

Université de Neuchâtel
Institut de géologie

**Contribution
à l'étude des cluses
du Jura septentrional**

Thèse
présentée à la Faculté des sciences
de l'Université de Neuchâtel

par Michel Monbaron
Licencié ès sciences

Avril 1975

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Contribution à l'étude des cluses du

Jura septentrional

de Monsieur Michel Monbaron

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel,
sur le rapport des membres du jury,

MM. les professeurs D. Aubert, P. Chauve
(Besançon), J.-P. Schaer et A. Burger

autorise l'impression de la présente thèse sans exprimer
d'opinion sur les propositions qui y sont contenues.

Neuchâtel, le 9 mars 1976

Le doyen :

P. Huguenin
P. Huguenin

Thèse publiée avec l'appui de : l'Etat de Neuchâtel et
l'Etat de Berne.

Ce travail a obtenu le Prix des Thèses 1976 de la Société
Jurassienne d'Emulation.

RÉSUMÉ

Une cluse jurassienne caractéristique, celle du Pichoux, est étudiée sous divers aspects. La localisation de la cluse dans l'anticlinal de Rameux dépend en premier lieu d'un ensellement d'axe au toit de l'imperméable oxfordien, ainsi que d'un relais axial dans le cœur de Dogger. Les systèmes de fissuration, principalement les deux systèmes cisailants dextre et sénestre, ont fourni la trame sur laquelle s'est imprimée la cluse. Hydrogéologiquement, celle-ci fait office de niveau de base karstique pour de vastes territoires situés surtout à l'W (bordure orientale des Franches-Montagnes). La principale source karstique qui y jaillit est celle de Blanches Fontaines: surface du bassin 48,8 km²; débit moyen annuel 1,25 m³/sec; valeur moyenne de l'ablation karstique totale: 0,082 mm/an.

La cluse du Pichoux fait partie d'un alignement transversal, axé à peu près Sud-Nord, comprenant au N la cluse d'Undervelier et au S la région de la Montagne de Saules. A plus d'un titre (structure, hydrogéologie) ces trois secteurs se ressemblent ou sont liés; ils jalonnent une zone drainante transversale importante à l'échelle de cette portion du massif jurassien.

On aborde ensuite l'étude des principales cluses du Jura septentrional. Au point de vue tectonique, on constate que les alignements de cluses jurassiennes (Sorne, Birse, Suze, etc) sont obliques (35 à 50°) par rapport à des linéaments d'orientation rhénane. La plupart des cluses sont cantonnées dans deux compartiments du bloc central: le compartiment "Sorne" à l'W, le compartiment "Birse" à l'E, tous deux caractérisés par une grande complexité des structures tectoniques. Au point de vue hydrogéologique, on constate à nouveau la prépondérance des cluses, en tant que niveaux de base karstiques régionaux: toutes les expériences de coloration importantes tentées dans le Jura ont prouvé que les résurgences principales sont cantonnées dans les cluses ou à leurs abords immédiats.

La valeur de l'ablation karstique dans la région du Pichoux permet ensuite d'estimer l'âge de la cluse de Semplain (partie supérieure du Pichoux) qui serait de moins d'un million d'année. Par analogie, on a daté quelques autres cluses; parmi les exemples choisis, la plus ancienne ne dépasserait que de peu les 4 millions d'années.

Dans la synthèse sont présentés deux modèles de genèse possibles pour la cluse du Pichoux. Tous deux font une large part aux processus d'érosion karstique, conjointement à l'érosion normale. La théorie des zones drainantes transversales, formulée en conclusion, présente d'ailleurs les cluses comme étant la résultante de l'action simultanée de l'érosion fluviale et de l'érosion karstique; leur façonnement aurait débuté dès l'ébauche du plissement du Jura.

ZUSAMMENFASSUNG

Eine typische Jurakluse (Cluse du Pichoux) wird nach verschiedenen Gesichtspunkten untersucht. Die Lage der Kluse in der Raimeux-Antikline ist in erster Linie durch eine Achsendepression im undurchlässigen Oxfordien und durch ein Achsenrelais im Dogger des Kerna der Antikline bedingt. Die Kluftsysteme, vor allem die dextren und senestren Scherklüfte, bilden die Leitlinien für die Anlage der Kluse. Hydrogeologisch gesehen, stellt die Kluse das Basisniveau für den Karst eines ausgedehnten Gebiets im W dar (Ostrand der Freiberge). Blanches Fontaines ist die Hauptkarstquelle der Kluse mit einem Einzugsgebiet von 48,8 km² und einer Schüttung von 1,25 m³/sec im Jahresmittel; der Mittelwert der gesamten Karstdenudation beträgt 0,082 mm/Jahr.

Die Cluse du Pichoux gehört einer ungefähr S-N gerichteten Querzone an, die im N die Cluse d'Undervellier und im S das Gebiet der Montagne de Saules umfasst. Diese drei Abschnitte ähneln sich in mehrfacher Hinsicht (Tektonik, Hydrogeologie); sie folgen einem in diesem Teil des Jura wichtigen querverlaufenden Entwässerungssystem.

Anschliessend werden die wichtigsten Klusen des nördlichen Jura behandelt. Tektonisch gesehen zeigt sich, dass die Klusenreihen des Jura (Sorne, Birs, Suze) die rheinisch gerichteten Lineamente unter einem Winkel von 35-50° schneiden. Die Mehrzahl der Klusen liegt innerhalb von zwei Abschnitten des zentralen Blocks: dem "Sornesektor" im W und dem "Birsektor" im E, beide gekennzeichnet durch eine sehr komplizierte Tektonik. Hydrogeologisch zeigt sich wiederum die vorherrschende Rolle der Klusen als regionale Basisniveaus des Karsts: Alle wichtigen Färbungsversuche im Jura haben gezeigt, dass die wichtigsten Resurgenzen innerhalb der Klusen oder in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft liegen.

Der Betrag der Karstdenudation erlaubt es schliesslich, das Alter der Cluse de Semplain (oberer Teil der Cluse de Pichoux) auf weniger als 1 Mill. Jahre zu schätzen. Entsprechend liessen sich einige andere Klusen datieren, die älteste davon wäre demnach nur wenig älter als 4 Mill. Jahre.

In der Synthese werden zwei mögliche Modelle für die Entstehung der Cluse de Pichoux entworfen. In beiden wird der Karsterosion neben den normalen Abtragungsvorgängen eine wesentliche Rolle zugewiesen. Nach der am Schluss formulierten Theorie der querverlaufenden Entwässerungssysteme sind die Klusen die Resultante einer gleichzeitig wirksamen fluviatilen und Karsterosion; ihre Ausgestaltung begänne dann gleich bei der ersten Anlage der Falten des Jura.

ABSTRACT

The Pichoux Gap which is characteristic of those found in the Jura Mountains, was studied from different aspects. The fact that this gap is found in the Raimeux anticline is due to the axial depression in the roof of the impermeable Oxfordian as well as to an axial plane in the heart of the Dogger. The dextral and sinistral shear systems in the fissured zones furnish the framework of the Gap. Hydrogeologically, it acts as a karstic base level for vast areas, particularly those lying to the West (the Eastern border of the Franches-Montagnes). The principal karstic spring which gushes out here is the Blanches Fontaines: the surface of its basin is 48,8 km², its average annual flow rate is 1,25 m³ sec, and the average karstic ablation totale 0,082 mm/year.

The Pichoux Gap is a part of a transverse alignment (whose axis is nearly South-North) which includes the Undervelier Gap to the North and the area of the Montagne de Saules to the South. In many ways the three structures are similar or linked; they mark a transversal drainage zone important to the scale of this portion of the Jura massif.

In addition, a study was made of the principal gaps in the northern part of the Jura. Tectonically the alignments of the Jura Gaps (Sorne, Birse, Suze, etc) are oblique (35 - 50°) in relation to the rhénish orientation features. Most of the gaps are found in two divisions of the central block. Complex tectonic structures are characteristic of the Sorne to the West and the Birse to the East. Hydrogeologically, the preponderance of the gaps act as regional karstic base levels. All coloration experiments attempted in the Jura proved that the principal springs are found in the gaps and/or their immediate vicinity.

The rate of karstic ablation in the Pichoux region thus makes it possible to fix the age of the Semplain Gap (upper part of the Pichoux) at less than 1 million years. For the purpose of comparison, some of the other gaps were dated but none were found to exceed 4 million years in age.

Two genetic models possible for the Pichoux Gap are presented. Both show the influence of karstic erosion in addition to the normal erosion process. Furthermore, the theory of transverse drainage as formulated in the conclusions, presents the Gaps, whose rough outline was formed with the folding of the Jura Mountains, as being the result of simultaneous fluvial and karstic erosion.

PREAMBULE

Le Jura, ce pays que j'habite depuis l'enfance, m'accroche à chaque instant, et rien de ce qui le touche ne me laisse indifférent. De tout temps, ses paysages m'ont fasciné, et l'envie d'en décortiquer l'histoire est à l'origine du choix de mon métier, et bien sûr, du sujet de cette thèse: les cluses jurassiennes.

M. le Prof. Daniel Aubert a su mieux que quiconque donner vie aux paysages jurassiens, et en faire découvrir (au profane comme au plus érudit) la subtil agencement des formes. J'ai eu la chance et l'honneur de devenir son élève. C'est lui qui a guidé mes pas mal assurés de chercheur solitaire et qui m'a prodigué conseils et encouragements. Sans l'appui constant et désintéressé de ce maître éminent, le présent travail ne serait jamais venu à terme.

Je dois également toute ma gratitude à Jacqueline, mon épouse, qui par sa compréhension et sa collaboration, a largement contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé, conseillé, entouré, soutenu moralement et financièrement:

- les professeurs, chercheurs et collaborateurs de l'Institut de Géologie;
- nombre de collègues et amis, de l'Institut et d'ailleurs;
- la commission de la recherche scientifique de l'Université;
- les organismes publics et privés auxquels j'ai eu recours (communes, état, bureaux d'expertises, etc.);

je ne saurais dire autre chose que merci de tout coeur.

* * *

Tout est dans tout. Tel fait en rapport avec le milieu touche inévitablement l'homme qui évolue dans ce milieu. Par ailleurs, les actions des hommes sont dictées, conduites, je dirais même imposées par le milieu, les paysages, le pays dans lequel ils vivent.

Dans des circonstances que chacun a encore en mémoire, ce coin de pays vient d'être politiquement écartelé. Mais le temps passe, l'eau s'écoule à travers les cluses, les idées progressent, les faits s'imposent. Les cluses ont toujours été des traits d'union entre les vallées jurassiennes, au service des hommes qui les habitent. Je suis persuadé que ces vallées transversales, voies millénaires privilégiées d'échange et de contact, contribueront à leur manière à réunifier un jour ce "Jura rauraque", que chaque Jurassien souffre aujourd'hui de voir déchiré.

La Neuveville, mars 1975

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
RESUME - ZUSAMMENFASSUNG - ABSTRACT	V
PREAMBULE	IX
TABLE DES MATIERES	XI
LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET PLANCHES	XIV
 <u>Première partie: GENERALITES</u>	 1
1. PRESENTATION DU SUJET	3
1.1. Problème des cluses jurassiennes	4
1.2. Démarche de travail	4
2. DEFINITION	5
2.1. Définitions tirées de la littérature géologique	5
2.2. Définition	5
2.3. Formes apparentées	7
3. ETUDES ANTERIEURES : LE POINT DE LA QUESTION	10
3.1. L'antécédence	10
3.2. La surimposition (épigénèse)	11
3.3. L'érosion régressive	14
3.4. Les causes tectoniques	15
3.5. Phénomènes karstiques	17
3.6. Travaux récents	18
3.7. Conclusions	18
4. CADRE DE L'ETUDE	19
4.1. Cadre géographique	19
4.2. Stratigraphie	21
4.3. Tectonique	28
4.4. Paléogéographie	29
4.5. Les moyens d'investigation	30
 <u>Deuxième partie: LE PICHOUX</u>	 33
5. LE PICHOUX : CRITERES STRUCTURAUX	37
5.1. Brève description morphologique	37
5.2. Complexité de l'anticlinal	38
5.3. Axes anticlinaux	40
5.4. Carte structurale au toit de l'Oxfordien	41
5.5. Failles, décrochement	43
5.6. Conclusions	44
6. LA FISSURATION	48
6.1. Définition	48
6.2. Orientation générale de la cluse	49
6.3. Orientation par secteur	53
6.4. Mensuration systématique de la fissuration	59
6.5. Plans de tassement	62
6.6. Conclusions	63

7. STRUCTURE ET MORPHOLOGIE GENERALE	65
7.1. Profil longitudinal	65
7.2. Disymétrie et plongement axial	67
7.3. Versants instables	69
8. HYDROGEOLOGIE	73
8.1. Bassin de la Sorne	73
8.2. Sources de la région du Pichoux	74
8.3. Les sources de Blanches Fontaines	78
8.4. Source de Montoit	99
8.5. Autres sources	104
8.6. Les conditions hydrogéologiques dans la cluse d'Undervelier	106
8.7. Les inondations de juin 1973	109
8.8. Spéléologie	113
9. PICHOUX ET CLUSES DE LA SORNE : CONCLUSIONS	117
9.1. Les cluses de la Sorne et la structure	117
9.2. Les cluses de la Sorne: zone de drainage transversale	117
9.3. Etudes ultérieures	118
9.4. Résumé et conclusions	119
<u>Troisième partie: CLUSES DU JURA SEPTENTRIONAL</u>	121
10. LES CLUSES DU JURA SEPTENTRIONAL	123
10.1. Carte des cluses du Jura septentrional	123
10.2. Morphologie des cluses	125
11. CLUSES ET TECTONIQUE JURASSIENNE	137
11.1. Compartimentage du Jura septentrional	137
11.2. Le bloc central	141
11.3. Interprétation	143
11.4. Conclusions	146
12. CLUSES ET KARST	147
12.1. Les sources karstiques du Jura septentrional	148
12.2. Expériences de coloration: synthèse	151
12.3. Les cavités karstiques du Jura septentrional	158
12.4. Commentaires et conclusions	162
13. AGE DES CLUSES	165
13.1. Cluse de Semplain	165
13.2. Autres cluses	166
13.3. Commentaires et conclusions	167
<u>Quatrième partie: SYNTHESE</u>	171
14. GENESE DE LA CLUSE DU PICHOUX	173
14.1. Erosion mixte: fluviale et karstique	173
14.2. Processus karstique	176
14.3. Commentaires	178
14.4. Conclusion	179

15. RESUME ET CONCLUSION	180
15.1. Théorie des zones drainantes transversales	180
15.2. Poursuite des recherches	180
15.3. Conclusions	181
APPENDICE	183
BIBLIOGRAPHIE	199

LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET PLANCHES

1° <u>Liste des figures.</u>	<u>Page</u>
Fig. 2.I. : Bloc-diagramme des divers types de cluses	6
Fig. 2.II. : Cluse sèche de Lajoux, isohypses	8
Fig. 3.I. : Couloirs d'érosion des anciens fleuves vosgiens (Liniger)	12
Fig. 3.II. : La surimposition, selon Vosseler	13
Fig. 3.III. : Schéma de la position des cluses par rapport aux ensellements axiaux (Schlee)	15
Fig. 4.I. : Carte tectonique schématique situant le domaine d'investigation	20
Fig. 4.II. : Carte géologique sommaire du Jura septentrional	22
Fig. 4.III. : Echelle stratigraphique, région Sud	24
Fig. 4.IV. : Echelle stratigraphique, région Nord	25
Fig. 5.I. : Vue aérienne de la région du Pichoux	35
Fig. 5.II. : Les trois secteurs de la cluse du Pichoux	36
Fig. 5.III. : Secteur amont de la cluse du Pichoux (photo)	37
Fig. 5.IV. : Galeries du Pichoux (photo)	38
Fig. 5.V. : Coupes géol. dans la région du Pichoux	39
Fig. 5.VI. : Carte structurale Oxfordien - Argovien	42
Fig. 5.VII. : Flexure dans le Malm, lèvre ouest (photo)	45
Fig. 5.VIII. : Pli-faille dans le Malm, lèvre est (photo)	45
Fig. 5.IX. : Pli-faille dans le Dogger (photo)	46
Fig. 5.X. : Diagramme du pli-faille de la fig. 5.IX.	46
Fig. 6.I. : Principaux systèmes de fissuration	48
Fig. 6.II. : Orientation de la cluse et de ses différents tronçons	51
Fig. 6.III. : Diagramme de la longueur des tronçons et de leur orientation	52
Fig. 6.IV. : Orientation du tronçon 4-6 (Malm sup.)	55
Fig. 6.V. : Orientation du tronçon 11 (Dogger)	57
Fig. 6.VI. : Orientation du tronçon 14	58
Fig. 6.VII. : Orientation du tronçon de liaison	58
Fig. 6.VIII. : Mensuration systématique de la fissuration	60
Fig. 6.IX. : Fissuration dans Rauracien (photo)	61
Fig. 6.X. : Tassements dans le Rauracien (schéma)	62
Fig. 7.I. : Profil longitudinal de la Sorne	66
Fig. 7.II. : Disymétrie des versants dans la cluse de Blanches Fontaines	68
Fig. 7.III. : Profil transversal dans le canyon	70
Fig. 7.IV. : Niche d'arrachement (photo)	71
Fig. 8.I. : Exutoires de crue et d'étiage (schéma)	76
Fig. 8.II. : Site d'une source mixte (photo)	76
Fig. 8.III. : Grotte de Blanches Fontaines a) à sec b) en crue (photos)	81
Fig. 8.IV. : Site de la coloration Les Craux (schéma)	85
Fig. 8.V. : Diagramme concentration - temps Lajoux	89
Fig. 8.VI. : Diagramme concentration - temps Fornet-Dessous	93
Fig. 8.VII. : Relation gouffres - sources de Blanches Fontaines (coupe)	95
Fig. 8.VIII. : Situation des gouffres par rapport aux Blanches Fontaines	95

Fig. 8.IX.	: Relation des débits Birse-Sorne	98
Fig. 8.X.	: Diagramme concentration - temps STEP Lajoux	100
Fig. 8.XI.	: Crues de juin 1973	111
Fig. 8.XII.	: Gouffre de la Salamandre	116
Fig. 10.I.	: Cluse en cirque (photo)	127
Fig. 10.II.	: Cluse évoluée en combe anticlinale (photo)	127
Fig. 10.III.	: Orientation des cluses (schéma)	130
Fig. 10.IV.	: Disymétrie des versants de quelques cluses	132
Fig. 10.V.	: Profondeur - largeur des cluses (schéma)	133
Fig. 10.VI.	: Relation entre profondeur et largeur des cluses (diagramme)	135
Fig. 10.VII.	: Erosion différentielle dans la cluse de Moutier (photo)	136
Fig. 11.I.	: a) photo-satellite du massif jurassien b) schéma explicatif	138
Fig. 11.II.	: Subdivisions du massif jurassien (schéma)	139
Fig. 11.III.	: Linéaments et bloc central	140
Fig. 11.IV.	: Modèle de déformation (Ruhland)	145
Fig. 12.I.	: Cluse de Court, sources	155
Fig. 13.I.	: Relation largeur - âge de quelques cluses	169
Fig. 14.I.	: Genèse de la cluse du Pichoux (schéma)	174
Fig. 14.II.	: Les 2 stades karstiques du Pichoux	177

2° Liste des tableaux.

Tabl. 6.A.	: Longueur et orientation des tronçons de la Sorne dans le Pichoux	50
Tabl. 6.B.	: Comparaison des tronçons avant et après rabattement	53
Tabl. 8.A.	: Principales sources karstiques dans le Pichoux	78
Tabl. 8.B.	: Paramètres physico-chimiques de quelques sources dans le Pichoux	79
Tabl. 8.C.	: Sources et captages contrôlés lors des essais de coloration	83
Tabl. 8.D.	: Analyse qualitative des fluocapteurs (coloration Les Craux)	86
Tabl. 8.E.	: Températures et fluorescéine aux Blanches Fontaines	88
Tabl. 8.F.	: Analyse qualitative des fluocapteurs à Montoit	101
Tabl. 8.G.	: Précipitations en juin 1973 dans le Jura	110
Tabl. 8.H.	: Débits des rivières jurassiennes en juin 1973	110
Tabl. 8.J.	: Cavités de la région du Pichoux et d'Undervelier	114
Tabl. 10.A.	: Cluses recensées dans le Jura septentrional	124
Tabl. 10.B.	: Orientation des cluses du Jura septentrional	129
Tabl. 10.C.	: Largeur et profondeur des cluses du Jura septentrional	134
Tabl. 12.A.	: Expériences de coloration dans le Jura septentrional	152
Tabl. 12.B.	: Cavités karstiques	160
Tabl. 13.A.	: Age de quelques cluses jurassiennes	167

3° Liste des planches.

Planche I.	: Carte topographique région du Pichoux
Planche II.	: Carte géologique (1:10.000)
Planche III.	: Axes structuraux dans la région du Pichoux

- Planche IV. : Les principales sources des cluses du Pichoux
et d'Undervelier
- Planche V. : Bassins d'alimentation (Blanches Fontaines et
Montoit)
- Planche VI. : Carte des cluses du Jura septentrional
- Planche VII. : Les principaux essais de coloration dans
le Jura septentrional
- Planche VIII. : Puits et grottes du Jura septentrional

Première partie:

G É N É R A L I T É S

1. PRÉSENTATION DU SUJET

La morphologie du Jura a de tout temps exercé une grande fascination sur les esprits curieux. Simple en apparence, du moins dans ses grands traits, le paysage jurassien se révèle plus complexe que prévu lorsqu'on l'examine de près et attentivement. L'arrière-fond se présente comme un massif plissé, aux formes adoucies, sénils semble-t-il. Très vite cependant, on s'aperçoit qu'il est truffé d'accidents topographiques d'apparence juvénile, marques évidentes d'une évolution continue: crêtes escarpées, dolines, combes, gorges encaissées, etc.

Au fur et à mesure de l'avancement des recherches géologiques, hydrogéologiques, morphologiques, spéléologiques, cette complexité s'ordonne peu à peu. Sans reprendre en détail tous les travaux récents, citons quelques auteurs qui ont marqué de leur empreinte l'étude du massif plissé jurassien durant ces dernières années. Il va de soi que cet inventaire n'est, et de loin, pas exhaustif!

- a) H.P. Laubscher et ses élèves ont établi de nouveaux levés géologiques et ont précisé certains aspects de la tectonique du Jura. Il en va de même pour certains géologues bernois (M. Antenen) ou neuchâtelois (J. Meia).
- b) L. Kiraly s'est livré à de patientes recherches sur la fissuration des calcaires du Jura, et l'équipe du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel en a tiré certaines lois concernant la circulation interne des eaux dans le Karst.
- c) Les lois de corrosion du calcaire ont été précisées par D. Aubert (1969), ce qui l'a conduit à publier une remarquable analyse de la morphogénèse des paysages du Jura central et français, durant le Tertiaire et le Quaternaire (1975).
- d) Le géographe D. Barsch a publié une étude morphogénétique du Jura bernois (1969); il y définit surtout une terminologie des formes, en rapport avec une méthode de cartographie géomorphologique.
- e) Autres contributions intéressantes, celles dues aux stratigraphes (Bolliger & Burri 1970, Persoz & Remane 1973), aux géochimistes (Miserez 1973), aux pédologues (Pochon, à paraître).
- f) La découverte du sous-sol karstique du Jura, sous l'impulsion de la Société suisse de Spéléologie (SSS), avance à grands pas, apportant une contribution essentielle à l'étude et l'exploitation des eaux souterraines.
- g) De nombreuses études géotechniques viennent compléter ce riche éventail: recherches d'eau, forages, constructions d'ouvrages de génie civil (Transjurane), prospection pétrolière, etc. Il est regrettable que ces précieux documents ne soient pas rendus publics plus systématiquement.

1.1. PROBLEME DES CLUSES JURASSIENNES

Il nous est apparu essentiel, dans ce contexte dynamique, de reprendre un des problèmes les plus controversés et qui, malgré de nombreuses recherches, demeure encore obscur: celui de la localisation et de la formation des cluses jurassiennes.

1.2. DEMARCHE DE TRAVAIL

Notre mémoire comprend, pour l'essentiel, trois volets bien distincts, qui reflètent nos préoccupations majeures au cours de nos recherches.

Nous avons premièrement cherché à établir le portrait d'une cluse jurassienne typique, en relation avec son environnement immédiat. Ceci nous a conduit à définir certaines lois régissant les rapports entre la structure tectonique, la stratigraphie, l'hydrogéologie et la morphologie proprement dite.

Nous avons ensuite essayé de vérifier si ces lois étaient applicables à d'autres cluses, réparties sur un territoire assez vaste du Jura septentrional.

Enfin, nous avons tenté une synthèse, rendant compte du phénomène cluse, à la fois dans l'espace (emplacement, rapports avec la portion du massif envisagée) et dans le temps (amorce du phénomène et façonnement ultérieur).

2. D E F I N I T I O N

Mais avant toute chose, il nous faut définir ce que recouvre le terme de cluse, afin de fixer parfaitement les idées sur les formes de terrain que nous allons évoquer tout au long de ce travail.

2.1. DEFINITIONS TIREES DE LA LITTERATURE GEOLOGIQUE

Cluse (ou clue en provençal)

- a) J. Thurmann: Essai sur les soulèvements jurassiques
2e cahier, 1836, p.8
"Les cluses ou gorges qui traversent une chaîne de part en part..."
- b) A. de Lapparent: Leçons de Géographie physique, 1898, p.126
"...des cluses, c'est-à-dire des coupures transversales, établies aux points les plus bas des bourrelets anticlinaux, permettent à certains cours d'eau de traverser les plis saillants."
- c) H. Baulig: Vocabulaire franco-anglo-allemand de géomorphologie, 1956, ch. 494 p. 140
"De courtes percées transversales (note: au travers des chaînons), cluses/gaps/Quer-, Durchbruchtäler, Klusen, correspondant aux lacunes entre les anticlinaux ou aux abaissements d'axe, par où s'échappe une partie du drainage."
- d) M. Derruau: Précis de géomorphologie, Masson & Cie, 1956, p. 302
"Cluse: passage d'une rivière à travers un mont".
- e) Rh. W. Fairbridge: The Encyclopedia of Geomorphology, 1968
"A water gap is a geomorphic term for a short gorge or valley cut by a river through a resistant ridge or mountain range."

Ce sont quelques définitions, glanées çà et là dans l'abondante littérature traitant de ce sujet *. Il nous paraît essentiel, en préambule, de définir avec plus de précision ce qu'est, selon nous, une cluse.

2.2. DEFINITION

UNE CLUSE EST UNE DEPRESSION TOPOGRAPHIQUE DUE A L'EROSION, TRANCHANT D'UN FLANC A L'AUTRE UNE STRUCTURE ANTICLINALE.

* Le terme "cluse" est peu usité dans le langage populaire du Jura septentrional. On parle le plus souvent de "gorges": gorges de Moutisr, gorges du Pichoux, gorges du Taubenloch, etc.

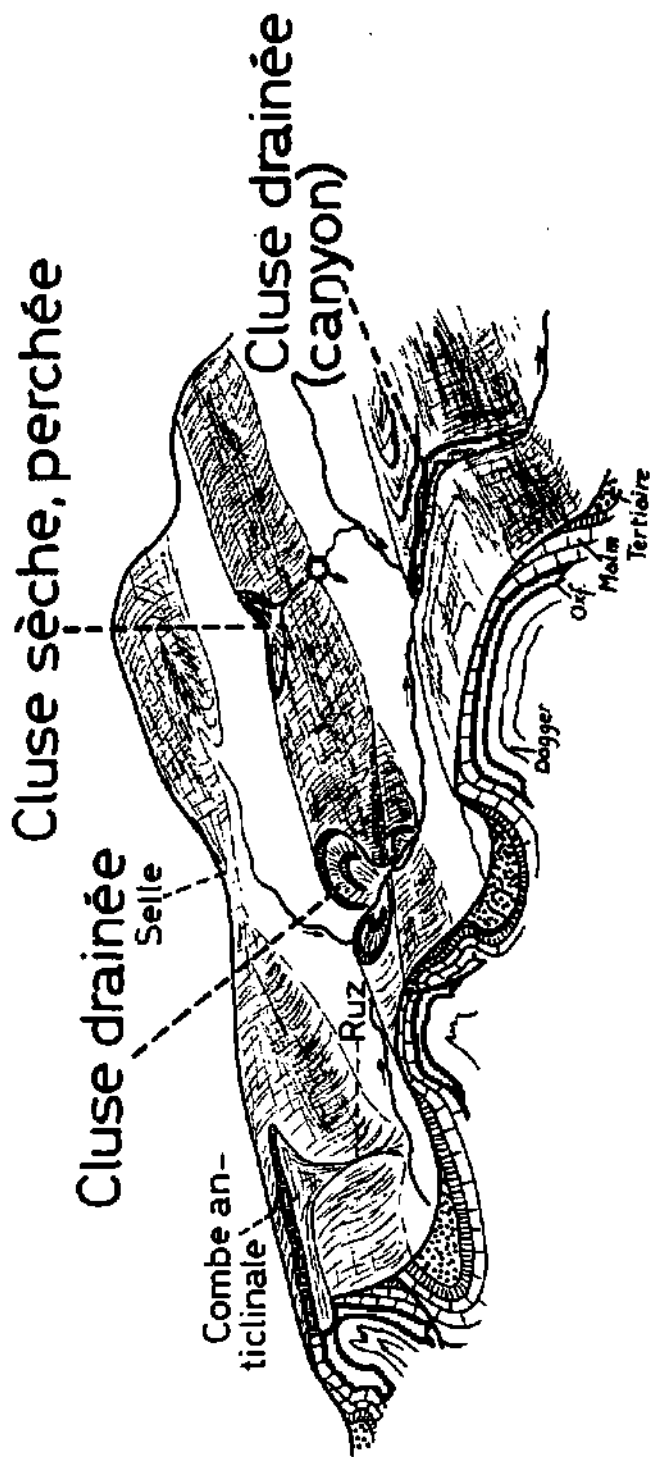


Fig. 2.1.
Bloc-diagramme schématique, représentant les principaux types de cluses.

2.2.1. Commentaires. (fig. 2.I)

Notre définition est essentiellement descriptive et peu restrictive. Reprenons-la en détail.

- a) Nous entendons par dépression topographique d'érosion un vide orographique important, interrompant la continuité d'une voûte anticlinale. Dans la plupart des cas, ce vide éventre de part en part le pli, en gros perpendiculairement à sa direction axiale.
- b) Un tel vide est une forme d'érosion; nous excluons donc les ensembles d'axe, pour autant que ceux-ci n'aient pas été mis à profit et approfondis par l'érosion.
- c) Il existe des cluses recoupant obliquement certains anticlinaux. Un cas typique est celui de la cluse du Tabeillon en aval de Bollement (577/239), à travers l'anticlinal de Vellerat.

Si l'on examine de plus près ce problème d'obliquité, on s'aperçoit en fait que peu de cluses sont rigoureusement perpendiculaires à l'axe des anticlinaux traversés (cf. 10.2.2.).

- d) Plusieurs définitions classiques nomment cluse toute vallée transversale parcourue actuellement par une rivière, autrement dit conduisant au travers du pli les eaux d'un synclinal amont vers un synclinal aval. Nous nommons une telle forme: cluse drainée.

La présence d'une rivière n'est cependant pas primordiale. Il existe en effet sur notre territoire des cluses entièrement sèches (Lajoux, Rebeuvelier), voire perchées en altitude (Chenal, Pierre Pertuis); leur analogie avec les cluses drainées reste évidente, et elles répondent aux critères généraux de la définition 2.2. (fig. 2.II).

- e) Les cluses sont bien des dépressions dues à l'érosion, sans préjudice des mécanismes employés par cette dernière, mécanismes sur lesquels nous aurons loisir de nous attarder longuement.

2.3. FORMES APPARENTÉES

Nous pensons évidemment aux ruz, souvent appelés aussi demi-cluses ou semi-cluses. Ces échancrures d'érosion recoupent transversalement un flanc d'anticlinal et drainent souvent des eaux météoriques à l'intérieur du pli (combes) pour les amener dans le synclinal adjacent. Nous serons amenés à évoquer parfois ces formes particulières; une des raisons en est qu'il existe dans notre région tous les intermédiaires entre ruz et cluses, en partant des simples goulets de flanc (= Rinne, Barsch 1969), en passant par des ruz de plus en plus im-

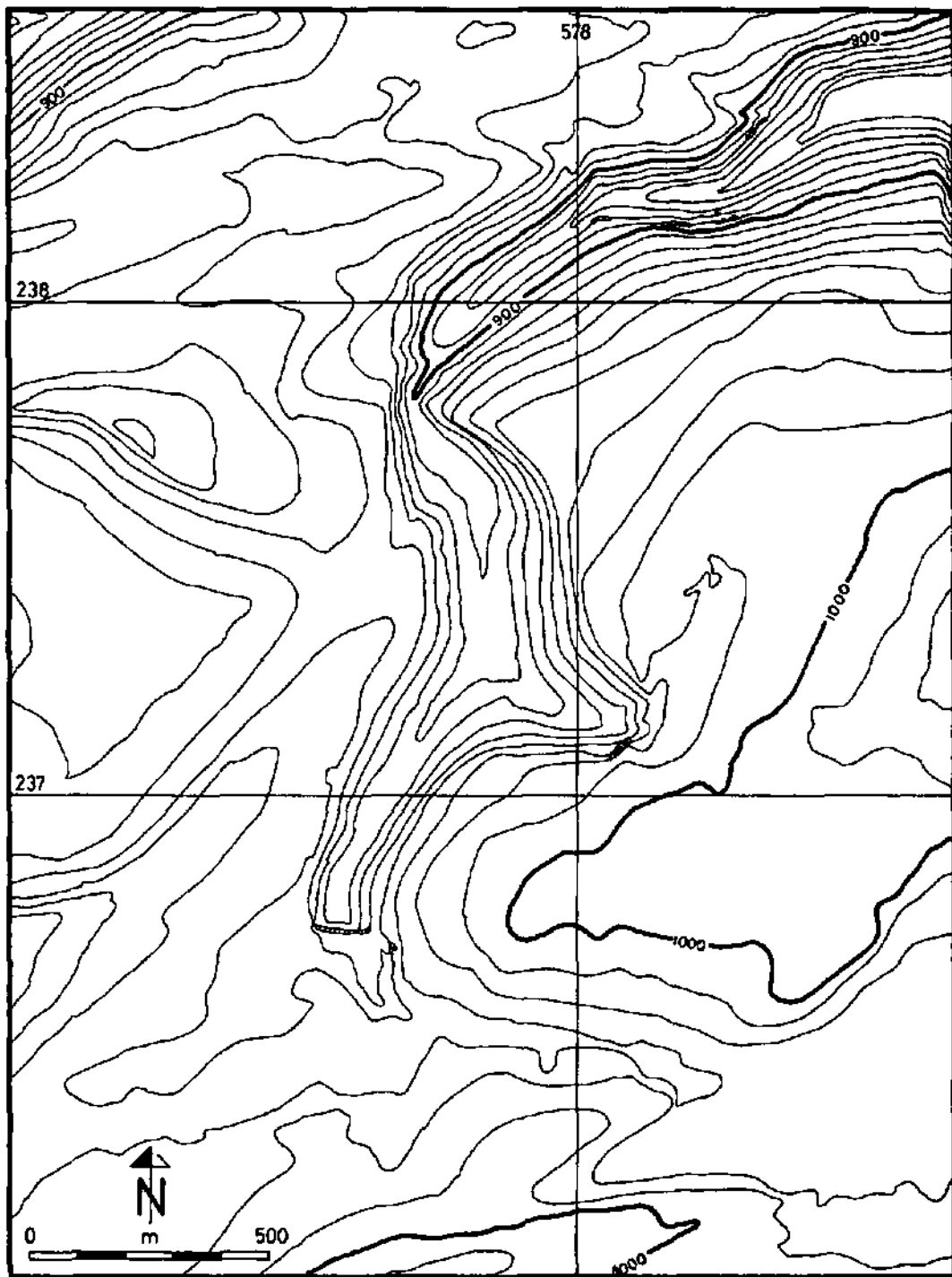


Fig. 2.II. Cluse sèche de Lajoux, isohypses.

portants, qui finissent par tronçonner régressivement le cœur de l'anticlinal et même mordre presque complètement dans le versant opposé. La Raçonnière (Col des Roches, Jura neuchâtois, coord. 545/211) est un cas extrême: ruz très évolué, ou cluse avortée ? De tels exemples ont amené certains auteurs à voir dans les ruz les amorces des cluses. Nous verrons plus loin ce qu'il faut en penser (cf. 3.3. et 10.1.1.).

Nous allons d'ailleurs nous pencher maintenant sur la bibliographie, et voir ce que les auteurs ont dit du problème.

3. ETUDES ANTERIEURES :

LE POINT DE LA QUESTION

Manifestations grandioses de l'érosion en pays calcaire plissé, coupes géologiques naturelles riches d'indications pour le géologue, les cluses ont de tout temps frappé l'imagination et attisé la curiosité des chercheurs. Il n'est pratiquement point de géologue ou de géomorphologue, ayant travaillé dans le Jura, qui n'ait exprimé son idée-choc, ou défendu la théorie émise par l'un ou l'autre des ténors de la géologie du moment. Des autodidactes même, avec plus ou moins de succès, ont apporté leur contribution à la question (Virieux 1950, Péronne 1955).

On pourrait donc raisonnablement penser que toutes les solutions possibles ont été proposées et que, dans l'embrouillamini des idées émises, la Vérité se trouve plus ou moins explicitement exprimée. C'est bien le cas en effet. Nous allons tenter de faire le point de la question.

Nous ne citerons pas chaque auteur. Les idées émises peuvent se classer, à quelques nuances près, en moins d'une demi-douzaine de théories, que nous allons énumérer et définir brièvement. Les commentaires ajoutés à chaque cas attireront l'attention sur leurs qualités et leurs faiblesses. En appendice sont cités les passages significatifs, dans lesquels les principaux auteurs expriment leurs idées-maîtresses.

Remarquons d'emblée que la plupart des chercheurs se sont raccrochés à une ou deux possibilités, rarement plus, se montrant ainsi dogmatiques. Souvent aussi, on a omis de discuter séparément deux notions pourtant distinctes: d'une part celle de la localisation des cluses par rapport aux chaînons traversés; d'autre part celle du mécanisme de formation. On a ainsi ajouté à la confusion. Enfin, on a souvent fait appel à l'intuition, plutôt qu'à des preuves ou des faits véritables, pour justifier une théorie, qui devient de ce fait une pure vue de l'esprit.

3.1. L'ANTECEDENCE

C'est la théorie la plus largement répandue.

3.1.1. L'antécédence pure.

Les rivières n'ont pas radicalement modifié leur cours depuis des millions d'années; durant le plissement, elles se sont enfoncées sur place, sciant les anticlinaux au fur et à mesure de leur édification.

