12.50	5.50	2.50	1.08	20.2	0.200
Voiteur 1968-1978 et 1981-1985	13.5	5.20	2.25	0.9	22.7	0.200

Tab.22 - Débits caractéristiques du Dard et de la Seille à Voiteur

Les figures 52 et 53 présentent les histogrammes de fréquence d'apparition des débits et les courbes des débits classés pour Voiteur (fig.52 : 14 cycles de 1968 à 1985, fig.53 : cycle 1987-1988). Les polygones de fréquence ne montrent qu'un seul mode. Les courbes des débits classés indiquent, par la concavité des courbes, une mise en réserve relativement réduite. Le cycle 1987-1988 est comparable aux quatorze cycles antérieurs, à l'exception toutefois des débits de crue, de fréquence d'apparition moindre durant ce cycle. Le phénomène apparaît clairement par superposition des courbes, nous l'étudierons plus en détail dans le paragraphe suivant.

Le Dard (fig.54) présente en revanche un aspect différent : l'histogramme des fréquences montre la contribution importante des débits d'étiage ($\leq 0.1\text{m}^3/\text{s}$). Il semble également se dessiner un second mode dans les débits, centré sur $1\text{m}^3/\text{s}$. La grande concavité de la courbe des débits classés traduit la faible mise en réserve du système.

L'étude des débits cumulés peut être effectuée selon l'application d'une loi de probabilité dérivant de la loi de Laplace (A. MANGIN, 1971). D'un point de vue méthodologique, elle consiste à étudier l'évolution des fréquences cumulées des débits (sur une échelle de probabilité) en fonction des débits (sur une échelle arithmétique ou logarithmique). Dans notre cas, l'échelle logarithmique s'est révélée la solution la mieux adaptée.

Cette méthode permet de détecter des anomalies dans le régime du cours d'eau (apports ou fuites), se traduisant par des ruptures de pente dans la courbe cumulée.

La courbe (fig.55) a été construite pour les quatorze cycles d'observation à Voiteur (1968-1985). Elle met en évidence deux ruptures de pente, l'une à $3\text{m}^3/\text{s}$ (assez faible) et l'autre à $25\text{m}^3/\text{s}$. Elles correspondraient toutes deux au même type de phénomène, à savoir une fuite des eaux hors du bassin.

De telles anomalies ne semblent cependant pas pouvoir être physiquement identifiées sur le terrain, seule base solide à l'interprétation (A. MANGIN, 1975). On peut remarquer que la courbe possède une allure identique à celles établies sur les divers cours

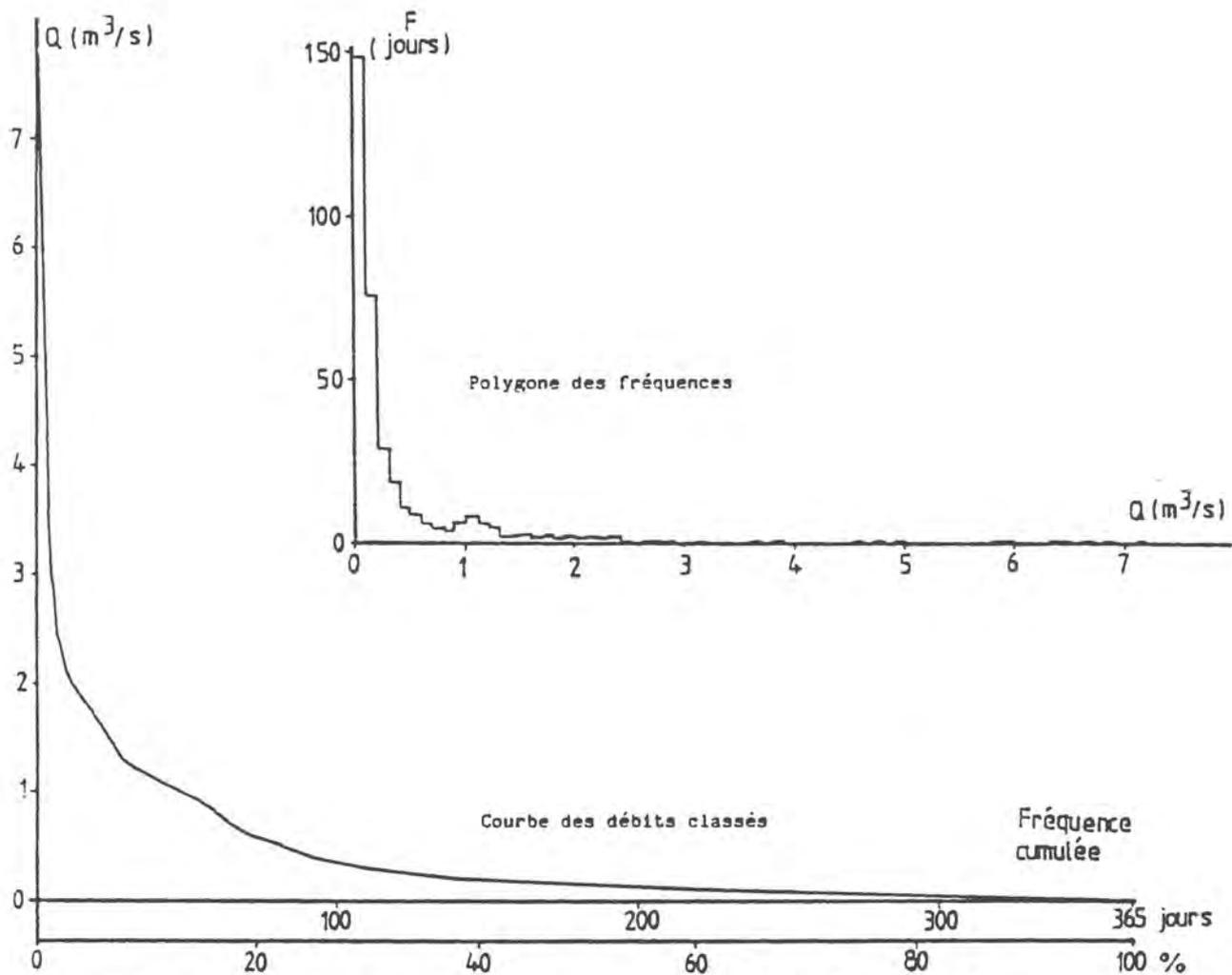


FIG. 54 - Débits du Dard à la grotte de Baume-les-Messieurs (88-89) : Fréquence d'apparition des débits et courbes des débits classés

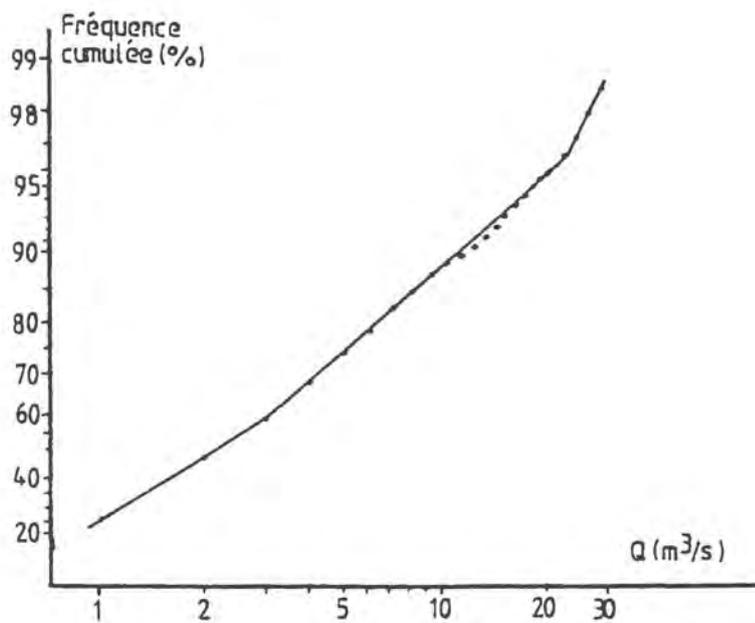


Fig. 55 - Courbe des débits cumulés de la Seille à Voiteur (14 cycles)

d'eau du bassin de l'Ain (cf J. ITTY, J. VINTAER, 1987) : les auteurs notent que les discontinuités de hautes eaux traduisent plutôt des difficultés de tarage.

La légère rupture de pente à $3\text{m}^3/\text{s}$ peut être interprétée comme une surestimation des débits d'étiage. En l'absence de mesures du niveau piézométrique de la nappe alluviale de la Seille, le rôle éventuel de cette dernière ne peut être précisé.

La même démarche a été reprise pour le cycle 1987-1988 à Voiteur (fig.56). L'allure de la courbe est similaire à celle de la précédente, à l'exception de la deuxième rupture de pente qui apparaît beaucoup plus tôt, vers $10\text{m}^3/\text{s}$. Ce résultat corrobore l'observation faite précédemment sur la courbe des débits classés, à savoir une fréquence d'apparition moindre pour les débits élevés. On peut supposer que le changement d'emplacement du limnigraphe et le nouveau tarage de la rivière interviennent dans l'interprétation du phénomène ; la seconde explication serait la modification du comportement du bassin.

Les débits cumulés du Dard (fig.57), sur une période d'un an en 1988 et 1989, présentent une courbe soulignée par deux ruptures de pente d'effets inverses, aux débits de 0.45 et $0.90\text{ m}^3/\text{s}$. Quoique faiblement marquées, ces anomalies semblent correspondre respectivement à un palier et une rupture de pente sur les hydrogrammes, justifiant ainsi leur apparition.

L'explication physique du phénomène est plus délicate à donner : on constate en effet la mise en activité de plusieurs trop-pleins lorsque le débit de la source augmente, mais aucun d'eux n'apparaît suffisamment important pour expliquer à lui seul l'anomalie. Seule la cascade de la grotte pourrait octroyer à la source le surcroît de débit observé ; cependant son tarissement intervient à un seuil inférieur à l'anomalie ($0.100\text{ m}^3/\text{s}$ pour ce tarissement, contre $0.45\text{ m}^3/\text{s}$ pour l'anomalie).

Nous pouvons néanmoins déduire de ces résultats le fait qu'un second type d'écoulement se superpose au débit de base de la source : son seuil d'apparition se situe aux environs de $0.45\text{ m}^3/\text{s}$. Son effet ne semble par contre pas s'étendre aux très forts débits, puisqu'une seconde rupture de pente traduisant une fuite hors du bassin apparaît vers $0.90\text{m}^3/\text{s}$. Pour les débits de crue, le faible nombre d'observations et les remarques faites précédemment sur le tarage en hautes eaux ne permettent pas d'interpréter la fin de la courbe. Soulignons enfin que la rupture de pente constatée sur les débits d'étiage de Voiteur n'est pas observée dans le cas de la source du Dard.

2.2.4. Ajustement des débits maxima à une loi de Gumbel

Bien que réduite, la chronique des débits journaliers à Voiteur a pu permettre d'estimer la crue décennale. La loi retenue pour cette prédétermination est celle de Gumbel, ou loi des valeurs extrêmes.

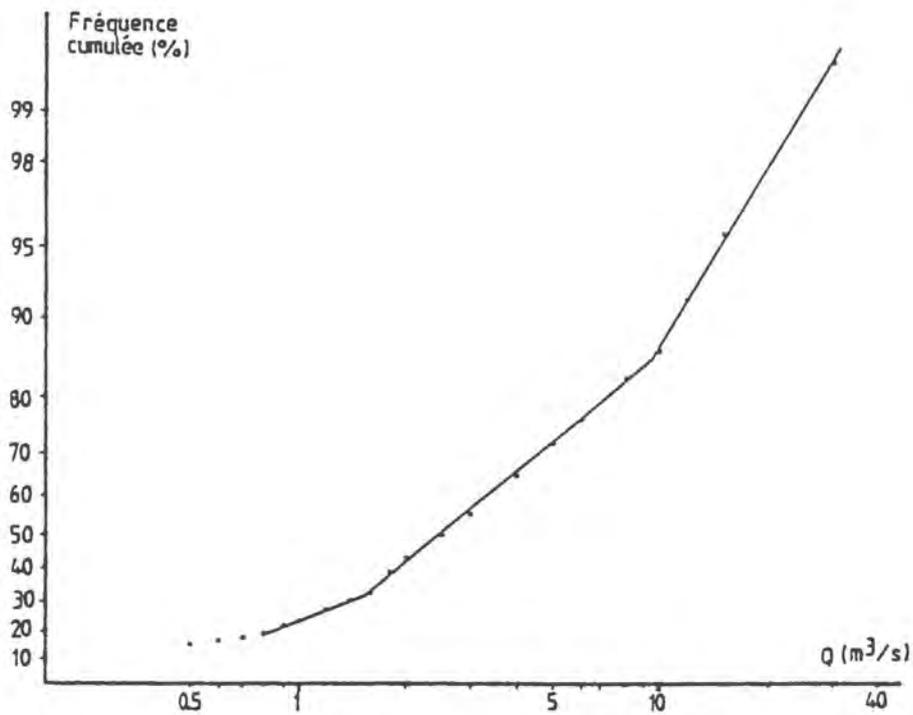


Fig. 56 - Courbe des débits cumulés de la Seille à Voiteur (cycle 87-88)

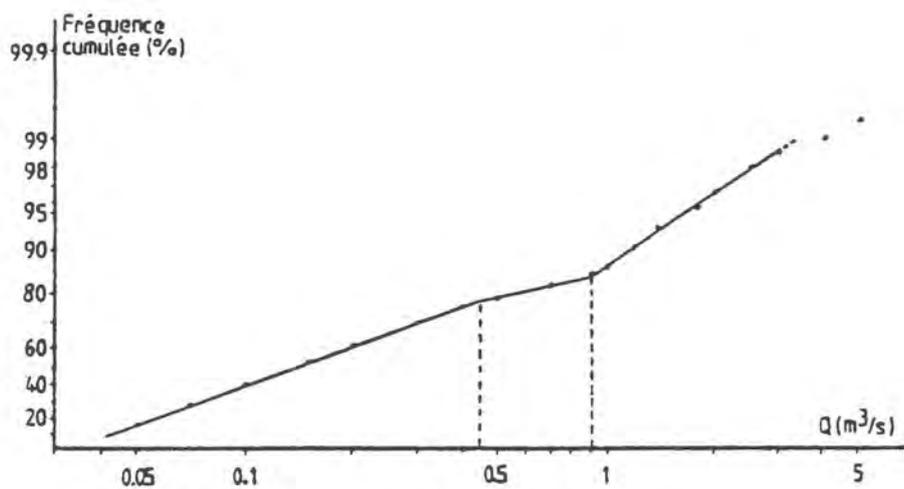


Fig. 57 - Courbe des débits cumulés du Dard (88-89)

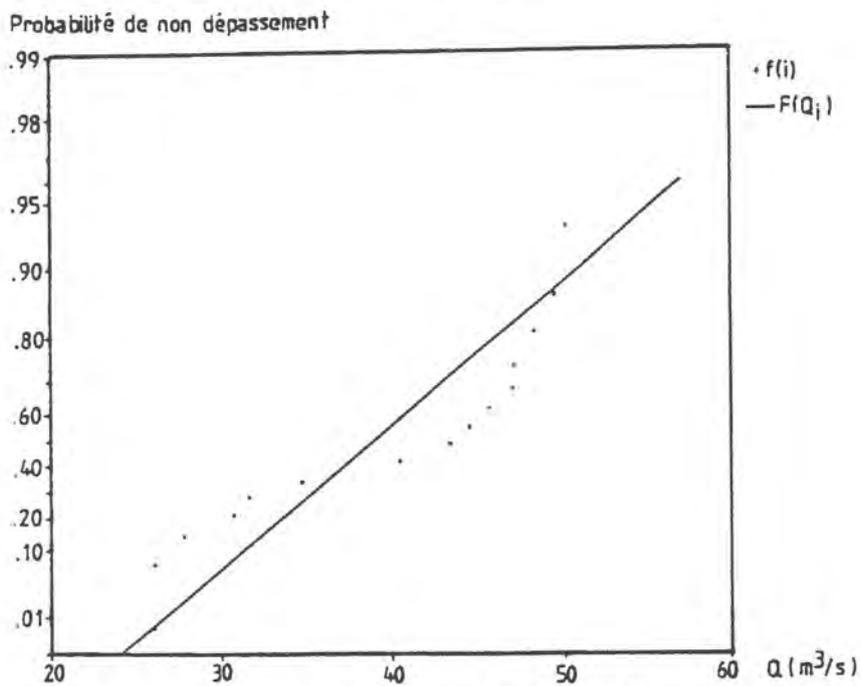


Fig. 58 - Ajustement des débits journaliers maxima annuels à une loi de Gumbel

2.2.4.1. Méthodologie

Pour chaque année de la période d'étude, on retient le débit journalier maximum observé : cette série constitue l'échantillon dont on recherche la loi de distribution.

Il importe que :

- la série soit longue (dans notre cas, N = 14 ans est juste suffisant).
- la série soit stationnaire (J. MIQUEL, 1984)

La loi de Gumbel s'écrit :

$$F(x) = \text{Exp}\left(-\text{Exp} \frac{Q-x}{\beta}\right)$$

où :

$$\left. \begin{aligned} F(x) &= \text{Proba}(Q_i \leq Q_{th}) \\ \alpha &= Q - 0.45\sigma \\ \beta &= \sigma/1.28 \end{aligned} \right\} \text{paramètres de la loi}$$

Q et σ sont les moyenne et écart-type de la série.

La représentation de F(x) est faite sur papier à probabilité, portant les fréquences d'apparition du débit en fonction du débit.

cycle	Q.j	Qj. class.	f(i)	F(Qi)
68-69	44.6	26	0.067	0.005
69-70	50.0	27.7	0.133	0.018
70-71	47.0	30.5	0.20	0.073
71-72	26.0	31.5	0.267	0.106
72-73	43.5	34.5	0.333	0.245
73-74	31.5	40.4	0.40	0.569
74-75	27.7	43.5	0.467	0.706
75-76	40.4	44.6	0.533	0.745
76-77	49.5	45.5	0.60	0.774
77-78	46.9	46.9	0.667	0.814
81-82	30.5	47	0.733	0.816
82-83	45.5	48.2	0.80	0.845
83-84	34.5	49.5	0.867	0.872
84-85	48.2	50	0.933	0.881

Tabl.23 - Séries des débits annuels maxima

2.2.4.2. Résultats

La série comportant les cycles allant de 1968 à 1978 d'une part et de 1981 à 1985 d'autre part (voir tab.23) la stationnarité a été vérifiée par le test statistique de l'égalité des moyennes de ces deux sous-séries. Au seuil de 5%, on accepte l'hypothèse d'homogénéité des moyennes des sous-séries 1968-1978 et 1981-1985.

Les paramètres calculés de la loi sont :

$$\alpha = 36.7 \text{ et } \beta = 6.45$$

La représentation graphique (fig.58) nous permet de constater que la courbe expérimentale "serpente" autour de la droite théorique et que l'ajustement est médiocre.

Les paramètres de la loi permettent d'estimer la valeur de la crue décennale, avec son intervalle de confiance à 95% (déterminée à partir de l'abaque de Bernier)

$$. 43 \leq 56\text{m}^3/\text{s} \leq 68$$

La crue centennale ne peut être calculée, la chronique demeurant trop courte pour obtenir un intervalle de confiance suffisamment limité.

Nous avons ajusté d'autres lois (loi normale et log-normale) à la distribution de ces débits : les ajustements ne se sont pas révélés meilleurs que celui de la loi de Gumbel.

La crue décennale peut donc être estimée à 56 m³/s, avec un large intervalle de confiance.

2.2.5. Analyse des courbes de récession

La courbe de récession représente la partie de l'hydrogramme allant de la pointe de la crue à la fin du tarissement. Diverses méthodes ont été proposées pour décomposer la récession des crues : nous utiliserons ici la méthode de A. MANGIN (1970,1975), bien adaptée aux sources karstiques.

Deux applications ont été effectuées :

- la Dard à la sortie des grottes de Baume-les-Messieurs,
- la Seille à Voiteur, qui intègre le volume total des eaux drainées par le bassin. Cette opération nécessite cependant d'admettre l'homogénéité du bassin, condition que nous considérons réalisée : le plateau, représentant 85 % de la superficie du bassin versant, possède des caractères morphologiques et géologiques réguliers.

2.2.5.1. Rappel de la méthode

L'équation de la récession donnée par A. MANGIN (1975) s'écrit sous la forme :

$$Q(t) = q_0 \frac{1 - nt}{1 + \epsilon t} + Q_{RO} e^{-\alpha t}$$

où $Q(t)$: débit total à l'instant t
 α, ϵ, n' : paramètres du système
 q_0 et Q_{R0} : débits caractéristiques de la crue

La figure 59 illustre le modèle et définit les différents paramètres.

Le premier terme (q^*) définit la courbe de décrue (vidange des fissures importantes et chenaux de l'aquifère karstique). Le second (Q_R) correspond à la vidange lente des zones capacitatives de l'aquifère noyé, c'est le terme de tarissement sensu stricto.

Le tarissement s'obtient en représentant la courbe $\log Q(t) = f(t)$: il est atteint lorsque les points de la courbe s'alignent. La pente de la droite représente alors α , le coefficient de tarissement :

$$\alpha = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0.4343 (t_2 - t_1)}$$

La décrue s'obtient ensuite en retranchant le tarissement du débit total dans la première partie de la courbe. Elle est ajustée à une fonction homographique du type :

$$q(t) = q_0 \frac{1 - nt}{1 + \epsilon t} \quad (1)$$

Cette fonction est définie par les paramètres :

$n = 1/t_i$ où t_i représente la durée totale de la décrue

ϵ , que l'on déduit de la formule (1), traduit la concavité de la courbe de décrue.

On procède ensuite à la linéarisation de la courbe de décrue : la fonction $-y = (t_i - t)/q^*(t)$ doit être une droite. Les points expérimentaux de $q^*(t)$ s'alignant le mieux sont retenus pour ce calcul de ϵ .

Les différentes courbes de décrue pourront être comparées par l'emploi de la fonction

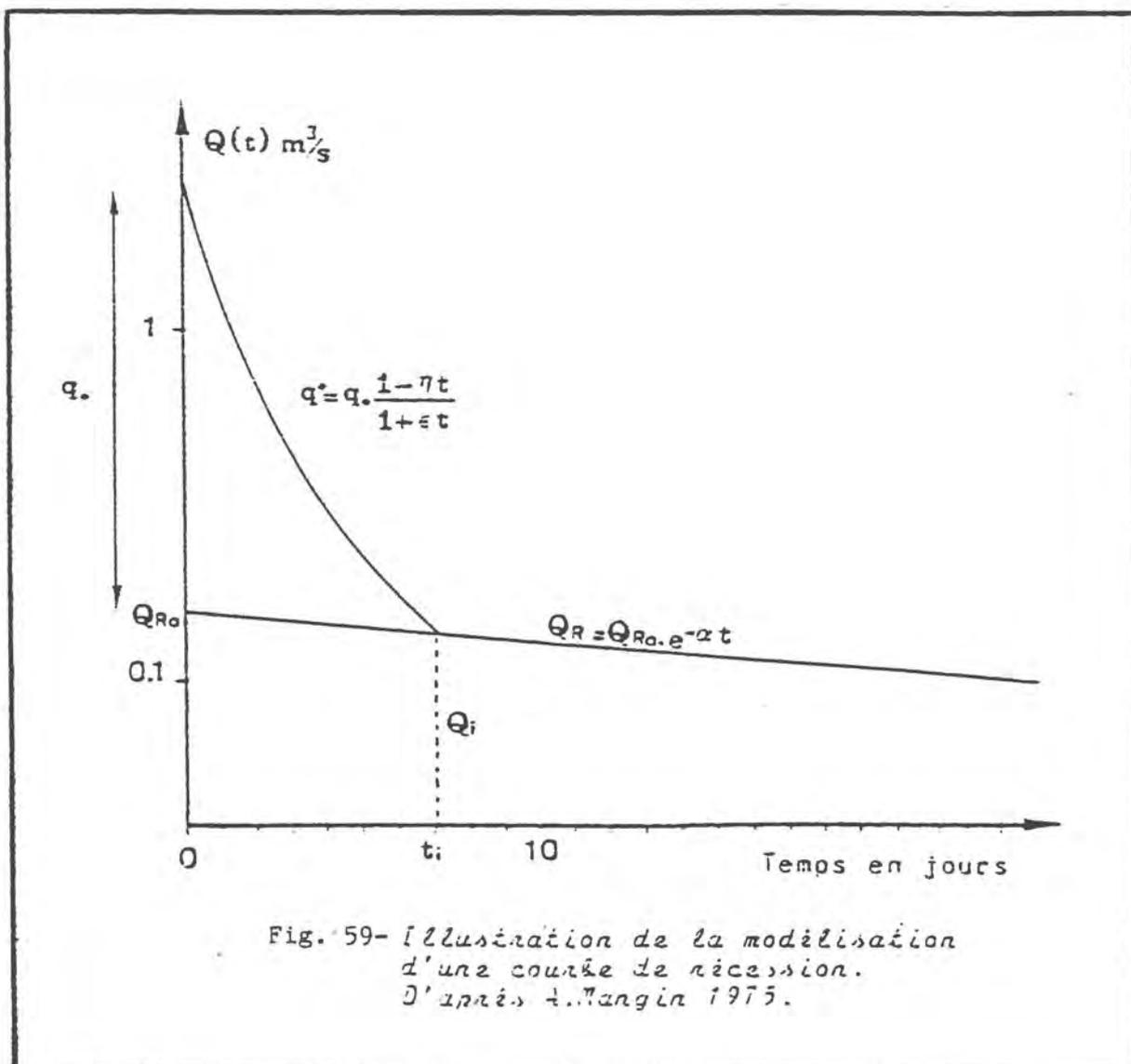
$$y(t) = \frac{1 - nt}{1 + \epsilon t}$$

Cette fonction, comprise entre 0 et 1, permet de s'affranchir des amplitudes variables des décrues.

La méthode permet de classer le système étudié, d'après la valeur de deux paramètres, i et k :

- i est la valeur de la fonction $y(t)$ pour $t=2$ jours. Ce paramètre rend compte de la vitesse de décrue : plus celle-ci est importante, plus i est faible

- k est le rapport volume dynamique/volume moyen de transit avec
 . Volume dynamique : quantité d'eau écoulée à partir du début du tarissement :



Date	$Q_0(\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{R0}(\text{m}^3/\text{s})$	$q_0(\text{m}^3/\text{s})$	$Q_i(\text{m}^3/\text{s})$	$t_i(\text{j})$	$\alpha(j-1)$	$n(j-1)$	ϵ	$V_d (10^6 \text{m}^3)$	k	i
4.06.88	7.66	0.123	7.54	0.083	14.25	0.0230	0.070	5.22	0.31	0.017	0.075
6.07.88	1.60	0.089	1.51	0.051	15.4	0.0340	0.065	3.14	0.13	0.007	0.119

Tab.24 - Paramètres des courbes de récession du Dard

		$Q_0(\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{R0} (\text{m}^3/\text{s})$	$q_0 (\text{m}^3/\text{s})$	$Q_i \text{ m}^3$	$t_i (\text{j})$	$\alpha(j-1)$	n	ϵ	$V_d(10^6 \text{m}^3)$	k	i
1969	25.06.69	33.7	1.55	32.1	0.417	30	0.043	0.033	1.57	0.83	0.005	0.23
1972	10.07.72	2.95	1.17	1.78	0.676	14	0.041	0.071	1.04	1.42	0.010	0.28
1973	9.05.73	19.7	2.69	17.0	1.51	14	0.039	0.071	1.12	3.30	0.022	0.26
1974	17.03.74	19.01	3.80	15.20	1.94	13	0.061	0.077	0.88	3.23	0.021	0.31
1977	30.08.77	8.15	0.955	7.20	0.790	19	0.010	0.053	0.41	6.56	0.044	0.49
1984	4.06.84	10.9	1.07	9.83	0.560	24	0.028	0.042	0.53	1.75	0.012	0.44
1988	6.07.88	8.54	0.955	7.58	0.363	31	0.031	0.032	0.95	1.02	0.007	0.32

Tabl. 25 - Paramètres des courbes de récession de la Seille à Voiteur

$$Vd = \frac{Q_i}{\alpha} \times 86400$$

. Volume moyen de transit : quantité d'eau moyenne annuellement écoulée

$$Vt = Q_{moy} \times 86400 \times 365$$

2.2.5.2. Source du Dard

Deux décrues et tarissements ont pu être étudiés durant la période de surveillance du Dard (fig.60).

Le premier épisode débute le 4.06.1988 par la dernière crue importante du printemps. Le tarissement, bien que perturbée par une petite crue, apparait au bout de 14 jours.

La deuxième crue étudiée est celle du 6 juillet 1988, dernière phase d'un épisode de crue de plusieurs jours ayant interrompu le tarissement précédent. L'amplitude en est suffisante pour permettre un second dépouillement (voir fig.60). Le tarissement se poursuit jusqu'à la fin du mois d'août.