Cette idée, proposée pour le Jura par Foerste (1891) d'après le modèle appalachien de Davis, a rapidement fait fortune, et prévaut encore actuellement (appendice, chiffre 1); on la trouve en bonne place dans tous les manuels de géomorphologie. Les

auteurs cités ci-dessous en ont fait leur cheval de bataille (cette énumération n'est de loin pas exhaustive).

Ed. Brückner (1898), M. Lugeon (1901) ont admis cette théorie et l'ont clairement exprimée; A. Heim (1919) s'est montré ardent partisan de l'antécédence, et a largement contribué à l'ériger en dogme. Dans la région qui nous intéresse, Schlaich (1934) l'a appliquée sans autre au cas de Court, et Schwabe (1939) l'a cautionnée dans son étude géomorphologique des Franches-Montagnes (app. chf 2 à 6).

3.1.2. Fleuves vosgiens (fig. 3.I.).

C'est aussi à une manière d'antécédence que croit Liniger (1953), reprenant des idées exprimées avant lui par Elber notamment (1920) (app. chf 7 et 8).

Lors du plissement, les cours d'eau du système de drainage actuel du Jura septentrional (orienté du sud au nord) auraient réoccupé des couloirs d'érosion préexistants, façonnés dans les dépôts tertiaires par d'anciens fleuves descendus des Vosges. Ces couloirs seraient antérieurs au plissement (pré-pontiens). Ils expliqueraient l'alignement de certaines cluses (Birse, Sorne).

3.1.3. Commentaire.

L'antécédence a pour elle une certaine logique; les bizarreries du cours de certaines rivières, qui se sont "obstinées" à se façonner un passage aux endroits souvent les moins favorables -au lieu d'emprunter un tracé plus facile et plus "logique" (selles, zones d'ennoyage)- semblent cautionner cette solution.

Cependant, et pour reprendre un mot de D. Aubert, l'antécédence est bien la "théorie de la résignation". Elle est si commode que les auteurs l'ont appliquée partout, sans plus la remettre en question valablement depuis sa formulation. Nous verrons plus loin comment certains faits bousculent cette théorie, sans toutefois en contredire radicalement l'idée-maîtresse.

3.2. LA SURIMPOSITION (EPIGENESE)

Sur un soubassement déjà plissé (Mésozoïque) empâté par des sédiments plus tendres (Tertiaire) -le tout formant un vaste glacis peu vallonné-, se serait établi un réseau de drainage superficiel. Peu à peu, la couverture tertiaire aurait été déblayée, et les rivières se seraient enfoncées sur place, dans les structures existantes, une fois le calcaire atteint.

Peu d'auteurs admettent la surimposition pure en ce qui concerne le Jura. On imagine plutôt l'action simultanée de deux phénomènes antagonistes. D'une part, des forces tectoniques plissent les sédiments mésozoïques; le Tertiaire "amortit" les effets du plissement, qui se marque peu en surface. D'autre part, des

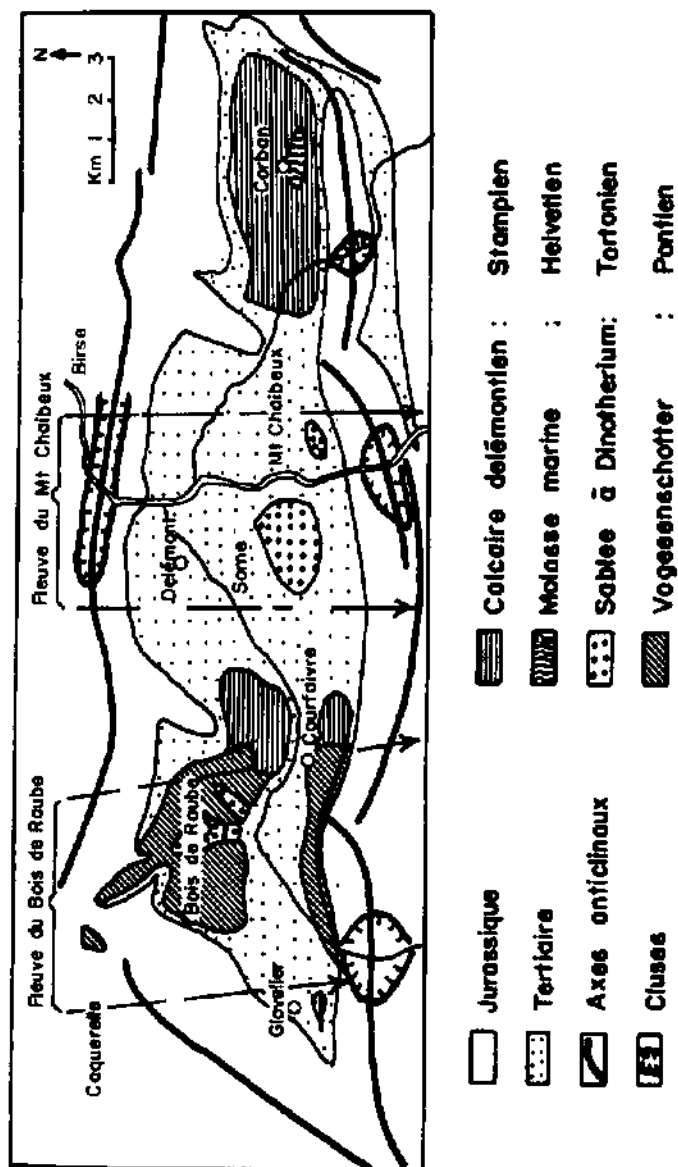


Fig. 3.1. Couloirs d'érosion des anciens fleuves vosgiens (tiré de Liniger, 1953).

cours d'eau sillonnent le glacis tertiaire, où ils s'enfoncent linéairement. A un moment donné, le cours d'eau rencontre le sommet d'une voûte calcaire et s'enfonce sur place; l'emplacement de la cluse est dès lors fixé, et la rivière n'a plus qu'à tronçonner le pli, au gré de son édification. Le schéma de Vosseler (1947, fig. 3.II.) illustre bien cette manière de voir. Schlee (1913) s'est aussi exprimé dans ce sens (app. chf 9.).

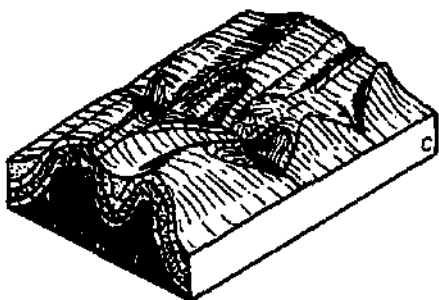
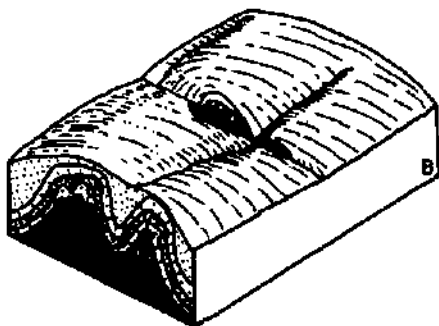
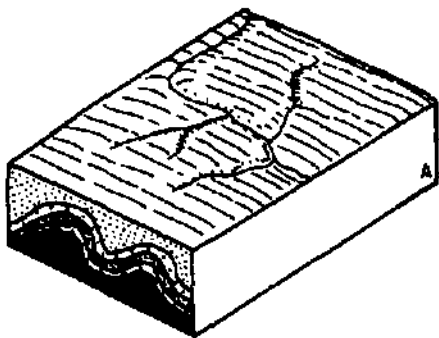


Fig. 3.II. La surimposition, selon Vosseler (1947)

Commentaire: en fait, ce dernier processus n'est pas très éloigné de l'antécédence. Il en diffère dans sa phase terminale, le pli à scier n'étant atteint qu'en cours ou même en fin de surrection, alors que dans l'antécédence pure, le pli est attaqué dès son ébauche tectonique.

Antécédence comme surimposition ont un grave défaut commun: elles n'expliquent pas logiquement l'orientation plus ou moins perpendiculaire des cluses par rapport aux structures anticlinales (cf 10.2.2.). Si les rivières s'étaient imprimées "du dessus", elles auraient "choisi" au moins aussi souvent l'orientation oblique que l'orientation normale aux plis. Comment expliquer encore l'alignement régional de certaines séries de cluses (Birse, Sorne): on ne peut envisager une rivière sur son glacie tertiaire, disciplinée au point de maintenir une direction d'écoulement méridienne jusqu'au moment de s'enfoncer dans le calcaire.

3.3. L'EROSION REGRESSIVE.

On fait intervenir ici l'action régressive d'un cours d'eau à partir d'un synclinal aval, à travers un anticlinal; la rivière finit par capturer les eaux d'un synclinal amont, créant ainsi une dépression transversale qui tronçonne tout l'anticlinal.

Souvent aussi est évoquée l'action régressive des eaux météoriques, façonnant deux ruz situés asymétriquement de part et d'autre d'un anticlinal. La cluse est parachevée par le plus actif des deux ruz, à son profit.

De nombreux auteurs admettent l'une ou l'autre de ces solutions. Fr. Jenny (1897) attribue le façonnement de plusieurs cluses à l'érosion régressive, la localisation de celles-ci dépendant de la structure. Fr. Machacek (1909) pense que les cluses des affluents de la Birse sont dues à ce mode d'action, celles de la Birse même devant être attribuées à l'antécédence (app. chf 10 et 11). A. Heim, par ailleurs fervent partisan de l'antécédence, s'y réfère pour expliquer la formation de plusieurs cluses (et non des moindres, p. ex. celle de Crémises).

Commentaire: l'idée est astucieuse; elle a pour elle le mérite de proposer un mécanisme générateur logique; le façonnement d'un profil d'équilibre le long d'un cours d'eau suit des règles élémentaires: approfondissement linéaire et recul de la tête du cours d'eau dans le versant. Pourquoi les rivières ayant façonné les cluses feraient-elles exception ?

En revanche, elle convient moins pour expliquer la position des formes qu'on lui attribue. La localisation des ruz actuels semble obéir à certaines lois bien précises (dont la principale paraît être la proximité d'une culmination axiale), lois que ne suivent pas les cluses. D'autre part et théoriquement, chaque ruz devrait représenter l'écoulement d'une future cluse, ou alors être la cicatrice d'une cluse avortée. Enfin, on peut compter les endroits de nos anticlinaux où deux ruz sont en exacte opposition: ils sont extrêmement rares.

Le problème des ruz, de leur position et de leur genèse, mériterait à lui seul de faire l'objet d'une étude fouillée.

3.4. LES CAUSES TECTONIQUES

On peut grouper sous cette désignation toutes les théories qui mettent en jeu des causes d'origine structurale, pour expliquer la position des cluses. Essayons de sérier un peu le problème.

3.4.1. Ensellements

Les cluses sont situées dans les ensellements d'axes anticlinaux: telle est l'idée la plus couramment formulée par les tenants inconditionnels de la tectonique. La rivière aurait choisi les selles préexistantes, offrant les passages les plus aisés, et s'y serait peu à peu enfoncée dans le calcaire.

Outre Schlee, déjà cité, qui associe surimposition et ensellements (app. chf 9), E. Fournier (1900) et Em. de Margerie (1909) en sont partisans (app. chf 12 et 13). La fig. 3.III, tirée de Schlee (1913), illustre cette théorie.

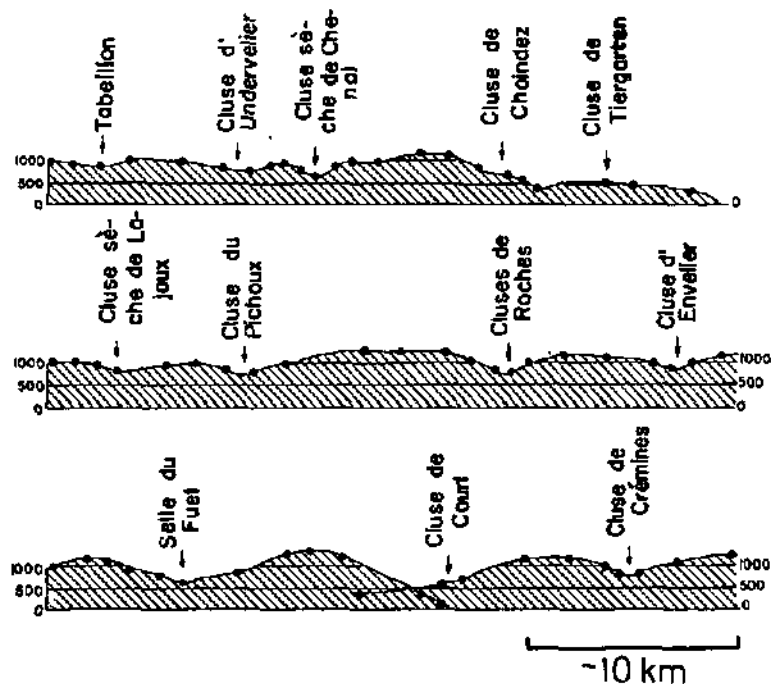


Fig. 3.III. Schéma tiré de Schlee (1913), montrant la position des principales cluses jurassiennes par rapport aux ensellements axiaux.

Pour certains enfin, les ensembles auraient permis la vidange de lacs qui occupaient les synclinaux; ces plans d'eau se seraient amenuisés au fur et à mesure de l'approfondissement des cluses (app. chf 14).

Commentaire: constatons d'emblée que cette "règle" connaît au moins autant d'exceptions que de cas démonstratifs, si ce n'est plus. La cluse de Court, une des plus magnifiques, est située en pleine montée axiale du pli de Graiterie, peu à l'W de sa culmination. Même dans le cas réputé classique de Reuchenette, citée en exemple par Aeberhardt, la cluse n'est pas située exactement au fond de l'ensellement, puisque la descente axiale se poursuit à l'est sur plusieurs km. L'examen de détail de chaque cas semble donc contredire l'idée de base de cette théorie.

Quant aux lacs dans les synclinaux, les preuves de leur existence manquent totalement (sauf cas particuliers, sans rapport avec notre problème: lac du Val de Travers -Burger 1959-, de la Vallée des Ponts -Barsch 1968-).

3.4.2. Faïlles, décrochements.

Il existe indéniablement des cluses situées dans des zones de failles ou de décrochement. A. Heim (1919) en cite plusieurs: St Cergue, Morez, celles jalonnant le décrochement de Pontarlier, la cluse du Doubs à Pont de Roide, la cluse d'Entreraches au Mornont, etc.; Heim reste cependant circonspect face à ce problème (app. chf 15). Dans notre région, on connaît aussi quelques exemples: la cluse de Soyhières, celle de Fontenais en Ajoie.

Ces faits expliquent que de très nombreux auteurs (quelques-uns sont cités en appendice, chf 16 et ss) voient dans les failles la cause première de la localisation des cluses; ils les considèrent comme des zones privilégiées, dans lesquelles l'érosion a pu, plus facilement qu'ailleurs, se créer un chemin transversal aux structures.

Commentaire: il n'est pas aisé de faire véritablement la part des choses dans ces cas. Comme nous le verrons à plusieurs reprises, on remarque dans les cluses des traces indiscutables de dérangements tectoniques: bancs en discordance de part et d'autre de la coupure, flexures, petite chevauchements, plis-faïlles dans le cœur de l'anticlinal, etc. Ces accidents sont souvent localisés à l'intérieur du pli, moins fréquents (ou plus difficiles à mettre en évidence) sur le coffre externe.

Il est cependant difficile d'affirmer que ces défauts de structure sont responsables de la localisation de la cluse. Ils sont fréquents, certes, mais sans doute mieux visibles qu'ailleurs à cause de la coupure. L'apparente tranquillité de l'aspect extérieur d'un pli, non éventré par l'érosion, a très souvent été contredite par le percement de galeries, ou par des forages (Grenchenberg, Risoux, etc.).

En revanche, il est certain que l'existence d'accidents facilite le travail de l'érosion, principalement au niveau de la

circulation interne des eaux. Il faut en tout cas attribuer à des failles le franchissement par les eaux karstiques des grandes séries marnseuses imperméables (P. Chauve 1971). Certaines coupures morphologiques majeures sont sans conteste liées à des failles (Valanvron, p. ex.). Dans le cadre restreint d'une cluse, les petits accidents observés doivent jouer un rôle non négligeable.

3.4.3. Fissuration.

On a démontré toute l'importance des systèmes de fissures, résultant des contraintes tectoniques, en ce qui concerne l'orientation des vallées et dépressions (Burger 1959, Aubert 1969 app. chf 18, Kiraly & al. 1971, etc.). A notre connaissance cependant, aucun auteur ne s'est aventuré à faire endosser l'exclusive responsabilité de la création d'une cluse à une fissuration particulièrement dense. Si l'on admet qu'une faille ou un décrochement est jalonné par une zone où la fissuration est plus dense qu'ailleurs, on peut ramener ce cas au précédent (cf. 3.4.2.).

Commentaire: il est très difficile de prouver qu'une cluse a été induite par une zone très fracturée, puisque les traces de cette fracturation ont été depuis fort longtemps déblayées par érosion. On constate, aux portails d'entrée et de sortie, des pans rocheux ni plus ni moins compacts qu'ailleurs sur les versants. Le lit rocheux ne recèle, lui non plus, rien d'"anormal", en ce sens que les bancs y paraissent aussi massifs qu'ailleurs. L'approche du problème que nous avons tentée par ce biais n'a rien montré de significatif (cf. 6.4.2.).

3.5. PHENOMENES KARSTIQUES

Nous ne devons pas perdre de vue le fait que nous nous trouvons dans un pays à armature calcaire, qui fut de tout temps soumis à l'érosion karstique.

Plusieurs auteurs (Penck in Foerste 1891, Hettner 1912, Rickenbach 1925, cf. app. chf 19 et ss.) ont vu dans les rivières souterraines les grandes initiatrices des cluses et des formes voisines (reculées, ruz, etc.). La circulation des eaux à l'intérieur du massif aurait créé des cavités importantes, dont le toit se serait effondré pour former une vallée à ciel ouvert (théorie de l'effondrement). Une fois l'échancrure produite, la vallée aurait continué à évoluer à ciel ouvert, ou aurait subi un certain nombre de cycles: enfoncement karstique - effondrement.

Commentaire: L'absence de toute trace de tels effondrements ne suffit pas à prouver que ce phénomène n'a pu se produire. On sait que la dissolution peut faire disparaître assez "rapidement" des masses calcaires importantes. Cependant, il est fort peu vraisemblable qu'un tel mécanisme se soit manifesté de façon générale et aussi brutalement. Nous aurons largement l'occasion de préciser plus loin la part que nous attribuons au kare et à son évolution.

3.6. TRAVAUX RECENTS

Depuis la fin de la dernière guerre, peu de chercheurs se sont occupés du problème des cluses. Outre Virieux (1950) et Lini-gér (1953) déjà cités, deux auteurs consacrent quelque atten-tion aux cluses de notre région: Barsch (1969, 1974) et Laub-scher (1967).

D. Barsch, auteur d'une récente monographie morphologique du Jura bernois, n'envisage que des actions externes (antécéden-ce au travers des plis principaux, surimposition aux plis se-condaires - app. chf 22 -; ses considérations sur les "Klusen-verflachungen" (= "terrasses de cluse") ne peuvent être te-nues pour plausibles dans un massif à structure plissée.

Nous pensons que H.P. Laubscher a su le mieux synthétiser, sans parti-pis, les idées récentes sur les cluses (1967, app. chf 23). Il estime que les hypothèses émises sont en général trop spé-culatives: on ne peut envisager de causes exclusivement tecto-niques, ni invoquer exclusivement l'antécédence. Il souligne l'importance des reliefs pliocéniques (post-plissement ?), et celle des relais karstiques qui existaient dès le plissement entre les divers synclinaux; ces relais seraient localisés le long de "zones de désorganisation tectonique" (tektonische Zerrüttungszone), jalonnant, par exemple, une suite de relais axiaux (cluses de la Birse à travers le Raimeux).

3.7. CONCLUSIONS

On sent nettement, à l'énoncé de toutes ces idées, que la plus grande confusion a régné et règne encore à ce propos. Pourtant, n'était-ce pas déjà Machacek qui, en 1905, conseillait d'exa-miner soigneusement chaque type de cluse pour lui-même, et de ne pas généraliser sans autre les conclusions tirées à partir d'un cas particulier; même avertissement chez Heim (1919):

Mettons encore en évidence la constatation de A. Nettner (1912, p.520):

" Der Charakter des Schweizer Jura als ein Kalk- und Karst-gebiete scheint mir vielfach nicht genügend beachtet zu werden."

En ce qui nous concerne, nous avons admis comme hypothèse de travail que les cluses étaient la résultante de l'interaction de nombreux facteurs, d'ordre tectonique, stratigraphique, hy-drogéologiques, climatiques, etc. Notre souci a été de tenter d'établir l'importance relative des uns par rapport aux autres.

4. CADRE DE L'ETUDE

4.1. CADRE GEOGRAPHIQUE

Les cluses, dont nous allons parler, sont propres aux massifs plissés, dont elles constituent un des traits les plus caractéristiques. Les plus grandioses sont localisées dans des chaînes calcaires. Citons pour mémoire les cluses du Jura méridional et des chaînes subalpines françaises (cluse du Fier, cours supérieur de la Filière, du Chéran, etc.), celles des Alpes dinariques calcaires en Yougoslavie, du Moyen-Atlas marocain, du Liban, des Monts Zagros en Iran, etc. Ce sont des zones de drainage importantes à l'échelle de ces massifs. L'homme a exploité tout naturellement ces passages transversaux, pour servir de voies de communication entre les divers compartiments longitudinaux déterminés par la structure.

4.1.1. Le Jura septentrional

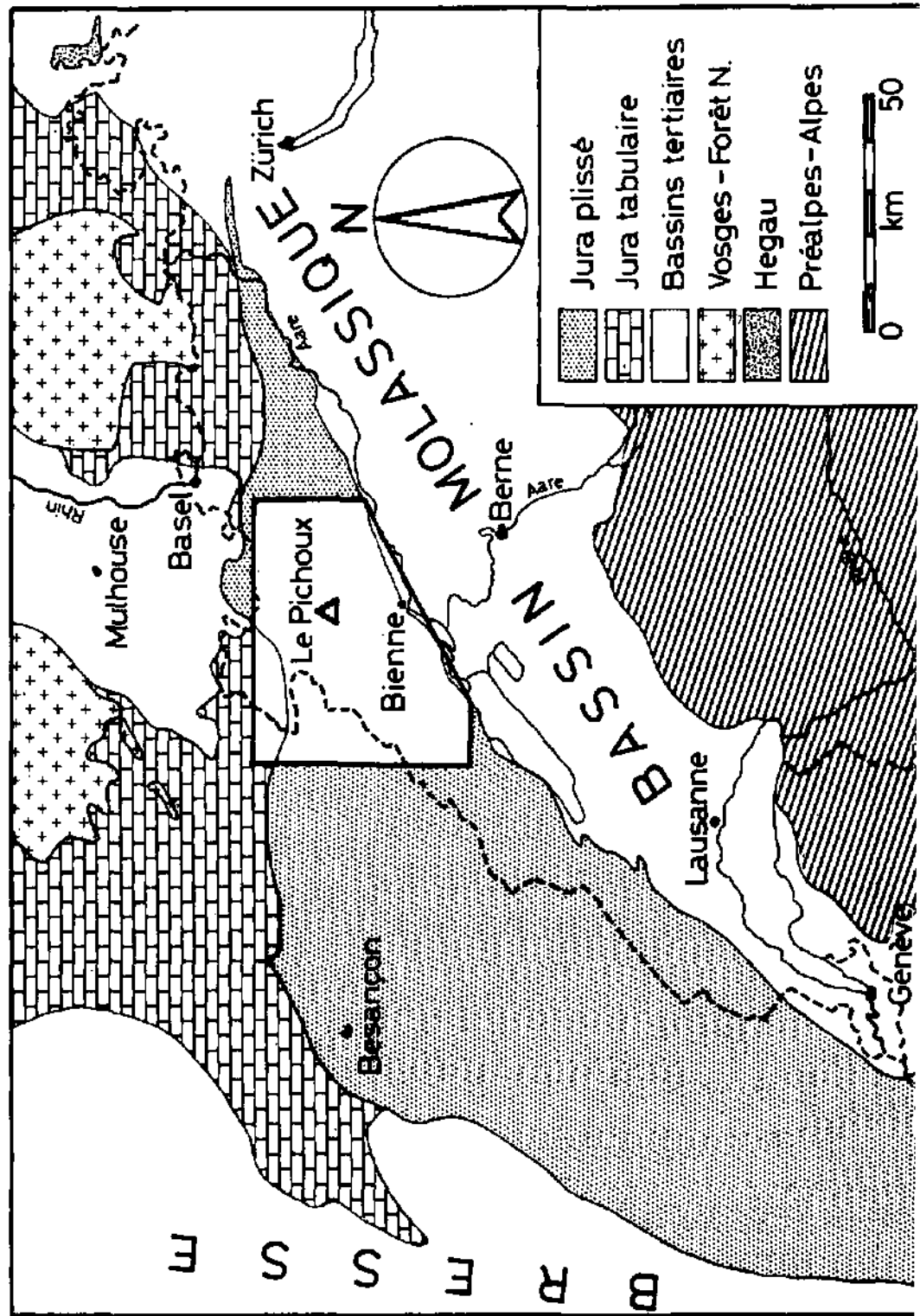
La Haute Chaîne jurassienne, massif plissé-type, compte de très nombreuses cluses. Sa partie nord-orientale est particulièrement riche en exemples classiques, dont nous venons de voir qu'ils ont donné lieu à de nombreuses interprétations. Il nous a semblé judicieux de restreindre nos observations à cette partie de la chaîne (fig. 4.1), quitte à sortir de ce cadre lorsque cela s'avèrerait nécessaire. Les cartes d'ensemble que nous avons dressées recouvrent en gros le territoire de la feuille 31 (Biel-Bienne) de la carte nationale suisse au 1:100.000.

4.1.2. La cluse du Pichoux

Notre propos est de décrire dans les chapitres qui suivent une des cluses les plus classiques: celle du Pichoux (pl. 1).

Située en plein centre du Jura septentrional, elle est un des seuls traits d'union entre le Jura sud et le Bassin de Delémont, à travers le Jura plissé. Elle relie le Petit Val au S (altitude de 720 à 850 m en moyenne) au vallon d'Undervelier - Soulce au N, situé 150 à 200 m plus bas (distance à vol d'oiseau de 2,2 km env.). Elle entaille perpendiculairement la chaîne du Raimeux, à peu de distance de son individualisation en bordure E du Plateau franc-montagnard.

La Sorne, affluent de la Birse prenant sa source à Bellelay, la traverse de part en part, puis s'écoule par la cluse d'Undervelier vers le Bassin de Delémont, jusqu'à sa confluence avec la Birse dans cette dernière localité.



Plusieurs raisons ont guidé notre choix:

- a) La cluse du Pichoux est une "classique" du genre: la forme en cirque est bien marquée; le noyau anticlinal est largement entaillé; elle est active; autrement dit, une rivière la traverse de part en part, reliant deux synclinaux au travers d'un anticlinal bien développé.
- b) Cette cluse possède un large éventail de caractères spécifiques; elle présente de ce fait un condensé des problèmes que pose le "phénomène cluse", tant en ce qui concerne la localisation que la morphogénèse.
- c) L'aspect juvénile de certains tronçons et de certaines formes montre nettement qu'il s'y passe quelque chose, et que le modelage de la cluse par les agents de l'érosion n'est de loin pas terminé.
- d) Elle n'est pas isolée, mais alignée avec la cluse d'Undervelier, en une transversale sud-nord presque parfaite.
- e) Enfin, l'accès en est aisé et elle a été peu dégradée par l'homme (voies de communication, carrières).

4.2. STRATIGRAPHIE

Il n'est pas dans notre propos de répéter tout ce qui a déjà été dit à plusieurs reprises sur le Jura, sa série stratigraphique et son histoire géologique. Nous ne retiendrons ici que les faits essentiels, nécessaires à la compréhension du cadre dans lequel nous allons évoluer.

4.2.1. Stratigraphie sommaire du Jura septentrional

La série stratigraphique de notre région comprend essentiellement trois subdivisions; de haut en bas (fig. 4.II):

- a) une couverture quaternaire, discontinue, généralement peu épaisse;
- b) des sédiments tertiaires, localisés dans les zones synclinales;
- c) une ossature de roches mésozoïques, corps de la chaîne.

a) Couverture quaternaire.

Elle reflète, encore qu'imparfaitement, l'évolution récente de nos paysages.

Les éboulis de pentes, omniprésents, tapissent les flancs des anticlinaux, les pieds des falaises rocheuses, etc. Ils proviennent de la désagrégation des calcaires et marno-calcaires

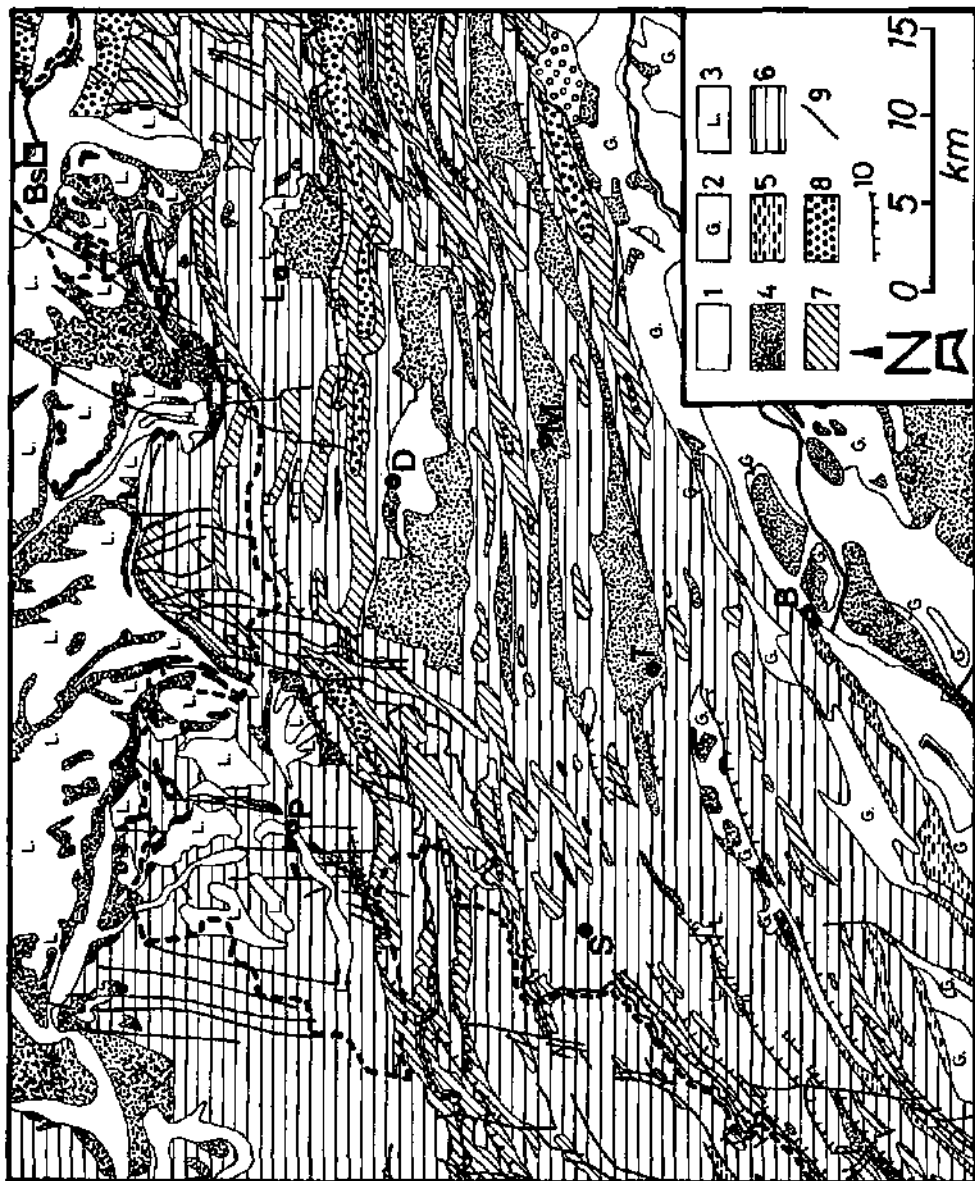
Fig. 4.11.

Carte géologique
sommaire du Jura
septentrional
(d'après la carte géo-
logique de la Suisse
1:800 000.
Commission
géologique suisse,
1972).

Légende:

1. Alluvions
2. Glaciaire
3. Limon lacustre
- Argiles d'altération
4. Tertiaire
5. Crétacé
6. Malm
7. Dogger
8. Lias et Trias
9. Faille
10. Chevauchement

B = Bienne
Bs = Basel
D = Delémont
L = Laufen
M = Moutier
P = Porrentruy
S = Saignalégier
T = Tavannes



secondaires*, ce matériel a souvent été repris par les cours d'eau et déposé en cônes de déjection au sortir des ruz, ou en nappes alluviales dans les thalwegs (fonds de synclinaux); ces nappes, très colmatées par des argiles, sont généralement peu perméables. Des niveaux de terrasses alluviales ont été définis (Barsech 1969), dont l'importance nous paraît peu significative en ce qui concerne notre problème.

Les argiles de décalcification, résidus insolubles résultant de la dissolution des calcaires sous-jacents, recouvrent de larges surfaces dans les Franches-Montagnes, en Ajoie et sur les croupes anticlinales principales. D'une manière plus générale, les soles de la région contiennent une part importante de ces argiles, auxquelles se sont souvent mélangés des éléments allochtones, d'origine loessique (Pochon 1973)

Dans le sud de la chaîne, des formations morainiques würmiennes occupent de larges surfaces (Val de Ruz, Vallon de St Imier, Plateau de Diesse, etc.); des résidus morainiques riisiens sont signalés jusque sur le "plateau" franc-montagnard.

b) Sédiments tertiaires.

Ce sont des sédiments qui se sont déposés avant le plissement du massif jurassien. L'histoire de ces formations est complexe, surtout dans le Jura interne, qui semble avoir évolué pour lui-même durant cette période (Aubert 1975).

Dans notre région, qui a dû constituer une sorte de détroit entre le Bassin molassique suisse et le Fossé rhénan, on rencontre essentiellement des grès, des marnes, des calcaires d'eau douce, parfois des conglomérats. Ces roches sont généralement peu résistantes à l'érosion, raison pour laquelle on ne les trouve plus que sous forme de lambeaux occupant le fond des grands synclinaux. Nous aurons l'occasion de parler plus loin du rôle (plutôt passif) qu'ils ont pu jouer lors de la formation de certaines cluses (cf. 14.3.1).

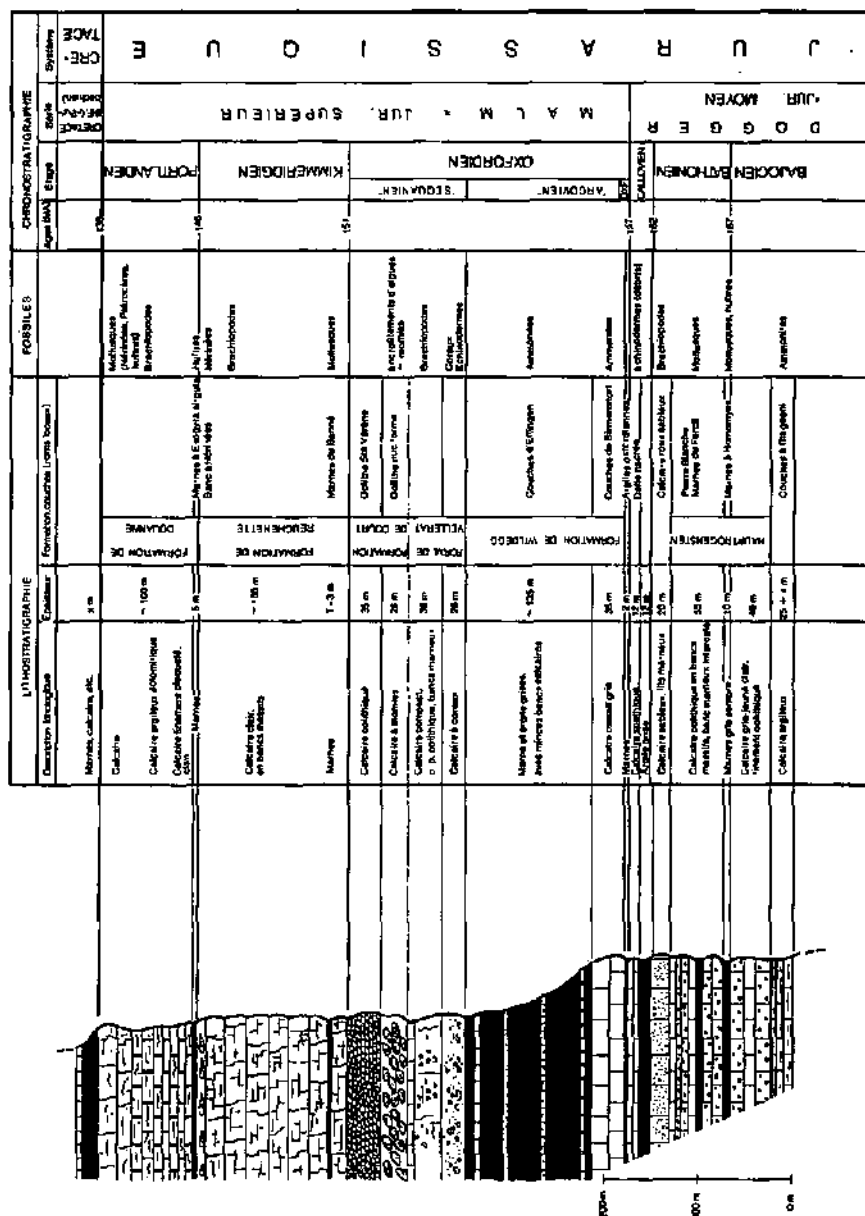
c) Roches mésozoïques.

Ce sont les sédiments qui constituent l'ossature de la chaîne.

Nous n'insistons pas sur le Crétacé, peu représenté sur notre territoire (Vallon de St Imier, bord des lacs de Bienne et Neuchâtel). Les séries sédimentaires du Jurassique retiendront plus particulièrement notre attention: deux échelles stratigraphiques les décrivent en détail; l'une d'elle est valable pour la partie sud de notre territoire (fig. 4.III, région des cluses de la Suze), l'autre rend compte des conditions

* A. Pancza prépare actuellement une "étude des phénomènes périglaciaires dans le Jura". Elle a trait notamment à l'influence des phénomènes de gel-dégel sur la désagrégation des parois rocheuses.

Echelle stratigraphique du Jurassique dans la région des cluses de la SUZE

Fig. 4.III.
Echelle stratigraphique, région sud (tirée de Monbaron, 1974).