Les paramètres de ces courbes de récession sont présentés dans le tableau 24.

Les coefficients de tarissement, légèrement différents (0.023 et 0.034), indiquent tous deux une vidange assez rapide du karst noyé. Les paramètres n et ϵ indiquent respectivement des décrues à la fois brèves et rapides, traduites par les courbes homographiques (fig.61).

ϵ rend compte de la concavité de la courbe homographique, qui est accentuée dans les cas étudiés : l'infiltration de l'eau est rapide et ne semble pas freinée.

Ainsi, en considérant pour la première crue, des paramètres $n = 0.07$ et $\epsilon = 5.22$, le débit initial q_0 décroît de :

- . 50 % au bout de 5h
- . 75 % au bout de 13h
- . 90 % au bout de 1.5 jour
- . 99 % au bout de 8 jours

On peut dès lors reporter les paramètres i et k dans le graphe de la classification établie par A. MANGIN (1975) (fig.63). Le Dard appartient au groupe I de cette classification : ce groupe est caractérisé par des valeurs faibles de i et k ($i \leq 0.25$, $k \leq 0.1$) traduisant un système où d'une part le pouvoir régulateur du karst noyé est négligeable. Le ruissellement souterrain prédomine dans ce cas. D'autre part, le paramètre i caractérise la qualité du réseau de drainage et le très faible retard à l'infiltration. Les observations de terrain et la présence du réseau spéléologique des grottes confirment ces résultats.

D'un point de vue régional, le système du Dard est comparable à celui du Verneau (P.TRESSE et G.TISSOT, 1978).

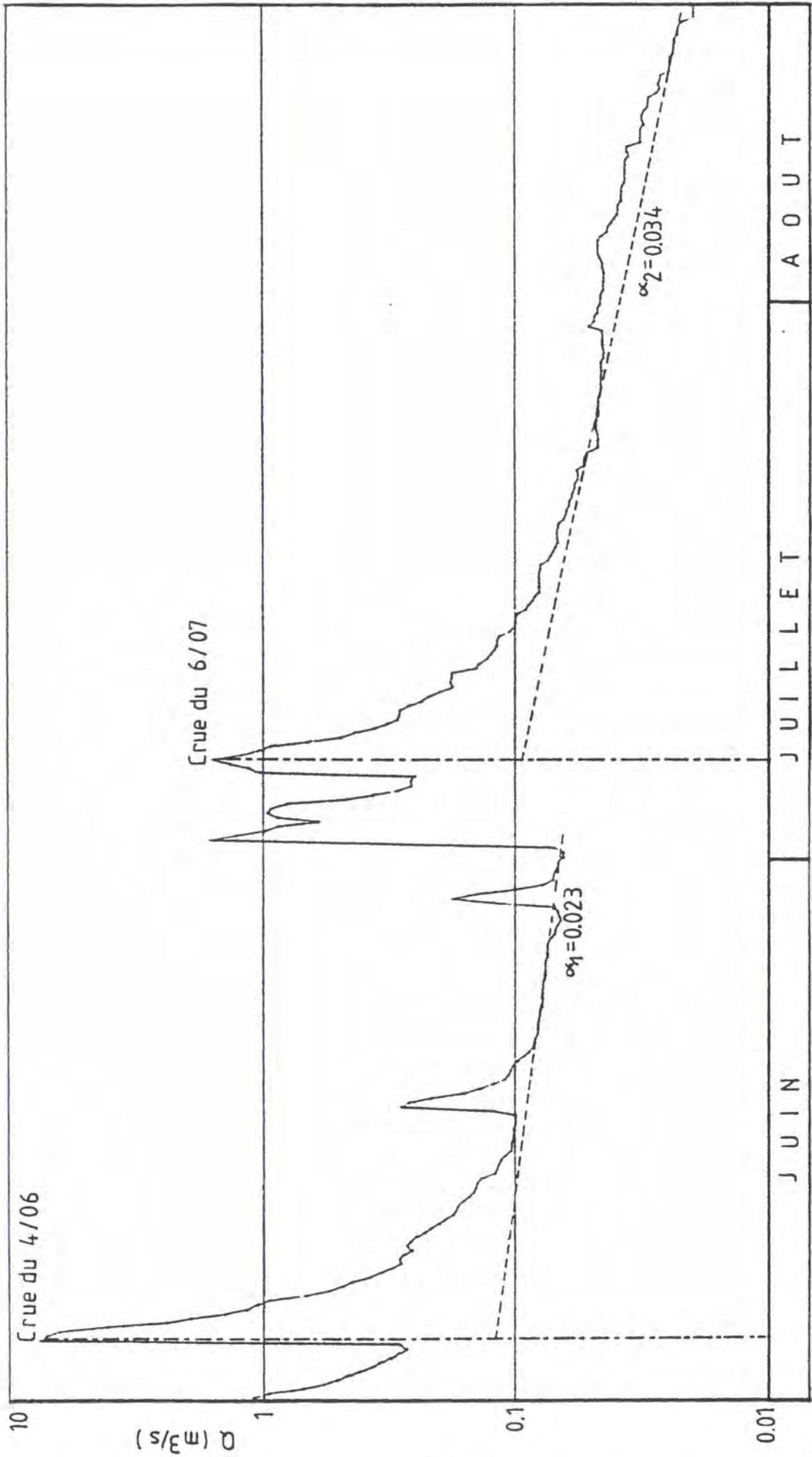


Fig. 60 - Décrue et tarissement du Dard (1988)

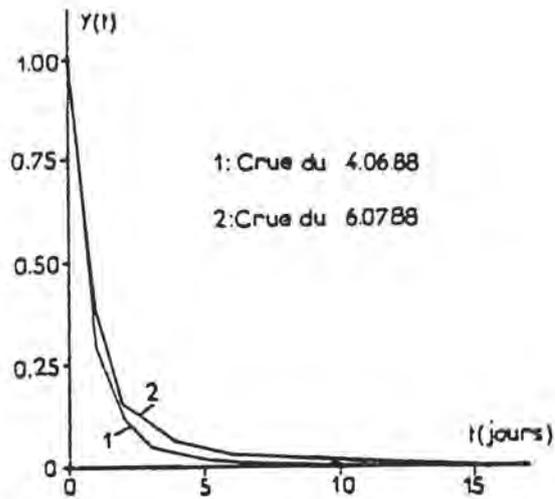


Fig. 61 - Courbes homographiques du Dard (1988)

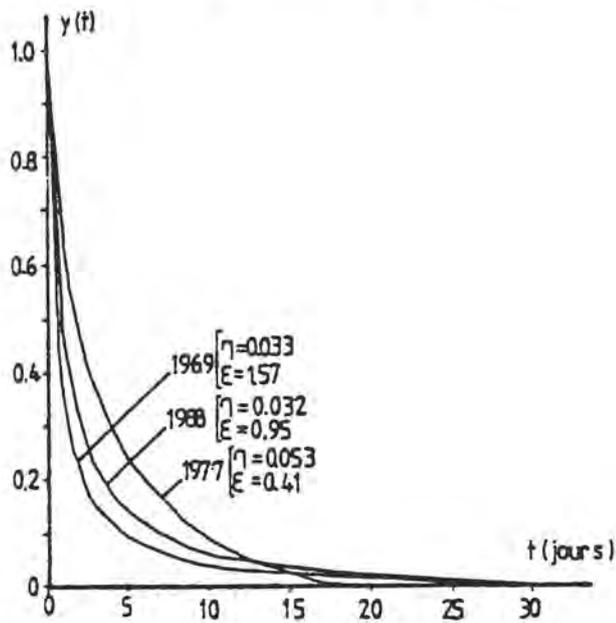


Fig. 62 - Courbes homographiques extrêmes de la Seille à Voiteur

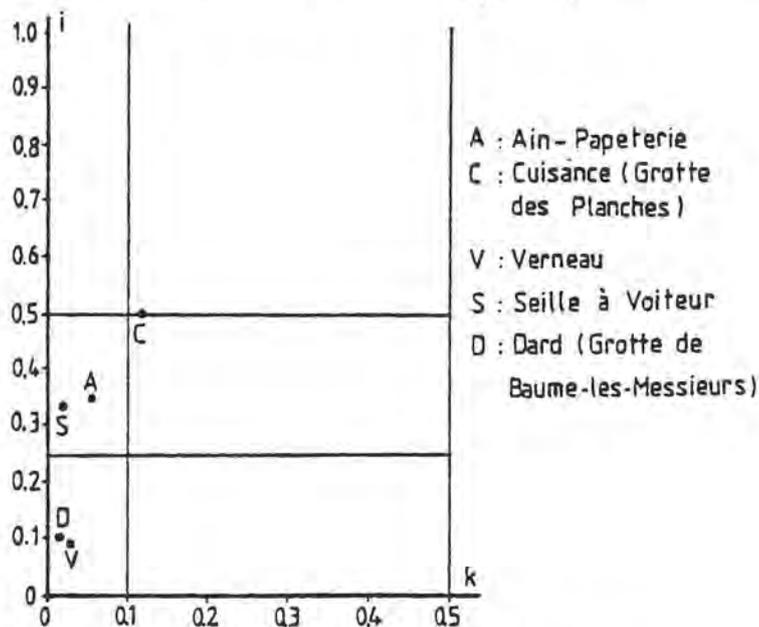


Fig. 63 - Position du Dard et de la Seille à Voiteur dans la classification de A. Mangin

2.2.5.3. La Seille à Voiteur

L'étude des courbes de récession de la Seille à Voiteur s'est avérée plus délicate pour diverses raisons :

- il s'agit d'un système relativement vaste, somme de plusieurs systèmes particuliers ;
- les tarissements sont difficilement atteints en raison des crues perturbatrices (cette difficulté est classique sur les sources jurassiennes).

L'interprétation donnée à l'analyse de la Seille sera donc plus générale que dans le cas de la source du Dard.

Sur 18 années de données exploitables, nous avons retenu 7 années où les épisodes de récession estivale sont interprétables. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 25.

Leur examen révèle une grande dispersion entre les différentes années :

- les coefficients de tarissement varient de 0.010 à 0.051 soit un rapport de 1 à 5.
- les paramètres n et ϵ respectivement de 0.032 à 0.077 et de 0.41 à 1.57. De ce fait les fonctions homographiques s'écartent sensiblement les unes des autres (fig.62).

En adoptant des valeurs n et ϵ moyennes ($n = 0.054$, $\epsilon = 0.92$), le débit initial q_0 diminue de :

- . 50 % au bout de 1 jour
- . 75 % " " 3 jours
- . 90 % " " 6 jours
- . 99 % " " 16 jours

Le calcul de i et k pour chaque décrue permet de classer le système : il appartient au domaine III des systèmes à écoulement retardé, caractérisés par une valeur de i comprise entre 0.25 et 0.50 (fig.62).

Les valeurs de k calculées sont en revanche très faibles (0.007 à 0.044) : la vidange générale du système est donc rapide, comme dans le cas du Dard : les coefficients de tarissement élevés en sont la cause.

Soulignons enfin que cette position dans la classification rapproche la Seille des systèmes du bassin de l'Ain, et dans une moindre mesure du bassin de la Cuisance. Ces systèmes sont également caractérisés par des réservoirs de faible volume dynamique ; malgré une diversité de contexte de ces bassins, cette tendance apparaît donc régionale.

2.2.6. Conclusion

L'étude hydrodynamique a mis en évidence, aussi bien pour le système de la Seille que pour le cas particulier du Dard, une prédominance du ruissellement souterrain. La qualité du drainage est importante pour le Dard, moins élevée pour le système Seille, ce qui le rapproche des systèmes voisins (Ain, Cuisance). Il aurait cependant été intéressant d'étudier séparément les différentes unités composant ce système et de les comparer au Dard.

Les résultats de l'étude des débits classés aboutissent aux mêmes observations, une mise en réserve réduite, voire très réduite dans le cas du Dard. Ces conclusions ne renseignent cependant pas sur la quantité de la réserve (sans doute importante, voir chapitre précédent), liée à la géométrie de l'aquifère.

Enfin, la complexité générale du système est soulignée par la courbe des débits cumulés du Dard : cette source met en jeu une série de seuils qu'il est cependant difficile d'identifier sur le terrain.

2.3. BILAN HYDROLOGIQUE

L'équation générale du bilan s'écrit :

$$Q = P - \text{ETR} \pm S + g - p$$

avec

- Q : lame d'eau écoulée
- P : lame d'eau précipitée
- ETR: évapotranspiration réelle
- S : variation de réserve de l'aquifère
- p : pertes vers l'extérieur
- g : apports de l'extérieur

Nous considérons dans un premier temps le bilan sur quatorze cycles hydrologiques, ce qui nous permettra de négliger le terme S, la variation de réserve pouvant être considérée comme nulle en comparaison de la lame écoulée au bout de cette période. Les termes g et p seront négligés, l'étude des débits classés n'ayant pas mis en évidence d'apports ou de pertes caractérisés.

2.3.1. Bilan général de la Seille à Voiteur

Le bilan est établi sur les cycles allant de 1968 à 1978 et de 1981 à 1985, soit quatorze cycles au total. Nous étudierons séparément le cycle 1987-1988, celui-ci posant des problèmes de comparaison avec les cycles précédents.

Le tableau 26 résume les données du calcul de la lame d'infiltration. Les précipitations prises en compte sont celles de Crançot, seul poste existant sur le bassin. Ce poste semble néanmoins présenter une représentativité correcte vis à vis des précipitations du plateau (cf paragraphe climatologie).

La lame d'infiltration a été déterminée de deux façons :

- a - par le calcul de P-ETR, avec l'évapotranspiration réelle déterminée par la formule de Turc (bilan annuel),
- b - par le calcul de P-ETP, selon la méthode du bilan mensuel de Thornthwaite.

Les sorties sont calculées d'après les débits de la Seille à Voiteur.

Cycles	68-69	69-70	70-71	71-72	72-73	73-74	74-75	75-76	76-77	77-78	78-79	79-80	80-81	81-82	82-83	83-84	84-85	moyenne
T°	8.43	7.77	8.34	8.24	7.95	8.65	8.38	8.52	8.52	7.74	7.81	8.07	7.59	8.96	9.11	7.87	7.92	8.23
P(mm)	1348	1488	1249	924	1149	1138	1452	1063	1839	1465	1328	1508	1399	1482	2029	1160	1632	1391
ETR (mm) (1)	505	492	498	468	481	499	508	489	524	490	487	501	483	527	547	479	500	498
P-ETR (mm) (1)	843	996	751	456	668	639	944	574	1315	975	841	1007	916	955	1482	681	1132	892
Q (m3/s)	5.32	5.49	4.09	2.51	3.15	3.02	4.82	2.99	7.12	5.48	-	-	-	4.90	7.98	3.88	4.82	4.68
ETP(mm) (2)	607	586	612	598	588	616	595	614	578	578	590	591	600	621	636	566	608	599
P-ETP(mm)*	774	957	734	445	616	548	949	578	1205	898	773	955	806	848	1507	722	1013	842
Superficie (Turc)	199	174	172	173	149	149	161	164	171	177	-	-	-	162	170	180	134	164
Superficie (Tornth.)	217	181	176	178	161	174	160	163	186	192	-	-	-	182	167	169	150	172.5

* RFU = 20 mm ; (1) méthode de Turc ; (2) méthode de Tornthwaite

Tabl.26 - Bilan hydrologique de la Seille à Voiteur (1968- 1978, 1981-1985)

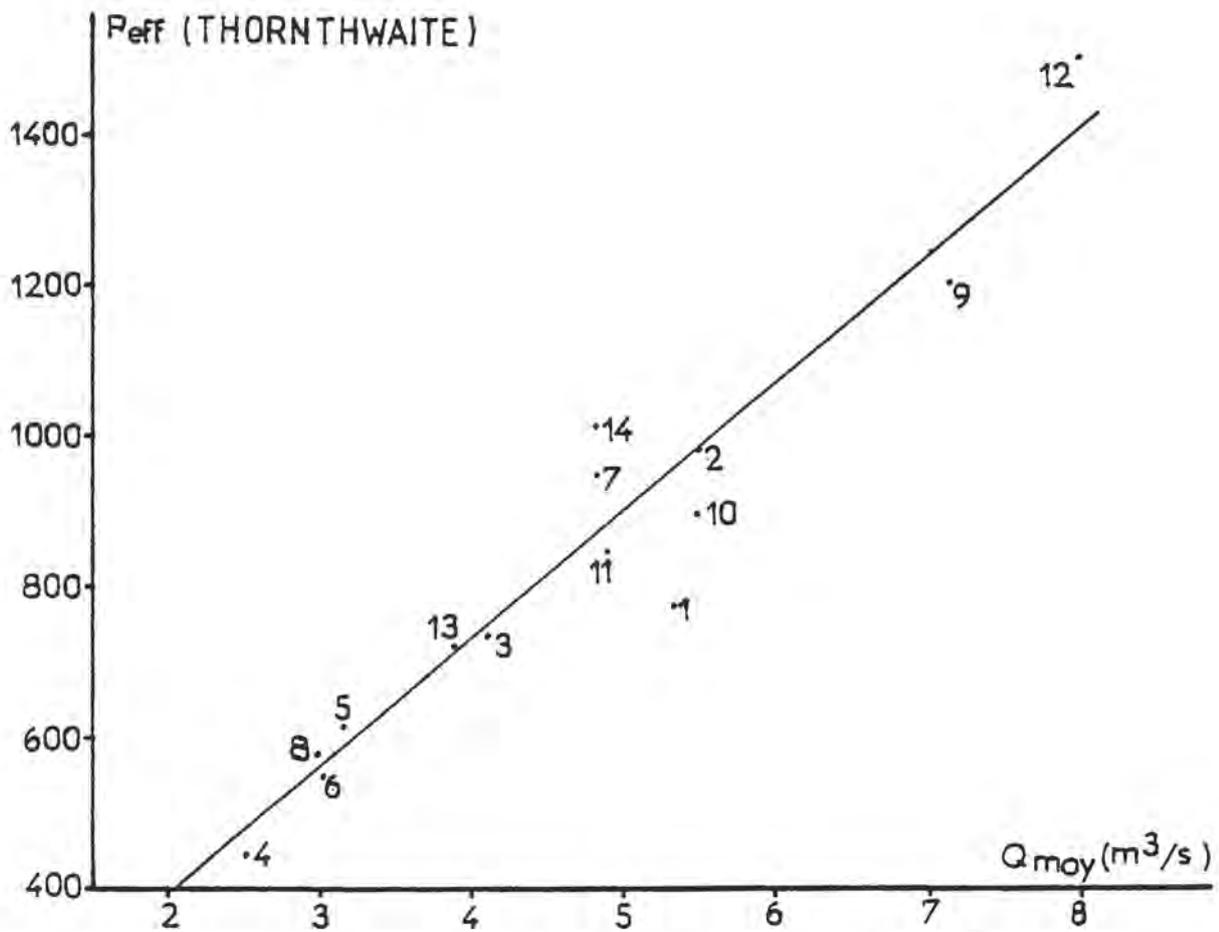
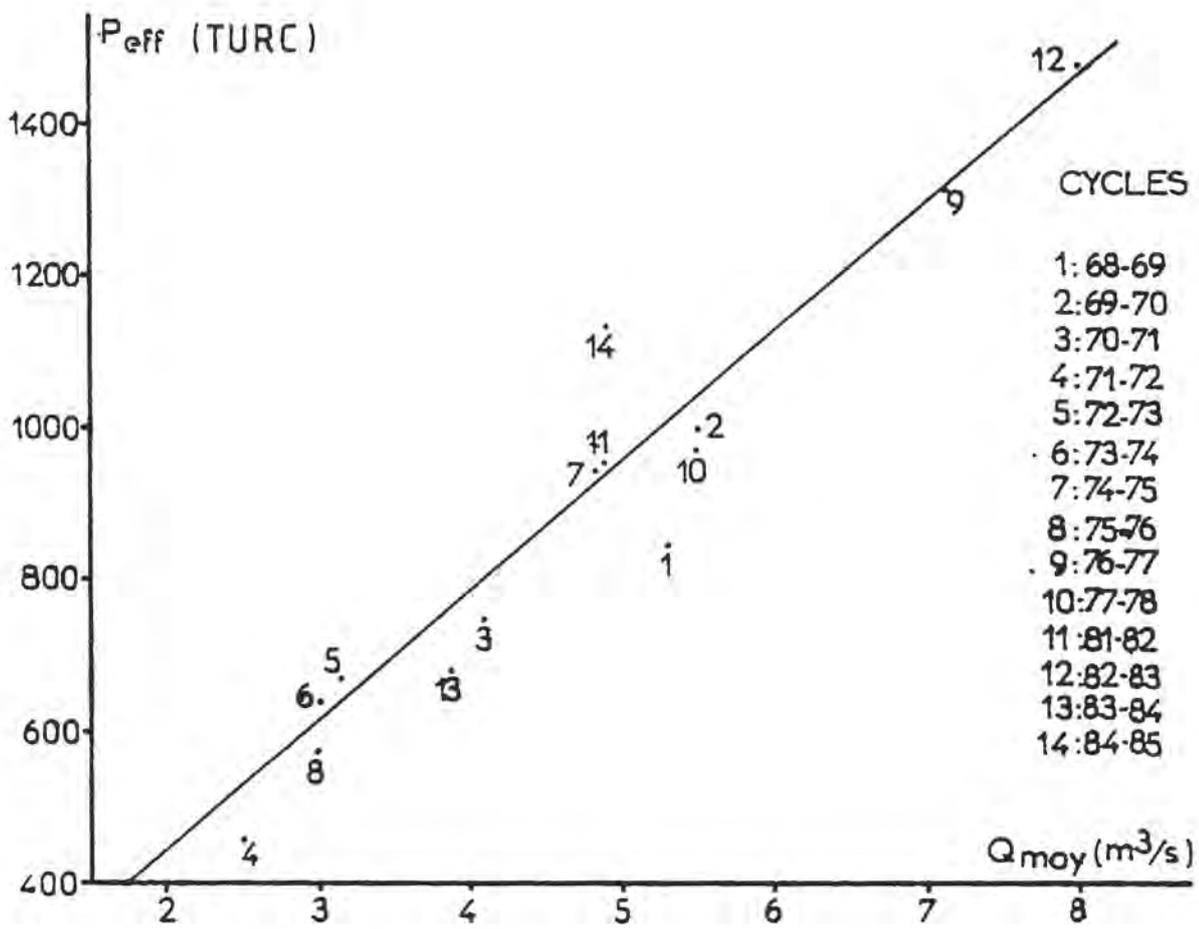


Fig. 64 - Comparaison des lames d'infiltration et des débits moyens par cycle (Seille à Voiteur)

La comparaison entrées-sorties a été effectuée de plusieurs manières :

- par le calcul : le bilan des quatorze cycles donne la superficie du bassin nécessaire pour obtenir l'équilibre. Cette superficie est de 164 km² par la première méthode (Turc) et de 172 km² par la deuxième méthode (Thorntwaite). La superficie du bassin définie au chapitre 1 était de 155 km², soit des différences respectives de 6 et de 10 %, toutes deux dans le sens d'un excès d'écoulement. Le bilan peut donc être considéré comme équilibré si l'on retient un seuil de tolérance de 10 % (pourcentage généralement admis en raison des nombreuses incertitudes de mesures des différents paramètres).

- par graphique : la figure 64 représente les lames infiltrées durant chaque cycle en fonction du débit. Dans les deux méthodes adoptées, la corrélation est significative au seuil de 1 %.

D'après ces résultats, on peut donc admettre que le bassin versant de la Seille à Voiteur couvre une superficie de 155 à 165 km².

2.3.2. Bilan du cycle 1987-1988

Le calcul du bilan hydrologique du cycle 1987-1988 a été effectué de la même manière que précédemment pour la Seille à Voiteur.

Le tableau 27 présente les résultats relatifs à ce cycle.

Cycle	T*	P	ETR (Tur)	P-ETR (Turc)	ETP (Thornt.)	Infil. (Thornt.)	Q moy (m ³ /s)
87-88	9.7	1734	559	1175	657	1069	4.49

Tab.27 - Bilan hydrologique du cycle 87-88

Les surfaces d'équilibre de bassin versant d'après les deux méthodes s'établissent à 120 km² (méthode de Turc) et 132 km² (méthode de Thorntwaite). Ces valeurs sont largement inférieures à l'intervalle de 10 % toléré par rapport à la surface topographique (155 km²). La différence est encore plus importante avec les valeurs précédemment calculées sur quatorze cycles : celle-ci va dans le sens d'un déficit d'écoulement pour le cycle 1987-1988.

Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat :

1- une sous-estimation des débits, due à un mauvais tarage : cette hypothèse ne peut qu'expliquer partiellement le déficit de 25%.

2- une modification du système hydrologique (apparition d'un flux sortant à la jonction plateau-vallée ou variation de la surface de l'impluvium).

L'étude des sous-bassins va nous permettre d'étudier ces deux hypothèses.

2.3.3. Bilan des sous-bassins

Les essais de traçage ont démontré la complexité des circulations dans le massif : aussi semblait-il difficile dans une première approche de définir les sous-bassins topographiques des différentes sources de la Seille. Ceux-ci apparaissent en effet largement imbriqués les uns dans les autres.

Nous avons donc préféré, d'après le calcul des débits en plusieurs points de la Seille, reconstituer des surfaces théoriques des sous-bassins en ces points.

Les calculs portent sur :

- les 2 sous-bassins des reculées Nord (Ladoye-Blois) et Sud (Baume-les-Messieurs), peu avant le point de confluence,
- les sous-bassins respectifs des sources du Dard, d'Aldegrin, de Blois et de Ladoye.

2.3.3.1. Sous-bassins des reculées Nord et Sud

45 valeurs simultanées de débit, relevées en 1987 et 1988 à l'aval des branches nord et sud de la Seille ont été analysées.

Il apparait que :

- les débits de la Seille Nord et de la Seille Sud sont sensiblement égaux (différence de 10 %, donc non significative),
- les débits cumulés de ces deux points sont plus importants que ceux observés à Voiteur aux mêmes moments : 3.35 m³/s en moyenne pour la somme Seille Nord + Seille Sud contre 3.08 m³/s pour la moyenne des observations simultanées de la Seille à Voiteur, soit une diminution de presque 10%.

Une partie du débit est donc amputée du cours de la Seille entre Nevy et Voiteur, sans doute à cause de la nappe alluviale et des pompages que l'on y effectue. Ces pompages (1000 m³/j à Nevy/Seille) sont cependant trop faibles pour expliquer le déficit.

D'autre part, les sous bassins des reculées nord et sud semblent de surfaces sensiblement équivalentes. En considérant le point de confluence comme exutoire, la surface topographique cumulée des 2 sous-bassins peut aisément être déterminée : elle représente 141 km².

Nous attribuerons donc 74 km² au bassin de la Seille nord et 67 km² à celui de la Seille sud.

2.3.3.2. Sous bassins des sources

Une démarche similaire à la précédente a été adoptée pour quantifier les sous-bassins des différentes sources. Ne disposant pas de limnigraphes excepté sur le Dard, une comparaison des mesures simultanées de débit sur les sources va nous permettre d'établir l'importance relative de leurs bassins respectifs.