Dressée par Max Antenen, d'après Bollego, Burri, Eschle et Späth (Wegmann I modifiée)

Dressée par Jean Mafé, d'après P. Diebold, H. Laubscher, A. Schneider, B. Tschopp, complétée par M. Monbaron

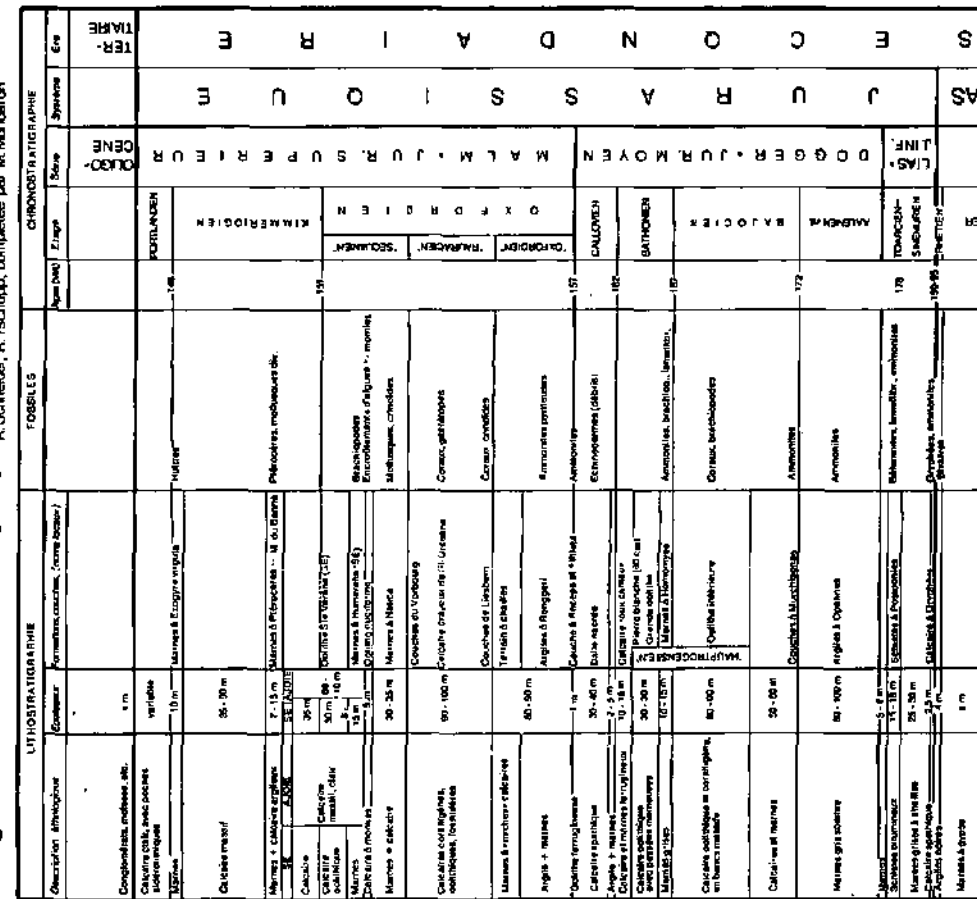


Fig. 4.IV.
Echelle stratigraphique, région nord (tirée de
Monbaron, 1974).

régnant dans le Clos du Doubs et en Ajoie (fig. 4.IV). Remarquons essentiellement deux choses, en comparant les deux domaines:

- les plis septentrionaux ont été plus profondément érodés que ceux de la partie méridionale;
- des changements latéraux de faciès sont visibles; le plus spectaculaire se marque au niveau de l'Oxfordien inférieur et moyen: alors que dans le S il est calcaire à la base et marneux ensuite (faciès argoviens), la situation est inverse au N (faciès oxfordien s. str. marneux à la base, faciès calcaire rauracien au-dessus)*.

Pour le détail, nous renvoyons le lecteur aux études régionales nombreuses et fouillées (entre autres: Stäuble 1959 pour le Dogger; Bolliger & Burri 1970, Pümpin 1965, Ziegler 1956, Thalmann 1966, Schaer 1966, Persoz & Remane 1973, pour le Malm; Persoz & Kubler 1968 pour le Crétacé; Liniger 1925, 1953, 1964, pour le Tertiaire; etc.), ainsi qu'aux cartes de l'Atlas géologique suisse et à leurs notices explicatives.

4.2.2. Région du Pichoux: particularités stratigraphiques.

Nous n'entrerons pas non plus dans les détails de la stratigraphie locale, déjà abondamment décrite pour cette partie du Jura (Rollier 1893, 1898, Birkhäuser 1925 p. 237 - 254, Bolliger & Burri 1970; cf. aussi fig 4.IV). Signalons tout de même certaines particularités de la série stratigraphique.

Le Jurassique est représenté par ses assises de Malm et de Dogger; le niveau le plus ancien mis à jour au coeur de la cluse est le "Hauptrogenstein" (Bathonien), et plus précisément les marnes à Homomya (HR moyen). L'étage le plus récent est le Portlandien inférieur (10 - 15 m de puissance), présent sur le flanc S de l'anticlinal, mais qui n'existe plus sur le flanc N. Autre fait à signaler en ce qui concerne le Malm: la chaîne du Rameux est située dans la zone de transition entre les faciès argovien et rauracien, avec une assez nette tendance vers ce dernier (Pichouxkalk de Bolliger & Burri).

Le Tertiaire se présente comme suit:

- un niveau de gompholite à la base (5 - 10 m), passant à une molasse (dite "molasse alsacienne"); celle-ci est une

*Des recherches récentes considèrent les anciens "étages": Oxfordien, Rauracien, Argovien, Séquanien, comme de simples faciès de l'Oxfordien s.l. (selon Arkell 1956). Ces termes désignent des formations lithologiques, sans équivalences chronostratigraphiques. Tout en admettant ce point de vue, nous conserverons cette nomenclature, d'un usage commode dans le Jura septentrional: combe argovienne ou oxfordienne, crêt rauracien ou séquanien. Nous renonçons à placer ces termes entre guillemets.

alternance de sables et grès, devenant très marneux au sommet; les marnes delémontiennes prolongent l'épisode marneux précédent (en tout environ 150 m (?), Heckendorn 1974); elles sont surmontées par le calcaire d'eau douce delémontien (15 m); toutes ces formations sont d'âge stampien (Chartien);

- le Miocène ne se rencontre que dans le synclinal de Soulce, sous forme de conglomérat à galets de quartzites et de porphyres vosgiens (6 m selon Birkhäuser, 100 (?) m selon Heckendorn);
- on a attribué au Pliocène les galets de quartzites et de porphyres épars sur les surfaces calcaires, pris dans une matrice de lehm d'altération (Höhenschotter); il s'agit plus vraisemblablement de galets provenant de la désagrégation de conglomérats miocènes, galets qui ont résisté à la dissolution.

4.2.3. Stratigraphie et morphologie.

Mentionnons d'emblée l'importance extrême, au sein des séries jurassiques, de l'alternance calcaire - marne. Ce fait conditionne toute la morphologie jurassienne (Aubert 1969). Pour le géomorphologue jurassien en effet, plus que les étages aux limites parfois arbitraires (banc à Nérinées entre le Kimméridgien et le Portlandien du Jura neuchâtelois, par exemple), ce sont les suites lithologiques, et particulièrement les oppositions entre bancs résistants et bancs friables, qui sont importantes.

Sur les surfaces calcaires, c'est le modelé karstique qui prédomine. La chape calcaire vient-elle à disparaître, mettant à jour un niveau marneux sous-jacent, celui-ci est immédiatement soumis à l'érosion normale, dont l'action est plus rapide. Une fois la couche marneuse déblayée par ruissellement, une nouvelle aire calcaire se trouve soumise à l'action karstique. Cette évolution se poursuit, au gré de l'alternance calcaire - marne.

N'oublions pas non plus que chaque niveau marneux est un imperméable, hydrologiquement parlant. Qu'ils soient épais ou minces, les bancs marneux influencent à toutes échelles la circulation des eaux souterraines dans le massif. Ce fait est également primordial.

Mentionnons encore que plus un niveau (marneux ou calcaire, peu importe) est épais, plus son "impact morphologique" est grand (combes argoviennes ou oxfordiennes, crêts rauraciens).

L'évolution des paysages jurassiens, avant, pendant et après le plissement de la chaîne, a donc été conditionnée dans une très large mesure par la lithologie. Nous aurons l'occasion d'y revenir par la suite, lorsqu'il s'agira d'expliquer le façonnement des cluses.

4.3. TECTONIQUE

Le Jura a très souvent été cité comme exemple-type de structure plissée simple. Mais cette simplicité n'est qu'apparente; une foule de travaux révèlent toute la complexité des structures jurassiennes (Buxtorf 1916, Aubert 1959, Lloyd 1963, Laubscher 1961, 1962, 1965, Pavoni 1961, Wynnock 1961, Kiraly 1968, 1973, Maia 1969, Heckendorn 1974, etc.).

4.3.1. Structure du Jura septentrional

On peut décrire à grands traits la région envisagée comme une succession de croupes anticlinales et de vallons synclinaux, d'orientation SW - NE, voire W - E. Le relief y est conforme à la structure. Les plis sont vigoureux au S, plus modestes en altitude au N. Ils sont généralement coiffés, et montrent une tendance au déversement vers le N; ceci est dû sans doute à la poussée latérale génératrice, censée venir du S - SE.

Le territoire d'investigation est limité à l'E, en gros, par le début de la zone des recouvrements (bordure E du Bassin de Delémont); à l'W, la limite correspond à peu près au décrochement de la Ferrière. Il s'appuie au N au Jura tabulaire (Ajoie) et sa limite coïncide au S avec l'enfoncement des couches mésozoïques sous la molasse du "Plateau suisse" (gouttière du Pied du Jura). L'entre-terrain contient la majeure partie des cluses dont nous avons tiré modèle.

Dans cet ensemble, les Franches-Montagnes occupent une place à part. Les plis y sont plus serrés, mais moins apparents dans la morphologie, l'érosion les ayant nivelés plus qu'ailleurs.

4.3.2. Structure de la région du Pichoux.

La cluse du Pichoux éventre un des plus longs anticlinaux jurassiens, celui du Raimeux, qui prend naissance près des Emibois (565/231), en relais de l'anticlinal des Sommètres (cf. planche VI). Ce pli traverse longitudinalement toutes les Franches-Montagnes (Rouges Terres - Les Montbovats - N de Lajoux - Rebévelier). A l'E de la cluse, il se poursuit par: Le Coulou - Montagne de Moutier - Roches (où la Birse le franchit également en cluse) - Envelier (autre cluse); il vient enfin buter dans la région du Passwang à une zone complexe, qui annonce le Jura charrié.

Près du Pichoux, vers le S, le Raimeux voisine avec l'anticlinal de Moron; ils déterminent entre eux une auge synclinale remplie de Tertiaire, le Petit Val, qu'on peut également suivre sur plusieurs km, vers l'E comme vers l'W. Le pli sis au N, et coupé par la cluse d'Undervelier, est l'anticlinal de Vellerat. Entre Raimeux et Vellerat se trouve le synclinal Tertiaire de Soulce.

Toutes ces structures ont une extension longitudinale comparable au pli de Raimeux; elles diffèrent bien entendu l'une de

l'autre par de nombreux détails dont nous ne parlerons pas ici (allure des plis, relais, failles, etc., cf. Birkhäuser 1925, Rothpletz 1933, Schlaich 1934, Heckendorn 1974).

4.3.3. Plissement du Jura.

Encore un sujet qui a fait couler beaucoup d'encre! Durant de longues années, les géologues se sont disputés pour savoir si le Jura s'est plissé au Miocène ou au Pliocène; s'il s'est édifié en un seul jet ou a subi deux ou plusieurs phases de plissement; enfin si les plis les plus anciens se trouvent au nord ou au sud de la chaîne. D. Barsch (1969, pp. 19 - 24) résume très bien le problème.

Après les travaux de Laubacher (1961, 1962, 1965) et ceux d'Aubert (1969, 1975), on est plutôt d'avis actuellement que le plissement du Jura s'est produit en une seule phase principale, au tardi - Pontien (voici 5 à 7 millions d'années). Des mouvements antérieurs (phase tectonique cassante de l'Oligocène, Aubert 1959) ont largement préparé le terrain à cet événement tectonique. A l'opposé de cette conception, citons l'avis de Liniger (1964), qui reste partisan d'un plissement en plusieurs phases, au post-Pontien, post-Pliocène moyen et Pliocène supérieur.

La relative jeunesse du plissement enlève au problème de l'antériorité des plis méridionaux ou septentrionaux une bonne part de son acuité, du moins pour ce qui concerne les cluses et leur formation.

4.4. PALEOGEOGRAPHIE

Pour le géomorphologue, il est essentiel de se rendre compte que le paysage jurassien actuel résulte d'actions érosives ayant débuté bien avant le plissement, et qui se sont poursuivies presque sans arrêt jusqu'à nos jours. Durant une bonne partie du Crétacé et du début du Tertiaire (Eocène), les surfaces calcaires ont été soumises à l'érosion et à la dissolution; une portion non négligeable de notre territoire (Franches-Montagnes surtout) a vu cette évolution karstique se poursuivre durant tout l'Oligocène et une partie du Miocène (Aubert 1972, 1975), alors que l'autre région (dépression rauraque) recevait une sédimentation molassique assez importante. La transgression miocène semble avoir mis fin, momentanément, au régime d'érosion continental.

C'est donc une surface déjà passablement décapée et disloquée qui a subi le plissement pontien; dès lors, la couverture tertiaire a dû être très rapidement érodée des voûtes anticlinales, dès leur ébauche tectonique. Les variations climatiques du Quaternaire ont certainement trouvé un relief assez peu différent du nôtre, sur lequel porter leurs coups de boutoir.

4.5. LES MOYENS D'INVESTIGATION

Le problème choisi est à la fois restreint ("objet" à étudier: la cluse en tant que forme de terrain) et très vaste (répartition spatiale des cluses à l'échelle du massif, reconstitution des événements ayant concouru à leur formation). Pour tenter de mener à bien notre étude, nous n'avons pu disposer que de moyens modestes, ceux propres au chercheur isolé.

4.5.1. Cartes et photos aériennes.

Les cartes topographiques sont l'outil de base du géomorphologue. A la limite, il peut se contenter d'une restitution hypsométrique et hydrographique, plus parlante que n'importe quelle autre carte surchargée de détails superflus (cf. fig. 2.II). L'examen de tels documents est complété par celui des cartes géologiques détaillées et des photos aériennes.

Pour notre région, nous avons pu disposer des cartes au 1:10.000 du plan d'ensemble cantonal pour les levers de détail. Pour la synthèse régionale, les cartes topographiques du STF (échelles 1:25.000 - 1:50.000 - 1:100.000) ont été employées. Quant aux cartes géologiques récentes et détaillées (1:25.000), elles n'existent pas encore partout dans le Jura*.

Pour ce qui concerne les photos aériennes, nous avons employé la couverture normale de la région, réalisée par le Service topographique fédéral; nous avons eu accès également à quelques prises de vue par satellites d'un programme américain (cf. 11.1).

4.5.2. Observations de terrain.

Elles constituent le support fondamental de toute notre étude. Elles ont principalement consisté en:

- cartographies et mensurations de détail, tectoniques et morphologiques dans quelques cluses et ruz typiques, et dans leur environnement immédiat (Pichoux, Undervelier, etc.).
- visites de nombreuses cluses dans la région choisie, ailleurs dans le Jura, voire hors de la chaîne jurassienne, en vue d'une synthèse régionale;
- préparation et réalisation d'expérience de coloration d'eaux souterraines; étude de bassins-versants;
- exploration de réseaux souterrains;
- exploitation d'événements spéciaux ou de conditions particulières d'observation (inondations, observations hivernales, vols aériens, etc.).

* Voir la liste des cartes régionales dans Fischer (1969 a).

4.5.3. Documents inédits.

En vue de la synthèse régionale, il nous a paru essentiel de confronter les données actuellement connues avec des documents non publiés. Certains recoupements intéressants ont ainsi été possibles, et de grande importance pour nous. Ces documents sont:

- rapports d'expertises géologiques et hydrogéologiques (recherches d'eau potable principalement) exécutées pour le compte de communes ou d'organismes publics (Ville de Moutier, SEF*, Ponts et Chaussées, etc.).
- documents déposés aux archives géologiques suisses à Berne;
- plans et descriptions de réseaux souterrains, provenant des archives du Spéléo Club Jura;
- documents inédits déposés à la Commission géologique suisse à Bâle.

Nous devons toute notre reconnaissance à ces institutions pour leur compréhension et leur collaboration.

* SEF = Syndicat pour l'alimentation des Franches Montagnes en eau potable.

Deuxième partie:

LE PICHOUX



Fig. 5.I.
Vue aérienne verticale de la cluse du Pichoux, du Petit Val et de la région
des Bouts de Saules (de haut en bas).

Reproduite avec l'autorisation du Service topographique fédéral
du 2.6.76.

Cluse de Blanches Fontaines

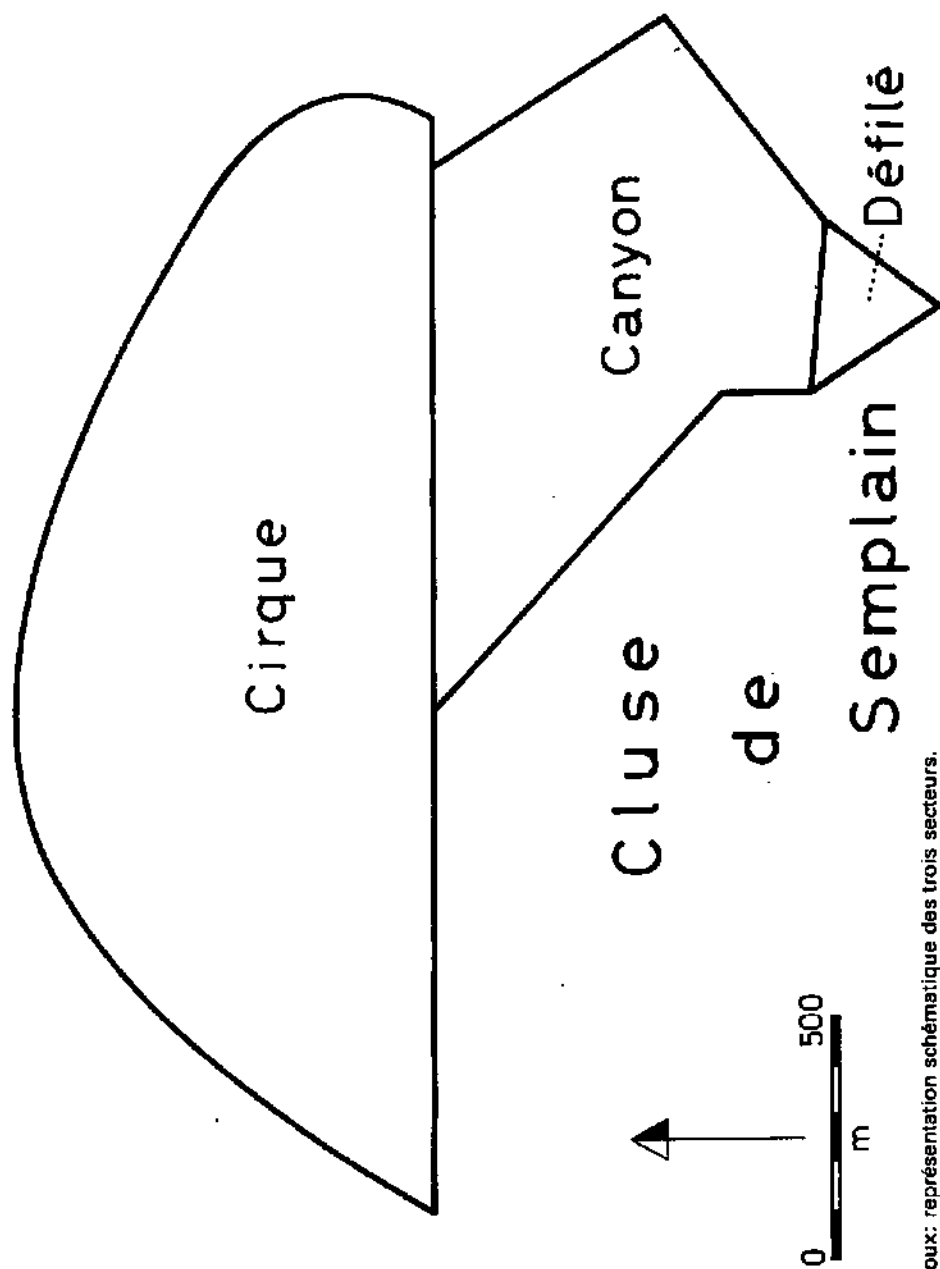


Fig. 5.11.
Cluse du Pichoux: représentation schématique des trois secteurs.

5. LE PICHOUX : CRITERES STRUCTURAUX

Il nous faut maintenant aborder en détail les particularités structurales du site du Pichoux. Nous décrivons tout d'abord les faits tels qu'ils nous apparaissent; leur interprétation sera tentée plus loin (cf. 9.1. et 11.3.)

5.1. BREVE DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE (Planche I et fig. 5.II à 5.IV)

Après un portail d'entrée S extrêmement resserré, on traverse un étroit défilé rocheux (fig. 5.III), coupant perpendiculairement les couches du Malm supérieur, redressées à 50° environ. Ce tronçon est une vallée en V typique.



Fig. 5.III.

Secteur amont de la cluse de Semplain (défilé), vu du portail sud.

Le défilé s'élargit dès l'aval du tunnel de la route (coord. 584.060/236.020), là où les couches s'infléchissent, jusqu'à devenir pratiquement horizontales. L'orientation de la dépression, en gros sud-nord dans cette partie supérieure, passe alors et sur 500 m environ à une direction SE - NW. Ce secteur de la cluse peut à juste titre être comparé à un canyon, et nous le désignerons comme tel par la suite (fig. 5. IV).

Juste à l'amont du petit barrage hydroélectrique construit au centre des gorges du Pichoux (583.675/237.725), les couches (calcaire rauracien) se redressent très brusquement, presque



Fig. 5.IV.

Les "Galleries du Pichoux", dans le secteur de liaison (canyon), sur rive droite

à la verticale (genou). La rivière reprend alors son orientation méridienne pour franchir les couches du Dogger, et parvenir ainsi au coeur du pli, à peu près au coude de la rivière, 300 m en amont de l'Usine de Blanches Fontaines (583.750/238.000). On se trouve là au centre d'un cirque d'érosion, de forme à peu près hémicyclique, dont le diamètre de plus de 2 km, est orienté à peu près selon l'axe de l'anticlinal.

On quitte le coeur du pli par un passage étroit, franchissant obliquement la retombée N des couches de Malm. Comme nous le verrons plus loin en détail (cf. 6.2.), la vallée en V et le secteur en canyon forment la cluse de Semplain; le cirque rocheux est la cluse de Blanches Fontaines*.

5.2. COMPLEXITE DE L'ANTICLINAL

Le simple examen de la carte topographique montre que la chaîne de Raimeux s'élargit immédiatement à l'ouest de la cluse. Cette modification est due à une voûte secondaire, l'anticlinal de Semplain, qui prend naissance dans la région Les Grands Champs - Sapran. Cet anticlinal-apophyse se confond ensuite avec le pli principal et n'est déjà plus individualisé dans la région du Perceux, 2 km à l'E (pl. III)

Cette voûte secondaire a un flanc sud assez redressé (portail S de la cluse), mais se coiffe très nettement ensuite et ne présente pas à proprement parler de flanc N: les couches horizontales s'inclinent très légèrement au N, peu avant le redressement spectaculaire (cf 5.1. et 5.5.2.). Ce redressement des couches marque d'ailleurs le véritable flanc S de l'anticlinal de Raimeux, ou pli principal (fig. 5.V).

* Du nom de l'Usine située en son centre; celle-ci doit son nom aux sources de Blanches Fontaines, qui jaillissent 500 m en amont (cf. 8.3.).

Versant W Ant. de Raimieux

1000 Pli de Semplain

Le Pichoux

Carbon

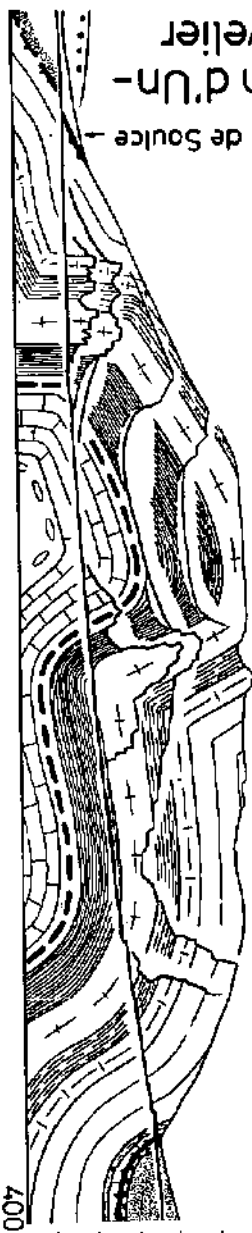
Le Mentot

S Gorges du Pichoux

Fabrique

N

400



Versant E

Sur la Côte

Mont Oedos

Ant. de Raimieux

Vallon d'Un-

R. de Souce

1000

Légende



Ebaoulis

Eboullement



Miocène

Calcaire délemontien

Molasse alsacienne

Gampholite

Loess



Portland

M. à Exog. virg.

Kimmeridgien



Séquanien sup.

int.



Rauracien

Oxfordien



Callovien

Hauptrogenstein

Dogger

int.

Fig. 5.V.
Coupes géologiques dans la
région du Pichoux, par Bir-
häuser (1925).

5.3. AXES ANTICLINAUX

L'accrolement du chignon de Semplain semble aller de pair avec des modifications de la direction et du plongement des axes anticlinaux. On remarque également une assez nette disharmonie entre le coffre de Malm et le coeur de Dogger (pl. III).

5.3.1. Anticlinal de Raimoux.

a) Carapace de Malm

Près de Rebévelier (581/237), l'enveloppe externe du pli principal est orientée N 77 E, avec un léger plongement vers l'E (8°). L'érosion ayant complètement décapé l'anticlinal à l'endroit de la cluse, il devient ensuite difficile de déterminer l'axe de la carapace du pli. Située à 970 m d'altitude environ près de Corbon, à l'W de la cluse, la base de la chape calcaire de Rauracien n'est plus qu'à 830 m environ à Mont Dedos (coörd. 584/237, pente de 7%). L'analyse structurale révèle, psu à l'E du centre de la cluse, une modification de 15° de la direction axiale primitive, ainsi qu'une légère accentuation du plongement vers l'E (N92/12E). Cette descente axiale paraît s'atténuer quelque peu à l'E de la cluse.

A l'E du Perceux (586/237), l'anticlinal de Raimoux a pris une orientation N104E, et son axe remonte de 8° environ en direction ESE.

b) Structures locales

Des axes partiels, pris sur le flanc nord, dans la région du Miéry - Les Corbés, révèlent de petites structures locales extrêmement complexes (couches renversées, broyages tectoniques, tassements), qui nécessiteraient une étude très détaillée. Leur extension longitudinale doit être d'ordre de grandeur hectométrique. Ce sont sans doute de petits replis de flanc, comme il en existe de nombreux dans la région, particulièrement sur les versants N des anticlinaux.

c) Noyau de Dogger

L'analyse tectonique de la voûte de Dogger, au centre de la cluse (Le Mont - Blanches Fontaines - Le Voutier) montre une notable différence d'avec la carapace de Malm. La lèvre W (mesures prises le long du nouveau chemin forestier) a un axe orienté N 111 E et qui plonge de 16° vers l'E. Ce plongement s'atténue quelque peu à l'E de la rivière (Le Voutier), passant à N 108 E / 08 E. Il y a donc assez nette disharmonie entre Malm et Dogger, qu'il faut attribuer aux épaisses assises marneuses de l'Oxfordien, très plastiques (cf. 7.3.3.).

A l'E du Perceux, le cœur de Dogger de l'anticlinal du Raimeux a la même orientation et le même plongement que le coffre de Malm (pl. III). Il existe indiscutablement à l'E de la cluse, un relais dans le noyau anticlinal, qui ne transparait cependant pas sur la carte structurale au toit de l'Oxfordien (bourrage tectonique ?, cf fig. 5.VI).

5.3.2. Anticlinal de Semplain

Il est orienté plein E et plonge axialement de 10° vers l'W, donc en sens contraire de Raimeux. Il semble même que près du Perceux (586/237), il tourne vers le NE, en accentuant sa montée axiale.

Quelques mesures, prises dans la gouttière synclinale entre Semplain et Raimeux (Rauracien supérieur) donnent un axe horizontal, orienté N 96. Nous verrons plus loin que cette brusque flexure évolue en faille au-dessus du Séquanien marneux.

Le Dogger n'affleure pas dans l'anticlinal de Semplain.

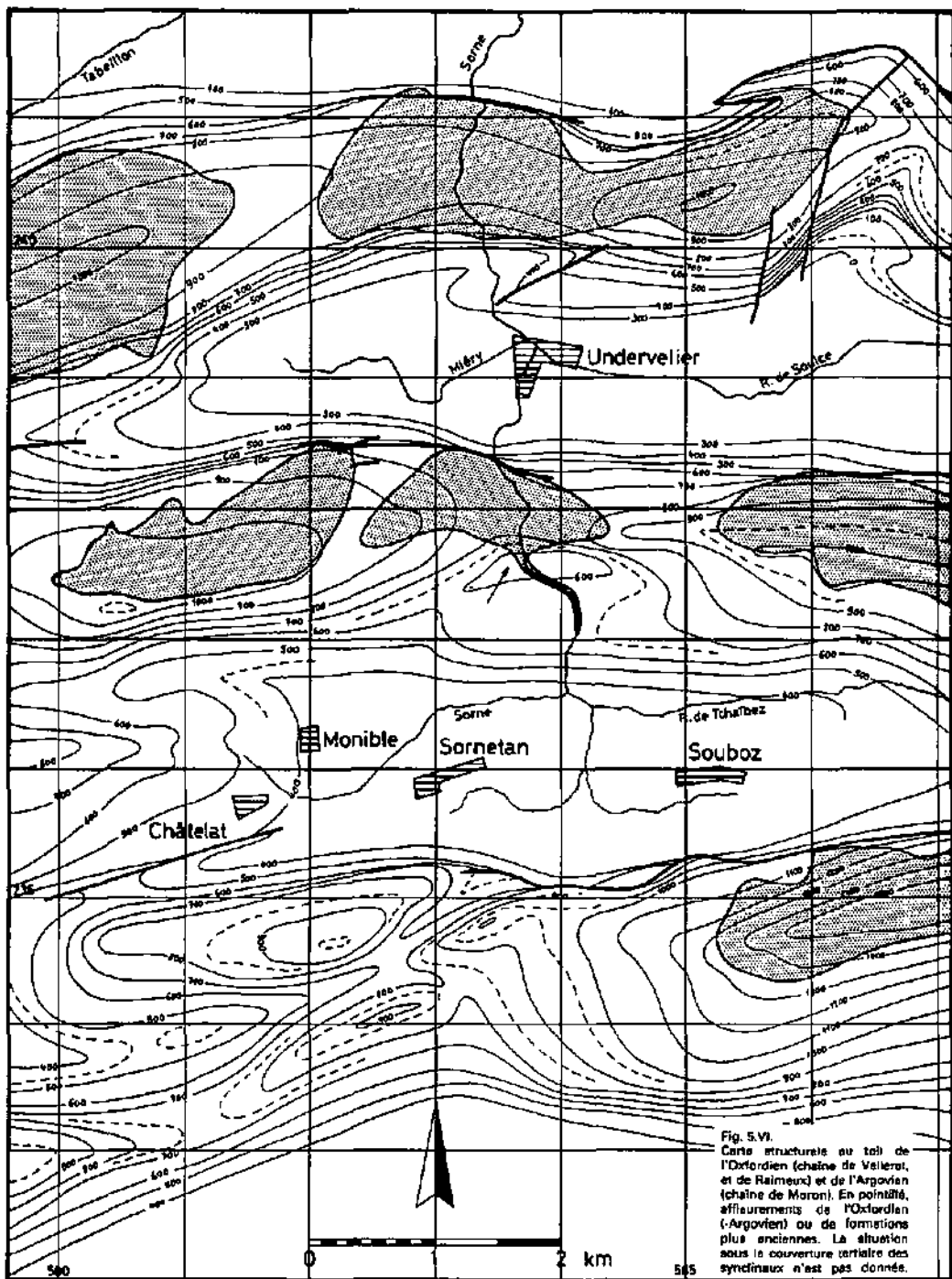
5.4. CARTE STRUCTURALE AU TOIT DE L'OXFORDIEN (fig. 5.VI)

Cette interprétation structurale a été établie sur la base de la carte géologique de Glauser (inédit), des coupes de Birkhäuser (1925) et de nos propres observations. La partie S (Moron) se base sur les coupes de Schlaich (1934) et Rothpletz (1933). L'angle NE (anticlinal de Vellerat) est tiré de Heckendorn (1974).

Le toit de l'Oxfordien, ou de l'Argovien sur l'anticlinal de Moron, constitue le niveau de base des circulations karstiques à l'échelle régionale. Ce niveau marneux isole le coffre de Malm des calcaires du Dogger, dont nous venons de voir le comportement structural particulier au Pichoux. Nous n'analysons présentement que les anticlinaux de Raimeux et de Semplain.

Le pli de Raimeux présente un net ensellement au toit de l'imperméable dans la région de la cluse. Cette selle est associée à une accentuation du pendage sur le versant N; on constate même un léger renversement des couches juste au portail de sortie (cf. 5.5.2.). Il semble bien que la rivière ait tiré parti de cet endroit pour quitter le pli.

Il est intéressant de noter la cuvette synclinale fermée, entre Raimeux et Semplain, marquée par l'isohypse 600; le fond de cette auge coïncide exactement avec l'endroit où jaillissent les grandes sources de Blanches Fontaines, dont nous parlerons abondamment plus loin (8.3.). Enfin, le "plateau" sommital contraste avec la relative raideur du versant sud de l'anticlinal de Semplain.



On voit donc nettement que:

- à travers l'anticlinal de Raimieux, la cluse occupe une situation "logique", du point de vue structural;
- rien ne justifie, en revanche, la coupure à travers Semplain, en pleine montée axiale, à peu de distance à l'W de sa culmination axiale, ou plutôt de son incorporation au pli principal.

Le passage à travers l'anticlinal aurait été plus "aisé" à l'W de Semplain, en évitant ainsi l'obstacle supplémentaire que constitue le pli adjacent.

Nous analyserons plus loin la situation telle qu'elle se présente dans les chaînons voisins, au N et au S.

5.5. FAILLES, DECROCHEMENT

5.5.1. Failles transversales et traces de mouvement

Il n'existe pas, à première vue, de faille transversale importante dans la région du Pichoux, qui puisse expliquer la localisation de la cluse à cet endroit.

Nous en voulons pour preuve la parfaite concordance des bancs de part et d'autre de la cluse. On peut aisément contrôler cette concordance au portail sud du Pichoux, ainsi que le long du cours supérieur de la Sorne (tronçon 4 et 5, cf. fig. 6.II.) dans le lit de la rivière; elle est également discernable au pli en genou des couches rauraciennes, près du bassin d'accumulation, tout comme à la retombée N de ces mêmes couches, en aval de l'Usine de Blanches Fontaines. Si cette ordonnance des couches est quelque peu perturbée au portail N, dans le Malm supérieur (région des Corbés), cela est dû aux complications tectoniques locales, d'extension longitudinale et de dimensions réduites, que laisse présumer l'analyse structurale (cf. 5.3.1. et 8.5.1.).

Dans la cluse et à ses abords, il est extrêmement rare de trouver des traces de mouvement bien conservées sur des plans de failles (stries, crochons). Nos recherches nous ont permis d'en mettre quelques-unes en évidence, aux endroits où les parois de roche en place ont été récemment rafraîchies par coupe artificielle: le long de la route principale et des chemins forestiers, éventuellement encore dans des falaises où des pans de rocher se sont récemment éboulés. Partout ailleurs, la patine de la roche empêche toute observation valable.

En règle générale, les mouvements décelés les plus marqués sont à composante sub-horizontale. Ils s'impriment dans des zones tabulaires (Semplain), sur des plans obliques par rapport à l'axe du pli, et ont une tendance sénestre (cf. 6.4.1.). Dans des zones localement perturbées, on rencontre d'autres traces de mouvement, sans rapport cependant avec notre problème.

En résumé, les indices de mouvement transversaux sont insuffisants pour admettre l'existence d'un accident transversal majeur (décrochement); qui aurait pu déterminer à cet endroit l'établissement d'une cluse.

5.5.2. Failles longitudinales.

- a) Le flanc N de l'anticlinal de Raimeux a tendance à se déverser vers le N; le renversement sur le synclinal ne paraît pas très important; il se marque assez bien cependant sur la carte structurale (fig. 5.VI).
- b) L'articulation du repli secondaire de Semplain avec le pli du Raimeux se fait par une flexure très brusque. Sur la lèvre W, les bancs s'infléchissent régulièrement, à tous les niveaux (fig. 5.VII); sur la lèvre E en revanche, la flexure n'est régulière qu'au niveau du Rauracien: sur le chemin (coord. 583.700/237.595, dans le Rauracien inférieur), la charnière est encore intacte et les bancs passent en continuité et sur quelques mètres de N 113/08 N à N 95/45 à 50 S. Un peu plus haut dans la série rauracienne (alt. 620 m, au-dessus du chemin), la flexure est annoncée par une série de petits plis en chevron (knicks). Au-dessus des marnes du Séquanien inférieur au contraire, l'articulation se fait par pli-faille (fig. 5.VIII).

On voit que la faille doit prendre naissance dans le vide actuel; il est difficile de connaître son extension longitudinale, en direction E, ainsi que de se prononcer sur l'influence qu'elle aurait pu avoir sur la localisation de la cluse.

- c) Le noyau de Dogger, outre son plongement quelque peu aberrant déjà signalé plus haut, présente quelques particularités tectoniques intéressantes. Citons notamment un petit pli-faille (rive gauche, alt. 565 m, coord. 583.665/237.890, fig. 5.IX et 5.X). Direction et plongement de cette petite structure (N 118/16 SE) concordent assez bien avec les mêmes paramètres du noyau anticlinal dans son ensemble (pl. III.).

Une telle structure illustre assez bien la complexité tectonique du coeur du pli. La fréquence et l'extension axiale de tels accidents (celui que nous avons décrit n'est pas le seul dans le Pichoux) sont difficiles à préciser, à cause de l'épaisse couverture d'éboulis empêchant toute investigation de détail.

5.6. CONCLUSIONS

Il faut laisser aux tectoniciens le soin de décrire en détail la tectonique de la région (Laubscher, carte 1:25.000 Bellelay, en voie de publication). Notre intention n'était pas de

Fig. 5.VII.

Flexure régulière des couches de Malm supérieur, lèvre occidentale (jonction des anticlinaux de Semplain à gauche et de Raimeux à droite).



Fig. 5.VIII.

Pli-faillë dans les couches de Malm supérieur, lèvre orientale (jonction des anticlinaux de Semplain à droite et de Raimeux à gauche).





Fig. 5.IX. Pli-faille dans le cœur de l'anticlinal de Raimeux (Hauptrogenstein).

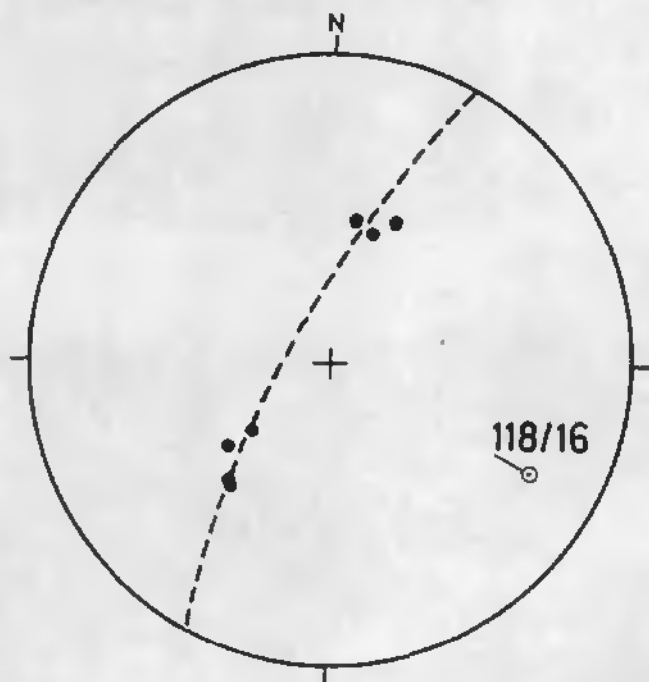


Fig. 5.X. Axe du pli-faille de la figure 5.IX. Diagramme de Wulff, hémisphère inférieur.

réaliser une étude tectonique fouillée de la zone de la cluse. Seuls nous ont retenu les points qui nous semblaient essentiels pour tenter d'expliquer la position de la cluse à travers l'anticlinal.

On peut d'ores et déjà admettre que la structure a tenu un rôle essentiel dans le choix du site, surtout la présence d'un en-sellement au toit de l'imperméable; il faut noter aussi la modification de la direction de l'axe anticlinal aux abords de la cluse, ainsi que le relais axial dans le Dogger. Nous n'avons découvert aucun indice d'une faille majeure; en revanche, de nombreux accidents tectoniques locaux ont été mis en évidence; leur impact sur la détermination du site ne peut être exactement apprécié.

6. LA FISSURATION

En pays calcaire notamment, il existe un rapport étroit entre l'orientation des dépressions topographiques et les systèmes de fissuration. Nous allons voir ce qu'il en est dans la région du Pichoux.

6.1. DEFINITION

Nous entendons par fissure toute solution de continuité dans un banc ou un groupe de bancs. Ce sont: les diaclases, les plans de faille, les plans de tassement, les plans de couches; ils peuvent être ouverts ou colmatés, conducteurs d'eau ou secs; leur écartement peut varier du mm au m, et même plus.

Les fissures s'ordonnent généralement en systèmes, locaux ou régionaux (Kiraly 1968, Kiraly & Simeoni 1971). Ces systèmes découlent des contraintes tectoniques ayant affecté les roches. Dans le Jura, les auteurs cités reconnaissent 4 systèmes principaux de fissuration (fig. 6.I.):

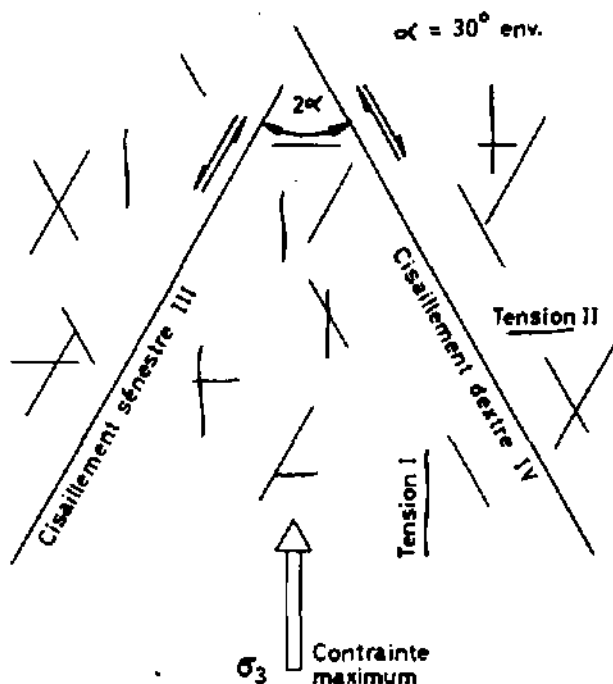


Fig. 6.I. Les principaux systèmes de fissuration (schéma tiré de Kiraly 1968)

- les fissures de tension, parallèles (tension I) ou perpendiculaires (tension II) à la contrainte maximum σ_3 (autrement dit, perpendiculaires ou parallèles au pli engendré par cette contrainte);
- les fissures de cisaillement sénestres (III) et dextres (IV), obliques par rapport aux structures; généralement, ces systèmes forment un angle de $- 30^\circ$ par rapport à la contrainte σ_3 .

Nous allons tenter de déterminer si l'orientation de la cluse peut être mise en relation avec ces systèmes de fissuration.

6.2. ORIENTATION GENERALE DE LA CLUSE

L'orientation générale de la cluse, mesurée entre les portails d'entrée S (pli de Semplain, chute de la Sorne, coord. 584.060/236.590) et de sortie N (pli de Raimeux, virage des Corbés, coord. 583.530/238.620) est N 14 W. On remarque donc d'emblée que la coupure d'érosion n'est pas parfaitement perpendiculaire au pli pris dans son ensemble, qui est orienté N 90 - N 100 à cet endroit.

La figure 6.II. montre un découpage en tronçons du cours actuel de la Sorne. Longueur et orientation de chaque tronçon sont données dans les tableaux 6.A et 6.B. On a ajouté sur la figure 6.II. les diagrammes stéréographiques des plans de couches franchis, pour divers tronçons caractéristiques. Ceux-ci sont:

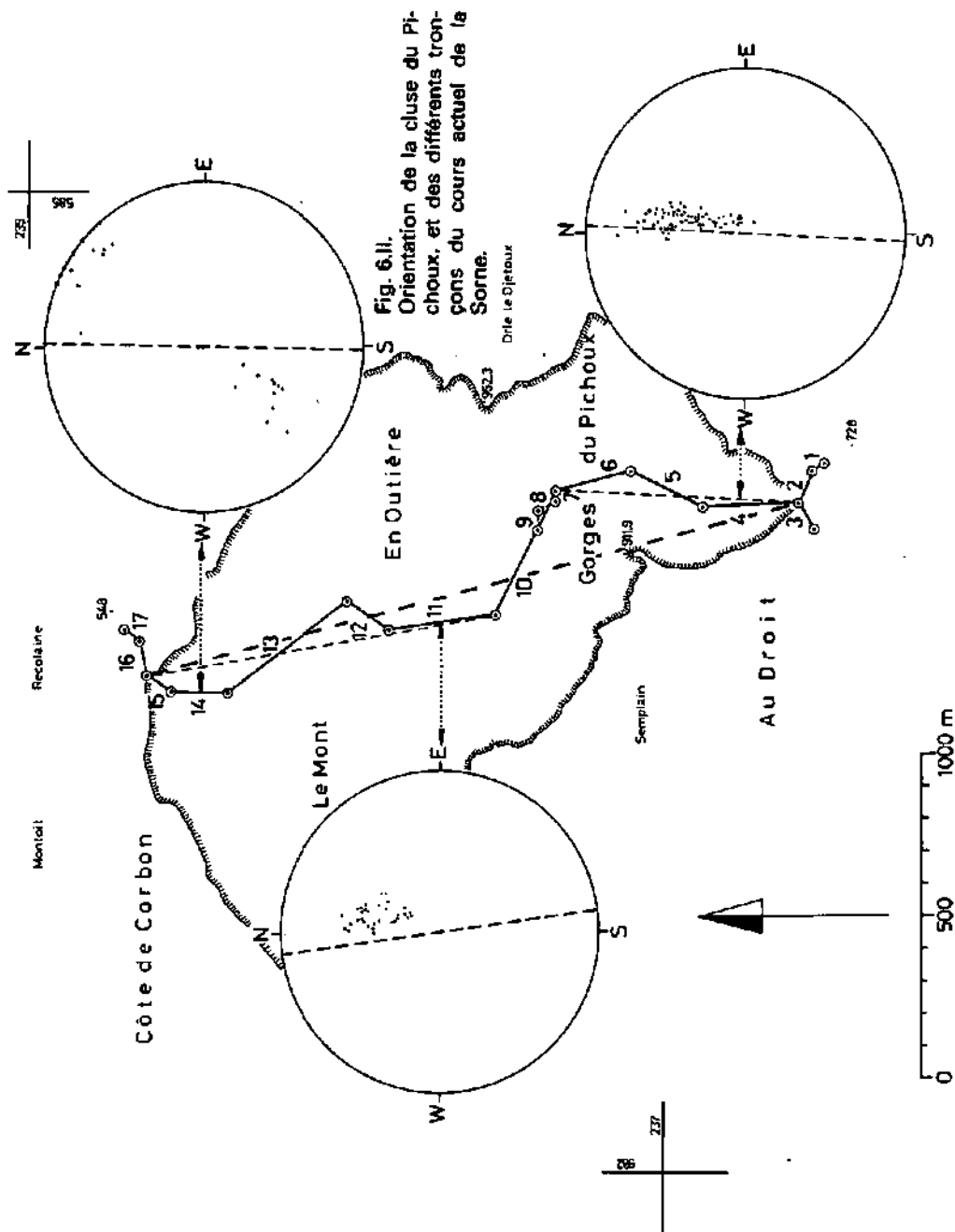
- les tronçons 4 - 6, à travers les couches de Malm du versant S de Semplain;
- le tronçon 11, qui franchit les couches du Dogger du flanc S de Raimeux;
- le tronçon 14, qui traverse la retombée N des couches de Malm de Raimeux.

Les tronçons 1 à 3, comme 16 et 17, sont situés hors des limites de la cluse; on n'a pas tenu compte de leur orientation, ni de leur longueur pour le diagramme de la fig. 6.III. Les tronçons 7 à 9 sont des divagations du cours d'eau dans les formations meubles du thalweg; ils ne sont pas significatifs; on n'a pris en compte que l'orientation générale du secteur complet 7 à 10: N 117, ainsi que sa longueur totale: 415 m.

La figure 6.III. est un diagramme représentant la longueur de chaque tronçon, par rapport à son orientation (azimut). On voit que plusieurs tronçons importants sont obliques par rapport à la direction moyenne N 14 W. L'hémicycle supérieur représente, en %, la longueur réelle de chaque tronçon, par rapport à la longueur cumulée de tous ces tronçons (= 100 %); l'hémicycle inférieur montre, en %, la longueur de chaque tronçon après rabattement sur la direction moyenne de la cluse

23 TABLEAU 6. A. Longueur et orientation des tronçons de rivière dans la cluse du Pichoux.

No d'ordre	Tronçons		Tronçons groupés		Cluse totale		Remarque
	Orient.	Longueur	Orient.	Longueur	Orient.	Longueur	
1	N 150	150 m					Tronçons extérieurs à la cluse propre- ment dite
2	N 113	105 m					
3	N 60,5	90 m					
4	N 178	305 m					Cluse de Semplain, partie supérieure; vallée en V
5	N 25,5	250 m	N 02,5	760 m			
6	N 166,5	240 m					
7	N 87	30 m					Cluse de Semplain, tronçon de liaison; forme en canyon
8	N 150	60 m	N 117	415 m	N 166	2109 m	
9	N 88	60 m					
10	N 117	280 m					Cluse de <u>Blanches Fon-</u> <u>taines</u> ; formé en cir- <u>que</u>
11	N 172,5	330 m					
12	N 33,5	160 m					
13	N 143,5	470 m	N 169,8	1110 m			Tronçons extérieurs à la cluse propr. dite.
14	N 01	175 m					
15	N 35	90 m					
16	N 79	105 m					
17	N 37	60 m					



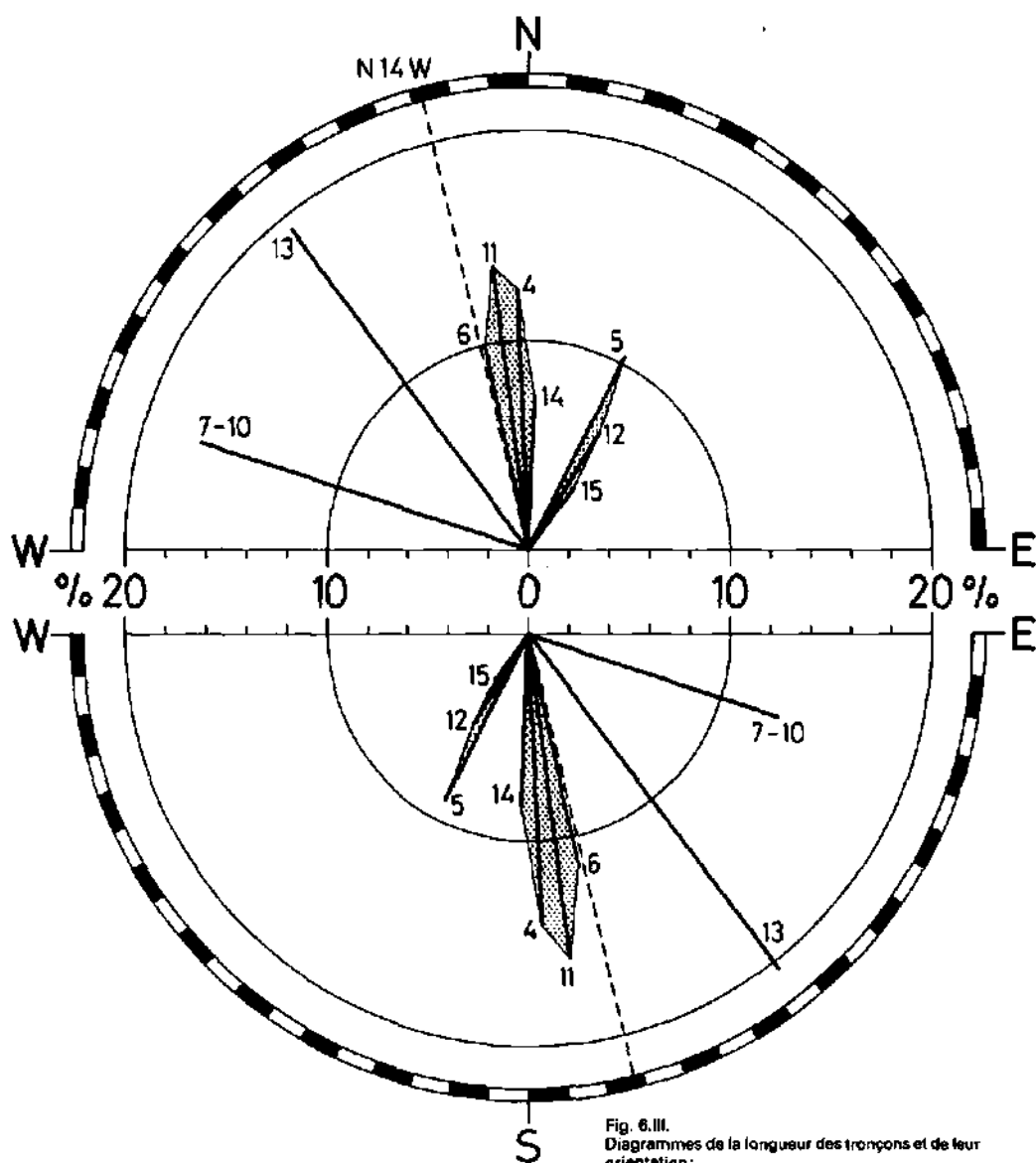


Fig. 6.III.
Diagrammes de la longueur des tronçons et de leur orientation:
— hémicycle supérieur: longueur réelle de chaque tronçon
— hémicycle inférieur: longueurs rabattues
Voir explications dans le texte.

TABLEAU 6 B : Comparaison des tronçons, avant et après rabattement sur la direction moyenne de la cluse du Pichoux.

No	Tronçons non rabattus			Tronçons rabattus		
	Orient.	Longueur	%	Orient.	Longueur	%
4	N 178	305 m	12,5		297 m	14,1
5	N 25,5	250 m	10,3		192 m	9,05
6	N 166,5	240 m	9,9		240 m	11,50
7-10	N 117,5	415 m	17,0		273 m	13,05
11	N 172,5	330 m	13,6	N 166	330 m	15,80
12	N 33,5	160 m	6,6		110 m	5,10
13	N 143,5	470 m	19,3		434 m	20,40
14	N 01	175 m	7,2		172 m	8,20
15	N 35	90 m	3,7		61 m	2,80
Total		2435 m	100 %		2109 m	100 %

(= 100 %): en ce cas, les tronçons orientés de N 05 E à N 15 W voient leur "poids" statistique augmenter nettement au détriment des tronçons les plus obliques (tronçon 7 - 10, p. ex.).

Descendons maintenant d'un cran dans l'échelle des observations pour nous intéresser à quelques tronçons ou secteurs caractéristiques.

6.3. ORIENTATION PAR SECTEUR

Les tronçons 4 à 15 ont été regroupés en 3 secteurs principaux:

- tronçons 4 à 6 : partie amont de la cluse de Semplain;
- tronçons 7 à 10: tronçon de liaison, appartenant encore à la cluse de Semplain;
- tronçons 11 à 15: cluse de Blanches Fontaines.

Nous allons étudier ci-dessous l'orientation de ces différents secteurs. Des mesures tectoniques (plans de couches et de fissures) effectuées sur les tronçons qui s'y prêtaient, constituent la base de cette étude.

6.3.1. Cluse de Semplain: orientation des tronçons amont.

Les tronçons 4 à 6 ont une orientation moyenne de N 2,5 E. La coupure est donc pratiquement perpendiculaire au pli de Semplain, orienté rappelons-le assez exactement W - E. On pourrait donc penser que l'érosion a mis à profit le système de fissuration perpendiculaire à l'axe du pli (tension I). Selon Kiraly et Simeoni (1971) en effet: "... dans la zone de "décompression" (près de la surface topographique), les fissures de tension s'ouvrent beaucoup plus facilement que les fissures de cisaillement".

Les diagrammes stéréographiques de la figure 6.IV. montrent:

- en a (couches non rabattues à l'horizontale), les pôles des fissures se répartissent de façon très dispersée et sont difficiles à regrouper en concentrations caractéristiques;
- en b (après rabattement des couches à l'horizontale), on peut facilement définir trois groupes bien distincts:
 - tension I, peu représentées;
 - cisaillement sénestre (III), les plus fréquentes et les mieux regroupées (toutes assez proches de la verticale);
 - cisaillement dextre (IV), moins fréquentes que III, ayant une plus grande variation de pendage de part et d'autre de la verticale.

L'orientation moyenne du secteur supérieur de la cluse de Semplain diverge peu (11° environ en direction de l'E) de la bissectrice des 2 systèmes de cisaillement; ceux-ci forment entre eux un angle de 72° . Cette bissectrice, quant à elle, coïncide à peu près avec l'orientation moyenne du système I (tension parallèle à la compression).

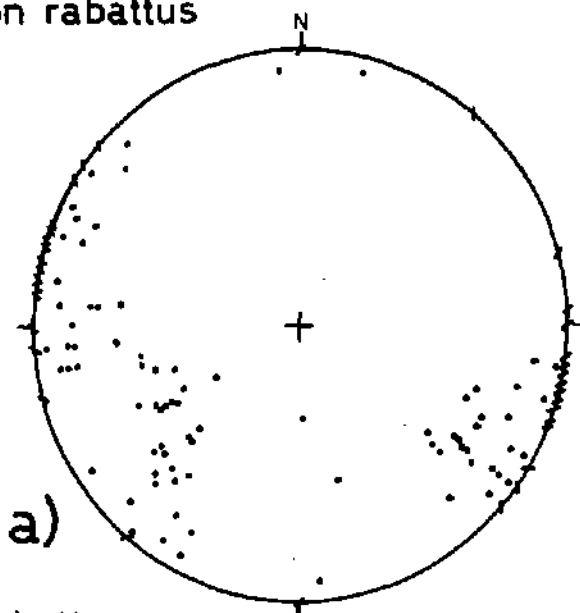
L'orientation de ce secteur de la cluse paraît donc dépendre plus de l'interférence des deux systèmes de cisaillement, que de l'existence d'un système de tension I, moins bien développé que les deux autres, et surtout moins ouvert, comme le montrent les observations de terrain.

En principe, la contrainte maximum σ_3 devrait être axée selon la bissectrice des deux systèmes de cisaillement, soit N 170 environ; de ce fait, l'anticlinal de Semplain devrait être orienté N 80 E environ. Sa direction réelle (N 90 E) diffère donc de 10° par rapport au cas théorique.

6.3.2. Orientation de la cluse de Blanches Fontaines.

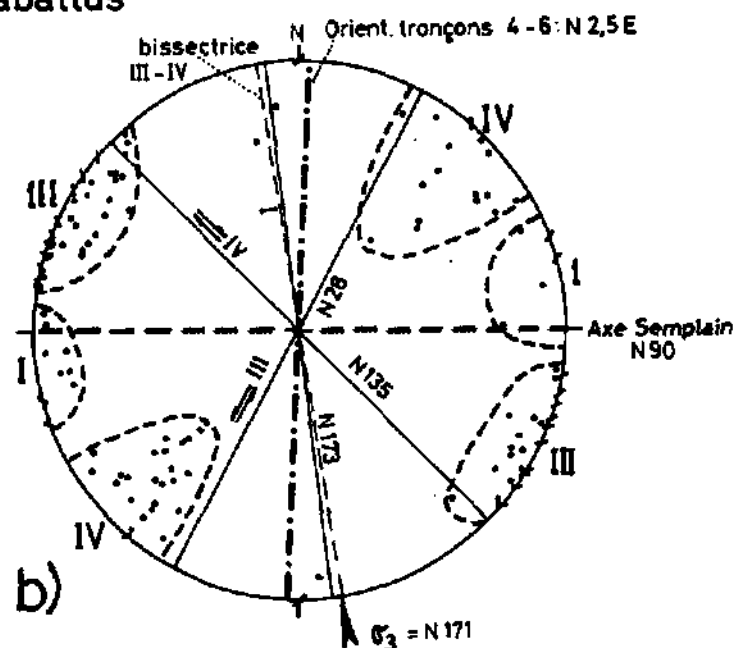
La cluse de Blanches Fontaines (tronçons 11 à 15) a une toute autre allure. Son orientation moyenne est de $10,2^\circ$ à l'W. Or, nous avons vu que l'axe de l'enveloppe du pli est de N 92 E à cet endroit; l'obliquité est donc nette (près de 13°); elle est encore plus marquée si l'on considère l'allure de l'axe du Dogger (cf. 5.3.1), qui est dirigé N 111 E; la diffé-

Non rabattus



a)

Rabattus



b)

Fig. 6.IV. Orientation du tronçon 4—6 (Malm supérieur), par rapport à l'orientation des principaux systèmes de fissuration. Diagramme de Wulff, hémisphère Inférieur; pôles non rabattus (a) et rabattus à l'horizontale (b). Les plans de couches ne figurent pas sur le diagramme a).

rence est alors de plus de 30° .

Le tronçon 11 franchit précisément le Dogger du flanc S; dans cette zone, les fissures de tension I (fig. 6.V. a et b) semblent prédominer nettement. Cependant, l'orientation du tronçon diverge de plus de 25° , par rapport à l'orientation du plan moyen de ces fissures; d'autre part, aucun système de fissures important ne semble jalonner la direction du tronçon 11; son orientation reste donc inexplicable par la fissuration existante.

Quant au tronçon 14. (retombée N des couches de Malm, fig. 6.VI.), il nous montre une image à peu près semblable à celle des tronçons amont de Semplain (6.3.1.). Les systèmes sénestre et dextre sont à nouveau prépondérants; le système de tension I est pratiquement inexistant. L'orientation du tronçon diverge de 10 à 12° par rapport à la bissectrice de l'angle formé par les deux systèmes; ici cependant, la direction a plutôt tendance à s'aligner sur le système cisailant dextre.

6.3.3. Orientation du tronçon de liaison.

Les cluses amont (Semplain) et aval (Blanches Fontaines) sont reliées entre elles par un tronçon de liaison (7 - 10), d'orientation totalement aberrante; celui-ci est creusé entièrement dans des couches subhorizontales. Nous allons maintenant chercher à expliquer ce tronçon et son orientation.

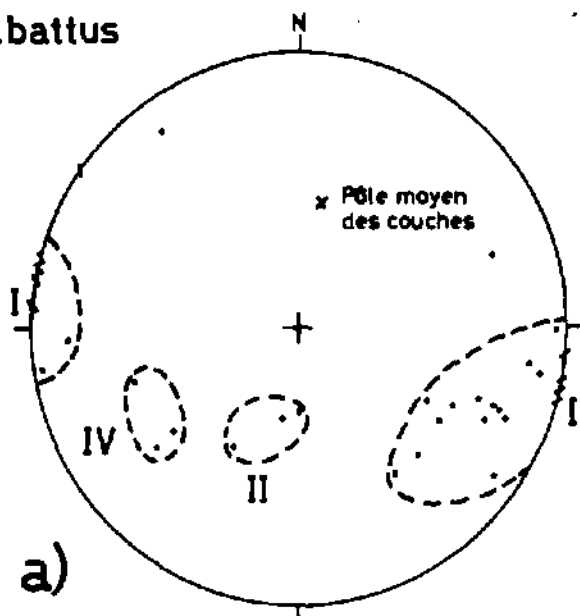
Pas besoin ici de procéder au rabattement des couches et de leurs systèmes de fissuration, puisque nous nous trouvons en zone tabulaire (fig. 6.VII.). En prenant toujours comme référence un pli axé N - E, on constate que:

- l'orientation du tronçon 7 - 10 (N 117 E) est axée exactement sur la bissectrice des deux systèmes: tension II - cisaillement dextre IV;
- comme sur le tronçon 4 à 6, les systèmes de tension I et de cisaillement sénestre III sont toujours bien représentés; l'orientation de leurs plans moyens respectifs s'est toutefois rapprochée; en effet, si le plan moyen de tension I reste orienté N 7 à N 8 W, le système de cisaillement sénestre III passe de N 28 E à N 19 E; sur le diagramme, les deux concentrations de pôles se rapprochent et se confondent presque. Cette "mise en commun" semble cependant n'avoir aucun effet sur l'orientation de ce tronçon;
- la bissectrice de l'angle formé par les deux systèmes cisailants (égal ici à 60°), est orientée N 170 E; ceci confirme ce que nous avons constaté au portail S (6.5.3.), à savoir que la contrainte maximum σ_3 est bien orientée N 170 E pour le pli de Semplain.

6.3.4. Conclusion.

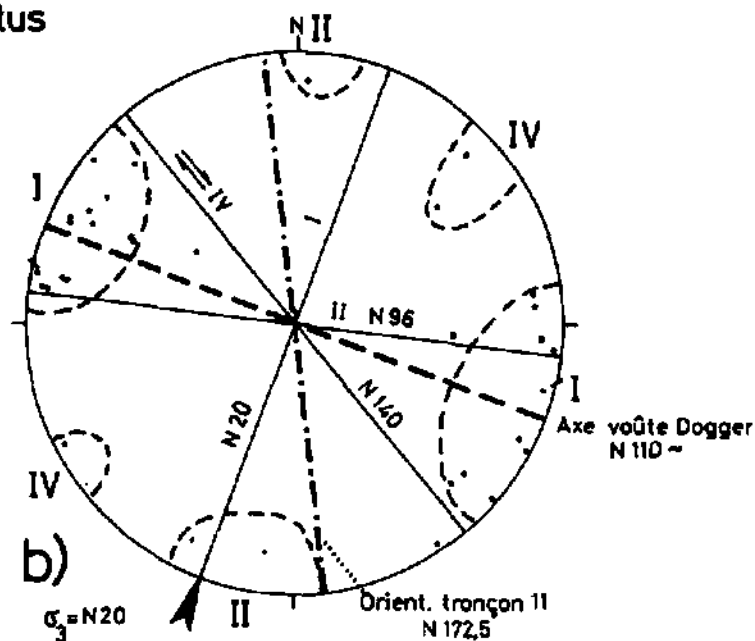
En résumé, on se trouve en présence de deux cluses distinctes:

Non rabattus



a)

Rabattus



b)

Fig. 6.V. Orientation du tronçon 11 (Dogger), par rapport à l'orientation des principaux systèmes de fissuration. Diagramme de Wulff, hémisphère inférieur; pôles non rabattus (a) et rabattus à l'horizontale (b).

Tronçon 14 (rabattu)

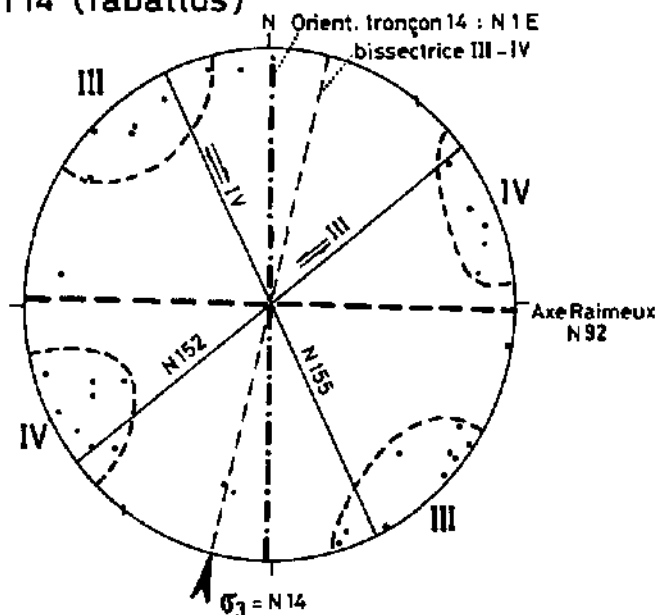


Fig. 6.VI. Orientation du tronçon 14 (Malm supérieur) par rapport à l'orientation des principaux systèmes de fissuration. Diagramme de Wulff, hémisphère inférieur, pôles rabattus à l'horizontale.

Tronçons 7-10 (liaison)

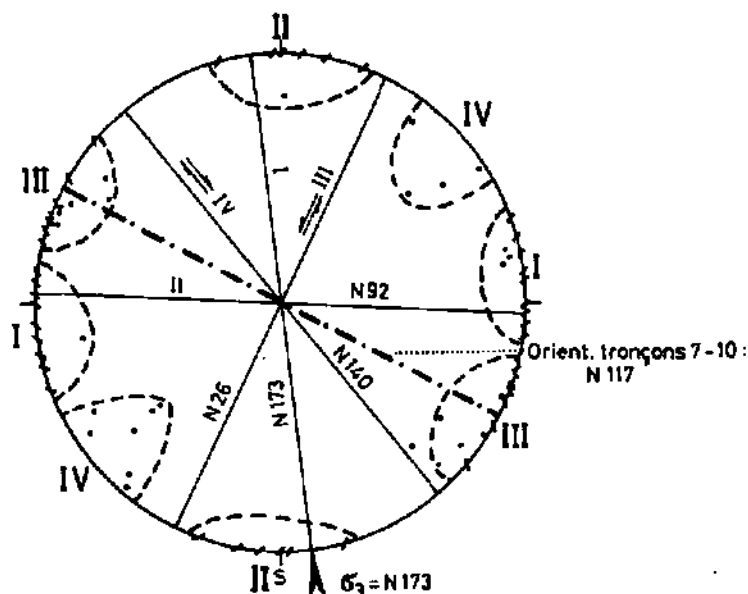


Fig. 6.VII. Orientation du tronçon de liaison (7-10) par rapport à l'orientation des principaux systèmes de fissuration. Diagramme de Wulff, hémisphère inférieur.

- la cluse de Semplain, d'orientation quasi perpendiculaire à l'axe du pli;
- la cluse de Blanches Fontaines, orientée obliquement par rapport à l'axe anticlinal.

Ces orientations semblent alignées, au moins en ce qui concerne le Malm, sur la bissectrice des systèmes de fissuration III et IV (cisaillement).

Le tronçon qui lie ces deux cluses est orienté selon la bissectrice des deux systèmes: tension II - cisaillement dextre IV.

6.4. MENSURATION SYSTEMATIQUE DE LA FISSURATION

Jusqu'à présent, nous avons procédé à une analyse qualitative de la fissuration. L. Kiraly (1969) a développé une méthode originale d'analyse statistique quantitative de la fissuration. Nous avons appliqué cette méthode avec plus ou moins de succès dans le Pichoux.

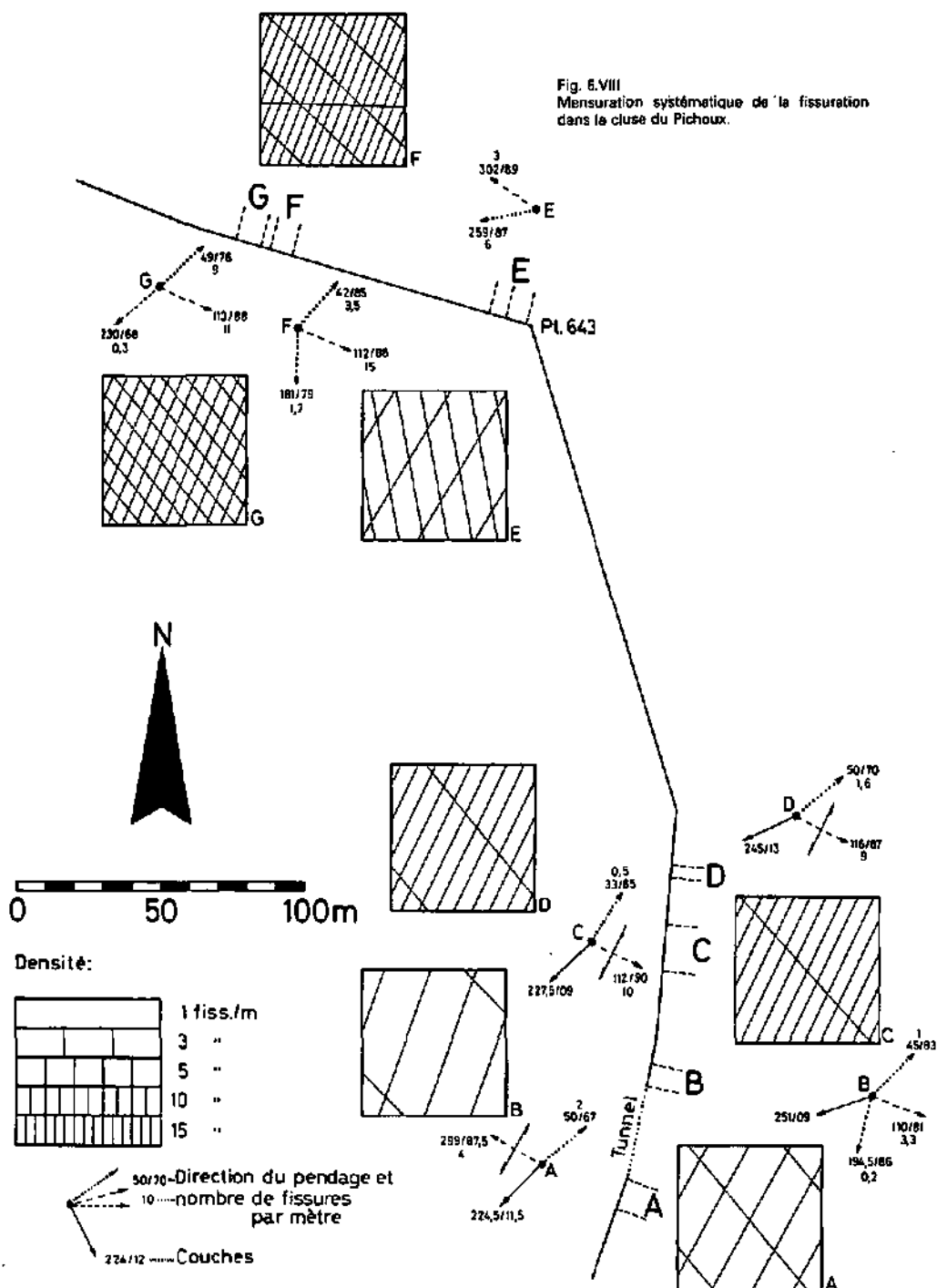
6.4.1. Fissuration à la jonction: Semplain amont - tronçon de liaison.

Nous avons cherché à définir quantitativement l'évolution de la fissuration, dans la région de jonction du secteur supérieur de Semplain (4-6) avec le tronçon de liaison (7-10, fig. 6.II). Il s'agissait de déterminer si le brusque coude de la vallée à cet endroit peut être expliqué par une modification de la fissuration (orientation, densité).

Pour ce faire, des stations de mesures ont été choisies le long de la route cantonale, près du tunnel (coord. 584.075/236.980) et en aval du point 543, dans la région du coude de la vallée. On remarque que:

- le groupe de stations du tunnel (stations A à D, fig. 6.VIII) montre une nette prédominance du système orienté N 20 - 30 E (cisaillement sénestre, entre 3 et 10 fissures par m); le système N 130 - 140 E (cisaillement dextre) n'est que faiblement représenté (0,5 à 2 fiss./m). Il en résulte que l'orientation de la vallée à cet endroit (tronçon 5 = N 25,5 E) est conditionnée très exactement par l'orientation du système de fissuration le plus dense;
- les stations aval (E, mais surtout F et G) révèlent une augmentation importante du système N 130 - 140 (4-9 fissures par m), sans que pour autant le système N 20 - 30 (10 à 15 fiss./m) diminue; on voit d'autre part apparaître en F un système de fissuration E - W (tension II, selon notre schéma), peu fréquent. Ces deux facteurs nouveaux semblent conditionner l'orientation du tronçon de raccord. Ainsi est confirmée l'appréciation qualitative que nous avons faite plus haut (6.3.3.).

Fig. 6.VIII
Mensuration systématique de la fissuration
dans le cluse du Pichoux.



Mentionnons enfin que des traces de mouvements, à composante séneestre subhorizontale, s'impriment sur les plans N 20 - N 30; ceci confirme que nous avons bien affaire au système de cisaillement séneestre (cf. 6.3.1.). Ces traces de mouvement sont à peu près les seules que nous ayons constatées dans la cluse.