29 mesures de débit, effectuées de mai à octobre 1988, fournissent une moyenne en chaque point. On peut alors établir les

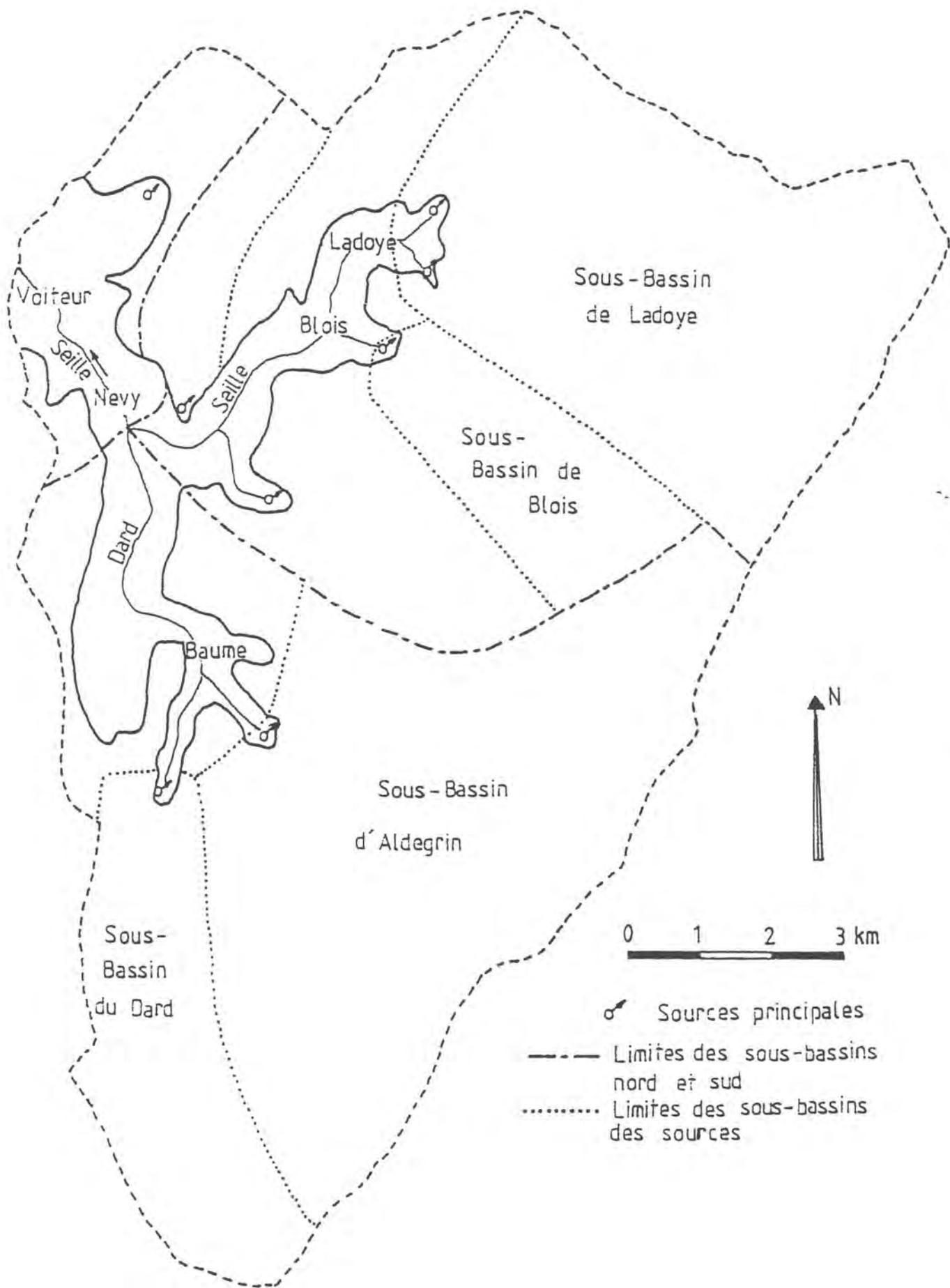


Fig. 65 - Extension probable des sous-bassins du système de la Seille

pourcentages respectifs de participation de chaque source au débit général de l'exutoire à Voiteur. Nous avons cependant majoré ce débit de base de 10 % pour tenir compte des remarques faites au paragraphe précédent concernant le déficit observé entre Nevy et Voiteur.

source	Dard	Aldegrin	Blois	Ladoye	Voiteur
Q moyen (m ³ /s)	0.397	1.31	0.209	0.840	3.35
% Q total	11.5	38.5	6	25	100
Surface km ²	16	51	8.5	35.2	155

Tab.28 - Participation des sous-bassins au débit de la Seille.

Le faible nombre de mesures ne donne qu'une estimation de ces bassins et de leur superficie : la source d'Aldegrin et les sources de Ladoye constituent cependant les exutoires majeurs du système.

Une synthèse cartographique de ces résultats est proposée en fig.65.

Outre les sources drainant la partie est du plateau, on peut souligner les bassins des sources de moindre importance :

- la source de Chambon au nord,
- la source du réseau de la Borne au Cassots. Le développement du réseau spéléologique associé à cet exutoire permet de penser que le sens d'écoulement des eaux est parallèle aux accidents importants du secteur ; ceux ci semblent délimiter des compartiments hydrologiquement indépendants. Ce même type de liaison existe vraisemblablement pour le Dard, où on peut observer le départ d'un drain noyé vers le Sud (voir fig.44, p.92).

- les sources du flanc ouest de la reculée supérieure (Ladoye) sont alimentées par la bordure du plateau.

2.3.4. Conclusion

Le calcul du bilan hydrologique a confirmé l'extension de 155 km² du bassin versant de la Seille à Voiteur, au moins pour la période 1968-1978 et 1981-1985. En revanche, les résultats du cycle 1987-1988 font apparaître un déficit d'écoulement (25%) que l'on peut attribuer soit à des erreurs de tarage, soit à une modification du système hydrologique. Dans cette seconde hypothèse, les pertes enregistrées entre Nevy et Voiteur peuvent intervenir : il n'est cependant pas démontré que ce phénomène n'existait pas avant 1985, période où le bilan était équilibré.

On peut présager que ces deux facteurs interviennent, sans toutefois pouvoir en préciser les parts respectives. La poursuite des mesures aurait cependant été nécessaire pour confirmer la modification du système.

Une estimation des différents sous-bassins peut être proposée, en terme de surfaces à l'équilibre car la détermination des surfaces réelles d'impluvium pose des problèmes d'imbrication de ces sous-bassins. Une synthèse cartographique amène à formuler des hypothèses sur l'extension des différentes unités composant le bassin de la Seille à Voiteur.

CONCLUSION

Les conditions climatiques du bassin de la Seille en font un plateau relativement arrosé (environ 1400mm), avec un gradient augmentant de l'Ouest vers l'Est, peu enneigé ; l'infiltration représente les 2/3 des précipitations.

L'étude du fonctionnement hydrologique a permis de montrer d'une part la complexité du système au niveau de la source du Dard (où un trop-plein se déclenche au débit de 0.45 m³/s), d'autre part le faible pouvoir régulateur du karst dans son ensemble (faible valeur du volume dynamique). Les capacités de drainage sont excellentes pour le Dard, un peu plus faibles pour le système dans son ensemble, ce qui le rapproche des systèmes voisins : Ain, Cuisance.

Enfin, le calcul du bilan hydrologique accorde une différence sensible entre les cycles 1968-1985 et le cycle 1987-1988, dans le sens du déficit d'écoulement pour ce dernier cycle, objet de nos mesures. On peut donc soupçonner une modification du système hydrologique, sans toutefois être en mesure de la démontrer.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Le bassin versant de la Seille à Voiteur couvre une superficie d'environ 155 km², valeur qui concorde avec le bilan hydrologique établi pour les cycles allant de 1968 à 1985. Le cycle 1987-1988, relativement arrosé, fait en revanche apparaître un déficit d'écoulement (environ 25%). Ce déficit pourrait être dû en partie à des pertes de la rivière entre Nevy sur Seille et Voiteur : on constate en effet une diminution du débit entre ces deux points, alors que des ruisseaux viennent encore alimenter le cours de la rivière.

On peut également retenir l'hypothèse d'une modification du système plus en amont, explication qui ne peut être vérifiée.

Dans le détail, les deux branches nord et sud des reculées drainent des surfaces sensiblement équivalentes. Le bassin est composé d'unités relatives à chaque émergence, imbriquées les unes dans les autres. Une approximation de leur surface d'impluvium peut être proposée (fig.65).

L'étude du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique permet de décrire la structure de l'aquifère calcaire et des écoulements y transitant. On montre :

- une structure favorable à un piégeage important des eaux (J.J.COLLIN et al, 1967).

- un aquifère fortement karstifié : les vitesses de circulation des eaux sont rapides (> 50 m/h, cf traçages) et le ruissellement souterrain important. Dans l'exemple du Dard, on a pu montrer de très bonnes capacités de drainage (décrues brèves et rapides). Il aurait été intéressant de disposer des paramètres i et k de A.MANGIN sur les autres émergences afin de les comparer au Dard. Dans l'exemple de Ladoye, une telle détermination aurait permis de vérifier l'hypothèse d'une plus grande perméabilité de fissures fines sur ce secteur (voir chapitre 2).

- des volumes dynamiques peu élevés, impliquant une faible participation du réservoir matriciel à l'écoulement total. Les méthodes utilisées (étude des décrues et tarissements, distribution des débits, etc...) sont malheureusement insuffisantes pour préciser l'état réel du karst en profondeur, en particulier le volume de la réserve et de son stockage en étiage.

- une diffluence générale des eaux sur la partie médiane du bassin (liée au relèvement du substratum), au profit des extrémités des reculées. Cette observation corrobore les résultats des perméabilités (1ere partie), qui apparaissent précisément plus élevées aux extrémités des reculées (secteurs de Ladoye d'une part et de Baume-les-Messieurs d'autre part).



CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le travail effectué sur le système karstique des sources de la Seille, au Sud du premier plateau jurassien, met en évidence la diversité des facteurs intervenant dans la caractérisation et l'évolution d'un tel système. Les trois voies d'approche (description physique du milieu, comportement hydrodynamique, réponses hydrochimiques) s'avèrent complémentaires. Ceci montre la complexité de l'évolution de tels systèmes, influencés par des facteurs variés, ainsi que la nécessité de faire appel à des techniques diversifiées pour les étudier.

Le plateau qu'entaillent les reculées de la Seille se présente comme un ensemble monoclinale calcaire reposant sur une épaisse série marneuse. Il domine à l'Ouest le faisceau lédonien et se trouve barré à l'Est par la chaîne de l'Heute. Affectée d'un léger pendage vers l'Est, cette structure renferme l'aquifère karstique drainé par les sources de la Seille. Le bassin versant de la Seille à Voiteur couvre une superficie comprise entre 155 et 165 km² : il apparaît composé de sous bassins imbriqués les uns dans les autres. Une estimation de leurs surfaces respectives d'impluvium peut être proposée.

Plusieurs directions principales de fracturation peuvent être mises en évidence, résultant d'un contexte tectonique polyphasé :

- une direction N-S, retrouvée à toutes les échelles au niveau de l'imagerie spatiale (satellite, alignements de dolines, photographies aériennes) : cette direction correspond au faisceau lédonien.

- une direction NNE, bien affirmée sur les stations de la petite fissuration, mais aussi par les directions d'extension des galeries karstiques : au Nord du plateau, cette orientation est en accord avec les structures principales (accidents principaux et directions de développement des reculées) ainsi qu'avec la direction probable des accidents du socle (P. CHAUVE et al, 1988).

- une direction ESE, en relation avec la phase compressive ayant généré le charriage du Jura sur la Bresse.

L'examen des champs de fissuration et de perméabilité, obtenus respectivement par krigeage des fréquences de fissuration et des conductivités hydrauliques, permet de dégager une zonation de leurs caractéristiques dans le plateau, aux abords des reculées.

L'avant-plateau, situé à l'Ouest de la reculée nord (Ladoye sur Seille), possède des perméabilités faibles et des directions de perméabilité NNE sensiblement parallèles aux grands accidents et à la direction d'extension de la reculée. Ces caractéristiques fissurales ont une influence hydrogéologique et pédologique :

- les sources de ce versant sont peu karstifiées, comme le démontre l'étude de la Fontaine de Blois.

- ce milieu plus faiblement fissuré a permis le développement de sols bruns sur argile (contexte pédologique que l'on retrouve plus

généralement au Nord du plateau). Ce type de couverture entraîne un marquage accentué en silice des eaux aux exutoires ainsi qu'une ablation karstique moindre.

La partie principale du plateau, située à l'Est des reculées, montre des perméabilités plus élevées, en particulier aux points de ramifications des reculées. C'est le cas de la source de Ladoye sur Seille qui possède un débit important. Pour les autres sources, la relation perméabilité-débit est moins évidente, mais la présence de gros drains y est aussi prépondérante. Les sources de ce versant du plateau témoignent d'une karstification élevée, confirmée par les vitesses de circulation mesurées lors des essais de traçage. La source du Dard, objet d'une étude plus complète, montre des décrues rapides.

Cette karstification élevée se retrouve dans les réponses hydrochimiques des sources, où on note une ablation karstique plus importante que pour l'avant-plateau. Les sols calcaires sont peu épais et s'enrichissent fortement en calcium en raison de fortes pCO_2 . Ce processus se poursuit à l'interface sol-roche : l'étude de la source épikarstique de La Marre, qui possède des variations hydrochimiques de grande amplitude, le montre clairement. Ce secteur est le siège d'une intense ablation des milieux superficiels du karst.

Ce constat général pour le plateau peut être modulé en fonction des différentes réponses enregistrées sur chaque émergence. La variabilité des concentrations au cours du cycle hydrologique permet d'abord de désigner les parties les plus karstifiées de l'aquifère : bassins du Dard et de Blois. L'étude des éléments issus de l'activité anthropique permet ensuite de discerner leur impact : rejets d'eaux usées pour la source de Blois, activités agricoles pour le bassin de Ladoye. La grande extension des prairies et des forêts contribue cependant à l'atténuation de cette pollution chimique, les eaux subissant néanmoins une contamination bactériologique importante.

BIBLIOGRAPHIE

- AMINOT A. (1975).-Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. 4 : le pH : aspect théorique, mesure et interprétation géochimique. *Ann. Spéleo.*, 1975, 30, 1, p. 7-20.
- AUBERT D. (1965).-Calotte glaciaire et morphologie jurassienne. *Eclog. Géol. Helvet.*, vol.58.
- AUBERT D. (1969).-Phénomènes et formes du karst jurassien. *Eclog. Geol. Helvet.*, Vol 62, n°2, p.325-399.
- AUBERT J. (1972).-Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région d'Orgelet (Jura). Thèse 3e cycle Univ. Franche-Comté Besançon, 162 p.
- BAKALOWICZ M. (1976).-Géochimie des eaux karstiques. Une méthode d'étude de l'organisation des écoulements. 2e Coll. Hydrol. Pays. Calc. *Ann. Scient. Univ. Besançon. Géologie* (3), 25, p. 49-58.
- BAKALOWICZ M. (1979).-Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doct. Etat. Paris VI, 269 p.
- BAKALOWICZ M. (1980).-Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO₂-H₂O-Carbonate. Coll. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates, Bordeaux, p. 11-23.
- BEAUFILS Th. (1983).-Typologie des stations forestières du plateau lédonien et de la côte de l'Heute. Lab. Taxon. Exp. et Phytol. Fac. Sc. Besançon.
- BLAVOUX B. (1980).-L'eau dans le karst : les différentes composantes de l'écoulement et leur participation au débit de l'exutoire en crue et en étiage. 1er Coll. Nat. sur la protection des eaux souterraines Karst. Besançon. p. 59-81.
- BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVE P., MUDRY J. (1979).-Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, 21(4), p. 295-306.
- BLAVOUX B., CHAUVE P., MUDRY J., OLIVE P. (1982).-Essai d'évaluation du temps de renouvellement des réserves karstiques du Jura à partir de l'évolution des teneurs d'étiage en tritium. 3e Coll. Hydrol. Pays. Calc. Neuchâtel (Suisse). *Ann. Scient. Univ. Besançon, Géol.*, Mém. n°1, p. 133-142.
- BLAVOUX B., MUDRY J. (1983).-Séparation des composantes de l'écoulement d'un exutoire karstique à l'aide des méthodes physico-chimiques. *Hydrogéologie, Géol. de l'Ing.* 4, p. 269-278.