En résumé, on peut dire qu'il existe une relation entre l'orientation des systèmes existants et leur densité d'une part, et l'orientation des tronçons 5 à 10 d'autre part; le changement de direction (coude de la vallée) s'expliquerait surtout par l'augmentation de densité du système de cisaillement dextre (N 130 - N 140).

6.4.2. Position de la cluse et densité de la fissuration.

Nous avons tenté de mettre en évidence une augmentation statistique de la densité des fissures dans la zone de la cluse. Pour cela, plusieurs stations de mesures ont été choisies sur les flancs de l'anticlinal, de part et d'autre de la cluse. Les résultats obtenus n'ont cependant pas répondu à notre attente; l'extrême variabilité de la fissuration (d'un banc à un autre, ou d'un affleurement à un autre tout proche) rendait illusoire un choix réellement objectif des affleurements à prendre en considération.

De ce fait, il n'a pas été possible d'apprécier objectivement une éventuelle variation de la densité de fissuration aux abords de la cluse. Ce problème reste posé.

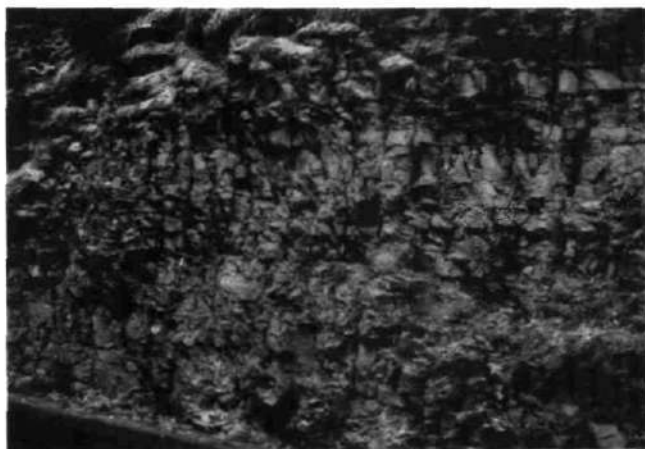


Fig. 6.IX. Fissuration dans le Rauracien, juste en aval de la station de mesure G (fig. 6.VIII). Couches subhorizontales, roche fortement délitée.

6.5. PLANS DE TASSEMENT

L'approfondissement brutal du canyon supérieur, par l'érosion, déséquilibre les versants rocheux. Ceux-ci réagissent en se tassant, par pans entiers, vers le vide ainsi créé. Le jeu de ces "failles" se marque par des décalages de niveaux-repères, de l'ordre de quelques cm à près d'un mètre. Ces tassements se produisent selon les systèmes de fissuration existants; nous n'avons pas constaté de systèmes nouveaux induits par décharge. Le système de fissures employé varie selon le versant envisagé (fig. 6.X). Nous avons surtout pu vérifier cela à deux ou trois endroits bien déterminés, dans la cluse de Semplain.

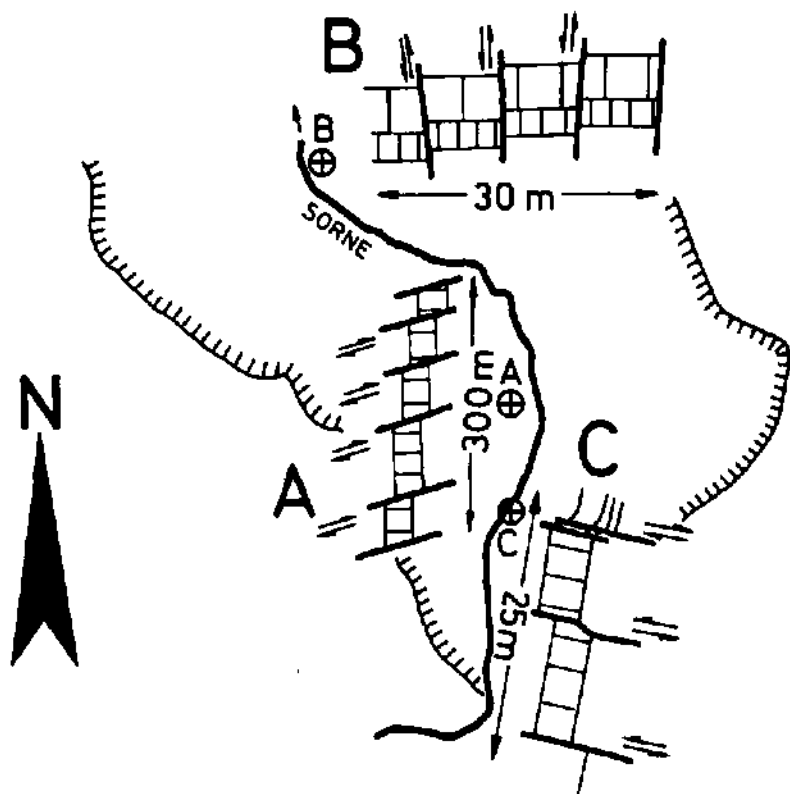


Fig. 6.X. Position (cercle avec croix) de quelques tassements dans le Rauracien de la cluse de Semplain; en cartouches, coupes schématisiques des trois zones en tassement A, B et C (cf 6.5.).

6.5.1. Rive gauche.

Il s'agit à nouveau du tronçon de route situé entre le tunnel et le pt 643 (cf. 6.4.1.). Le tassement se fait le long du système N 130 - N 140. C'est le compartiment NE qui descend par rapport au compartiment SW. On peut déterminer 6 à 8 panneaux, se succédant en marches d'escaliers descendant du S au N. Certains de ces plans de tassement, particulièrement bien marqués dans le terrain, déterminent des anfractuosités parfois énormes, où les suintements sont nombreux (A, fig. 6.X.).

6.5.2. Rive droite.

La falaise subhorizontale du Rauracien est affectée de la même manière, juste avant son redressement spectaculaire en face des Blanches Fontaines (bord du sentier, coord. 583.710/237.570). Le système N 20 - N 30 fait ici office de plan de tassement, et c'est le compartiment W qui s'effondre par rapport au compartiment E (B, fig. 6.X.).

Un phénomène à peu près semblable se produit en amont de ce site, juste au-dessous du tunnel de la route, toujours sur rive droite, à l'endroit où la barre rauracienne passe de l'horizontalité à un pendage sud assez prononcé (flexure). Il y a ici également tassement de tranches rocheuses l'une par rapport à l'autre, mais cette fois comme des touches de piano (sens du jeu différents selon les compartiments). C'est à nouveau le système orienté N 20 env. qui joue le rôle de plan de tassement (C, fig. 6.X.).

On peut penser que tous ces tassements sont récents; ils pourraient être une réponse à la disparition, par affouillement, des marnes oxfordiennes au pied des falaises.

6.5.3. Rebord de la cluse.

En parcourant le pied des falaises calcaires, que ce soit dans le canyon ou dans le cirque lui-même, on voit des paquets de roches tassées, de toutes dimensions (cf. carte géologique, pl. II). Ces tassements se produisent également le long des systèmes de cassures existants; le système local subparallèle à la pente est généralement sollicité.

6.6. CONCLUSIONS

Orientation des fissures et de la cluse sont en relation étroite: la fissuration a bel et bien fourni la trame sur laquelle s'est imprimée la cluse.

Certains indices laissent penser que les systèmes de fissuration ont été déterminés très tôt, aux tout premiers soubresauts du plissement: les pôles rabattus des fissures s'orga-

nissent en systèmes cohérents, subverticaux. Les agents de l'érosion, responsables du façonnement ultérieur de la cluse, ont pu mettre très rapidement à profit ces zones de discontinuité de la roche.

On ne peut rien dire concernant l'intensité de la fracturation dans la zone de cluse, lorsque celle-ci n'existait pas: était-elle plus intense qu'ailleurs dans l'anticlinal ? On ne peut rien vérifier "dans le vide". Nous devons cependant admettre que la fracturation, alliée à d'autres facteurs, a dû jouer un rôle prépondérant dans l'établissement d'une vallée transversale à cet endroit.

MORPHOLOGIE GÉNÉRALE

Plusieurs traits morphologiques caractéristiques de la cluse du Pichoux sont conditionnés par la structure. Nous examinerons successivement:

- le profil longitudinal de la Sorne;
- le plongement axial et son incidence sur la forme générale de la cluse;
- les versants instables

7.1. PROFIL LONGITUDINAL (fig. 7.I.)

Le profil longitudinal de la Sorne n'est pas équilibré dans la cluse du Pichoux. Il présente deux ressauts caractéristiques et bien marqués; le premier, complexe, entre le portail d'entrée supérieur et la jonction des tronçons 4 et 5; le second sur le tronçon 11 (cf. fig. 6.II.).

7.1.1. Ressaut supérieur.

La rivière quitte le synclinal du Petit Val pour aborder plus ou moins perpendiculairement les couches redressées (50 - 60°) du Malm supérieur; très forte au passage des bancs résistants du Kimméridgien, la pente s'atténue quelque peu (alternances marnes - calcaires Kim. inf. - Séquanien sup.), pour s'accroître à nouveau lors du franchissement de la barre rauracienne.

A la jonction 4 - 5, la pente diminue, et ceci pour deux raisons:

- les couches s'aplanissent;
- la rivière coule sur les marnes oxfordiennes.

Le tronçon déséquilibré supérieur trouve donc son origine à la fois dans la structure (flanc redressé) et la stratigraphie.

7.1.2. Ressaut inférieur.

Ce nouveau front d'érosion régressive, beaucoup moins prononcé que le précédent, correspond très exactement au franchissement par la rivière du versant S du pli de Raimeux (redressement brusque des couches). A nouveau ici, la structure est responsable de ce tronçon déséquilibré.

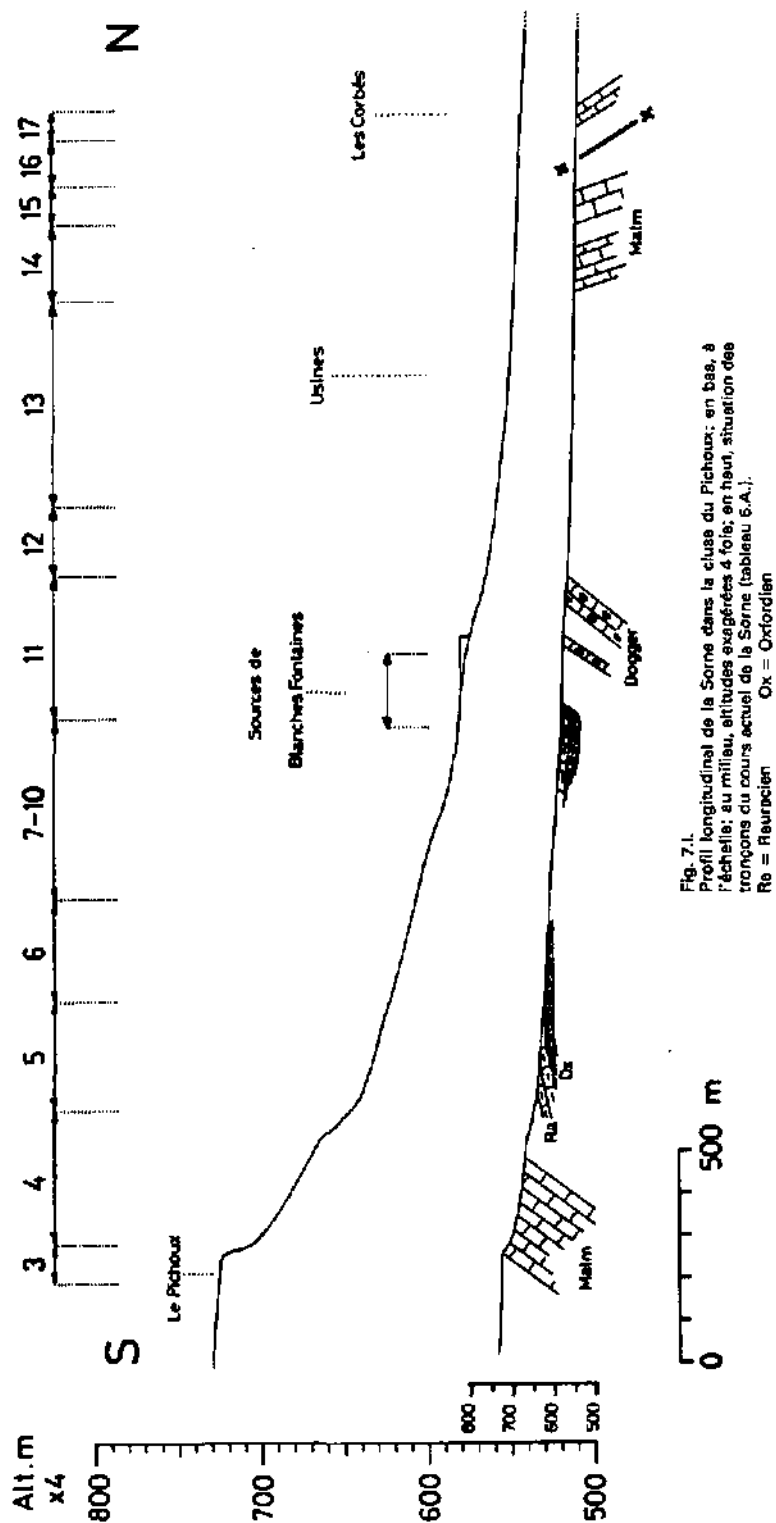


Fig. 7.1.
 Profil longitudinal de la Sorne dans la cluse du Pichoux; en bas, à l'échelle; au milieu, altitudes exagérées 4 fois, en haut, situation des tronçons du cours actuel de la Sorne (tableau 6.A.).
 Re = Reuracien Ox = Oxfordien

Plus loin (tronçons 12 et ss), la rivière paraît équilibrée. Même au portail N (Malm), la pente est faible et continue. Le thalweg semble d'ailleurs colmaté par des alluvions; à aucun moment on ne voit d'affleurement rocheux au fond du lit.

7.1.3. Commentaires.

L'opposition entre les deux cluses de Semplain et de Blanches Fontaines (cf. aussi: 5.1., 5.2., 5.3., 6.3.) se marque une nouvelle fois de façon particulièrement nette.

La cluse de Semplain, au profil très nettement déséquilibré, contraste étonnamment avec la cluse de Blanches Fontaines équilibrée. A première vue, on pourrait en déduire que la cluse à travers Rameux est ancienne, et que celle tronçonnant Semplain est récente.

Ceci pose immédiatement plusieurs questions, ayant trait notamment à l'âge de chacune des cluses, ainsi qu'aux mécanismes d'érosion mis en oeuvre, qui pourraient être différents en chaque cas. Nous reviendrons plus loin sur ce problème (cf. chap. 13).

On discerne aussi, et de mieux en mieux, l'importance du tronçon de jonction des deux cluses, aboutissant à un site dont nous parlerons longuement plus loin: celui où jaillissent les sources de Blanches Fontaines.

7.2. DISYMETRIE ET PLONGEMENT AXIAL

Ici encore, la comparaison des deux parties de cluse révèle certaines dissemblances.

7.2.1. Cluse de Semplain.

A partir du tronçon 5 et jusqu'à la fin du tronçon 10, la cluse supérieure ressemble à un canyon, forme caractéristique due à l'enfoncement d'un cours d'eau dans des structures tabulaires (comme le Doubs, ou la Suze au Taubenloch).

Actuellement, la rivière coule sur l'Oxfordien, qu'on voit affleurer en quelques endroits, ou sur des éboulis et alluvions peu épais. Les falaises rauraciennes des deux rives, encore très proches l'une de l'autre, résultent d'une érosion linéaire récente; elles commencent leur recul respectif, en obéissant strictement aux lois de désagrégation des bancs calcaires (érosion frontale - Aubert 1969). Les barres séquanienues et kimméridgiennes sus-jacentes sont d'autant plus distantes les unes des autres qu'elles ont été dissociées plus anciennement.

W

Corbon

Mont Dedos

E

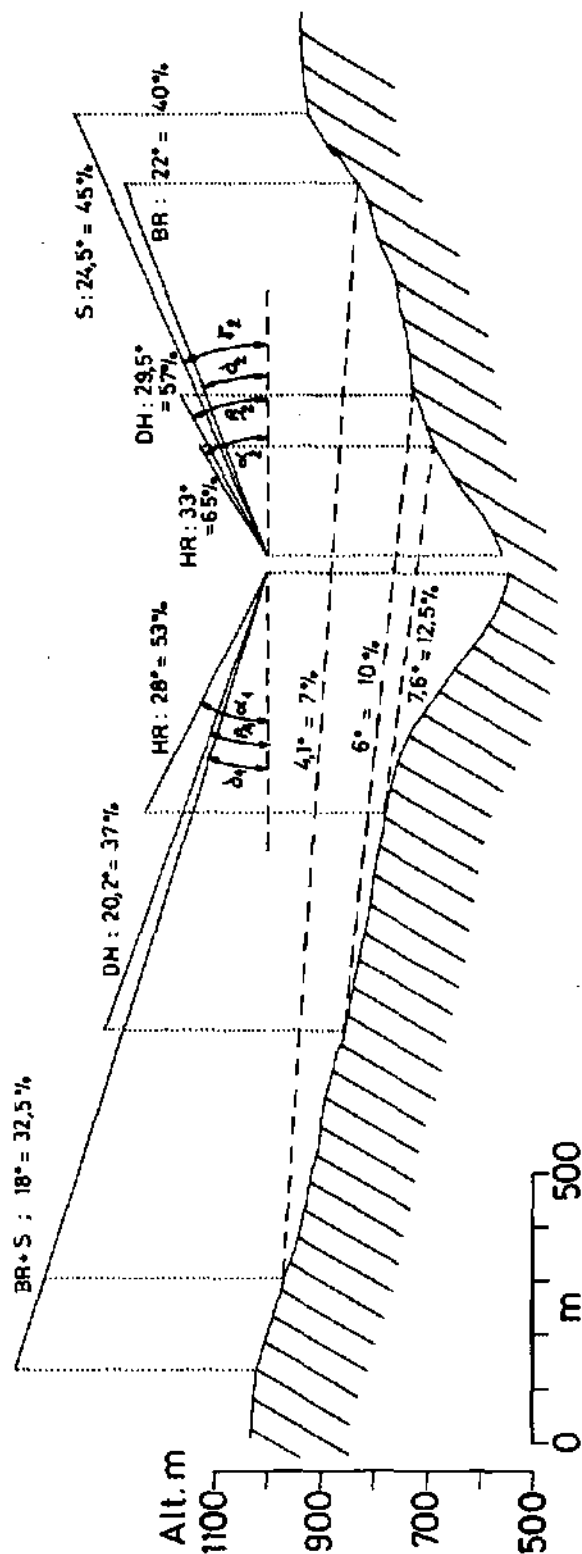


Fig. 7.11. Disymétrie des versants occidental et oriental dans le cirque de Blanches Fontaines (angles d'ouverture).

S = sommet cirque
BR = Base Rauracien
DN = Dalle Nacrée
HR = Hauptrogenstein

Les versants E et W du canyon ne sont pas symétriques; l'un présente une pente plus abrupte que l'autre (fig. 7.III). Cette dissymétrie est essentiellement due à l'existence d'un plongement axial vers l'W. Le versant contraire au plongement (versant W) est le plus raide; l'érosion frontale des bancs y semble freinée, inhibée; ceci provient principalement de la tendance des eaux d'infiltration à s'écouler selon le plongement, plutôt que de suinter au front des bancs; dissolution et gélivation s'en trouvent ralentis.

Le versant conforme au plongement paraît au contraire évoluer plus rapidement, pour des raisons inverses: les suintements et sources y sont nombreux (cf. 8.2.), favorisant la gélivation et la dissolution; les versants reculent plus vite. D'autre part, grâce au plongement vers la cluse, marnes et débris d'altération peuvent facilement glisser; l'évacuation des débris est donc plus rapide sur ce versant.

Enfin la rivière a plutôt tendance à déraiper selon le plongement; elle est naturellement contrainte à affouiller plus activement le pied du versant contraire au plongement; la situation est équivalente à celle de la rive externe d'un méandre.

7.2.2. Cluse de Blanches Fontaines.

Elle possède une forme de cirque rocheux, d'aspect plus classique. Cette boutonnière présente cependant certaines particularités, dont est responsable la structure.

Le changement de direction de l'axe anticlinal, dans la cluse même, provoque une modification de la forme du cirque; au lieu d'être parfaitement elliptique (comme celui d'Undervalier, ou de Soyhières-Nord), il est plutôt hémicyclique, sa base (diamètre du demi-cercle) se confondant avec le flanc S très redressé du pli principal (cf. schéma, fig. 5. II.).

Le plongement axial vers l'E se marque à nouveau par une dissymétrie des versants (fig. 7.II.). Sur rive droite (Le Voutier), la pente moyenne est de 45 %, alors qu'elle est de 32,5 % entre l'Uaine de Blanches Fontaines et Corbon, à l'W. Le versant conforme au plongement est ici également le moins raide, pour les raisons que nous venons d'invoquer. Cette observation peut se vérifier, à plus petite échelle, entre la rivière et le sommet oriental et occidental des voûtes internes de Dalle Nacrée et de Hauptrogenstein.

7.3. VERSANTS INSTABLES

Notre cluse présente plusieurs exemples de portions de versants instables, où des mouvements de masse se sont produits, se produisent actuellement, ou sont en préparation.

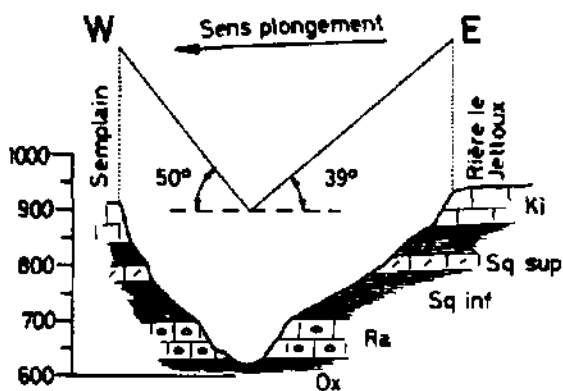


Fig. 7.III Profil transversal dans le canyon; noter la dissymétrie des versants, due au plongement axial

Les causes de l'instabilité de ces versants sont essentiellement:

- un appel au vide, entretenu par l'approfondissement rapide de la cluse (cf. 13.1.3.); les phénomènes de tassement au front des falaises calcaires (bord du canyon, rebord des lèvres du cirque, cf. 6.5.) sont de ce type;
- une érosion linéaire importante, favorisant une évacuation rapide des résidus d'altération et un affouillement continu au pied des versants (cf éboulement des Blanches Fontaines, 8.3.1. ou celui des Corbés 8.5.1.);
- l'alternance marnes - calcaires, les premières servant de plan de glissement aux seconds;
- enfin, la structure, qui souvent favorise les mouvements de masse; les mouvements décrits ci-dessous appartiennent à cette catégorie.

7.3.1. L'éboulement de l'Usine. (coord. 583.350/238.120)

Cet écroulement récent (printemps 1971), s'est produit au cours des travaux de construction d'un nouveau chemin forestier, sur le versant W du cirque principal, dans le Dogger (Kellerhals, inédit).

Une importante masse rocheuse de Hauptrogenstein (5 ± 10 m de puissance, reposant sur les marnes à Homomya (6 ± 3 m), et déséquilibrée par l'entaille du pied de la falaise lors des travaux, s'est éboulée au-dessus de l'Usine de Blanches Fontaines. Le niveau marneux a fait office de plan de glissement (fig. 7.IV.).

La niche d'arrachement est située à l'endroit où le plongement des couches vers le NE s'accroît brusquement, passant de $25 - 30^\circ$ à plus de $45 - 50^\circ$. Des diaclases béantes, très corrodées et concrétionnées, sont à l'origine de l'éboulement.



Fig. 7.IV. Niche d'arrachement (calcaire du Bathonien) de l'éboulement de l'Usine; au premier plan, les marnes à Homomya, qui ont servi de plan de glissement.

Structure et stratigraphie créant les conditions propices, c'est l'homme qui a déclenché prématurément le processus d'écroulement, qui tôt ou tard se serait produit. La masse écroulée, qui obstruait le passage, a été fracassée à coups de dynamite, et les débris déversés sur le versant. D'ores et déjà, des fissures assez larges, parfois même béantes (Grotte du Garde-Forrestier) apparaissent à l'amont de la niche, préparant ainsi l'écroulement de la tranche suivante.

7.3.2. L'éboulement du Mont (coord. 583.050/238.190)

Le tracé du nouveau chemin effleure, à l'altitude de 740 - 750 m, l'extrémité d'une masse déplacée de Dalle Nacrée de vastes dimensions (cf. carte géol., pl. II). Il s'agit fort probablement d'une dalle structurale, rattachée à l'origine à la falaise - mère, au sommet de la voûte interne actuelle (alt. 855 - 860 m environ), qui s'est détachée et a glissé sur les marnes calloviennes. Ce glissement s'est effectué exactement selon le plongement axial de la voûte interne, soit sur un plan incliné d'environ 16° vers l'E.

L'ensemble de la zone du Mont (pâturage en voie de reboisement) n'est d'ailleurs que glissements ou tassements. La masse éboulée de Dalle Nacrée est en effet investie de toutes parts par des masses glissées et tassées, en provenance des falaises de Malm. Des paquets d'éboulis de pente, parfois des tranches de falaises peu dérangées se sont tassées vers l'aval sur les marnes oxfordiennes qui ont tenu le rôle de plan de glissement. Ce mouvement général est également favorisé par la pente axiale, qui accélère le recul des versants et des falaises rocheuses; la "tête" du cirque mord largement en direction W (Corbon), accentuant la disymétrie du cirque. La jonction de la cluse avec la combe anticlinale de Rebévelier est sur le point de se réaliser.

7.3.3. Tassements du Voutier.

On observe également d'importants tassements et glissements au coeur du cirque oriental, entre le sommet de la voûte de Dalle Nacrée et la base du Rauracien. A nouveau, il s'agit de masses d'éboulis rauraciens en provenance des falaises en recul, qui se tassent vers l'aval sur les marnes oxfordiennes.

Ici comme sur le Mont (charnière occidentale), l'Oxfordien n'affleure nulle part; la base du Rauracien est également masquée par les masses énormes d'éboulis; on ne peut donc tracer de limites d'étage précises. On a cependant l'impression que les marnes sont particulièrement épaisses dans ces charnières (et surtout ici à l'E: plus de 100 m), par l'effet d'un bourrage tectonique, consécutif à la disharmonie des plongements du coffre et du coeur de l'anticlinal (cf.5.3.1.). L'épaisseur particulièrement importante des marnes favoriserait les tassements et glissements constatés.

8. HYDROGÉOLOGIE

La rivière qui traverse la cluse du Pichoux est donc la Sorne. Nous allons dire quelques mots de cette rivière et de son bassin d'alimentation. Cependant, elle ne représente pas le facteur primordial de façonnement de la cluse. D'autres facteurs hydrogéologiques interviennent puissamment; leur examen formera le corps de ce chapitre. Ceci va nous obliger à sortir de notre "trou", pour nous intéresser d'un peu plus près aux régions jouxtant le Pichoux, surtout celles situées à l'ouest.

8.1. BASSIN DE LA SORNE

8.1.1. La rivière et ses affluents.

La Sorne prend sa source en aval du seuil de Bellelay, près de la station d'épuration de la Maison de Santé (coord. 580.100/235.055). Elle coule en direction ENE sur quelques centaines de mètres, dans un thalweg de marnes tertiaires et de formations d'altération quaternaires imperméables. Puis elle s'infléchit vers le N pour entamer le versant calcaire sud de l'anticlinal Le Peuchapatte - Les Bois - Pâturatte - Prédame - Béroie, non loin de sa terminaison périclinale près de Châtelat. Elle y perd par infiltration une bonne partie de ses eaux, la totalité même en étiage (cf. 8.3.6.).

Reprenant contact avec le Tertiaire du synclinal, elle est réapprovisionnée en eau de drainage superficielle et reçoit de gauche un affluent, le ruisseau de la Draï, venant de Fornet, avant de mordre le versant S de l'anticlinal de Semplain et y couler sur 400 m environ en combe latérale (marnes à *Exogyra virgula* ?). Elle pénètre franchement dans la cluse par une chute d'une quinzaine de m (coord. 584.060/236.590).

Au pied de la chute, la Sorne reçoit un affluent venant de l'E, le ruisseau de Tchaibez. Celui-ci draine les versants tertiaires de la partie E du Petit Val, entre les Ecorcheresses et l'entrée de la cluse. Rarement, en période de crue ou de fonte des neiges, les eaux récoltées dans la combe anticlinale éventrant le Moron, au-dessus de Souboz - Ecorcheresses, s'échappent par des ruz à écoulement temporaire vers ce ruisseau, le gonflant énormément.

Durant sa traversée de la cluse, la Sorne reçoit les eaux de nombreuses et importantes sources, dont nous aurons l'occasion de parler plus loin.

8.1.2. Vallon de la Sorne: partie supérieure.

En amont du seuil de Bellelay, vers l'W, s'étend une vallée synclinale que Barsch (1968 a) appelle le bassin karstique (Karstwanne) de Bellelay. Un ruisseau s'y écoule, venant des

Genevez; ces eaux se dirigent vers le SE pour se perdre dans un ponor près de la Bottière, au lieu-dit La Rouge Eau (580. 720/233.460).

Avant d'être prises au piège dans le bassin fermé de Bellelay, et d'en être soutirées par voies souterraines, les eaux superficielles provenant de l'W devaient s'écouler vers le Petit Val inférieur, dans la région de l'actuelle Maison de Santé (Barsch 1968). Orographiquement, le bassin superficiel de la Sorne a donc été amputé de sa partie supérieure, par capture souterraine.

En fait, les eaux provenant des Genevez se retrouvent finalement dans la Sorne, puisque la résurgence des eaux de la Rouge Eau se trouve en plein centre du Pichoux, aux sources de Blanches Fontaines (cf. 8.3.3.).

8.1.3. Ruissellement superficiel.

Il est extrêmement rare que des eaux météoriques ruissellent des versants calcaires adjacents vers le synclinal, car le calcaire absorbe l'eau très facilement par ses diaclases (Monbaron 1973 a). On ne peut donc envisager, comme aire alimentaire de la Sorne en amont de la cluse, que la surface des affleurements tertiaires du Petit Val inférieur, et éventuellement les parties marneuses (Oxfordien) de la combe anticlinale du Moron. L'ensemble donne une superficie de 6,6 km² environ au bassin d'alimentation superficiel (cf. pl. V).

Compte tenu de la valeur des précipitations (1330 mm à la station de Bellelay) et de la moyenne de l'évapotranspiration admise pour cette partie du Jura (estimée à 40 % sur le Tertiaire), on peut calculer grossièrement le débit moyen annuel de la Sorne, à son entrée dans la cluse; il est de 150 - 170 l/sec., soit environ 10 m³/min. (appendice, chf. 24); le ruisseau de Tchaibez en fournit un peu plus de la moitié, le reste provient de l'W.

Cette valeur de débit est approximative et indicative et pallie le manque d'indications limnimétriques; elle correspond bien aux observations (Barsch 1969), et nous permettra plus loin de préciser les autres apports d'eaux, à l'intérieur même de la cluse du Pichoux.

8.2. SOURCES DE LA REGION DU PICHOUX

Les sources qui jaillissent dans la cluse du Pichoux et à ses abords sont nombreuses et importantes.

Les principales sont bien entendu des sources karstiques (exurgences et résurgences). Leur bassin alimentaire dépasse très largement les limites de la cluse. On trouve aussi des sources plus modestes: simples suintements, ruisselets sortant des é-

boulis, etc. Les volumes d'eau ainsi libérés sont peu importants et correspondent à un bassin-versant limité (talus d'éboulis, petite combe marnasse, plan de couche imperméable, fissure drainante, etc.).

La position des principales sources est indiquée sur la planche IV. Quelques paramètres physico-chimiques des plus caractéristiques figurent au tableau 8.B.

8.2.1. Les sources locales.

Les suintements et sources à faibles débits livrent des eaux ayant percolé à travers les éboulis de pente, qui couvrent tout ou partie des zones à substratum marneux (Oxfordien, Séquanien inférieur, etc.). Les principales sont:

- la source de la Dalle, en haut du canyon (584.065/236.710);
- les suintements et sources du Défilé (584.060/236.770);
- les sources encroûtantes de la combe séquanienne (584.020/236.835);
- etc.

Le pH de ces eaux est en moyenne plus basique que celui des eaux karstiques typiques (+0,4 à 0,6 unité de pH). En revanche, la dureté moyenne est semblable à celle des autres sources. On trouve souvent des amas de tufs calcaires à leur griffon; on leur doit la formation des bancs de brèches de pentes consolidées épars dans toute la cluse. Les mousses qu'on trouve en abondance dans ces endroits, prennent une part prépondérante dans l'édification de ces amas de tufs.

La plupart de ces suintements livrent des eaux locales, c'est-à-dire tombées sur le périmètre de la cluse elle-même. Ils sont nettement concentrés dans la partie S de la cluse (pli de Semplain); on peut le constater en hiver surtout, en localisant les amas de glaçons qui ornent les zones de suintement.

Ces sources et suintements ont une certaine importance dans le micro-façonnement des versants et falaises (gélivation, dissolution).

8.2.2. Les sources mixtes.

En étiage, elles sourdent des éboulis et peuvent être assimilées aux suintements décrits ci-dessus. En périodes pluvieuses en revanche, elles s'enflent et jaillissent de fissures karstiques situées au-dessus. Celles-ci représentent donc les exutoires de crue, ceux d'étiage étant couverts d'éboulis et inaccessibles à l'observation (schéma, fig. 8.1). Enfin, ces sources sont encroûtantes.

Ces eaux diffèrent des eaux karstiques normales par leurs pH plus basiques et leur dureté plus faible (tableau 8.B.).



Fig. 8.II. Site d'une source mixte, versant oriental du canyon (584,940/237,470).

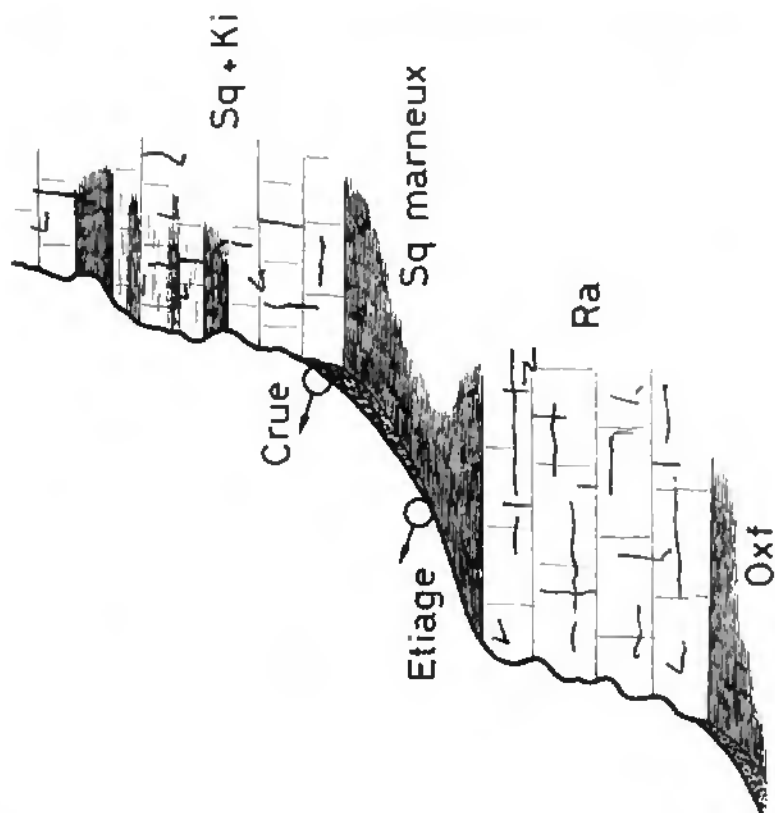


Fig. 8.I. Schéma situant les exutoires de crue et d'étiage des sources mixtes.

Ce type de sources est essentiellement cantonné dans le pli de Semplain, au pied de la barre calcaire horizontale du Séquanien supérieur, le Séquanien marneux fonctionnant comme niveau-barrage. Elles jaillissent surtout dans la gouttière synclinale, entre les deux plis. Les plus importantes sont situées sur la lèvre E, sous Rière le Jettoux (584/237) fig. 8.II.; d'autres jaillissent sur le versant W, en contrebas du lieu-dit la Prairie (583/237).

Leur position, nettement déterminée par la structure, permet de se faire une idée de leur bassin de réception karstique:

- sur le versant W, la zone Le Cerneux - La Prairie - Semplain;
- sur le versant E, la région Rière le Jettoux - Sur le Rochet.

Il s'agit donc essentiellement des affleurements de Malm sup. calcaire, formant synclinal entre les deux chaînons. Il est probable que la faille longitudinale du "genou" et les zones fissurées qui lui sont liées (cf. 5.5.2.) constituent un drain préférentiel pour l'eau, expliquant ainsi la position synclinale de ces sources.

Le mécanisme de fonctionnement "mixte" de ces sources a pu être mis en évidence avec certitude lors des inondations de juin 73 (cf. 8.7.). Le système karstique local s'est alors mis en charge, et des griffons très rarement actifs, placés juste au-dessus des zones de suintement habituelles, ont débité abondamment.

Le débit de ces sources varie énormément. Il peut passer en quelques heures de quelques dizaines à plusieurs milliers de l/min., preuve de leur caractère karstique. Le contrôle des débits et des divers paramètres de ces eaux est rendu difficile par leur situation mal accessible, entre deux falaises à pic.

En constatant que les altitudes des zones d'émergence sont à peu près semblables sur les deux lèvres (760 m à l'E, 730 m à l'W), on pourrait être tenté de penser à un ancien système de conduits karstiques, continus, orientés de l'E à l'W conformément au plongement de l'axe synclinal, et qui aurait été tranché par la cluse. A notre avis, il s'agit plutôt d'un niveau d'exurgence karstique local, induit par les marnes du Séquanien inférieur formant gouttière. Il n'a jamais drainé que des eaux locales. On ne peut l'envisager comme héritage d'un ancien niveau de base karstique régional, qui aurait été court-circuité ou se serait enfoncé ultérieurement.

8.2.3. Les sources karstiques (généralités).

Ce sont les plus importantes, raison pour laquelle nous les décrivons avec précision, pour essayer d'en définir le bassin d'alimentation. Ceci nous obligera à sortir de notre clu-

se, et à la placer dans son cadre hydrogéologique régional. Cependant, avant de décrire ces sources, voici quelques généralités sur leur position et leur fonctionnement.

Elles jaillissent toutes dans la cluse ou à ses abords immédiats, au niveau de la rivière ou peu au-dessus. Elles jalonnent donc le fond actuel du thalweg, mais possèdent parfois deux ou plusieurs exutoires, étagés en altitude. L'un d'eux fonctionne en permanence, même en étiage; c'est le plus bas, situé tout proche de la rivière. Les autres entrent en action épisodiquement, en période de crue, lorsque le niveau de la nappe karstique s'élève.