- BLIN-LACROIX J.L. (1988).-Analyse et modélisation des fractures et des systèmes fracturés en milieu rocheux. Contribution à l'élaboration d'une chaîne de logiciels intégrant l'acquisition des données, le traitement analytique et statistique, la simulation. Thèse Doct. I.N.P.L., Nancy, 295 p.
- BLONDE J.L., BRUCKERT S., CHAUSSOD R., JOUVENOT A. (1989).-Etude de quelques aspects de l'activité biologique des sols calcimagnésiques jurassiens. *Ann. Sci. Univ. Franche-Comté, Besançon, Biol. Ecol.*, 5ème sér., 1, 15p.
- BONTE A. (1953).-Contribution à la tectonique du vignoble aux environs de Lons le Saunier (Jura). *Bull. Soc. Géol. Fr.(6)*, II, p. 337-365.
- BROQUET P., FORESTIER G., VEREZ C. (1978).-Essai d'analyse en sismique réflexion de la fracturation d'un massif rocheux calcaire en Franche-Comté. *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géologie*, fasc. 29, 3ème Sér., p. 37-45.
- BRUCKERT S., GAIFFE M. (1980).-Analyse des facteurs de formation et distribution des sols en pays calcaire, glaciaire ou karstique. Plaine de Frasne-Bonnevaux et montagne du Laveron. Jura Central. *Ann. Sc. Univ. Besançon, Fasc.1.*
- BRUCKERT S. (1989).-Lessivage vertical versus lessivage latéral : incompatibilité de ces deux grands phénomènes pédogénétiques. *C.R. Acad. Sci.*, 308, Sér.II, p. 335-340.
- BRUCKERT S., GAIFFE M. (1989).-Processus de formation et de fonctionnement des sols en relation avec le réseau poral des roches. *Ann. Sci. Univ. Besançon.*
- CAIRE A. (1955).-Surfaces d'érosion et versants calcaires du Jura Central. *Bull. Soc. Hist. Nat. Doubs*, n°59, p. 35-55.
- CAMPY M. (1982).-Le quaternaire franc-comtois. Essai chronologique et paléoclimatique. Thèse Doct. Etat, Univ. Franche-Comté, Besançon, 575 p.
- CHABOT G. (1927).-Les plateaux du Jura Central. Etude morphogénique. Pub. Fac. Lettres Univ. Strasbourg, Fasc.41. Ed. Les Belles Lettres, Paris, 350 p.
- CHAUVE P. (1975).-Le Jura. Guides géologiques régionaux. Ed. Masson, 216 p.
- CHAUVE P., CLAUDON G., DUPUIS J., FOLTETE J., FORESTIER G., MATHIS V., METTETAL J.P., MUDRY J., ROSENTHAL P. (1976).-Amélioration des débits de forage d'eau en pays calcaire par acidifications. Exemples franc-comtois. *2e Coll. Hydrol. Pays. Calc.*, Géologie, 3e série, Fasc.25, p. 143-155.

CHAUVE P., DUBREUCQ F., FRACHON J.C., GAUTHIER A., METTETAL J.P.,
PEGUENET J. (1987).-Inventaire des circulations souterraines reconnues
par traçage en Franche-Comté. Atlas, *Ann. Sci. Univ. Besançon*,
Géologie, Mém.n°2, ISSN 07597517, 10 p., 10 fig.

CHAUVE P., MARTIN J., PETITJEAN E., SEQUEIROS F. (1988).-Le chevauche-
ment du Jura sur la Bresse. Données nouvelles et réinterprétation
des sondages. *Bull. Soc. Géol. France*, 1988, (8), t.IV, n°5,
p. 861-870.

X CHORVOT G., TRESSE P. (1979).-La Borne aux Cassots à Nevy sur Seille.
Gr. Spéléo. Doubs, Nos cavernes, n°14, p. 58-64.

CLAUDON G., PHARISAT A., THOMAS M. (1977).-Exemples d'application de
l'analyse factorielle en géologie. (Paléontologie, Géochimie et
Hydrochimie). *Ann. Sci. Univ. Besançon*, Géologie, 3ème Sér.,
fasc.28, p. 43-63.

COLBEAUX J.P., MANIA J. (1976).-Relations entre la fracturation et
l'écoulement des eaux superficielles et souterraines en pays
crayeux au Cran d'Escalles. Application à l'Artois. 2e Coll.
Hydrol. Pays Calc., *Ann. Sci. Univ. Besançon*, Géologie, Fasc.25,
3e Sér., p. 179-194.

(COLIN J. (1966).-Inventaire spéléologique de la France. Département du
Jura. Ed. BRGM. 307 p.

COLIN J., DREYFUSS M., LIENHARDT G. (1965).-Connaissance de l'hydrolo-
gie du premier plateau du Jura. Rapport n°2. BRGM, DSGR 65 à 73.

COLIN J., DREYFUSS M., LIENHARDT G. (1967).-Premier plateau du Jura ;
piège hydrologique important. *Bull. BRGM*, Paris, n°4, p. 81-94.

CONTINI D. (1970).-L'Aalénien et le Bajocien du Jura Franc-Comtois.
Thèse Doct. Etat, Univ. Besançon, 2 vol., 514 p.

C.P.G.F. (1988).-Etude préalable à la détermination des périmètres de
protection des sources de la ville de Lons le Saunier. Rapport
d'étude n°2951B, C.P.G.F. Lyon Sud-Est.

CRUCHET M. (1983).-Relations entre l'hydrogéologie, le thermalisme et
les circulations d'eaux uranifères dans les roches fissurées. Les
massifs cristallins externes de Basse Maurienne (Savoie). Thèse
3e cycle, Univ. Grenoble.

CTGREF (1973).-Le forage de Crançot (Jura). Acidifications du 7/05 au
6/07/1973. Rapport CTGREF 581-8-73, div. hydrogéol., inédit.

DROGUE C. (1969).-Contribution à l'étude quantitative des systèmes hy-
drologiques karstiques, d'après l'exemple de quelques karsts pé-
riméditerranéens. Thèse Doct. Sc. Nat. Univ. Montpellier, 462 p.

DUBREUCQ F. (1987).-Le chimisme des eaux de la Cuisance en amont
d'Arbois (Jura). Influence du karst, des sols et des activités
humaines. Thèse Fac. Sc. Univ. Franche-Comté, Besançon, 155 p.

- DUBREUCQ F., CHAUVE P., MANIA J., BRUCKERT S., MIGNOT Ch., MOINDROT D., TRUCHE C. (1988).-Rôle de l'interface sol-roche dans l'acquisition du chimisme des eaux. Application aux eaux karstiques. 4e Coll. Hydrol. Pays Calc., *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géologie, Mém. H.Sér.n°6*, p.221-228.
- DUPLESSIS-KERGOMARD D., MARTIN J. (1968).-Observations sur le réseau supérieur de la Seille (Reculées de Ladoye sur Seille et Baume les Messieurs, Jura). *Bull. Fed. Soc. Sc. Nat. Franche-Comté*, t.LXX, Nlle Série, n°1, p. 7-9.
- DUTARTRE Ph. (1982).-Etude de la fracturation du granite de la Margeride (région de Saint-Alban-sur-Limagnole - Lozère). Géométrie, cinématique, densité des fractures. Thèse 3e cycle. Documents du BRGM n°41. 344 p., 91 fig., 4 pl.
- FORESTIER G., BROQUET P., VEREZ C. (1977).-Etude comparative de la fracturation des schistes bitumineux et de leur couverture calcaire en Franche-Comté. 5eme R.A.S.T., Rennes, p. 230.
- FORESTIER G., VEREZ C. (1978).-Etude de la fracturation du plateau d'Ornans (Doubs). Thèse 3e cycle, Fac. Sci. Tech. Franche-Comté, Besançon.
- FORESTIER G., VEREZ C., BROQUET P. (1978).-Application d'une méthode de traitement d'images à l'analyse de structures linéaires sur différents types de photographies aériennes du Jura français. 6eme R.A.S.T., Orsay, p. 166 bis.
- FRACHON J.C. (1975).-Etude géomorphologique des reculées du Jura lédonien. *Mém. de Maîtrise, Inédit.*
- GIESEKING J.E. (1975).-Soils components. 1. Organic components. Springer-Verlag, Berlin, 534 p.
- GIRARDOT L.A. (1890-96).-Coupes dans les étages inférieurs du système jurassique dans les environs de Lons-le-Saunier. *Mém. Soc. Emul. Jura*, sér.4, vol 5 et 6, 899p.
- GAUTHIER A. (1988).-L'acidité des pluies et les photooxydants atmosphériques. Etudes récentes en Franche-Comté et relation avec le dépérissement forestier. Thèse Fac. Sci. Univ. Besançon, 117 p.
- GONDO J. (1990).-Evolution et modélisation des écoulements et des transferts des eaux souterraines en milieu fissuré saturé. Examen des modalités de propagation des polluants. Thèse Doct. Univ. Besançon (à paraître).
- GRILLOT J.C. (1979).-Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance. Thèse Doct. Etat Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, 212 p.
- GUILLAUME A. (1977).-Analyse des variables régionalisées. Ed. Doin, Paris, 177 p.

- ITTY J., VINTAER J. (1987).-Contribution à l'étude géologique et hydrologique du haut bassin de l'Ain (Jura). Thèse Univ. Besançon, 336 p., 182 fig., 69 tab.
- JACQUEMIN P. (1984).-Réponses hydrodynamiques des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue : simulation des écoulements, influence de l'enneigement et de la traversée du lac Saint-Point, étude des pertes du Doubs. Thèse 3e cycle Fac. Sc. Besançon, 164 p.
- JAMIER D. (1975).-Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des massifs de l'Arpille et du Mont-Blanc. Thèse Fac. Sci. Univ. Neuchâtel, 153 p., 45 fig., 41 tab., 4 pl.
- JAMIER D., SIMEONI G.P. (1979).-Etude statistique de la distribution spatiale des éléments structuraux dans deux massifs des Alpes helvétiques. Conséquences pour l'hydrogéologie karstique. *Bull. BRGM*, 2e Sér., Sec.III, n°1, p. 67-76, 9 fig., 3 tab.
- JUIF L. (1988).-Le chimisme des sources Martin. Influence du karst et des activités humaines. Mém. DEA., Univ. Besançon.
- KIRALY L. (1969).-Statistical analysis of fractures. Orientation and density. *Geol. Rundschau*, 59, 1, pp 125-151.
- KIRALY L. (1978).-La notion d'unité hydrogéologique. Essai de définition. *Bull. Centre. Hydrogéol.*, Neuchâtel, n°2, pp 83-221.
- LEFAVRAIS-RAYMOND A. (1961).-Stratigraphie du Lias des sondages de la région de Lons-le-Saunier. Coll. Lias. Français. *Mém. BRGM*. n°4 pp 633-641.
- LIAKOPOULOS A. (1965).-Variation of the permeability tensor ellipsoid in homogeneous anisotropic soils. *Water Resources Research*, 1/1, p. 135-151, 3 fig.
- LIENHARDT G. (1962).-Géologie du bassin stéphanien du Jura et de ses morts-terrains. *Mem. BRGM*, n°16, p. 231-267.
- de LUCA P. (1976).-Observations tectoniques dans la reculée de Vaux sur Poligny. La pincée géologique de Pupillin à Plasne (Jura). *Ann. Blaireaux Polinois*, Tome 3, Fasc.1-2, pp 21-26.
- MANGIN A. (1970).-Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et de tarissement. *Ann. Spéléo.*, t.25, fasc.3, pp 581-610.
- MANGIN A. (1971).-Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Ann. Spéléo.*, t.26, pp 283-329
- MANGIN A. (1975).-Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct. Etat, Dijon. *Ann. Spéléo.*, t.29, n°3, pp 283-332, t.29, n°4, pp 495-601, t.30, n°1, pp 21-124.
- MARION F. (1988).-Etude comparée du "flux" de calcium dans les sols

- calcimagnésiques et brunifiés du Jura. Mém. D.E.A. Pédologie, Univ. Franche-Comté, Besançon, 46 p.
- de MARSILY G. (1981).-Hydrogéologie quantitative. Ed. Masson, Paris, 215 p.
- MARTIN J., MATHIS M. (1974).-Etude morphologique des plateaux du Jura Central : la surface de Loulle-Lons le Saunier. *Ann. Scient. Univ. Besançon*, 3e Série, Géol, Fasc.22, p. 59-63.
- MASSONAT G. (1981).-Hydrogéologie en milieu fissuré et thermalisme. Etude du massif de Bramefarine et du nord du massif d'Alleverd. La source thermominérale d'Alleverd. Thèse 3e cycle Univ. Grenoble.
- MATHERON G. (1962).-Traité de géostatistique appliquée. Tome 1 (1962), tome 2 (1963), Ed. Technip, Paris.
- MATHIS M. (1973).-La chaîne de l'Heute (Jura). Thèse Doct. Spéc. Univ. Besançon, 212 p.
- MLJATOVIC B. (1988).-Fissuration et karstification. Rapport sur le thème 2. 4^e Coll. Hydrol. Pays. Calc. et *Ann. Sci. Univ. Besançon*. Géologie (6), Tome 2, p. 432-438.
- MIQUEL J. (1984).-Guide pratique d'estimation des probabilités de crues. Ed. Eyrolles, 1984.
- MISEREZ J.J. (1973).-Géochimie des eaux du karst jurassien (contribution physico-chimique à l'étude des altérations). Thèse Fac. Sc. Univ. Neuchâtel.
- MOINDROT D. (1989).-Influence de la fusion nivale sur le bilan hydrologique et la qualité des eaux de trois bassins expérimentaux en moyenne montagne (Haut-Doubs). Thèse Fac. Sc. Tech. Franche-Comté, Besançon, 293 p., 140 fig., 118 tab.
- MUDRY J., ROSENTHAL P. (1977).-La Haute Chaîne du Jura entre Morez, Saint-Claude et la Pesse (étude géologique et hydrologique). Thèse 3e cycle Fac. Sc. Besançon. 205 p., 95 fig.
- MUDRY J. (1980).-Classification automatique des données d'une campagne de prélèvements simultanés d'étiage des émergences karstiques jurassiennes (émergences, paramètres physico-chimiques et isotopiques). 8e Réun. Ann. Sc. Terre, Marseille, p.257.
- MUDRY J. (1987).-Apport du traçage physico chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse Doct. Etat. *Ann. Scient. Univ. Besançon*, Géologie, n°4, 311 p.
- MUET Ph. (1985).-Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du Nord du Causse de Martel (Corrèze). Thèse Univ. Orléans, 386 p., 120 fig., 34 tab.

- MUXART R., STCHOZKOY T., FRANCK J.C. (1966).-Observations karstochimiques et spéléologiques dans le Bas-Jura. Bassin supérieur et reculées de la Seille. *Bull. GRSIF*, 2e Série, n°4, p. 2-8.
- OLIVE P. (1976).-Le système CO₂/H₂O/CaCO₃. Mémento pratique. Univ. P. et M.CURIE, Paris, 43 p.
- ORANGE A. (1985).-Etude de deux systèmes aquifères contrastés en terrains carbonatés du nord-ouest de la Nièvre. Aspects hydrodynamiques et hydrochimiques. Thèse 3e cycle, Univ. Orléans. 268 p., 77 fig., 38 tab.
- PERRODIN Y. (1987).-La Seille jurassienne. Bilan pollution. Mém. Inédit, INSA Lyon, 68 p.
- POCHON M. (1978).-Origine et évolution des sols du Haut Jura suisse. Phénomène d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide. Thèse Univ. Neuchâtel, 190 p.
- RODIER J. (1971).-Analyse chimique et physico-chimique de l'eau. Ed. Dunod, Paris, 700 p.
- ROQUES H. (1962).-Considérations théoriques sur la chimie des carbonates (2e mémoire). *Ann. Spéléol.*, 17, 2, p. 241-284.
- ROQUES H. (1963).-Sur la répartition du CO₂ dans les karsts (2e mémoire) *Ann. Spéléol.*, 18, 2, p. 141-184.
- ROQUES H. (1964).-Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes CO₂-H₂O-Carbonates. *Ann. Spéléol.*, t.19, f.2, p. 255-284.
- ROQUES H. (1969).-Problèmes de transfert de masse posé par l'évolution des eaux souterraines. *Ann. Spéléol.*, 24, 3, p. 455-494.
- ROQUES H. (1972).-Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux naturelles. *Ann. Spéléol.*, 27, 1, p. 79-92.
- ROSSIER Y. (1982).-Relation entre tenseur de perméabilité et champ géologique de fissuration. Application à un massif granitique fissuré. *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géol., Mém. n°1*, p. 183-190.
- ROSSIER Y., SANDMEIER N. (1983).-Etude hydrogéologique d'un massif granitique fissuré (massif du Haut du Them, Sud des Vosges). Thèse 3e cycle Fac. Sci. Besançon.
- ROSSIER Y. (1986).-Exemples d'applications d'une méthode d'analyse de la fissuration. Illustration en pays granitique et calcaire. *Hydrogéologie*, n°2, p. 231-240.
- ROSSIER Y. (1988).-Présentation d'un logiciel d'analyse des linéaments et de comparaison des diverses représentations linéamenteuses. 4e Coli. Hydrol. Pays Calc., *Ann. Sci. Univ. Besançon, Géologie, Mém. H.Série n°6*, p. 169-176.

- ROSSIER Y., WEXSTEEN P. (1988).-Méthodologie d'étude du champ des orientations préférentielles de la fissuration et du champ des fréquences de fissuration. Application au massif du Furcil, Jura Neuchâtelois (Suisse). 4e Coll. Hydrol. Pays. Calc., *Ann. Scient. Univ. Besançon, Géologie, Mém. H.Série n°6*, p.389-404.
- SALPERWYCK M., ROSSIER Y. (1988).-Reconstitution du champ de fissuration dans le secteur des reculées de la Seille (Jura, France). 4e Coll. Hydrol. Pays. Calc., *Ann. Scient. Univ. Besançon, Géologie, Mém. H.Série n°6*, p.389-404.
- SARROT-REYNAULD J. (1988).-Interprétation des relevés de fracturation et de fissuration aux différentes échelles d'observation. 4^e Coll. Hydrol. Pays. Calc., *Ann. Sci. Univ. Besançon. Géologie (6)* Tome 2, pp 293-301.
- SCHEIDEGGER A.E. (1960).-The physics of flow through porous media. University of Toronto Press, 313 p.
- SCHOELLER H. (1962).-Les eaux souterraines. Masson et Cie, Paris, 642 p.
- SCHWARTZ D. (1980).-Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes, Paris.
- SNEDECOR C.W. (1956).-Statistical methods. Iowa State Univ. Press, Rth Ed., p. 291-328.
- 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 du Jura. Thèse 3e cycle Fac. Sc. Besançon, 154 p., 56 fig., 8 pl.
- THEOBALD N. (1961).-Stratigraphie du Lias dans la Franche-Comté. Coll. Lias. Français. *Mém. BRGM n°4*. pp 625-632.
- TRESSE G., TISSOT P. (1978).-Etude des systèmes karstiques du Lison et du Verneau (région de Nans sous St Anne, Doubs). Thèse 3e cycle Fac. Sci. Besançon.
- VISTELLIUS A.B. (1966).- Structural diagrams. Pergamon Press, Oxford, 178 p., 47 fig.
- WITTIKE W., LOUIS C. (1968).-Modellversuche zur Durchströmung klüftiger Medien. *Felsmech. u. Ing. Geologie, Suppl. IV*, p. 52-78, 24 fig.

bobignon 2

pendage 90 ; 80 increment 10 degres.
 b:fissure.014
 bobignon 2
 echelle :1 fissure = 45 pixels

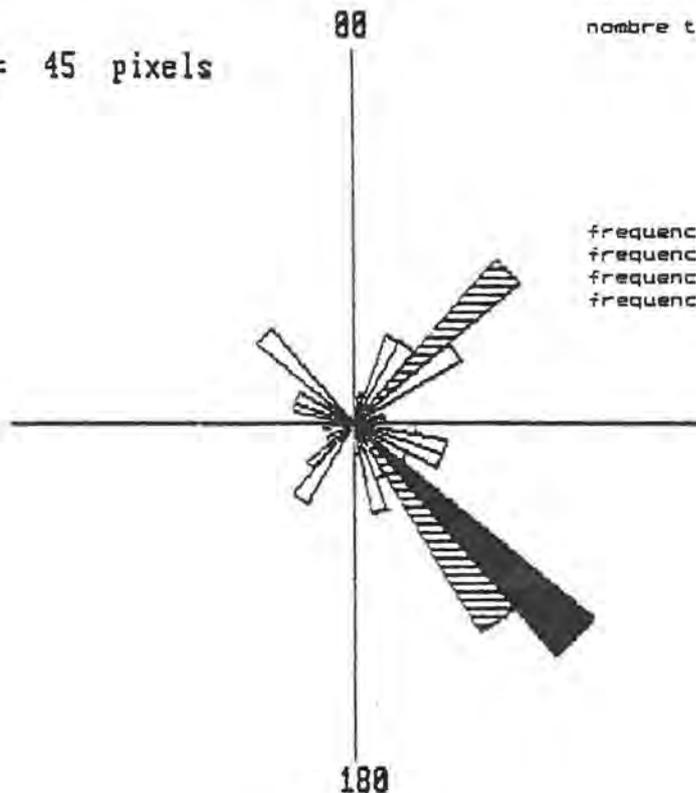
fichier de fissuration b:fissure.014

nombre total de familles 4

AZIMUT	PENDAGE
44	89
135	88
142	88
232	73

frequence de la famille 5 : 2.198418
 frequence de la famille 14 : 2.453252
 frequence de la famille 15 : 1.931197
 frequence de la famille 52 : 2.540462

270

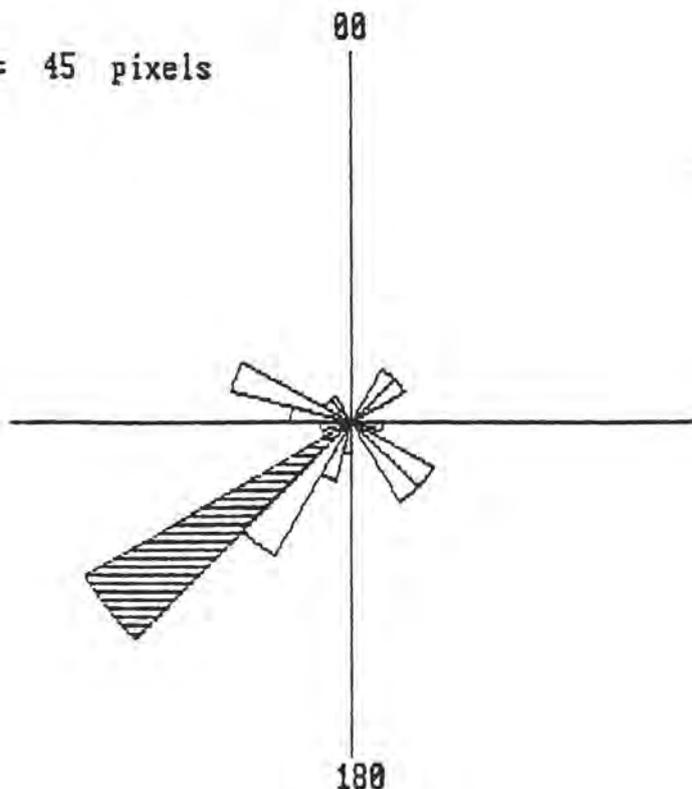


90

CLE 1:DESSIN ROSACE SUIVANTE CLE 2:FIN SHIFT+PRTSC+RETURN:IMPRESSION

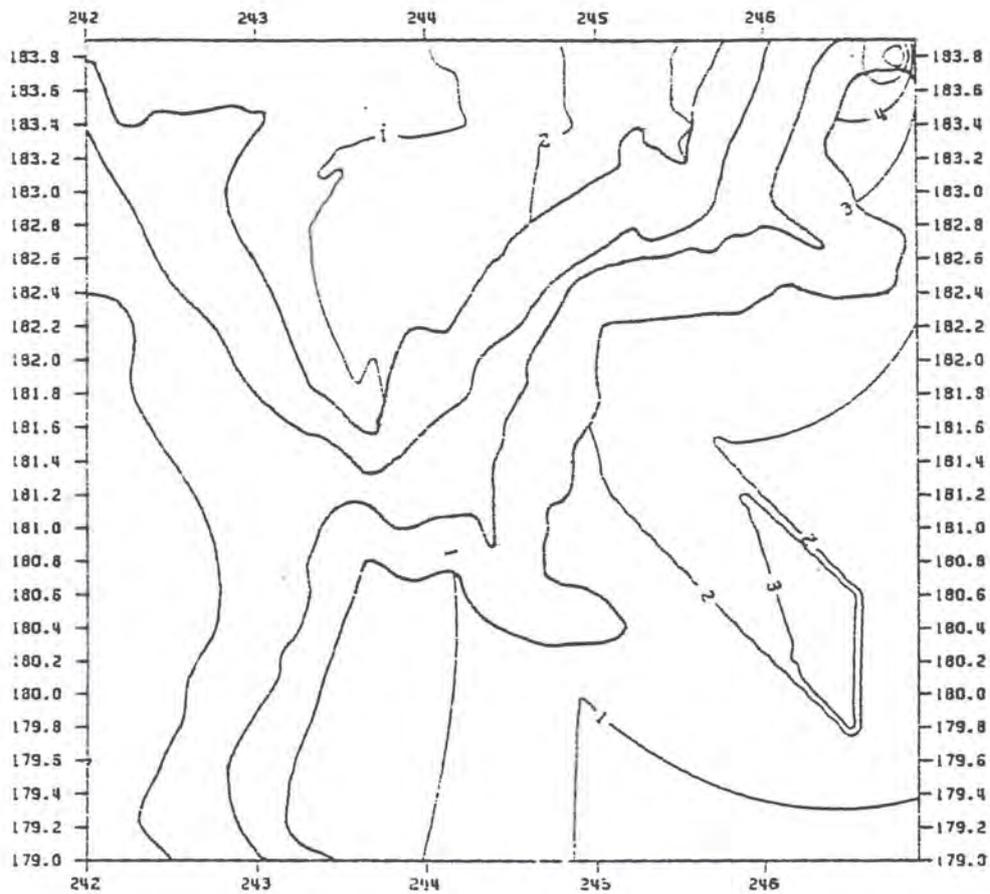
pendage 80 ; .60 increment 15 degres.
 b:fissure.014
 bobignon 2
 echelle :1 fissure = 45 pixels