Leur débit est en général important, mais très variable selon les conditions pluviométriques; il témoigne souvent d'un bassin d'alimentation vaste et, nous le verrons, parfois difficile à circonscrire. Les sources les plus importantes, en allant du sud vers le nord, sont mentionnées au tableau 8.A.

TABLEAU 8. A : Sources karstiques principales

dans la région du Pichoux.

<u>Nom</u>	<u>Coordonnées</u>	<u>Altitude</u>	<u>Rive</u>	<u>Position</u>
1. Tunnel	584.140/237.030	632-33 (-)*	dr.	limite Ra-Ox.**
2. Blanches Fontaines	583.650/237.610	585-600(630)	g.	limite Ra-Ox.
3. Captage Ueine	583.700/237.595	580 (583)	dr.	limite Ra-Ox.
4. Le Voutier	583.770/238.000	560 (615)	dr.	exutoire Dogger
5. Les Corbés	583.665/238.670	545 (-)	dr.	Ki flanc N Raim.
6. Montois	583.050/238.890	548 (-)	--	Ki flanc N Raim. 600 m W sortis N de la cluse

* entre () : niveau de l'exutoire supérieur, quand il existe.

** : Ox = Oxfordien Ra = Rauracien Ki = Kimméridgien

Ces sources diffèrent par leur débit et leur position par rapport aux structures. En revanche, leurs teneurs en carbonates dissous (sauf la 5), leur pH et leurs températures (sauf la 1) sont tout à fait comparables (tableau 8.B).

8.3. LES SOURCES DE BLANCHES FONTAINES

Elles comptent parmi les plus importantes sources karstiques du Jura septentrional. Le fait qu'elles jaillissent au centre

TABLÉAU N. 3. Paramètres physico-chimiques de quelques sources dans la région du Fackhou.

M.O.N.T.O.I.T

T.U.N.E.S

Date	28.1.74	4.3.74	22.4.74	5.6.74	5.7.74	25.10.74	Date	28.1.74	4.3.74	22.4.74	5.6.74	5.7.74	25.10.74
Débit l/s	300-400	40-50	30-40	-	120-150	400-500	Débit l/min	3-400	190-200	150	-	180-200	230-300
Temp. °C	8,22	8,51	8,92	-	8,75	8,42	Temp. °C	11,02	11,26	11,46	-	11,41	10,93
pH	7,05	7,08	7,20	7,20	7,28	7,27	pH	6,9	6,98	7,20	7,20	7,26	7,13
Dureté tot.	237,5	235,0	235,0	202,5	234,0	231,0	Dureté tot.	235,0	230,0	230,0	227,5	238,0	232,5
Dureté temp.	230,0	217,5	230	190,0	220,5	216,0	Dureté temp.	230,0	225,0	225,0	220,0	227	232,5
Remarque	-	-	-	crue	-	crue fonte neige	Remarque	-	-	-	crue	-	crue fonte neige

L.E.S. G.O.R.B.E.S

D.P.E.L.L.E.S

Débit	9,41	9,42	9,48	-	9,68	9,61	Débit l/min	-	-	10	-	5	-
Temp. °C	7,1	7,51	7,35	7,5	7,48	7,43	Temp. °C	7,82	-	8,5	-	8,9	-
pH	190	195,0	195,0	190	195	197	pH	7,5	-	7,35	7,78	7,74	-
Dureté tot.	185,0	187,5	185,0	180,0	185,0	187,0	Dureté tot.	242,5	-	232,5	225	238	-
Dureté temp.	-	-	-	crue	-	crue fonte neige	Dureté temp.	225,0	-	225,0	210	229,5	-
Remarque	-	-	-	-	-	-	Remarque	-	-	-	crue	-	crue: accès impossible

L.E. V.O.U.P.I.E.S

L.A. D.A.L.L.E.S

Débit l/min	500-600	250-300	-	-	300	450-500	Débit l/min	200	120	20	-	120	-
Temp. °C	9,09	9,06	-	-	9,28	9,08	Temp. °C	8,35	8,43	8,51	-	8,82	-
pH	6,9	7,08	-	7,25	7,34	7,18	pH	7,4	7,52	7,65	7,75	7,76	-
Dureté tot.	227,5	230,0	-	200	226,5	228,5	Dureté tot.	245,0	237,5	230,0	230,0	241,0	-
Dureté temp.	215,0	215,0	-	190	210,5	215	Dureté temp.	230,0	225,0	227,5	220,0	232,0	-
Remarque	-	-	-	tarie	-	crue fonte neige	Remarque	-	-	-	crue	-	accès impossible

L.E.S. B.L.A.N.C.H.E.S. P.O.N.T.A.I.N.E.S

D.I.V.E.R.S. 25.10.74

Date	25.9.68	11.2.69	28.1.74	4.3.74	22.4.74	5.6.74	5.7.74	25.10.74	Captage Bl. Font.	Réserve Jetons	La. Pralirie
Débit l/s	-	-	1360	1200	450-500	-	600	4-5000	400	1200-1500	250
Temp. °C	8,7	8,87	8,41	8,62	8,85	-	8,91	8,63	8,49	6,69	7,05
pH	6,95	7,15	6,9	7,07	7,30	7,15	7,30	7,1	7,17	8,15	8,1
Dureté tot.	255,0	260,0	245,0	240,0	240,0	215,0	235,5	245,5	224,5	207	206
Dureté temp.	250,0	251,2	230,0	230,0	230,0	205,0	228,0	234	-	180,5	-
Remarque	Misrez	Nieerez	-	-	-	crue	-	crue- fonte neige	-	-	-

même de la cluse du Pichoux est d'une importance primordiale.

8.3.1. Le site.

Les Blanches Fontaines jaillissent en une multitude de veines liquides bien individualisées et écumantes (d'où leur nom évocateur), d'entre une masse de blocs éboulés et d'éboulis, aux dimensions parfois énormes (certains blocs de plus de 100 m³), masse située au pied des Rochers Bacon; ceux-ci représentent sur rive gauche la barre calcaire du Rauracien, à l'endroit même de son redressement en "genou". Structuralement, elles se situent dans la gouttière synclinale entre Rameux et Semplain, au contact Rauracien - Oxfordien.

L'éboulement recouvrant le site provient sans aucun doute d'une tranche des Rochers Bacon, qui s'est écrasée après avoir été mise en surplomb par l'affouillement de son pied; les sources sont responsables de ce travail de sape, qui continue d'ailleurs, imperturbablement.

Les nombreuses veines s'échappent sur une largeur de près de 200 m, la plus septentrionale au milieu du petit lac de retenue; la limite sud du domaine d'émergence est marquée par la grotte de Blanches Fontaines (fig. 8.III., cf. aussi 8.8.1.), émissaire temporaire de la veine d'eau la plus méridionale. En étiage, les filets d'eau sortent à peu près au niveau de la rivière, soit 585 m environ. En crue, tout le rectangle compris entre la rivière et la route fournit de l'eau, soit jusqu'à 600 m d'altitude; en ce cas, la grotte refoule, elle aussi. Il peut même arriver que des émissaires plus élevés se mettent en charge, comme ce fut le cas lors des inondations de juin 1973: la source la plus haute a jailli d'une fissure située à plus de 630 m d'altitude, au-dessus de la route. A cette occasion, un vaste abri sous roche, vraisemblablement l'ancien émissaire principal, situé à 640 m, s'est presque rempli d'eau. On a donc eu à ce moment-là une mise en charge de plus de 50 m de tout ce système karstique, ce qui est considérable.

Malgré la large dispersion des filets d'eau, on a bel et bien affaire à un seul réseau. Lors d'un essai de coloration (cf. 8.3.5.), les analyses en 5 points de prélèvements répartis sur le front de sortie des eaux, ont montré des teneurs en fluorescéine très voisines (tableau 8.E.), preuve de leur origine commune. La température, constante pour tous les points d'eau, le confirme également.

8.3.2. Débits et bassin alimentaire.

Il est malheureusement impossible de donner ici des chiffres précis: il n'existe en effet aucune station de jaugeage sur la Sorne, pas même à son embouchure dans la Birse à Delémont. D'autre part, n'étant pas captées, les sources ne font l'objet d'aucune surveillance particulière.



Fig. 8.III.

a) Grotte de Blanches Fontaines, à sec

b) Grotte de Blanches Fontaines, crue de la rivière souterraine. La galerie supérieure n'est pas en charge.

On peut grossièrement estimer leur débit à 0,5 à 0,7 m³/sec au minimum en basses eaux (Barsch 1969); en crue, il fait plus que décupler, certainement, pour atteindre selon nous près de 12 à 15 m³/sec. Le spectacle qu'elles offrent à ces moments-là est des plus impressionnants.

Il n'en reste pas moins que la Sorne ne devient véritablement rivière qu'après avoir reçu les Blanches Fontaines; son débit quintuple pour le moins. Ce fait nous paraît essentiel.

Le problème du débit sera rediscuté plus loin (cf. 8.3.10), une fois déterminées les limites du bassin d'alimentation. En effet, le bassin des Blanches Fontaines était très mal connu jusqu'ici. Diverses expériences de coloration ont permis d'en préciser les contours. Nous rendons compte ci-dessous des principaux résultats de ces colorations (Pl. V et tableau 8 C).

8.3.3. Coloration de la Rouge Eau.

L'expérience a été réalisée en 1959 par l'hydrogéologue Mornod, mandaté par la commune de Moutier pour préciser les limites du bassin alimentaire de la Foule. Il était admis depuis Schwabe (1939), sans aucune preuve, que les eaux se perdant à La Bottière ressortaient dans le défilé de Sur Menué (593/235) près de Moutier, à la source de La Foule. On pensait aussi à une diffuence possible, par le seuil du Fuet, vers les sources de la Vallée de Tavannes et de la Trame (sources de la Birse, de la Tuilerie, etc.).

L'essai de marquage a infirmé toutes ces hypothèses. Le colorant n'a finalement été retrouvé, presque par hasard, qu'aux sources de Blanches Fontaines: la couleur verte due aux 15 kg de fluorescéine a été repérée dans la vallée de Delémont; en remontant la Sorne, on a pu localiser sa sortie dans le Pichoux, sous les Rochers Bacon*).

Les données techniques concernant cette expérience de marquage, sont résumées ci-dessous (Mornod 1959 a).

* Deux auteurs (Schmalz et Krähenbühl, ce dernier dans une publication posthume), ont encore repris en 1973 l'hypothèse de Schwabe, en cautionnant ses affirmations. Nous remercions la commune de Moutier de nous avoir autorisé à faire état du rapport du Dr. Mornod, qui n'a jamais été publié, ce qui permet de rectifier une erreur, largement répandue dans le public.

TABLEAU 8. C. Sources et captages contrôlés lors des essais de coloration dans la région du Pichoux.

Nom d.l. source	Coordonnées	Nature	Captage public	Contrôlé essai no	Coloration positive	Remarque
S. de la Birse	581.580/229.230	Karst.	SE Tavyannes	A-C	-	-
S. de la Citadelle	583.260/233.110	Karst+éboulis	SE Saules	B-D	-	-
S. de la Foule	593.530/235.335	Karst.	SE Moutier	A-B-C	-	-
S. de Plain Payen	590.710/235.940	Karst.	-	C	-	Contrôle par fluo- capteurs
S. du Moulin Brûlé	577.385/231.040	Karst.	SE Tramelan	A-C-D	-	Karst. ds calc. tertiaire
S. d.l. Forêt d'Enfer	579.340/231.630	Karst.	-	C-D	-	Contr. par fluoc.
Sorne - Les Genevez	576.720/234.050	Superf.	-	C	-	-
Sorne - Bellelay	580.100/235.055	Superf.	-	C	C ?	Pollution par fluo- resc. domestique
Captage Bellelay	580.330/235.050	Superf.	Ancien capt.	D	-	-
S. Côte de l'Envers	580.940/236.615	Karst+éboulis	-	C-D	D	Col. sulforhodam.
S. Les Navelles	584.385/235.610	Karst+éboulis	SE Soubos	B-D	-	-
S. Les Bl. Fontaines	583.650/237.610	Karst.	-	B-C-D	A-B-C	-
Capt. Bl. Fontaines	583.700/237.590	Karst.	Usine El. Font.	C-D	-	-
S. Les Corbés	583.665/238.670	Karst.	SE Undervellier	C-D	C	Pollution à partir de la Sorne
S. du Miéry	581.780/239.140	Karstique	-	C-D	-	Capt. défectueux S. karst. ds calc. tertiaire
S. de la Mettenuex	582.620/239.240	diverses	SE Undervellier	D	-	-
S. de Montcoit	583.050/238.885	Karst.	-	C-D	D	-
S. de Ste Colombe	583.410/239.550	Karst.	-	C-D	-	-
S. des Forges	583.390/239.830	Karst.	Forges d'Underv.	C-D	-	-
S. du Pont d.l. Jacot.	583.200/240.260	Karstique	-	C-D	-	-
Puits des Gr. Champs	583.260/240.550	Nappe alluv.	SE Bassecourt	D	-	Nappe alimentée latéral. à partir du Karst.
S. du Golat	583.250/240.910	Karst.	SE Bassecourt	C-D	-	-
S. de la Combe	580.120/241.320	Karst.	SE Glovelier	C-D	-	-
Le Tabeillon	577.860/238.225	Karst.	-	C-D	-	-
Ruisseau de Saulcy	577.950/238.840	Superfic.	-	C	-	-
Etangs de Lajoux	576.625/237.600	Superfic.	-	C	-	-
Canalisation Lajoux	577.650/237.800	Drainage	-	C-D	-	-
A= Rouge Eau (Mornod)	B= La Combe-Bouts de Saules	C= Gouffre de Lajoux	D= Double-essai Lajoux - Fornet Deessous	D	-	Contr. passage col.

Résumé des paramètres d'expérience.

Colorant: fluorescéine (15 kg)

Date et heure d'injection: 2 mars 1959 - 14.15 H.

Conditions atmosphériques: période de fonte des neiges

Lieu d'injection: perte de la rivière Rouge Eau, près de la Bottière.

Coordonnées: 580.720/233.470

Description du lieu: ponor, au contact Tertiaire - calcaire Portlandien du versant N de l'anticlinal de Moron, dans la zone d'ensellement du Fuet.

Profondeur du gouffre: 125 m (Audétat 1962)

Altitudes: entrée du gouffre 917 m environ
fond du gouffre 792 m "

Débit à la perte: 1.800 l/mn, température 5,8° C

Réapparition des eaux: sources de Blanches Fontaines

Longueur du trajet: 5050 m (vol d'oiseau)

Dénivellation et pente: depuis l'entrée du gouffre: 392 m, soit 66 o/oo
depuis le fond du gouffre: 207 m, soit 41 o/oo

Temps de parcours: 45 H. et demie (estimation)

Vitesse estimée: 109 m/h

Cette vitesse n'est pas excessive (cf. 8.3.5. et 8.4.2.). Elle permet de penser que le cheminement de la perte à la source ne se fait pas en ligne directe; il est possible que l'eau difflue par le seuil de Bellelay et rejoigne le réseau karstique de Coténiat - Châtelat (cf. 8.3.6.) qui aboutit aux Blanches Fontaines; autre possibilité: l'eau suit la zone synclinale sise entre le flanc N du Moron et la voûte adjacente du Chablet, axée SW - NE. Au sortir de cette gouttière structurale, au S de Sornetan, les eaux rencontrent une zone drainante axée S - N, qui les conduit vers leur résurgence. Cette dernière solution nous paraît la plus probable; consulter à ce sujet la carte structurale. fig. 5.VI.

8.3.4. Coloration des Craux (anticlinal de Moron).

L'essai à la fluorescéine que nous avons réalisé en juin 1974 dans la zone Les Craux - Montagne de Saules (583/234) était destiné à mettre en évidence les relations que nous supposions exister entre cette portion de l'anticlinal de Moron et les sources de Blanches Fontaines. Pour diminuer les frais d'expérience, on s'est contenté de surveiller les sources karstiques les plus importantes des alentours au moyen de sachets contenant du charbon actif (Mathy 1970); il a fallu renoncer aux prélèvements d'échantillons d'eau et aux analyses onéreuses qu'ils nécessitent.

a) Point d'injection et sources contrôlées.

Il a été choisi en fonction de sa position structurale (fig. 8.IV.). La fluorescéine (2,5 kg) a été déversée

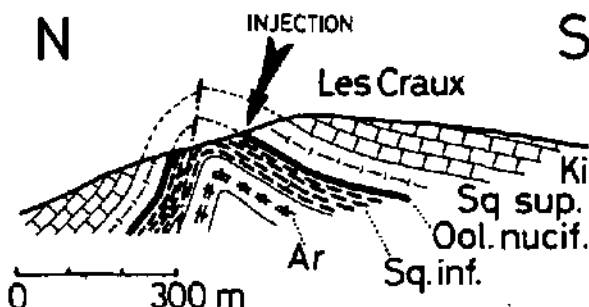


Fig. 8.IV. Schéma situant le lieu d'injection de la coloration des Craux - Montagne de Saules (d'après Rothpletz 1933)

Ki = Kimméridgien Sq = Séquanien Ar = Argovien

dans une large diaclase, sur la retombée S des couches du repli anticlinal des Craux, dans le Séquanien calcaire (coord. 583.555/234.830). Normalement, les eaux qui s'infiltrèrent jusqu'au toit de l'Argovien devraient suivre le pendage des couches et s'écouler vers le S.

Pour cette raison, les sources de la Citadelle à Saules ont été soigneusement surveillées (583.260/233.110). Les autres sources contrôlées se situaient:

- dans le Pichoux (sources du Tunnel et de Blanches Fontaines;

- au pied N de Moron (captage des Navelles/Souboz, 584.385/235.610);

- à La Foule à Moutier (la zone de protection de cette source s'étend théoriquement jusqu'aux Bouts de Saules).

b) Réapparition du colorant.

L'injection a eu lieu le 1er juin 1974, vers 16H. Le colorant n'a été décelé qu'aux Blanches Fontaines. Il a mis 6 à 12 jours (tableau 8 D) pour parcourir 2.800 m à vol d'oiseau et franchir 475 m de dénivellation, ce qui représente une pente de 170 o/oo; la vitesse de circulation est de l'ordre de 10 à 20 m/h. Une plus grande précision n'est pas possible, compte tenu de la méthode employée. Aucune autre source surveillée n'a recelé de colorant.

TABLÉAU 8 D : Sources de Blanches Fontaines: analyse qualitative des fluocapteurs, coloration Les Craux - Bouts de Saules.

<u>No</u>	<u>Pose</u>	<u>Retrait</u>	<u>Temps d'exposition</u>	<u>Résultat</u>
F1	1.6. - 16H	3.6. - 11H	43H	négatif
F2	3.6. - 11H	7.6. - 11H	96H	négatif
F3	7.6. - 11H	13.6. - 16H	149H	++++
F4	13.6. - 16H	26.6. - 14H	310H	++
F5	26.6. - 14H	5.7. - 9H	211H	négatif

c) Discussion des résultats.

L'eau d'infiltration des territoires karstiques de Moron - Montagne de Saules s'écoule vers les Blanches Fontaines. La faible vitesse d'écoulement mesurée tient sans doute à trois raisons:

- la circulation se fait transversalement aux axes tectoniques;

- un déficit en précipitation caractérise le début de l'année 74; les fentes karstiques n'étaient pas en charge lors de l'essai;

- sous le synclinal du Petit Val, il existe un réseau noyé qui, d'une part, freine la propagation du colorant et d'autre part, étale la durée de réapparition de celui-ci.

Autre fait très important: les Blanches Fontaines capturent des eaux qui, naturellement, devraient s'écouler vers le S. L'existence d'une telle zone de drainage souterrain, normale aux structures régionales, n'était pas connue jusqu'ici. Nous aurons encore à en parler plus loin (cf. 9.2.).

Enfin, on peut certifier que le bassin alimentaire de La Foule ne s'étend pas jusqu'aux Bouts de Saules, comme le prétend Mornod dans un rapport inédit (1965). Sa zone d'influence vers l'W ne doit pas dépasser Les Ecorcheresses (588/236). Le bassin des Blanches Fontaines s'en trouve agrandi d'autant (cf. 8.3.9.).

Les relations entre les eaux souterraines en provenance de la Combe - Montagne de Saules et le réseau souterrain de la Rouge Bau (8.3.3.) restent à préciser.

8.3.5. Coloration du Gouffre de Lajoux (Creux Koby).

Cet essai a été réalisé par nos soins, au printemps 1973, dans le cadre du présent travail. L'idée de départ était de confirmer la présomption d'une liaison karstique entre la zone synclinale de Fernet Dessus et les sources de Blanches Fontaines, et de préciser en même temps les limites du bassin - versant de ces sources*.

a) Injection du colorant.

10 kg de fluorescéine ont été injectés dans un des gouffres les plus profonds de la région (gouffre de Lajoux, 578.410/236.300), s'ouvrant dans une lignée d'emposieux près de Fernet Dessus; ces emposieux sont alignés au fond du synclinal kimméridgien des Fernet, axé N 75 E environ. La période choisie pour l'injection a coïncidé avec le maximum de fonte des neiges du printemps 73; à ce moment, un ruisseau disparaissait dans le gouffre, ce qui a facilité l'injection.

b) Réapparition du colorant.

Les prévisions sur la réapparition du colorant se sont très rapidement révélées exactes**. Moins de 20 heures après l'injection, soit le 28 avril vers 15 h., le colorant réapparaissait déjà (10 à 20 µg/l) aux Blanches

* Comme il s'inscrivait dans un programme d'épuration d'eau (étude d'un déversoir d'orage dans un emposieu situé à l'W de Fernet Dessus), les frais de matériel, d'analyses et de déplacements ont été pris en charge par l'Office d'économie hydraulique du Canton de Berne, organisme que nous nous plaisons à remercier ici.

** Pour les autres sources contrôlées, se référer au tableau 8 C.

TABLEAU 8. E. : Températures de l'eau et concentration en fluorescéine aux Blanches Fontaines lors de la coloration du Gouffre de Lajoux.

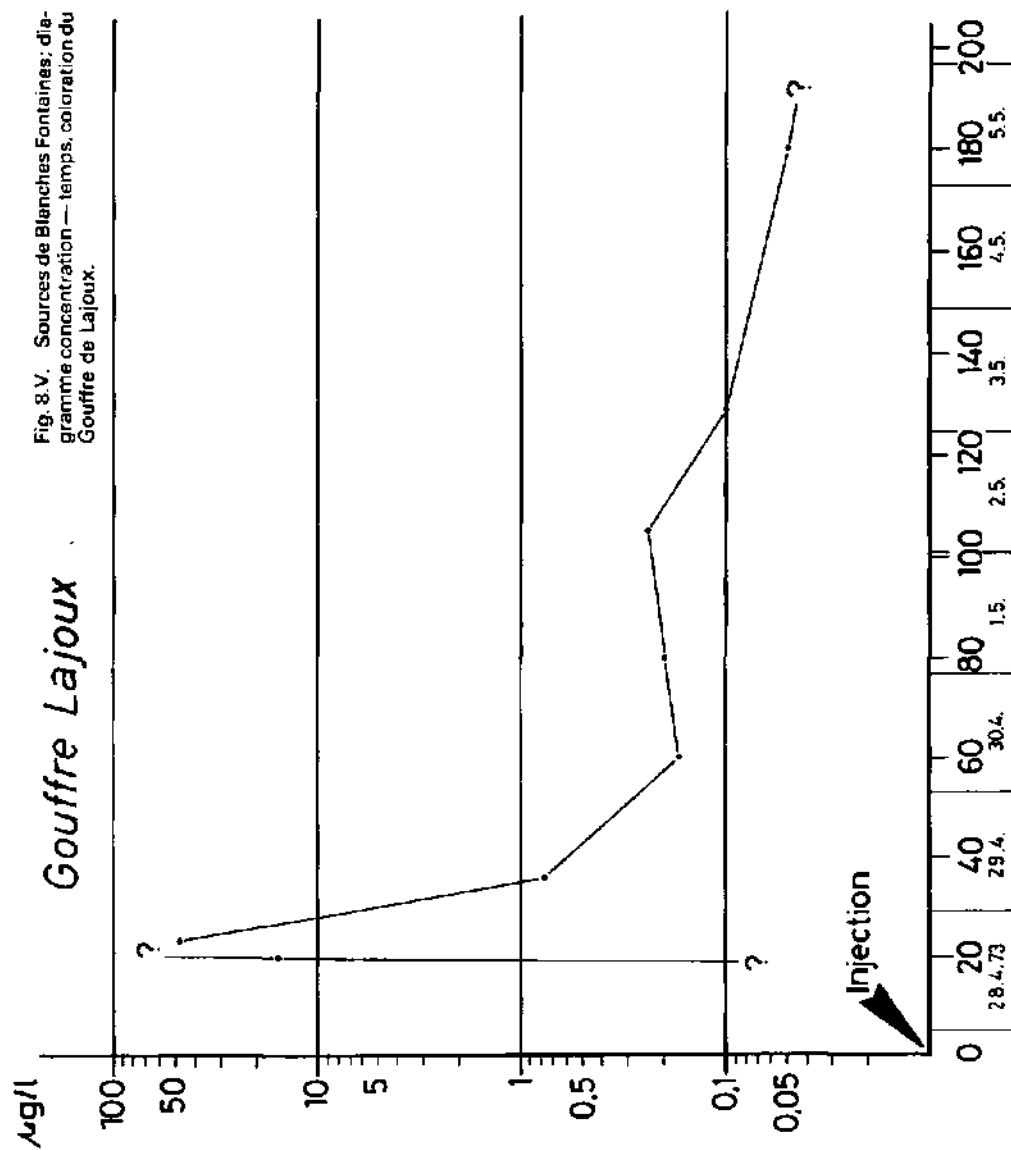
Date 1973	H	Température (°C)					Teneur en fluorescéine $\mu\text{g/l.}$						Débit tot. (estim.) m^3/s	
		S07*	S08	S09	S10	S11	S12**	S07	S08	S09	S10	S11		M
26.4	16	8,0	8,05	8,05	8,05	8,05	7,8	-	-	-	-	-	-	4-5
28.4	16	8,0	8,0	8,0	8,0	8,05	7,9	10,4	12,2	13,0	13,0	18,2	13,36	10
28.4	20	-	-	-	-	-	-	46,0	-	-	-	43,0	44,5	-
29.4	7	7,8	7,95	7,95	7,95	7,95	7,9	0,95	0,71	0,46	0,71	0,80	0,72	10-11
29.4	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	1	-
30.4	12	7,7	7,85	7,85	7,8	7,8	7,85	0,22	0,14	0,14	0,16	0,15	0,16	-
1.5	8	7,65	7,8	7,8	7,8	7,8	7,95	0,23	0,18	0,16	0,22	0,15	0,19	-
2.5	9	7,7	7,8	7,8	7,8	7,8	7,9	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	-
3.5	8	7,7	7,85	7,8	7,8	7,8	7,95	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,10	-
5.5	12	7,80	7,85	7,85	7,9-	7,85	8,1	-	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	-
7.5	8	7,95	7,95	7,95	7,95	7,95	8,05	-	-	-	-	-	-	1,6
9.5	19	8,0+	8,0+	8,0+	8,0+	8,0+	8,05	-	-	-	-	-	-	-
12.5	9	8,1	8,15	8,1	8,1	8,15	8,1	-	-	-	-	-	-	-
14.5	12	8,2	8,25	8,2+	8,2+	8,2+	8,15	-	-	-	-	-	-	1,2
17.5	11	8,3-	8,3	8,3	8,3	8,3+	8,15	-	-	-	-	-	-	1,0
21.5	15	8,4	8,45	8,4	8,4+	8,45	-	-	-	-	-	-	-	1,0
25.5	10	8,5-	8,5	8,5	8,5+	8,5+	8,2	-	-	-	-	-	-	-

* S07 - S11 : 5 points de prélèvement aux Blanches Fontaines, du N au S

** S12 : source de l'Usine

Gouffre Lajoux

Fig. 8.V. Sources de Blanchettes Fontaines: dia-
gramme concentration — temps, coloration du
Gouffre de Lajoux.



Fontaines; vers 18 h., la coloration était visible à l'oeil nu et vers 20 h. la teneur en fluorescéine des échantillons prélevés avoisinait 50 $\mu\text{g/l}$. Elle devait diminuer rapidement dans les heures qui suivirent, puisque le lendemain matin, on ne voyait déjà plus rien à l'oeil nu.

Les 28 et 29 avril, les sources se sont enflées jusqu'à débiter près de 10 - 12 m^3/sec (débit estimé). Cependant, le caractère approximatif de ce jaugeage, comme notre incertitude quant à l'heure exacte de sortie de la vague principale (début de la nuit), nous empêchent d'estimer avec précision la quantité de colorant réapparue. On peut admettre que plusieurs kilos sont ressortis entre le 27 avril et le 5 mai; le solde a dû être purgé lors d'une crue subséquente (fig. 8.V et tableau 8.E).

c) Vitesse d'écoulement.

Elle s'est révélée extrêmement forte, comparativement aux autres cas. Les premières traces de colorant sont apparues moins de 20 heures après l'injection, ce qui représente une vitesse de pointe de 270 m/h au minimum. Le gros du colorant a mis 23 heures environ. Les dernières traces décelables ont employé 190 à 200 heures.

Une vitesse si élevée tient sans doute à deux facteurs:

- le niveau élevé de la nappe karstique et la forte pression des eaux dans l'aquifère karstique durant l'essai;
- l'existence certaine d'un écoulement en ligne directe, par des conduits karstiques assez largement ouverts, entre le lieu d'injection et la résurgence (Monbaron, à paraître).

La vitesse d'écoulement serait sans doute plus faible en période d'étiage.

d) Cheminement.

Se perdant dans le Portlandien du synclinal, l'eau arrive au fond du gouffre, vraisemblablement au toit du Séquanien marneux. Elle suit la pente structurale, orientée vers l'E, passe à l'aplomb de Fornet Dessous et des Grands Champs. Il est probable qu'elle emprunte ensuite le synclinal entre Semplain et Rameux; il est cependant difficile de le prouver, tout comme de dire à quel moment et par quel moyen elle franchit l'écran imperméable du Séquanien inférieur; sa sortie est en effet située à la base du Rauracien; pour en savoir un peu plus, il serait nécessaire de connaître mieux les réseaux fossiles ou semi-actifs de la région (cf. 8.8.).

e) Résumé des paramètres d'expérience.

Nature du traceur: fluorescéine

Quantité: 10 kg, dilués dans 60 l d'eau à pH 7

Date et heure d'injection: 27.4.73 dès 19 h.00

Lieu d'injection: Gouffre de Lajoux (Creux Koby) près de
Fornet Dessus, perte de ruisseau

Coordonnées: 578.410/236.300

Temps d'infiltration totale: 20 minutes

Débit estimé de la perte: 30 l/min

Profondeur du gouffre: 173 m

Altitudes: entrée du gouffre 970 m env.
fond du gouffre 800 m env.

Sources colorées: sources de Blanches Fontaines, alt. 585 m

Longueur du trajet (vol d'oiseau): 5.400 m

Dénivellation et pente: depuis l'entrée du gouffre, 385 m
soit 71 o/oo
depuis le fond du gouffre, 215 m
soit 40 o/oo

Date et heure:

de l'arrivée des premières traces	28.4.73 vers 15H
de la vague principale	28.4.73 vers 18H
de la fin de la coloration	5.5.73 vers midi

Concentration maximum mesurée: 45 µg/l (28.4. à 20H)

Temps de passage:

des premières traces	20 heures
de la vague principale	23 heures (?)
des dernières traces mesurées	190 - 200 heures

Vitesse de circulation:

de la première vague	270 m/h (au minimum)
de la vague principale	225 m/h (?)
des dernières traces mesurées	27 m/h

8.3.6. Coloration de la Sorne à Châtelat.

Il s'agit d'un essai effectué en décembre 1958 par la commune de Moutier, toujours dans le cadre de l'aménagement de la source de La Foule. On a injecté du colorant dans la Sorne même, à l'entrée de la forêt de Coténiat (coord. 580.920/235.380 env., pl. V). En étiage, la rivière disparaît totalement durant son parcours dans la forêt; elle y coule en effet sur du calcaire portlandien fissuré; on supposait que l'eau reparaisait à La Foule à Moutier.

Selon le rapport de l'hydrogéologue, il n'en est rien. La perte de la Sorne en amont de Châtelat influence la source des

Blanches Fontaines dans la cluse du Pichoux (Mornod 1959 a). De plus en plus, cette source apparaît bien comme l'exutoire karstique le plus important de la région, vers lequel converge la majeure partie des eaux souterraines de ce secteur.

8.3.7. Coloration à Fornet Dessous.

En décembre 1973, pour compléter l'expérience de la STEP Lajoux (cf. 8.4.2.), nous avons coloré à la sulforhodamine G Extra un ruisseau prenant sa source à l'E de Fornet Dessous (coord. 580.060/236.530), dans les marnes tertiaires. Il s'agissait de savoir si les eaux de ce ruisseau, qui se perdent en étiage durant le parcours forestier en aval de la source, franchissent l'écran tertiaire (dont rien n'assure qu'il soit continu) pour pénétrer dans le karst et reparaitre dans l'une ou l'autre des sources karstiques de la région. On aurait pu s'attendre en effet à ce que le réseau Gouffre de Lajoux - Les Blanches Fontaines, situé juste à la verticale de ce synclinal, reçoive des infiltrations à partir de la surface, malgré l'imperméabilité supposée du Tertiaire*.

Plusieurs sources et captages publics ont été surveillés pendant plus d'un mois (cf. tableau 8 C). On n'a constaté aucune trace de colorant dans les exutoires karstiques de la région, et en particulier aux Blanches Fontaines. On peut en conclure que le Tertiaire est ici, et dans une large mesure, imperméable.

Mais le colorant infiltré est réseorti pendant plus d'un mois à une petite source d'éboulis (débit assez constant de 150 - 200 l/min), peu en aval du point d'injection (coord. 580.940/236.620, cf. fig. 8 VI.); ses eaux forment le ruisseau de la Draï, affluent de la Sorne avant son entrée dans les gorges. De ce fait, la Sorne a été aussi colorée. On peut donc en conclure que les sources de Blanches Fontaines ne paraissent pas alimentées par d'éventuelles pertes de la Sorne dans la partie supérieure de la cluse (canyon), sinon des traces de colorants y seraient apparues.

On peut encore tirer de cette expérience la conclusion suivante: seule la disparition du Tertiaire, par érosion, et la mise à nu des surfaces calcaires, permettent aux eaux météoriques de s'infiltrer dans le karst. Celui-ci semble assez parfaitement isolé, lorsque le Tertiaire est présent.

8.3.8. Limites du bassin d'alimentation des Blanches Fontaines

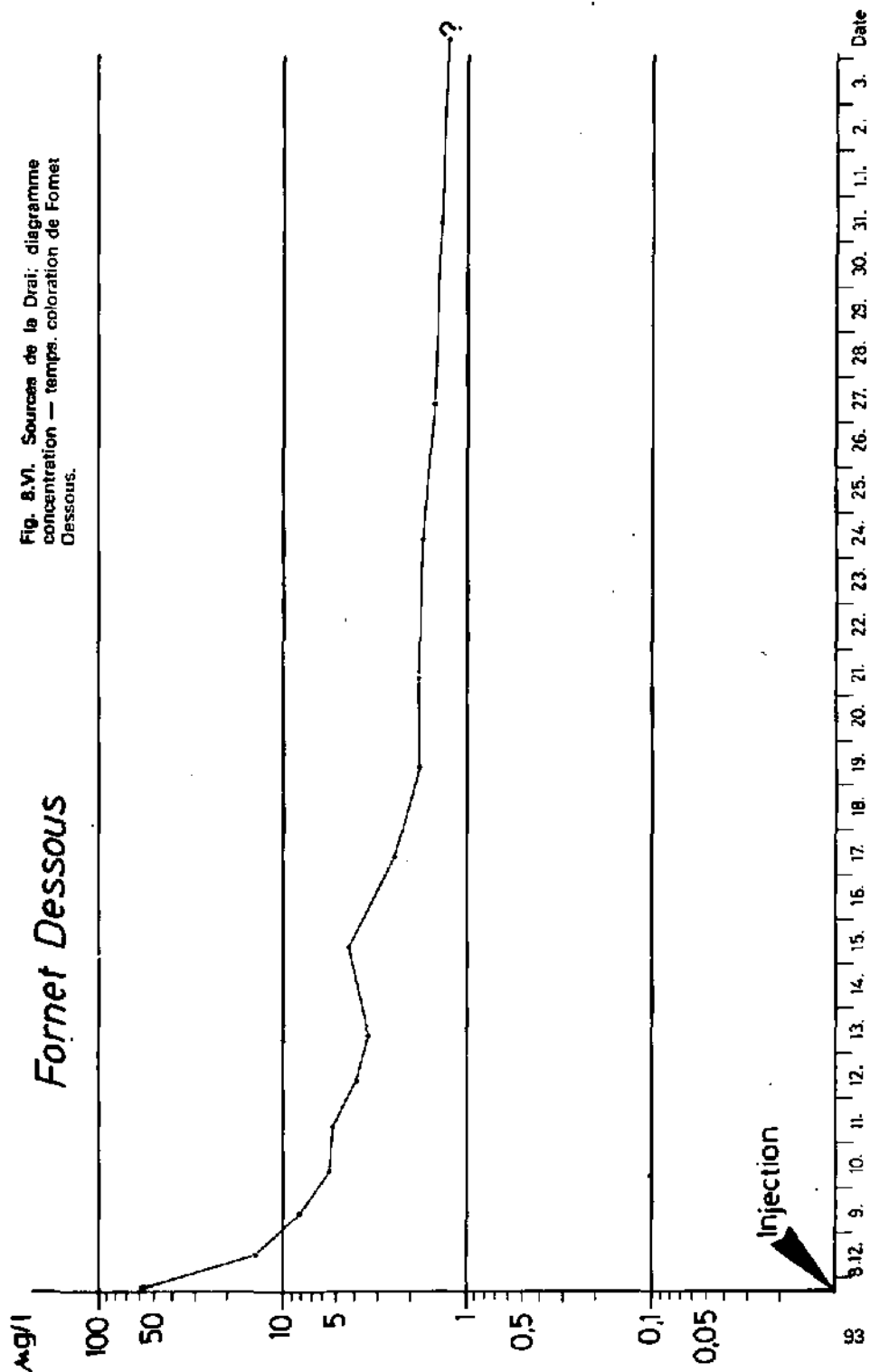
Les diverses expériences de colorations décrites plus haut permettent de circonscrire avec un peu plus de précision les limites du bassin d'alimentation de nos sources, qui étaient loin d'être connues jusqu'ici (pl. V.).

a) Limite B.

Nous avons démontré que le lit de la Sorne dans les gorges n'a pas de communication avec les sources. La rivière devrait donc représenter la limite B du bassin.

* Le projet de déverser ici l'effluent d'une future station d'épuration rendait nécessaire une telle expérience de coloration.

Fig. 8.VI. Sources de la Drac; diagramme concentration — temps. coloration de Fomel Oessous.



Cependant, nous avons vu qu'une zone noyée existe au fond du synclinal du Petit Val, et qu'elle se décharge aux Blanches Fontaines (8.3.4.). Elle est alimentée à partir des flancs sud de Raimeux et nord de Moron; la culmination de l'axe synclinal à l'E, fixée en première approximation aux environs des Ecorcheresses (588/236), doit constituer la limite orientale de sa zone d'alimentation. La zone de Rière le Jettoux (lèvre E, anticlinal de Semplain) alimente les nombreuses sources mixtes de la lèvre E (8.2.2.); elle ne peut être incluse dans la zone alimentaire des Blanches Fontaines.

b) Limite S.

Les expériences "Rouge Bau" et "Les Craux - Bouts de Saules" permettent de l'esquisser.

A la perte de la Rouge Bau, la faite tectonique de Moron n'est pas franchi: il constitue l'écran qui empêche les eaux de descendre dans le synclinal de la Trame. La limite est plus difficile à tracer dans la région des Bouts de Saules, puisque nous avons vu qu'elle mord sur le flanc S, dans une mesure que d'autres colorations permettraient sans doute de préciser. Plus à l'E encore, la limite rejoint la combe anticlinale de Mont à Iuet; le mont de Dogger et son système karstique ne peuvent être inclus dans le bassin des Blanches Fontaines.

c) Limite N.

Celle-ci doit correspondre assez exactement au sommet du crêt rauracien S de l'anticlinal de Raimeux. La zone de Semplain, quant à elle, alimente les sources mixtes de la lèvre W de la cluse.

d) Limite W.

La limite occidentale de la zone d'influence des sources est plus délicate à fixer. Des critères d'ordre structural, topographique et spéléologique permettent de la situer, en première approximation, dans la région Les Joux Derrière (573/234) - Bois Rebetez. Cette zone possède en effet un relief indécis, caractéristique d'une région à écoulement souterrain mal défini; structuralement, elle paraît jouer le rôle de zone de diffuence entre les bassins du Doubs à l'W et de la Sorne à l'E. Pour le confirmer, il serait nécessaire de colorer, entre autres, le gouffre de Bois Rebetez (pt 984).

En examinant les figures 8.VII et 8.VIII, on remarque que le Creux d'Entier, autre gouffre important de la région (- 198 m), est presque situé sur l'alignement Gouffre de Lajoux - Blanches Fontaines; la pente moyenne: fond du Creux d'Entier - source concorde aussi assez bien avec la pente moyenne Gouffre de Lajoux - source. Il est fort vraisemblable que ces deux gouffres appartiennent au même complexe karstique et soient en relation directe.

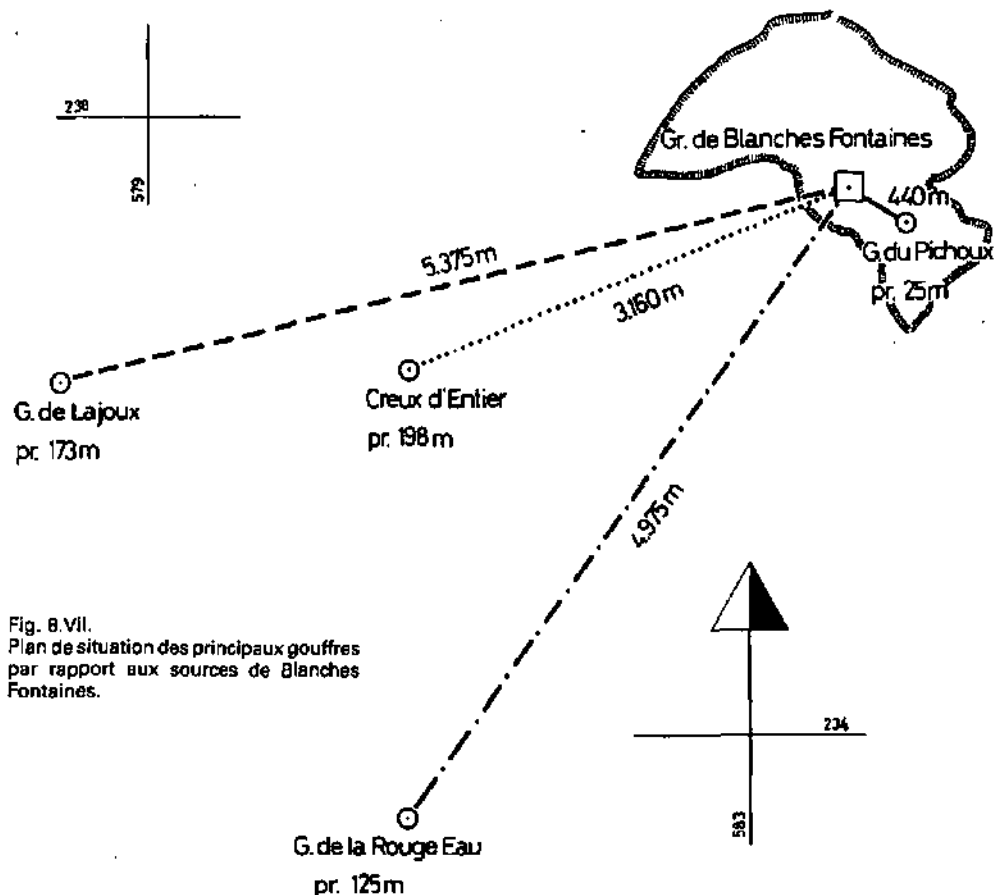


Fig. 8.VII.
Plan de situation des principaux gouffres
par rapport aux sources de Blanches
Fontaines.

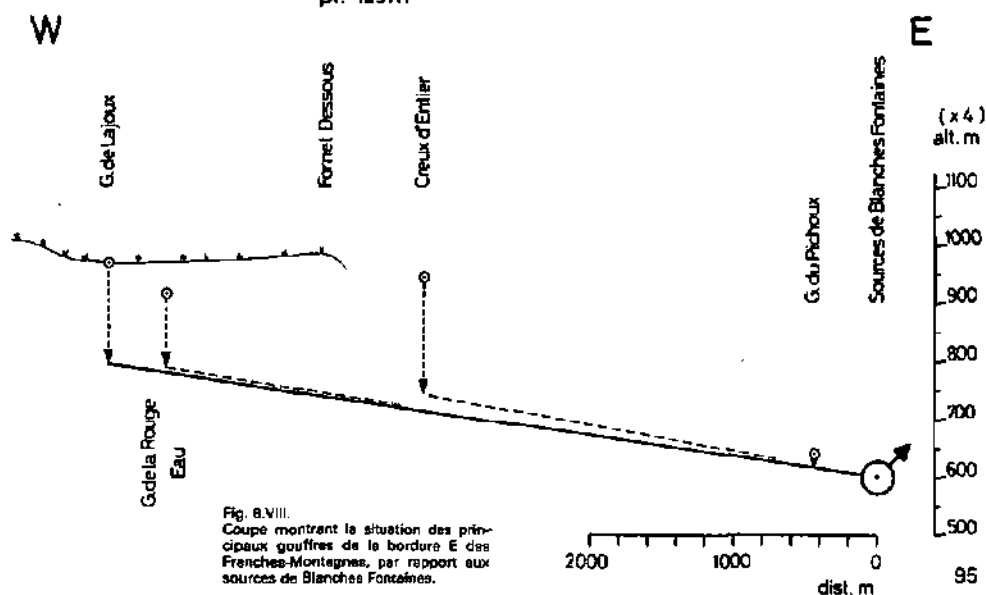


Fig. 8.VIII.
Coupe montrant la situation des principaux
gouffres de la bordure E des
Franches-Montagnes, par rapport aux
sources de Blanches Fontaines.

Le Gouffre de la Rouge Eau, dont la relation karstique avec Blanches Fontaines est prouvée, présente une pente moyenne fond du gouffre - source en tout point comparable à celle du Gouffre de Lajoux. Ces deux puits n'étant pas alignés (fig. 8.VII), ce fait nous semble dû à une coïncidence, encore qu'il montre à l'évidence l'influence prédominante des sources de Blanches Fontaines sur les écoulements souterrains de la région.

8.3.9. Superficie du bassin.

Nous avons vu plus haut (8.1.3.) que les eaux météoriques du synclinal tertiaire du Petit Val ruissellent sans s'infiltrer dans le karst. L'aire d'alimentation de nos sources est entièrement karstique, avec une petite réserve pour le Bassin de Bellelay, auge imperméable à écoulement superficiel, mais dont les eaux finissent tout de même par rejoindre le système karstique des Blanches Fontaines.

La surface totale du bassin karstique est de $40,2 \text{ km}^2$. Cette valeur est approximative, vraisemblablement par défaut. Il est possible que des études ultérieures permettent de la préciser encore mieux, surtout en direction W*. Dans ce chiffre n'est pas comprise l'aire où affleure le Dogger, sur l'anticlinal de Moron: les eaux qui s'y infiltrent pourraient appartenir à un autre "étage karstique", et ne se déchargent vraisemblablement pas aux Blanches Fontaines.

8.3.10. Estimation du débit des Blanches Fontaines.

Connaissant la surface du bassin, il est possible maintenant d'estimer approximativement le débit des sources. Cette estimation est extrêmement grossière, mais l'ordre de grandeur seul nous intéresse.

Nous nous basons sur la pluviométrie de la région (1330 mm en moyenne à Bellelay), et nous admettons une moyenne d'évapotranspiration de 25 % en terrain karstique (Tripet 1972) et de 40 % en terrain imperméable. On peut donc calculer qu'il s'écoule, à l'exutoire de tout ce système, un volume d'eau de près de 40 millions de m^3 /an, soit en moyenne $1,25 \text{ m}^3$ /sec (appendice chf. 25). Cette valeur est tout à fait compatible avec les résultats des nombreux jaugeages de débit des sources (Barach 1969, tabl. 2).

On peut faire une intéressante comparaison avec les chiffres donnés par Tripet, dans un bassin comparable du Jura neuchâtois, celui de l'Areuse. La superficie est de 130 km^2 , les précipitations moyennes de 1500 mm/an , l'évapotranspiration moyenne calculée de 27,6 %; finalement, le jaugeage de la source donne un débit de $4,68 \text{ m}^3$ /sec. En admettant pour Blanches Fontaines une évapotranspiration un peu supérieure, du

* En y ajoutant $6,6 \text{ km}^2$ pour le Petit Val et 2 km^2 environ pour les ruisseaux des versants W et E de la partie supérieure de la cluse, on obtient une surface totale de $48,8 \text{ km}^2$, valable pour le bassin de ré-

fait de l'altitude moindre du bassin-versant (30 %), et compte tenu de la surface et des précipitations, on pondère les chiffres d'un bassin à l'autre. Cela donne finalement pour Blanches Fontaines un débit calculé de $1,18 \text{ m}^3/\text{sec}$. c'est-à-dire un résultat très proche du précédent.

Autre possibilité de comparaison: le débit de la Birse à son entrée dans les Gorges de Moutier. Il existe une bonne corrélation entre les débits moyens mesurés à Moutier et les jaugeages effectués au barrage dans les Gorges du Pichoux (Barsch 1969): le coefficient de corrélation est de 0,93 (fig.IX.). En reportant sur le graphe la moyenne d'écoulement journalier de la Birse (calculée de 1912 à 1965), qui est de $3,24 \text{ m}^3/\text{sec}$, on voit que la Sorne débite en moyenne au barrage $1,47 \text{ m}^3/\text{sec}$. Nous avons vu plus haut (8.1.3.) que la rivière importe dans les gorges 150 à 170 l/sec environ. En soustrayant, on obtient un débit de $1,3 \text{ m}^3/\text{sec}$ environ pour les sources, chiffre à nouveau très voisin de ceux obtenus précédemment.

8.3.11. Calcaire dissous.

Si nous nous reportons au Tableau 8.B., nous voyons que les Blanches Fontaines exportent entre 215 et 260 mg/l de calcaire dissous sous forme de bicarbonates (les valeurs les plus faibles correspondent aux périodes de crue). Ces valeurs sont confirmées par celles de Miserez et de Barsch.

Connaissant le débit des sources ($1,2 \text{ m}^3/\text{sec}$) et leur dureté moyenne (230 mg/l), on peut calculer le volume de roches exporté sous forme dissoute aux Blanches Fontaines. On obtient (app.chf. 26):

- masse de calcaire exportée: près de 24 t par jour, soit 8.700 tonnes par an environ;
- volume équivalent (d calcaire = 2,65): 3.280 m^3

En répartissant ce volume sur la totalité de l'aire karstique, on voit que l'ablation moyenne est de 0,081 à 0,082 mm/an. Cette valeur est tout à fait conforme à celles que plusieurs auteurs ont déterminées (cf. chap. 12).

Si l'on admet que les conditions actuelles sont représentatives de celles qui ont régné dans le Jura depuis le plissement, on peut estimer que l'ablation karstique a pu dissoudre entre 450 et 500 m de roches calcaires depuis le plissement (soit environ 80 m par M.A.) sur notre territoire.

ception de la Sorne au barrage des Blanches Fontaines. Le chiffre de $94,0 \text{ km}^2$ donné par Barsch (1969, table 2 p.72) est manifestement exagéré.

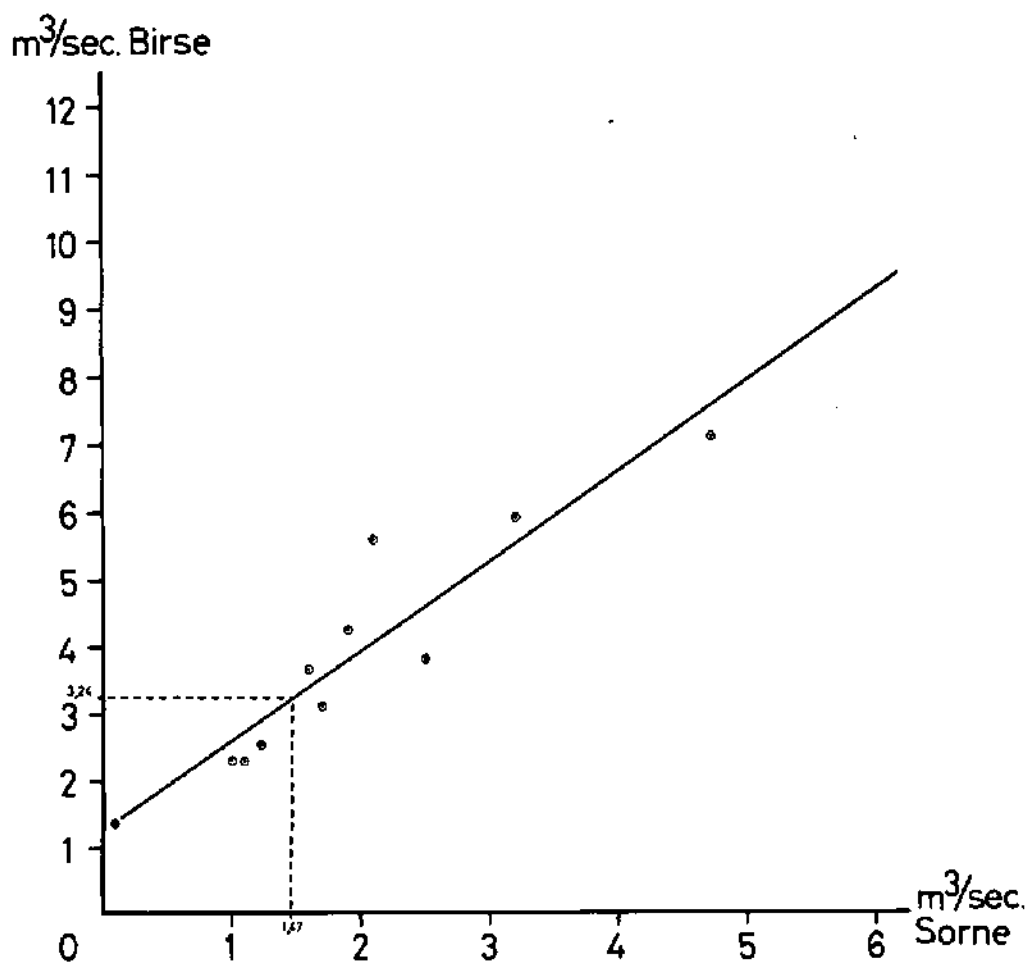


Fig. 8.IX.
Relation entre les jaugeages de la Birse (station limnimétrique de Moutier) et la Sorne (jaugeages occasionnels au Pichoux, cf. Barsch 1969).

8.4. SOURCE DE MONTOIT*

Cette source karstique importante, non captée**, ne jaillit pas dans la cluse même, mais à quelques centaines de m à l'W de son portail nord (583.050/238.890). Elle n'en est pas moins étroitement associée à la cluse et au niveau de décharge karstique qui lui est lié.

8.4.1. Le site.

A l'W d'Undervelier, le ruisseau du Miéry prend source et s'écoule dans le synclinal tertiaire; pour une raison inconnue, il oblique brusquement vers le SE et vient mordre dans le versant N de Raimeux, y coule en combe monoclinale sur environ 300 m, puis fait un nouveau coude brusque vers le N et quitte le versant. Peu avant de reprendre contact avec le Tertiaire, il s'enfle de manière importante grâce à un apport d'eau karstique: la source de Montoit.

La raison de cette curieuse incursion dans le versant calcaire est inconnue; certains y voient un tronçon épigénétique du ruisseau; quant à nous, nous pensons que l'existence de la source, elle-même liée à une zone faillée locale, n'y est pas étrangère.

La source représente l'exutoire d'un important domaine karstique s'étendant vers l'W. Il a pu être circonscrit assez exactement grâce à une expérience de coloration importante, que nous avons réalisée durant l'hiver 73-74.

8.4.2. Coloration à Lajoux.

Elle a eu lieu dans le cadre des aménagements locaux de la partie E des Franches-Montagnes, en collaboration avec l'Office d'économie hydraulique du Canton de Berne. Il s'agissait de déterminer les résurgences des effluents de la future station d'épuration de Lajoux, qu'on se propose d'infiltrer dans le karst.

a) Lieu d'injection.

La STEP est prévue au NE du village, dans la cluse sèche coupant l'anticlinal de Raimeux. Le fond du thalweg est imperméable (marnes oxfordiennes). Une canalisation y passe, qui conduit les eaux usées du village et draine les versants d'éboulis de la cluse; les eaux sortant de la future station s'é-

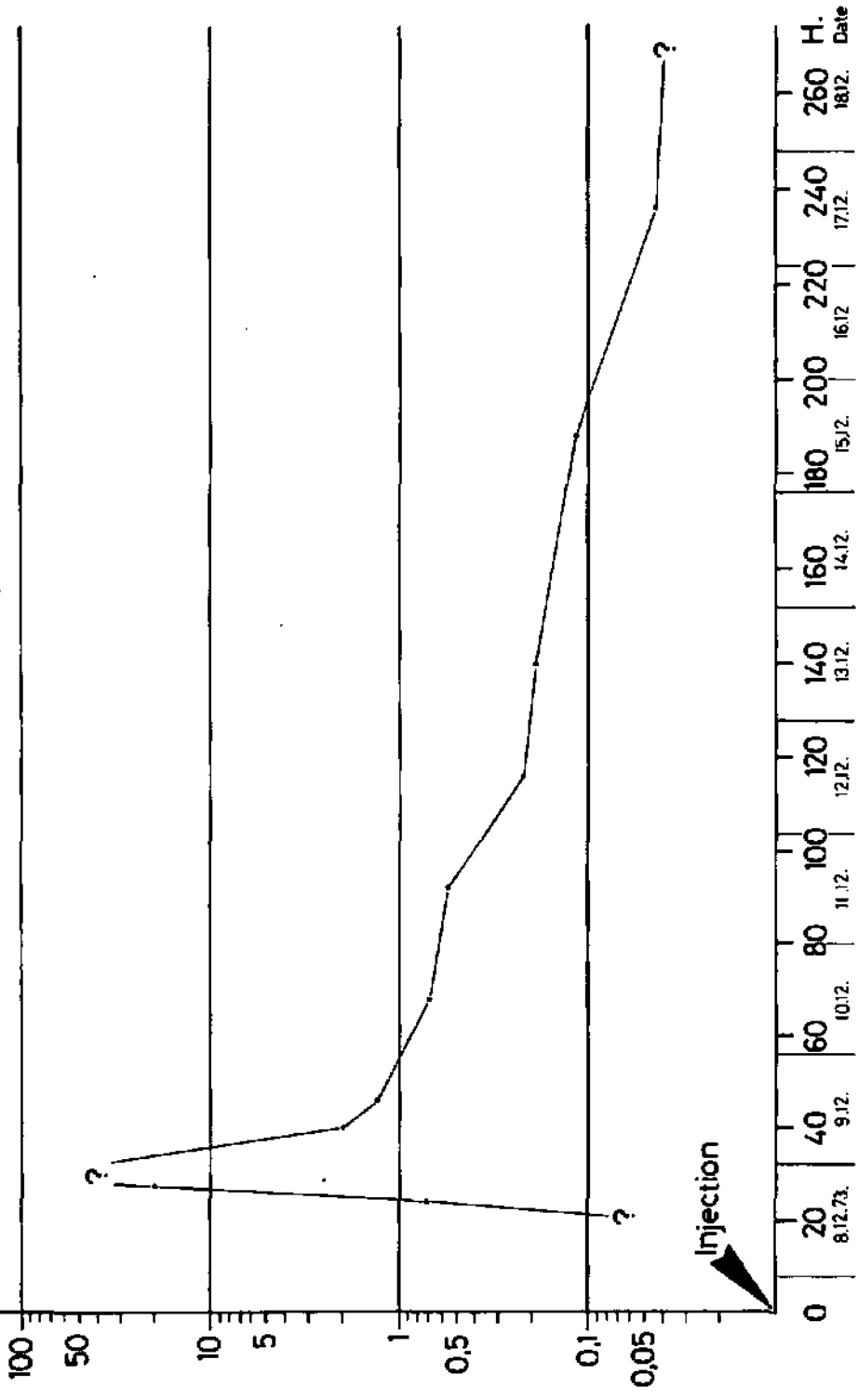
* Carte nationale au 1:25.000: Montois; plan d'ensemble 1:10.000: Montoit.

** Avant la guerre 39-45, on a étudié les possibilités d'alimenter les Franches Montagnes en eau potable à partir de cette source; l'idée a été finalement abandonnée pour des raisons d'économie de guerre (cf. rapport SEF).

$\mu\text{g/l}$

STEP Lajoux

Fig. 8.X. Source de Montoit; diagramme concentration — temps. coloration STEP Lajoux.



<u>Numérotation</u>	<u>Pose</u>	<u>Retrait</u>	<u>Temps d'exposition</u>	<u>Résultat</u>
S 13 - P 1	7.12/1300	8.12/0800	19 h	Négatif
S 13 - P 2	8.12/0800	9.12/0800	24 h	Positif++++
S 13 - P 3	9.12/0800	10.12/1200	28 h	" +++
S 13 - P 4	10.12/1200	11.12/1200	24 h	" +++
S 13 - P 5	11.12/1200	13.12/1200	48 h	" +++
S 13 - P 6	13.12/1200	15.12/1100	47 h	" ++
S 13 - P 7	15.12/1100	19.12/1200	97 h	" +++
S 13 - P 8	19.12/1200	24.12/1200	120 h	" ++
S 13 - P 9	24.12/1200	4.1 /1100	264 h	" ++
S 13 - P 10	4.1 /1100	28.1 /1300	24 j.	Négatif
S 13 - P 11	28.1 /1300	15.2 /1500	18 j.	"

TABLÉAU S.P.: Source de Montoit: analyse qualitative des fluocapteurs, coloration STEP Lajoux.

couleront aussi dans cette canalisation. A partir du pt 577.550/237.800, ces eaux s'écoulent à l'air libre dans un étroit chenal calcaire (retombée N de l'anticlinal) où elles disparaissent peu à peu dans des pertes diffuses. En période de crue, le ruisseau peut franchir le chemin (pt. 890: 577.700/237.870) et se répandre dans un petit marais situé dans la boucle du chemin, comme ce fut le cas lors de l'essai; il est cependant très rare que de l'eau s'écoule en aval du marais, dans la Combe des Beusses.

b) Injection du colorant.

Le colorant, 15 kg de fluorescéine, a été déversé à l'entrée de la canalisation (coord. 577.460/236.730), afin de tenir compte d'éventuelles fuites ou pertes occultes. L'injection a eu lieu le 7.12.73 dès 16.20 H et a bénéficié de conditions hydrologiques favorables: une couche de neige assez épaisse fondait très rapidement, sous l'influence d'un fort réchauffement de la température, accompagné de chutes de pluie abondantes.

c) Réapparition du colorant.

Les critères tectoniques et morphologiques donnaient à penser que le colorant réapparaîtrait dans le synclinal d'Undervelier, au sortir de la vallée sèche: Combe des Beusses - Combe aux Monnin; la source de Montoit était particulièrement propice, et de ce fait fut attentivement surveillée*.

Les prévisions se sont révélées exactes. Le lendemain (8.12.) à 16.30 H, le colorant ressortait déjà à la source de Montoit en concentration décelable (0,71 $\mu\text{g/l}$); à 19.30 H, on mesurait une teneur de 20 $\mu\text{g/l}$. Le maximum a dû être atteint durant la nuit, puis la vague a rapidement décru, puisqu'à 7.40 H le 9.12, on ne mesurait plus que 2,0 $\mu\text{g/l}$. La concentration a continué à décroître régulièrement pour descendre au-dessous du seuil analytiquement décelable au spectrofluorimètre 10 jours plus tard (19.12) (fig. 8.X. et tableau 8 F.).

Les fluocapteurs placés à la source ont révélé des traces de colorant jusqu'au 4.1.74; le colorant a donc mis près d'un mois à s'écouler entièrement. Cette relative lenteur des dernières traces peut être mise au compte:

- des fuites dans la canalisation d'amenée;
- de la rétention dans le marécage situé au-dessous du chemin, pt. 890.

Aucune autre source contrôlée n'a révélé la présence de fluorescéine.

* Pour les autres sources contrôlées, consulter le tableau 8 G.

d) Vitesse d'écoulement.

Les premières traces de colorant ont mis moins de 24 heures pour parcourir les 5.425 m (dénivellation 355m, soit 65,5 o/o) du parcours souterrain.

Début de l'infiltration massive: 7.12 à 16.20 h.

Arrivée à la source:

des premières traces	8.12 à 16.30 h.
de la vague principale	8.12 à 19-21 h.(?)
des dernières traces dosées	17.12 à 12.00 h.

Temps de passage:

des premières traces	23 h. 40 min.
de la vague principale	28 h. env.
des dernières traces dosées	236 h. env.

Vitesse d'écoulement:

des premières traces	229 m/h.
de la vague principale	194 m/h. env.
des dernières traces dosées	23 m/h. env.

Cette vitesse est comparable à celle obtenue lors de l'essai de coloration du Gouffre de Lajoux (cf. 8.3.5.), qui était, rappelons-le, 270 m/h pour la première vague; elle est bien supérieure à celle obtenue par Mor-nod (1959 a) pour la Rouge Eau (109 m/h, cf. 8.3.3.) ou par della Valle (1972) dans la région des Breuleux (35 m/h, cf. 12.2.3.). Il est vrai qu'ici, aucun barrage structural ne vient retarder l'écoulement.

8.4.3. Bassin d'alimentation.

Cette expérience permet d'esquisser les limites du bassin de réception alimentant la source (planche V). Il jouxte au S la limite du bassin des Blanchés Fontaines, et comprend essentiellement le domaine karstique des Cerniers de Saulcy - Cerniers de Rebévrier - Flanc N du Rameux (à l'exception du coeur de Dogger, pour les raisons que nous avons déjà évoquées plus haut (8.3.9.). Vers l'W, il est limité par la cluse de Lajoux: en effet, les eaux superficielles de la combe oxfordienne située à l'W s'écoulent par La Combe (574/237) vers le Tabeillon. Au N. il comprend le flanc calcaire méridional du Vellerat, au S et à l'E de Saulcy, ainsi que la région Combe des Beusses - Combe aux Monin; les eaux de ruissellement de la Combe Montjean et de la combe de Sous les Roches (579-580/239, dans l'Oxfordien) doivent également approvisionner notre source, par le truchement d'infiltrations dans l'étroit défilé rocheux en aval de la Combe aux Monin. Enfin, on peut inclure dans le périmètre, en première approximation, une partie du flanc S de la voûte de Ste Colombe (région La Metteneux, 582/239). Les eaux de ces dernières zones passent en siphon sous le Tertiaire du synclinal, lui-même considéré comme imperméable.

La surface de ce bassin est d'environ $9,5 \text{ km}^2$, dont $2,37 \text{ km}^2$ de zones non karstiques (marnes de l'Oxfordien essentiellement), soit à peu près 4 fois moins que le bassin des Blanches Fontaines.

8.4.4. Débit et ablation karstique.

La source de Montoit n'a jamais été jaugée en continu. Son débit varie, selon la carte cantonale de protection des eaux*, de 250 à 5.000 l/min, ce qui est manifestement insuffisant. Nous estimons qu'elle peut atteindre en crue au moins 20 à 30.000 l/min, débit qui a été atteint certainement lors de l'essai, les samedi 8 et dimanche 9.12.1973, et qui a régressé lentement les jours suivants.

En considérant les mêmes paramètres qu'au paragraphe 8.3.10., on peut calculer que le débit moyen de la source de Montoit est de 280 l/sec (annexe, chf. 27). Ce débit est proportionnellement plus faible qu'aux Blanches Fontaines, du fait de l'importance plus grande des zones à forte évapotranspiration.

En admettant une dureté moyenne de 215 mg/l (tableau 8.B.), on obtient une ablation moyenne de 0,075 mm/an sur tout le bassin. Ce chiffre est extrêmement proche de celui obtenu pour le bassin des Blanches Fontaines.

8.5. AUTRES SOURCES

D'autres sources typiquement karstiques méritent encore de retenir notre attention dans le périmètre de la cluse.

8.5.1. Source des Corbées (coord. 583.770/238.000)

Cette émergence, située juste à la sortie N de la cluse, sur rive droite de la Sorne, est captée par la commune d'Underverlier. Elle sourd au niveau même de la rivière, dans les calcaires kimméridgiens. Comme à Blanches Fontaines, une masse éboulée dissimule l'orifice de la source. Mais ici, les blocs sont plus petits et sont consolidés en brèche par de la calcite de précipitation (tuf).

En aval de la source d'ailleurs, on retrouve des masses importantes de tuf, qui forment les terrasses de Champ la Table et Recolaine (Pl. II.). Ces amas prouvent le caractère encroûtant de la source, à une époque récente, mais difficile à situer dans le temps (vraisemblablement après la dernière glaciation). Par rapport aux autres sources de la région, Corbées présente d'ailleurs un net déficit dans la teneur en carbonates (190 à 195 mg/l, contre 230 à 250 mg/l en moyenne, cf. tableau 8.B.), qui s'expliquerait (?) par le fait

* Carte de protection des eaux du Canton de Berne, 1:25.000, feuille Bellelay, publiée par l'OEHE (Office d'économie hydraulique et énergétique du Canton de Berne).

que l'eau, percolant à travers les éboulis, y laisse une partie de sa charge.

La source est située au pied d'une échancrure morphologiquement bien visible de la partie W du versant de Bambois; c'est la niche d'arrachement de l'éboulement évoqué ci-dessus. Rappelons que nous nous trouvons dans une zone tectoniquement perturbée, qui a pu favoriser cet éboulement (cf. 5.3.1.); l'eau s'échapperait du versant calcaire à la faveur de dislocations tectoniques. Il n'est pas impossible d'autre part que la source elle-même, par son action de soutirage karstique et son érosion mécanique, ne favorise une certaine tendance au déséquilibre du pied du versant, provoquant ainsi tassements et fauchages.

Le débit de cette source n'est pas jaugé exactement par la commune qui l'exploite. Sur la carte cantonale de protection des eaux, on l'estime entre 250 et 1000 l/min, ce qui est bien peu. L'étendue et la délimitation du bassin d'alimentation sont également mal connus: l'aire doit comprendre une partie du versant N de Raimeux, à l'E de la cluse (Le Bambois).

Pour plusieurs motifs, cette source mériterait une étude plus approfondie, ne serait-ce qu'en vue d'une exploitation plus rationnelle et une protection accrue, son état sanitaire laissant parfois à désirer.

8.5.2. Source du Voutier (coord. 583.770/238.000).

C'est le principal exutoire du Dogger. Il est situé sur rive droite de la Sorne; par basses eaux, l'exutoire est à quelques m au-dessus du lit de la rivière, dans des éboulis. En crue, l'eau jaillit d'une fissure dans les calcaires du "Hauptrogenstein" (Bathonien), près de 55 m plus haut. La source peut tarir complètement en étiage, même l'émissaire inférieur.

Il s'agit vraisemblablement d'une source de contact: calcaire bathonien - marnes à Homomya; elle est située sur la retombée N des couches du Dogger. Les eaux de cette source ne se singularisent ni par leur pH, ni par leur température ou leur teneur en carbonates dissous.

D'où proviennent les eaux de cette source ? L'aire d'affleurement relativement réduite du Bathonien sur le versant E de la cluse est insuffisante pour l'alimenter. On ne peut pas envisager non plus un apport depuis le versant W, par siphonnage sous la rivière. Il ne reste plus que deux solutions:

- l'eau proviendrait en grande partie de la combe anticlinale située à l'E de la cluse (Côte de l'Aimery - Forêt des Combes);
- des eaux infiltrées dans le Malm franchiraient l'Oxfordien par des zones tectonisées ou des lacunes de l'écran imperméable, dues au laminage des marnes.

Cette dernière solution est la moins probable; en tout cas,

l'esquisse structurale du toit de l'imperméable (cf. fig. 5.VI) n'a pas permis la mise en évidence de telles zones.

De toute façon, il est intéressant de constater que la cluse fonctionne comme niveau de décharge de l'étage karstique du Dogger.

8.5.3. Le captage de l'Usine de Blanches Fontaines.

(583.700/237.595) C'est une petite source karstique, jaillissant au contact Rauracien - Oxfordien, juste au pli en genou (fond de l'auge synclinale entre Raimieux et Semplain), sur rive droite de la Sorne. Ce qu'il y a de remarquable ici, c'est qu'elle se trouve juste en face des grandes sources de Blanches Fontaines, à la même altitude et en position structurale tout à fait semblable. Les deux exutoires sont cependant totalement indépendants l'un de l'autre, comme l'a notamment prouvé l'expérience de coloration du Gouffre de Lajoux (cf. 8.3.5.), où toutes les veines liquides des Blanches Fontaines accusaient des teneurs comparables en colorant, alors que le captage n'en recelait pas la moindre trace. Il n'y a donc pas de communication par siphon sous le lit de la rivière.

En étiage, l'eau sourd des éboulis au pied de la falaise rauracienne; en crue, un petit boyau karstique, situé 3 à 4 m au-dessus, dans la paroi, se met en charge et débite abondamment (1000 - 1500 l/min. ?).

L'eau provient sans doute d'infiltrations dans les couches redressées du Rauracien, formant éperon à l'E de la source.

8.5.4. Source du Tunnel (coord. 584.140/237.030).

Il s'agit à nouveau d'une source de contact: marnes oxfordiennes - calcaires rauraciens. Elle est située dans la zone de flexure, où les couches redressées du flanc S de Semplain s'aplanissent jusqu'à devenir horizontales. Elle se distingue des autres par sa température, de 2 à 3° C plus élevée. Faut-il y voir l'indice d'un temps de rétention ou d'un parcours souterrain plus long, voire d'une communication avec un niveau plus profond du karst ? Il est difficile d'expliquer cette anomalie, tout comme de déterminer la provenance exacte de ces eaux.

8.6. LES CONDITIONS HYDROGEOLOGIQUES DANS LA CLUSE D'UNDERVELIER

Cette cluse fait suite à celle du Pichoux, dans un alignement S - N presque parfait. Il ne fait aucun doute que cet alignement n'est pas fortuit. Nous allons essayer de comparer ces deux sites, et de déterminer ce qu'ils ont en commun et ce qui les différencie, tout d'abord sur le plan géologique, puis hydrographique.

8.6.1. Le site géologique.

La cluse d'Undervelier coupe l'anticlinal de Vellerat, quel-

ques km à l'E de la bordure NE des Franches-Montagnes.

Comme au Pichoux, la rivière n'aborde pas directement l'anticlinal principal; elle franchit d'abord une voûte-apophyse: l'anticlinal de Ste Colombe. Elle tronçonne ensuite le flanc S de Malm, caractérisé par une flexure très brusque des couches (redressement à la verticale au lieu-dit Rouge Pertuis); le coeur de l'anticlinal est évidé en une petite plaine (Les Grands Champs) dans les marnes et marno-calcaires bajociens et aslénien (marnes à Opalinus). La Sorne quitte le pli en franchissant ensuite les couches verticales du Malm; le flanc N montre la même tendance au renversement (Côte au Pucin - Côte de la Chaux) que l'anticlinal du Raineux.

L'allure des axes anticlinaux présente également certaines similitudes avec le pli méridional. L'axe de Vellerat est orienté WSW - ENE près de Saulcy - La Racine; puis il prend une direction W - E presque parfaite dans la zone de la cluse, à l'E de laquelle il s'infléchit SW - NE, avec un fort plongement axial vers le NE. Après la zone d'ensellement de Chenal (cluse perchée), le pli s'oriente N 100 environ, et remonte axialement.

L'ensellement de Chenal (compliqué par des failles - Hecken-dorn 1974) semble bien net (fig. 5.VI). Il existe aussi un petit ensellement du toit de l'imperméable à l'aplomb de la cluse, mais moins bien marqué que celui de Chenal. Il paraît donc évident, au contraire du Pichoux, que la rivière n'a pas "choisi" l'endroit le plus "favorable" pour franchir la chaîne. D'autres facteurs ont dû intervenir ici.

Il ne paraît pas y avoir de disharmonie majeure entre l'enveloppe de Malm et le coeur de Dogger. L'axe de la voûte interne est subhorizontal dans la région des Grands Champs.

8.6.2. Les sources karstiques.

Comme au Pichoux, le fond du thalweg est jalonné par toute une série de sources karstiques relativement importantes (pl. IV). Citons les plus caractéristiques (du S au N):

- a) La source de la Grotte de Ste Colombe, de faible débit, qui s'écoule par une diaclase au fond d'un vaste abri sous roche (583.410/239.550), creusé dans le coeur séquanien marneux du repli anticlinal du même nom.
- b) La source des Forges d'Undervelier (583.390/239.830), dans le Malm, juste avant le redressement en genou des couches.
- c) Les sources du Pont de la Jacoterie (583.200/240.260); plusieurs veines d'eau sourdent au niveau de la rivière, dans le lit d'un canal de dérivation, au contact des couches redressées du "Hauptrogenstein" (flanc S) et des marnes sous-jacentes. Leur débit est assez important, encore que mal connu. Deux déversoirs de crue

sont situés à l'W de la route, dans le versant; un autre est situé sur rive droite.