270



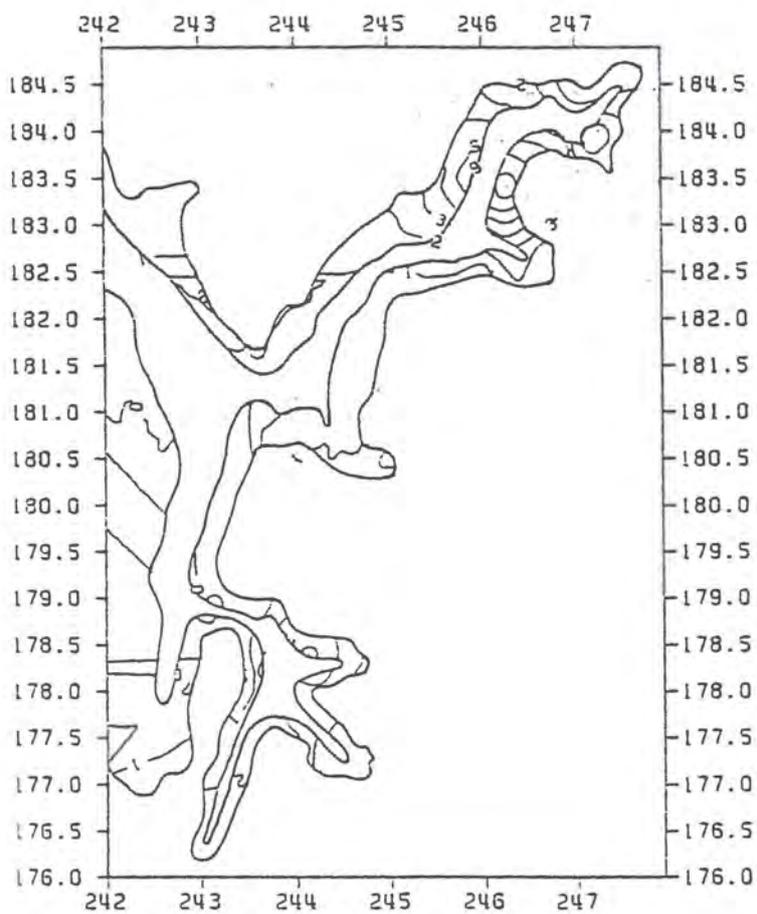
90

180

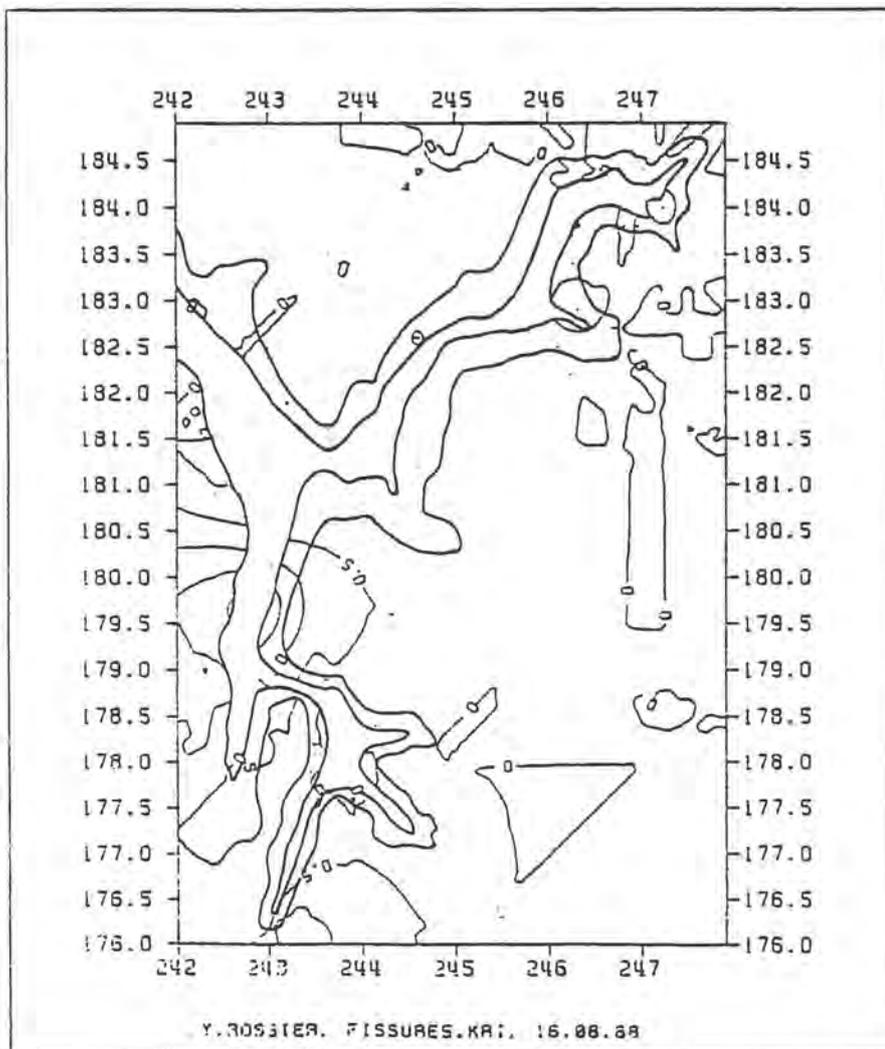
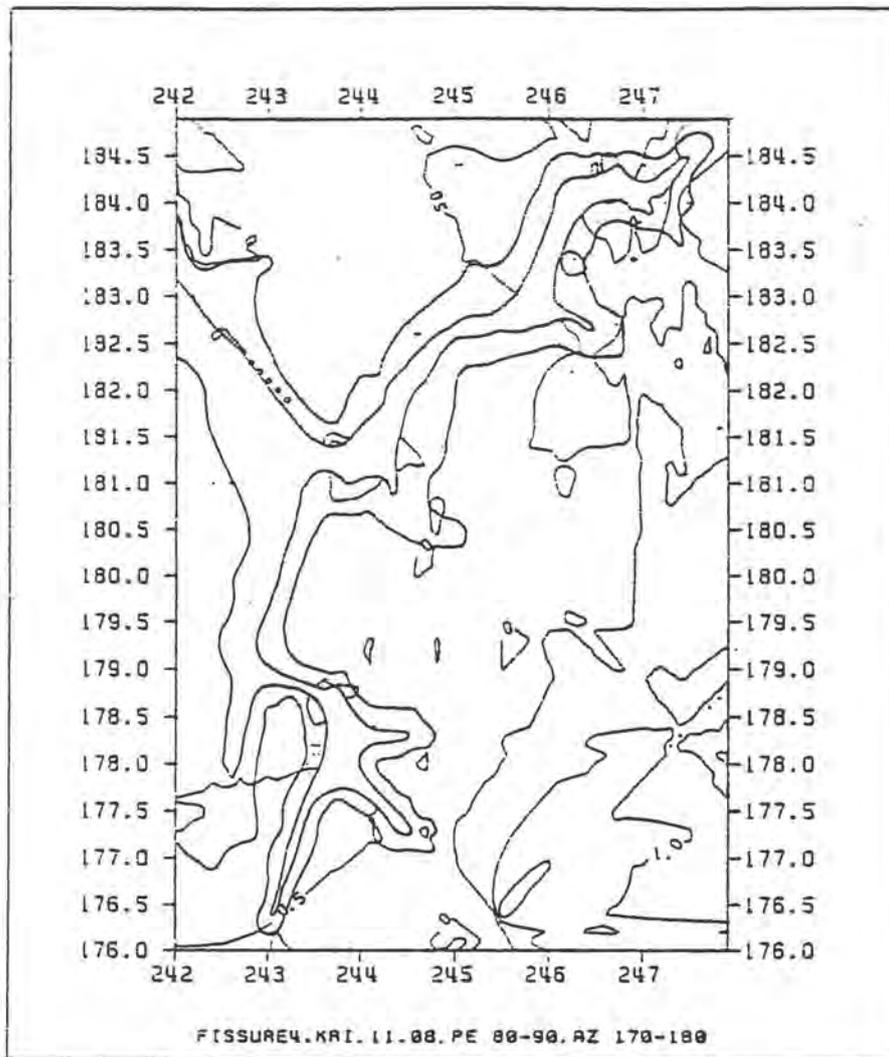


FISSURE3, KRI3, PE 80-90, Az 125-145, NORMAL, PLAT-HAUT

Cartographies krigées : cartes en isofréquences



FISSURE3, KRI4, PE 80-90, Az 125-145, NORMAL, PIED-MILIEU



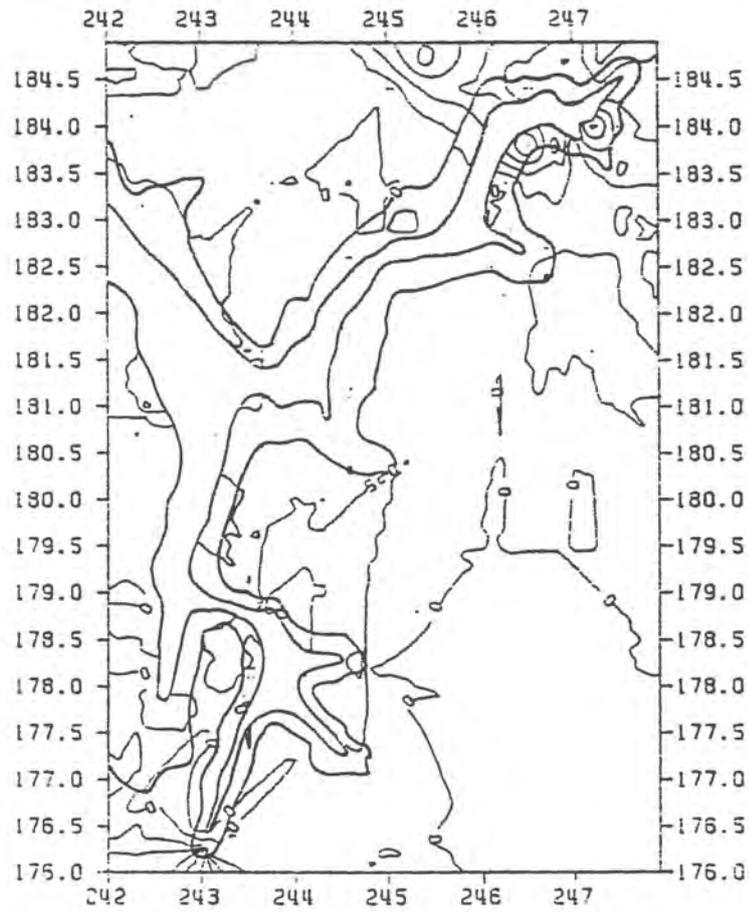


FIGURE 6. KAT. 11.08.88, ESSAI 1, PE 60-63, AZ 210-225

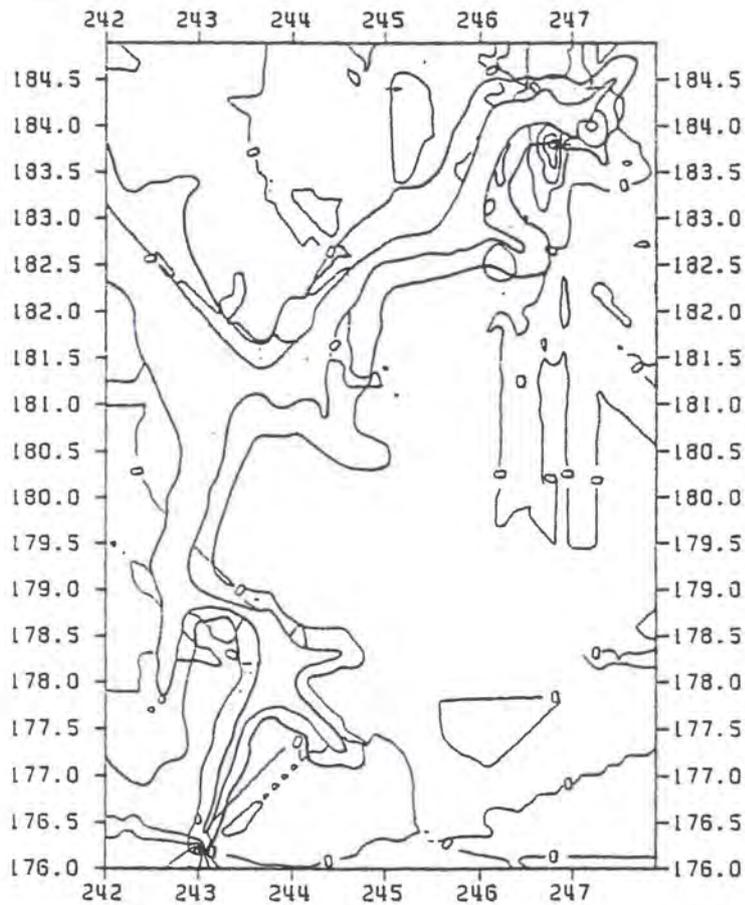
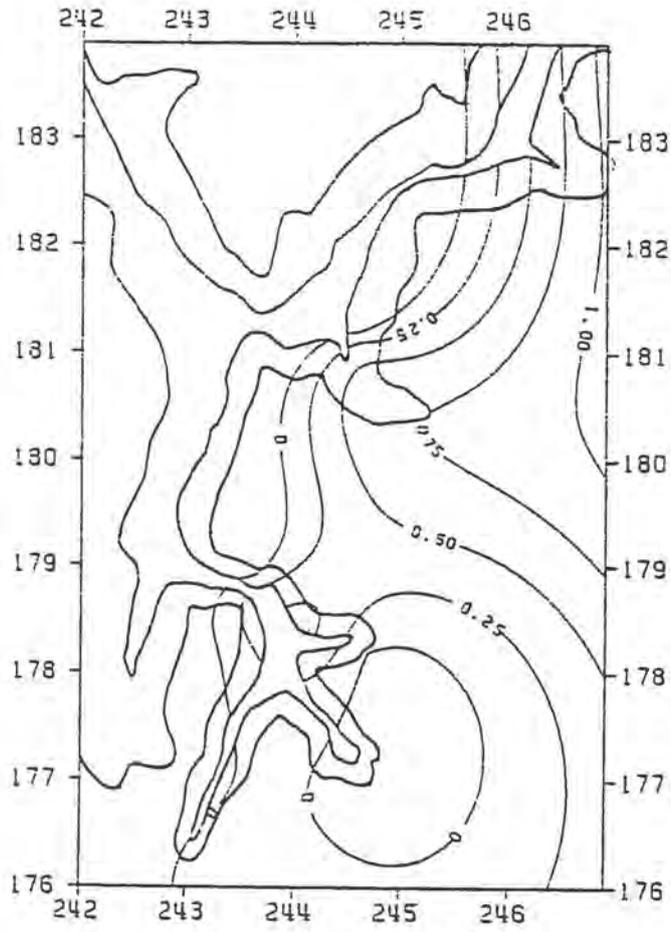
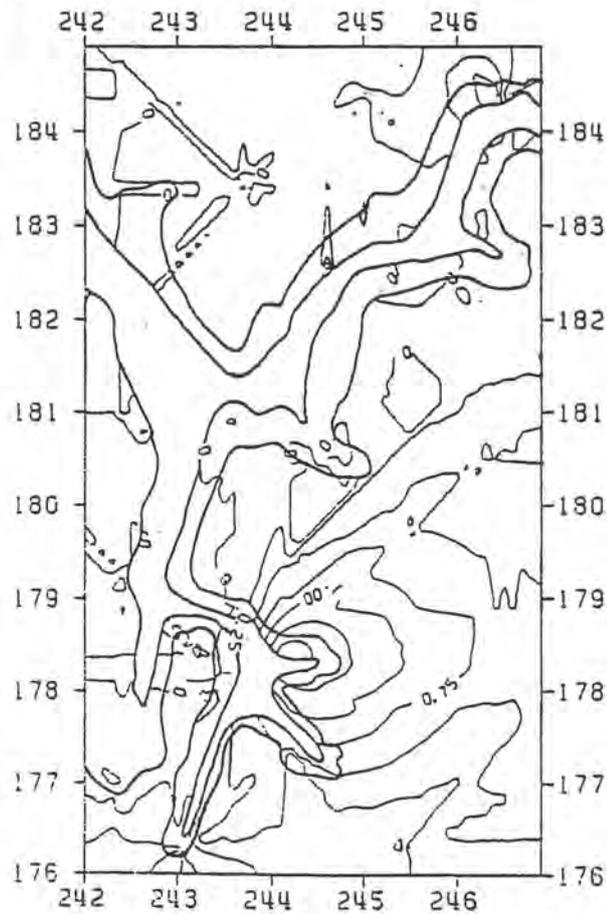


FIGURE 7. KAT. 11.08.88, ESSAI 1, PE 60-80, AZ 240-255



FISSURES, KRIZ, PE 68-88, AZ 278-285, BIOC, TRRE



FISSURES, KRIZ, PE 58-88, AZ 278-285, BIOC, MOYEN