- d) Plusieurs puits captent des eaux de fond aux Grands Champs (583.260/240.550, entre autres); la nappe alluviale doit être approvisionnée latéralement par des eaux karstiques en provenance du Dogger calcaire.
- e) La source du Golat (583.250/240.910) occupe sur la remontée N des couches du Dogger une position structurale symétrique à celles du Pont de la Jacoterie, avec des débits à peu près équivalents, qui sont estimés à 1000 - 5000 l/min. (captage de la commune de Basse-court). Cette source possède des exutoires de crue, épisodiquement mis en charge, et situés au-dessus de la source, au fond du Pâturage des Melnats.

Pratiquement toutes ces sources sont situées sur rive gauche, ce qui permet de penser que l'approvisionnement vient principalement de l'W. Enfin, les plus importantes sortent toutes au niveau du Dogger, ce qui semble prouver que la cluse est une zone de décharge importante de cet étage karstique. Deux expériences de coloration effectuées dans la région tendent à le confirmer.

8.6.3. Colorations dans la vallée du Tabeillon.

- a) Le laboratoire cantonal de Berne (della Valle, 1969) a procédé le 4 mars 1969, entre 7.30 H. et 7.45 H., à une injection de fluorescéine (3 kg dilués dans 15 l d'alcool) à l'Ecluse de l'Etang de Bollement, coord. 576/238, dans la vallée du Tabeillon. Juste en aval, cette rivière franchit en cluse, très obliquement, l'anticlinal de Vellerat; une bonne partie des eaux s'infiltrent dans les calcaires du Dogger formant le coeur de l'anticlinal. Il s'agissait de déterminer si le ruisseau pollueait la source de La Combe, captée par la commune de Glovelier (574.930/237.180).

Aucune coloration significative n'est apparue à La Combe. En revanche, les sources du Golat ont été nettement colorées en vert, le 6 mars dès le matin, et durant toute la journée (rapport oral d'un observateur). Le colorant a donc mis environ 2 jours pour parcourir 7.100 m (env. 180 m de dénivellation), soit une vitesse appréciable de près de 150 m/h; on voit d'autre part que l'eau est restée piégée dans le Dogger. Ce résultat est des plus intéressants.

- b) E. Schwabe (1939, p. 119-120) a de son côté coloré l'exutoire de l'Etang de Plain de Seigne (573/236), et prétend avoir retrouvé le colorant à la source des Forges d'Undervelier. Nous estimons que ce résultat, que nous ne considérons pas de prime abord comme totalement impossible, doit toutefois être considéré avec circonspection, comme celui de la Rouge Eau du même auteur (cf. 8.3.3.); à cette époque en effet, on ne possédait pas de moyens de détection aussi perfectionnés qu'actuellement (charbon actif,

spectrofluorimètre), et une forte turbidité de l'eau pouvait prêter à confusion. L'expérience de Plain de Seigne devrait être refaite; compte tenu de critères hydrogéologiques (structure, proximité du niveau de base) et morphologiques (réseau de vallées sèches), tout donne à penser que le colorant réapparaîtrait dans le Tabellon, et de là au Golat, ou éventuellement dans le Doubs, plutôt qu'aux Forges. La possibilité d'une liaison avec la source de Montoit (8.4.) n'est pas non plus totalement exclue.

8.7. LES INONDATIONS DE JUIN 1973

A la suite des pluies exceptionnelles des 22 et 23 juin 1973 dans le Jura (tabl. 8 G), les rivières gonflèrent de façon démesurée (tabl. 8. H) et provoquèrent de graves inondations dans les vallées jurassiennes (Birse, Sorne, Allaine). Il est intéressant d'analyser les effets de cette crue subite dans le Pichoux et ses abords:

8.7.1. Écoulements superficiels.

Les rivières s'écoulant sur du Tertiaire ont dû non seulement recueillir les surplus de ruissellement de leur propre bassin, mais encore les écoulements exceptionnels des combes anticlinales, les tronçons rocheux des ruz n'étant plus en mesure d'absorber ces eaux, comme c'est le cas normalement. Cette crue des ruz a provoqué une remobilisation de leurs alluvions, qui ont été épanchées sur leurs cônes de déjection, ou roulées par la rivière, loin en aval (débâcle, Monbaron 1973 a).

Ainsi, la Sorne a nettoyé son cours supérieur de la cluse (tronçons 4 à 10, tabl. 6.A.) des cailloutis qui l'avaient peu à peu recouvert. La partie supérieure du petit lac d'accumulation, au centre des Gorges du Pichoux, a été presque entièrement comblée par ces alluvions.

Le long du ruisseau de Miéry, nous avons pu mesurer un approfondissement du lit alluvial de 15 à 20 cm, près de la source de Montoit.

8.7.2. Crue des sources karstiques.

Mais ce sont surtout les sources karstiques qui ont retenu notre attention. Naturellement, toutes celles que nous avons citées et qui jalonnent le thalweg des cluses de la Sorne se sont mises en charge et ont abondamment débité. Des exutoires supérieurs, parfois même totalement ignorés jusque-là, ont refoulé de l'eau à torrents; aux Blanches Fontaines, par exemple, un exutoire situé au-dessus de la route (cote 630 m) et qui n'a débordé qu'une ou deux fois de mémoire d'homme, a coupé la route cantonale durant plusieurs heures.

Nous avons cherché à repérer les traces de cette mise en charge exceptionnelle du karst en parcourant les flancs des anticlinaux, à l'E et à l'W de la zone de nos cluses. Les faits

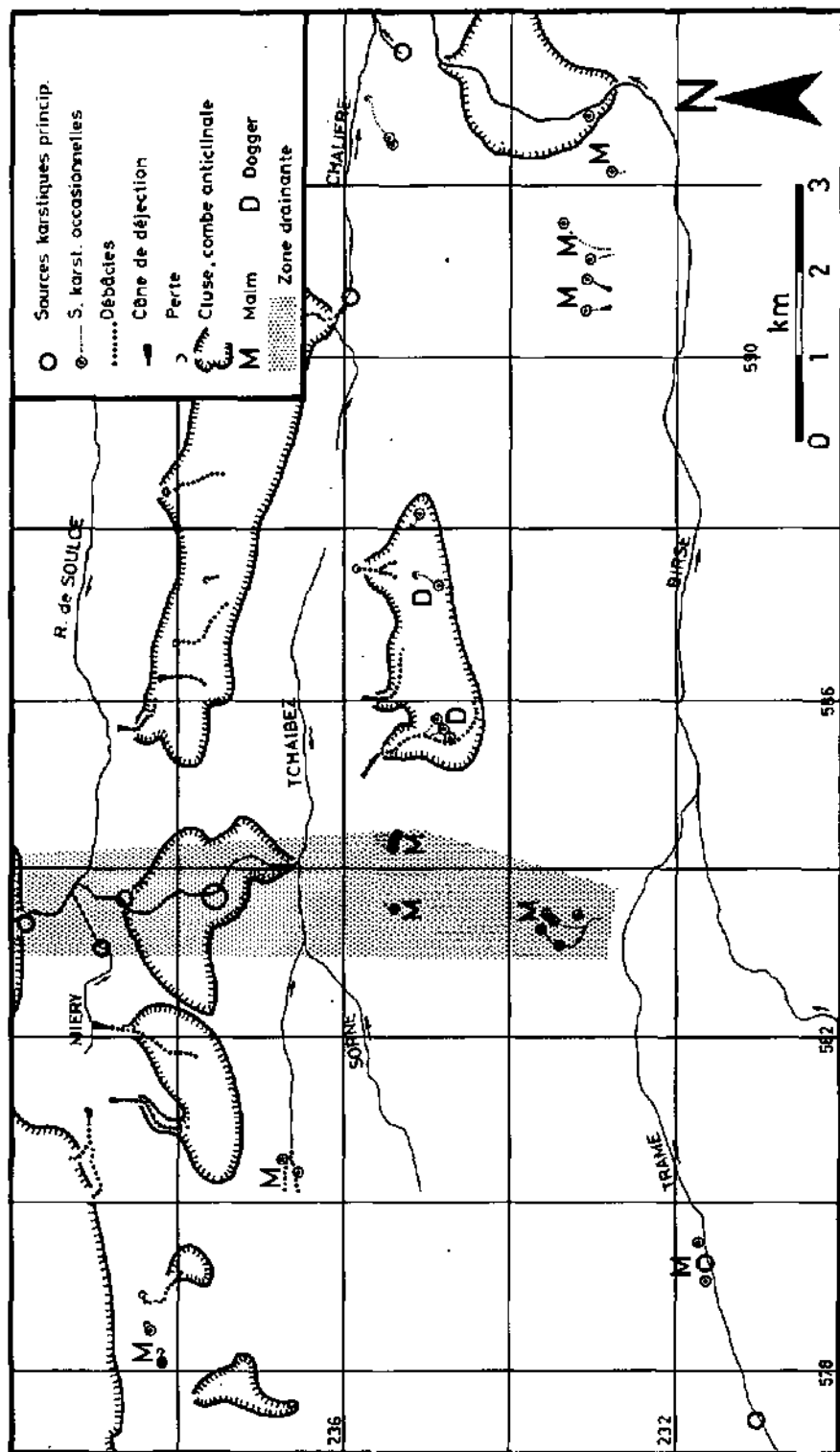
Station	18.6	19.6	20.6	21.6	22.6	23.6	24.6	25.6	Total 22-24.6	Total juin 73	Moyenne juin 1931-1960
Mont Soleil	0,0	0,0	21,0	2,4	34,5	73,7+	6,3	0,0	114,5	251,2	154
Saignelégier	1,2	0,0	35,8	0,0	86,1+	72,2	7,2	0,0	165,5	261,7	-
Bellelay	0,0	0,0	26,5	3,1	76,1+	72,1	8,7	0,0	156,9	254,3	144
Moutier	1,6	0,0	22,3	1,5	57,2	102,2+	9,2	0,0	168,6	284,8	-
Delémont	0,0	0,0	29,0	1,9	64,9+	58,4	10,2	0,0	133,5	219,3	108
Les Rangiers	0,3	0,0	32,6	2,4	55,2	78,9+	12,8	0,0	146,9	233,8	-
Mervelier	0,0	0,0	30,1	0,0	98,9	112,0+	15,0	0,0	225,9	388,0	139
Mormont	0,0	0,0	22,0	0,2	44,6+	37,4	3,7	0,0	85,7	158,1	113

TABLEAU 8. G. Précipitations enregistrées dans le Jura entre le 18 et le 26 juin 1973
(en mm de précipitation)

Station	18.6	19.6	20.6	21.6	22.6	23.6	24.6	25.6	26.6	Pointe	Moyenne juin 73	Moyenne des mois de juin	Moyenne annuelle
Birse-Moutier	2,79	2,62	3,23	4,02	4,36	39,0+	36,6	20,4	14,5	48-53	7,79	3,27	3,24
Birse-München- stein	9,83	9,22	10,2	15,7	14,3	213	269+	151	86,9	310-350	41,8	15,5	14,9
Doubs-Ocourt	10,4	13,6	12,7	13,1	9,57-	73,7	146	154+	105	175	40,5	28,2	32,6
Suze-Sonceboz	3,44	3,33-	3,33	3,55	3,33-	15,9	25,3+	15,3	10,4	29	7,08	4,13	4,06

TABLEAU 8. H. Débits des rivières jurassiennes lors des crues de Juin 1973 (m3/s)

Fig. 8.XI. Cruas de juin 1973: débâcles et sources occasionnelles.



suiuants ont été relevés (fig. 8.XI):

- sur les versants S des chaînes de Vellerat ou de Raineux, aucune émergence karstique exceptionnelle n'a pu être mise en évidence; même des ruz bien marqués, comme ceux du versant S de Semplain, ne présentaient aucune trace d'écoulement;
- sur les versants N de ces mêmes anticlinaux, chaque ruz a présenté des traces de débâcle, due aux eaux de ruissellement des combes anticlinales*; en revanche, aucune source karstique nouvelle n'a pu être mise en évidence ailleurs sur les flancs N.

L'anticlinal de Moron, au sud, a retenu toute notre attention. Nous l'avons parcouru entre Champoz et Tramelan sur son flanc S, entre Les Genevez et Les Ecorcheresses sur son flanc N. Plusieurs sorties karstiques inhabituelles sont apparues:

- sur le flanc N, au S de Sornetan (583.520/235.410, alt. 840 m) et au fond du ravin du Beucle (584.350/235.400, alt. 835 à 865 m, plusieurs sorties);
- plusieurs exutoires étagés entre 820 et 960 m d'altitude (coord. 583/233), au N du village de Saules, dans les ruz bien marqués du flanc S.

Toutes ces émergences occasionnelles sont localisées aux pieds N et S de la zone en dépression de la Montagne de Saules, elle-même située dans l'exact prolongement des cluses de la Sorne. Ces sources temporaires sont les seules, loin à la ronde, à avoir jailli sur les flancs de Moron. Les plus proches sources karstiques ayant fonctionné lors de cet événement se situent:

- dans la forêt d'Enfer (coord. 579.340/231.630, alt. 810 m, 5 km à l'W);
- dans la Combe Fabet (coord. 592.500/235.450, alt. 655 m, flanc S, 9 km plus à l'E);
- sur le versant S de Graivery, aux abords de la cluse de Court, où de nombreux ruz ont débité assez abondamment;
- à Plain Fayen (coord. 590.700/235.920, alt. 730 m, flanc N, 6 km à l'E).

La zone de la Montagne de Saules a donc "cédé" à la forte mise en charge momentanée du karst. On a assisté à une remise en

*Il n'est pas impossible que, dans certains ruz, le karst ait refoulé; il est cependant impossible de le certifier; il aurait fallu pour cela être présent au bon moment, pour localiser ces exutoires éventuels, dont les traces ont dû être effacées par la débâcle.

service d'anciens exutoires, qui furent très actifs sans doute à d'autres périodes; l'existence des ruz et échancrures d'érosion de ce secteur de la chaîne s'en trouve expliquée. Il faut surtout se rendre compte - et ceci est primordial - que cette zone de décharge est située exactement dans la prolongation S des deux cluses de la Sorne, et qu'elle occupe un site structural semblable (ensellement, cf. fig. 5.VI).

8.8. SPELEOLOGIE

La cluse du Pichoux (comme celle d'Undervelier) est particulièrement riche en cavités explorées par les spéléologues* (Pl. VIII et tabl. 8.J.). Décrivons rapidement les principales.

8.8.1. Les grottes et cavités des Blanches Fontaines.

Le site des sources de Blanches Fontaines est particulièrement riche en cavités. La plus importante est sans conteste la Grotte de Blanches Fontaines, ou Trou aux Moines, émissaire temporaire le plus méridional des sources.

Il s'agit de deux galeries subhorizontales superposées, s'enfonçant à plus de 90 m chacune dans les couches horizontales du Rauracien inférieur. On aboutit alors à un siphon, franchissable en étiage; quelques dizaines de m plus loin, on trouve un second, puis un troisième siphon, qui ont pu être vidangés et franchis. Une galerie ascendante leur fait suite, qui n'a pas encore été explorée (Spéléo Club Jura, communication orale). L'exploration est rendue périlleuse par les crues subites et imprévisibles des sources, qui risquent de réamorcer les siphons, coupant ainsi toute retraite aux spéléologues.

A cette grotte sont associées plusieurs cavités, entre lesquelles les communications n'ont pas encore été établies; mais elles doivent exister puisque toutes peuvent se mettre en charge lorsque les sources entrent en crue. Ce sont notamment:

- la Grosse Grotte (Bacon 1), vaste abri sous roche au pied des Rochers Bacon, vraisemblablement un ancien porche de sortie des sources;
- la grotte de la Petite Chute, étroit boyau incliné à plus de 50° (selon le plan des couches) et explorable sur quelques dizaines de m; c'est elle qui s'est mise en charge lors des inondations de juin 73 (8.7.2.).

*Nous remercions tout particulièrement le Groupe spéléologique de Bassecourt, affilié au Spéléo Club Jura, pour les documents qu'il nous a fournis et les visites sur le terrain, lors desquelles ses membres nous ont servi de guides.

<u>Nom</u>	<u>Coord.</u>	<u>Altitude</u>	<u>Développement</u>	<u>Etage géologique</u>	<u>No/pl.VIII</u>	<u>Remarques</u>
P** Grotte du Pichoux	584.375/236.975	840 m	92 m	Malm calcaire	35	-
P Gouffre du Pichoux	584.050/237.300	640 m	125 m (-25m)	Rauracien	36	= Gr. de la Grille
P Gr. de Blanches Font.	583.660/237.500	600 m	200 m env.	Rauracien	15	= Trou aux Moines
P Grotte de Bacon I	583.550/237.610	640 m	50 m	Rauracien	34	= Grosse Grotte
P Grotte de Bacon II	583.450/237.575	730 m	11 m	Séquanien	-	-
P Grotte de Bacon III	583.450/237.575	730 m	9 m	Séquanien	-	-
P Gr. d.l. Petite Chute	583.550/237.670	630 m	25 m	Rauracien	-	-
P Grotte du Voutier	583.850/237.985	615 m	12 m	Hauptrogenstein	-	obstruée par argile
P Gr. du Garde Porest.	583.250/238.050	760 m env.	20 m	Hauptrogenstein	-	-
P Gouffre des 100 m.	582.675/238.275	915 m	16 m	Rauracien	-	-
P Gouffre de la Salamandre	583.140/238.510	735 m	32 m (-15m)	Rauracien	-	Gf fig. 8.XII
P Grotte du Vieux Pont	583.450/238.430	570 m	10 m	Rauracien	-	-
U** Gr. de Ste Colombe	583.410/239.550	531 m	29 m	Séquanien	-	-
U Petite gr. de Ste Colombe	583.350/239.500	570 m	15 m	Séquanien	-	-
U Gr. des Grands Champs	583.100/240.350	543 m	11 m	Hauptrogenstein	-	-
U Gr. d.l. Jacotteriel	584.100/240.425?	802 m ?	15 m	?	-	Sit. approx.
U Gr. d.l. Jacotteriel et III	584.125/240.750	842 m	11 et 9 m	Rauracien	-	-
U Gr. des Melnats I	583.200/241.225?	615 m ?	14 m	Rauracien	-	sit. approx.
U Gr. des Melnats II	583.000/241.200	667 m	13 m	Rauracien	-	-
U Gr. des Melnats III	582.925/241.225	725 m	12 m	Rauracien	-	-
U Gr. du Golat	583.375/241.325 ?	589 m ?	10 m	?	-	sit. approx.
U Gr. au Pacin I et II	582.600/241.225	770 m	52 et 18 m	Rauracien	25	-

* Voir aussi tableau 12 B. et planche VIII

** P = Pichoux U = Undervelien

TABLEAU 8.J. : Cavités signalées dans la région des cluses du Pichoux et d'Undervelien*

Le réseau souterrain, dont nous venons de décrire les regards principaux, doit être extrêmement complexe et fort développé (Monbaron, 1975); de nombreux boyaux doivent être masqués par la masse éboulée dans le site des sources (8.3.1.).

Le Gouffre du Pichoux (ou Grotte de la Grille) est sans aucun doute également en relation avec le complexe des Blanches Fontaines.

8.8.2. Les exutoires des sources mixtes (cf. 8.2.2.).

Les sources du versant W ont leurs exutoires temporaires au pied de la paroi de calcaire séquanien; ce sont des abris sous roche s'étranglant au fond en fissures très étroites (Bacon 2), ou de minces boyaux ascendants (Bacon 3). Les nombreuses petites cavités qu'on trouve le long de cette paroi représentant toutes des points de suintements importants (cavités de gélivation).

Il en est de même sur le versant E de la cluse, notamment sous Rièrre ls Jstoux. Les falaises situées sous le pt. 897.9 (584.220/236.800) sont très riches en fissures karstifiées à suintements concentrés. C'est là aussi que se situe la Grotte du Pichoux, cavité importante difficilement accessible.

8.8.3. Les cavités de tassement.

Un autre type de cavités souterraines se rencontre fréquemment dans les falaises supérieures (rebord des lèvres de la cluse). Ce sont d'étroites fissures, parfois très profondes (fig. 8. XII), dues au tassement vers le vide de pans de falaise (cf. 6.5.3.). La partie tassée reste appuyée contre la roche en place, ménageant souvent un vide. De tels tassements participent activement au recul et au façonnement des versants rocheux de la cluse.

8.8.4. Cavités du Dogger.

Elles sont beaucoup moins fréquentes que dans le Malm. On peut citer la grotte du Voutier, ancien exutoire karstique en partie colmaté par des argiles, appartenant sans doute au réseau actif de la source du Voutier (8.5.2.). Sur le versant W, signale une cavité de tassement importante dans le "Hauptrogenstein" (grotte du Garde-Forrestier). Ce sont des déchirures semblables qui ont favorisé le gros éboulement de l'Usine de Blanches Fontaines (cf. 7.3.1.).

8.8.5. Les grottes de la cluse d'Undervelier.

Il y a moins de réseaux souterrains répertoriés dans cette cluse que dans celle du Pichoux (pl. VIII). Leur densité par km² reste cependant largement supérieure à la moyenne. On a affaire soit à des cavités de tassement, soit à des conduits karstiques en rapport avec des sources (Sts Colombe, Grotte

des Grands Champs). Une exploration plus systématique de la cluse devrait permettre de compléter la liste de ces objets.

8.8.6. Conclusion.

La zone des cluses de la Sorne présente une indiscutable concentration de grottes et cavités de toutes sortes. Certaines sont dues à l'existence même de la cluse (cavités de tassement). D'autres, les plus importantes à nos yeux, sont des émergences actives ou fossiles d'eaux karstiques. Le fait que les cluses en soient particulièrement riches a une signification précise; nous y revenons plus loin (cf. 12.3.).

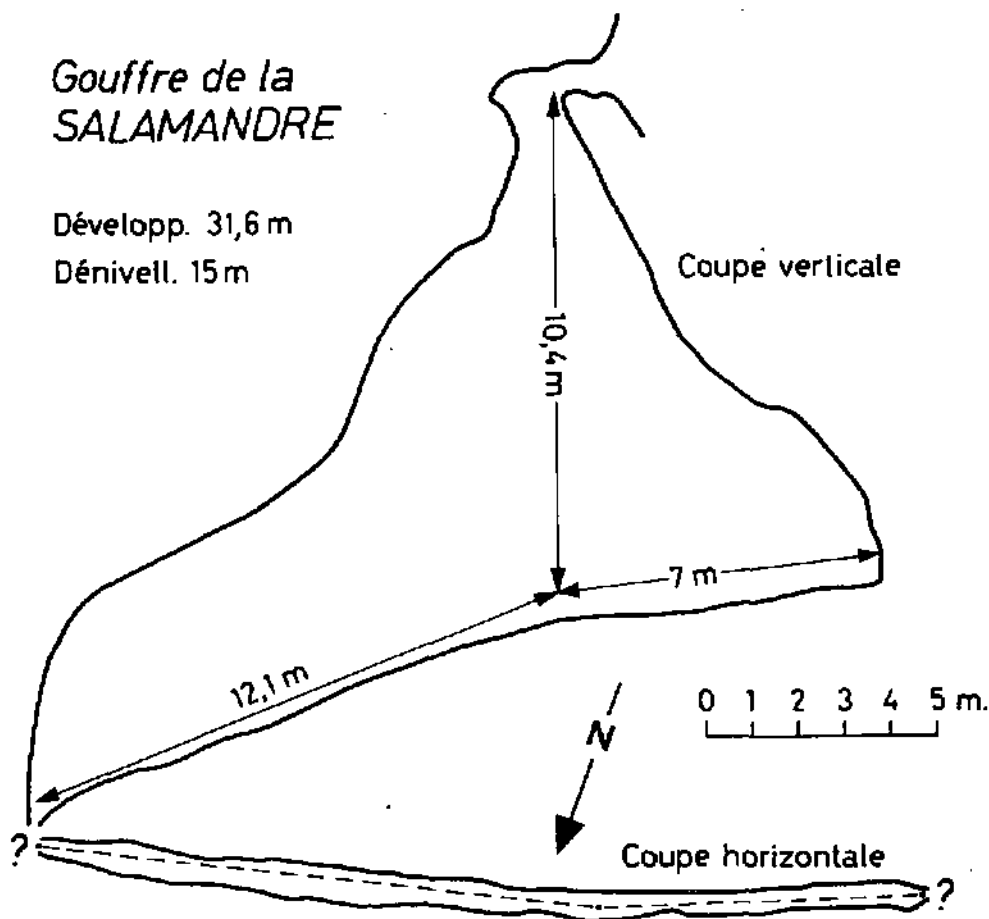


Fig. 8.XII. Gouffre de la Salamandre (cavité de tassement); d'après une esquisse du Groupe Spéléologique de Bassecourt

9.1. LES CLUSES DE LA SORNE ET LA STRUCTURE

Nous pensons que la structure est responsable de la localisation des cluses de la Sorne. En effet:

- chacune d'elles est située dans un ensellement d'axe, particulièrement marqué au toit de l'imperméable;
- chacune d'elles franchit l'anticlinal à l'endroit précis où une structure annexe apparaît pour s'accoler et se fondre avec le pli principal (relais de pli);
- à l'E de chacune d'elles existe un relais dans le coeur de Dogger;
- leur position coïncide avec le changement de direction de la chaîne: WSW - ENE dans les Franches Montagnes, W - E, voire même WNW - ESE à l'est des cluses.

La zone déprimée de la Montagne de Saules, dans la prolongation S, se caractérise également par un ensellement et l'accrolement de plusieurs structures anticlinales. C'est un site potentiellement favorable à l'emplacement d'une cluse, déjà partiellement entamé par une cluse sèche. Il est difficile cependant de préciser si elle est en voie de création (capture de la Haute - Trame) ou si elle a avorté. Une étude hydrogéologique plus complète serait nécessaire pour préciser ce point.

9.2. LES CLUSES DE LA SORNE: ZONE DE DRAINAGE TRANSVERSALE

On connaissait très mal les conditions hydrogéologiques de la région étudiée. Nos recherches ont permis d'en définir les grands traits. Il est désormais prouvé que les cluses de la Sorne représentent l'exutoire principal des eaux karstiques de l'E des Franches-Montagnes.

Les eaux s'écoulent d'abord longitudinalement vers l'E, selon la structure; à la hauteur des cluses, elles sont piégées par une zone drainante transversale, primitivement souterraine, qui les contraint à quitter ces structures. Nous pensons que cette zone drainante est surtout déterminée par les enselllements du toit de l'imperméable, formant une gouttière transversale axée N-S. Elle doit dépendre d'autre part d'une fracturation particulièrement favorable, elle-même liée à la tectonique assez complexe de cette zone; il est difficile toutefois d'apprécier correctement l'état de cette fissuration, la majeure partie des indices ayant disparu par érosion.

Cette zone drainante fait sentir ses effets vers le S, jusque dans la chaîne de Moron, comme le montrent:

- les émergences karstiques exceptionnelles lors des inondations de juin 1973, confinées dans cette partie de la chaîne; la décharge s'est produite dans une zone de "faiblesse": la zone drainante (cf.8.7.);
- le drainage souterrain, le long de cette zone drainante, à partir des sources de Blanches Fontaines. (cf. les résultats de la coloration des Craux, 8.3.4.)

On retrouve celle-ci également dans l'anticlinal de Vellerat au N, dont la dépression axiale est moins marquée; elle y permet la décharge de l'étage karstique inférieur (Dogger).

9.3. ETUDES ULTERIEURES

La recherche et l'exploitation des ressources en eaux, ainsi que la protection des nappes connues, ont toujours posé de gros problèmes dans les régions karstiques jurassiennes, et tout particulièrement dans les Franches-Montagnes. Il est étonnant qu'on ne se soit pas préoccupé plus tôt des conditions existant sur la bordure E du "Plateau".

C'est presque par hasard que nous avons été amenés à nous occuper des conditions hydrogéologiques de la région, dont on n'avait jusqu'à présent aucune idée cohérente. Ainsi est apparue l'importance de la transversale Pichoux - Berlincourt pour l'économie hydraulique régionale.

A notre avis, cette étude devrait être poursuivie, de façon plus approfondie et plus systématique. Partant des données désorms connues, il serait judicieux d'ériger pour quelques années cette zone en bassin karstique - témoin, à l'exemple de ce qui a été fait pour l'Areuse (Burger, Tripet) et pour la Serrières (Mathey, en préparation) dans le canton de Neuchâtel*.

Cette étude de longue haleine devrait porter principalement sur:

- les paramètres climatiques locaux;
- le bilan hydrologique global;
- les qualités physico-chimiques et bactériologiques des eaux karstiques et superficielles.

Elle devrait déboucher sur une mise en valeur réelle et une exploitation plus rationnelle des ressources en eau de la région, qui sont grandes.

*Une étude semblable est en cours depuis quelque temps dans la haute vallée de la Birse (vallée de Tavannes). Elle est menée sous les auspices de l'OEHE.

9.4. RESUME ET CONCLUSIONS

Pour le problème qui nous préoccupe (localisation et genèse des cluses), il faut accorder la plus grande importance à deux facteurs essentiels, le second découlant du premier:

- 1° Existence de zones tectoniquement complexes, transversales à la chaîne.
- 2° Ces zones perturbées fonctionnent comme axes transversaux de drainage karstique.

Nous allons chercher à déterminer si ces caractères se retrouvent systématiquement sur l'ensemble du territoire du Jura septentrional, là où se situent les principales cluses.

Troisième partie:

C L U S E S D U J U R A

S E P T E N T R I O N A L

10. LES CLUSES DU JURA SEPTENTRIONAL

Nous avons cherché, dans les pages qui précèdent, à décrire la cluse du Pichoux aussi précisément que possible, sans trop nous attarder sur les évidences ou les détails déjà connus. Il nous faut maintenant monter d'un cran dans l'échelle des observations, et envisager les cluses réparties sur l'ensemble du Jura septentrional.

Il s'agit tout d'abord de localiser sur carte les principales cluses et formes associées de cette région. Après avoir examiné quelques particularités touchant à leur morphologie, nous nous pencherons sur les deux points essentiels: position tectonique et décharge karstique.

10.1. CARTE DES CLUSES DU JURA SEPTENTRIONAL

Pour la dresser (pl. VI et tabl. 10.A), nous avons considéré la zone comprise entre le décrochement de la Ferrière et la limite occidentale de la zone des recouvrements, région qui comprend la majeure partie des cluses les plus typiques. Nous les avons situées par rapport aux axes anticlinaux principaux, et au réseau hydrographique. En tenant compte de toutes les formes de terrain qui répondent à la définition 2.2., nous avons envisagé plusieurs types de cluses différents, en fonction de leur position, de leur niveau de base, de leur activité.

10.1.1. Les cluses drainées.

- a) Les cluses classiques, parcourues par les cours d'eau principaux, présentent un profil plus ou moins équilibré, à quelques exceptions près. Elles sont généralement en forme de cirque, régulier ou irrégulier, selon la structure du pli. Nous citerons, parmi les plus connues: Undervelier, Court, Tiergarten, Reuchette, Mümliswil, Balsthal, ces deux dernières situées plus à l'E, hors de notre secteur d'investigation.
- b) Les cluses-défilés, débouchant sur le plateau suisse, sont creusées en "coup de scie" à travers la première chaîne du Jura. En général, elles n'ont pas atteint leur profil d'équilibre. Douanne, le Taubenloch dans notre région, l'Areuse, Covatanne ailleurs, en sont de bons exemples.
- c) Les cluses régressives; le Doubs, rivière importante, qui recoupe comme à l'emporte-pièce la partie nord-ouest de notre secteur, draine tout un cortège de vallons latéraux, entaillés au travers des anticlinaux qui enserrant la rivière au NW et au SE. Ces vallons, que nous appelons cluses régressives, ont une pente très forte. Manifestement, leur creusement n'a pas pu suivre l'enfoncement rapide du canyon du Doubs. Le Bief des Côtes au Noirmont est un bon exemple de ce type

1° Cluses drainées: nommées sur la carte

2° Cluses sèches:

I	Mavalau	IX	Mervelier - Nord
II	Fontenais	X	Chal des Prés
III	Voyehoeuf	XI	Pierre Pertuis
IV	Greifel	XII	Petite Gléresse (Dogger)
V	Maiche	XIII	Valbert (Dogger)
VI	Lajoux	XIV	Les Bugnats
VII	Chenal	XV	Le Pâquier - Villiers
VIII	Montchemin - Rebeuvelier		

3° Cluses régressives:

a)	Mouillewillers - St Hippolyte	l)	Maison Monsieur
b)	Soulce (Fr.)	m)	La Greffière
c)	Césai	n)	Combe de la Sombaille
d)	Les Moulins - Soubey	o)	Combe Grède
e)	La Fonge - Lobchez	p)	La Vieille Vacherie - Moudon
f)	Chauvillers	q)	Combe des Bains
g)	Les Côtes - Le Noirmont	r)	Cheneau de l'Envers
h)	Le Cerneut	s)	Combe à Bosset
i)	Château de Paille	t)	Combe du Bez
j)	Fromont	u)	Ederswiler
k)	Roche Guillaume - Le Pélard	v)	Bavelier

4° Passages transversaux:

1.	Combe de Varu	7.	Muriaux - Les Emibois
2.	Combe Vaillay	8.	Cerneux du Fraissalet - Les Pommerats
3.	Courtefontaine	9.	Les Cerlats - Les Royes
4.	Vacheresse	10.	Etang de la Gruère
5.	Le Moulin - Trévillers	11.	Les Joux
6.	La Seignotte	12.	Le Prédame

5° Cluses obliques:

A	Bollement - Côte des Arches (Tabeillon)
B	Combe Fabet

TABEAU 10. A. Les cluses du Jura septentrional (cf. pl. VI).

particulier, que nous distinguons sur la carte par un figuré spécial.

Le même type d'échancrure se retrouve sur le versant N du Chasseral, structuralement complexe, drainé vers la profonde dépression du Vallon de St Imier. Ici, c'est la double (ou même triple) cluse de la Combe Grède qu'on peut citer comme exemple.

Ces trois types de cluses ont en commun le fait d'être actifs, au moins durant une bonne partie de l'année. Dans chacune, il existe une pente continue, sans contre-pente, entre le synclinal amont drainé et le synclinal aval collecteur.

10.1.2. Cluses sèches.

Il existe plusieurs cluses sèches ou mortes, dépressions d'érosion indiscutables, qui paraissent avoir été façonnées par l'érosion fluviale; mais elles sont perchées en altitude, sans aucun cours d'eau de surface et leur thalweg présente parfois des contre-pentes. Ces cluses perchées sont un énigme de plus à élucider, et représentent des contre-exemples frappants pour les partisans de la théorie de l'antécédence. Pierre Pertuis, Chenal, etc., font partie de ce groupe.

10.1.3. Passages transversaux franc-montagnards.

Plus difficiles à mettre en évidence, mais tout aussi révélateurs sont les passages transversaux franc-montagnards, sortes de "cluses" de forme peu caractéristique. Il s'agit de dépressions peu marquées, plus ou moins alignées, traversant perpendiculairement les plis des Franches-Montagnes. En les examinant de plus près, on remarque qu'elles sont les points de convergence d'un ancien réseau fluvial complexe, facilement reconstituable, vestige d'un drainage sub-aérien du "Plateau", antérieur à la circulation souterraine, ou contemporain d'un permafrost. Actuellement, aucune rivière ne traverse ces dépressions. Le sillon Etang de Gruère - La Theurre - Les Royes illustre bien ce type.

10.1.4. Répartition.

A première vue, on ne voit aucune ordonnance particulière dans la répartition des cluses sur notre territoire. Certains anticlinaux (p. ex. le Vallerat) sont franchis en cluse à plusieurs reprises. D'autres chaînons, en revanche, n'en possèdent aucune (Montoz, p. ex.).

10.2. MORPHOLOGIE DES CLUSES

Les cluses de notre région (à l'exception du cas particulier des cluses régressives), possèdent en commun certains caractères, qui semblent obéir à certaines lois morphologiques.

Nous allons les passer en revue ci-dessous. Il est bien entendu que certaines considérations concernant le Pichoux seront reprises et généralisées.

10.2.1. Forme des cluses. (cf.5.1.)

Le type parfait de cluse reste le cirque rocheux, tel qu'on le trouve à Moutier (fig. 10.1) ou à Court; il existe néanmoins une autre forme classique, dite "en canyon". Examinons en détail ces deux cas et ce qui les détermine.

a) La forme en cirque.

En gros, on peut admettre que toutes les cluses en cirque ont entre elles deux caractères communs:

- elles tronçonnent un pli à voûte plus ou moins régulière;
- l'érosion y a mis à découvert une formation marneuse de grande épaisseur.

Outre Court et Moutier, mentionnons encore comme exemples: Reuchenette, Tiergarten, Soyhières Nord, Underweller, etc.

Le cirque est la forme géométrique logique créée par l'érosion à travers une voûte anticlinale. La symétrie du cirque dépend essentiellement du type de pli traversé (pli droit, renversé) ainsi que du plongement axial.

Les lois de désagrégation des bancs calcaires (dorsale, frontale, régressive, cf. Aubert 1969) s'appliquent très bien ici, et justifient aussi une telle forme; en effet:

- l'action de l'érosion frontale est freinée lorsque les bancs sont redressés; les portails d'entrée et de sortie sont ainsi "naturellement" préservés et maintenus en relief;
- l'action de l'érosion frontale est au contraire d'autant plus accélérée que les couches sont plus proches de l'horizontale: dans un pli régulier, l'horizontalité est atteinte au sommet de la voûte; c'est précisément à cet endroit, là où le recul doit être par nature le plus rapide, que les cirques atteignent leur plus grande largeur;
- la fissuration, particulièrement développée dans la zone de charnière, favorise également l'évasement du cirque.

L'existence d'un niveau marneux est aussi d'une importance primordiale. Son effritement continu affouille le pied de la formation calcaire sus-jacente et celle-ci se désagrège pour rétablir l'équilibre compromis. Plus le niveau marneux est épais et friable, plus son impact sur le recul des parois du cirque est grand, et plus la cluse s'évase.



Fig. 10.I. Un cirque typique: la cluse de Moutier, vue d'avion; à l'arrière-plan le cluse de Choindez, hémicycle oriental. Photo J. Chausse.



Fig. 10.II. Cluse d'Undervelier, versant oriental; le sommet de la voûte a été décapé; la cluse s'est soudée à la Combe anticlinale adjacente. Photo J. Chausse.

Notons enfin que le décapage du sommet de la voûte par l'érosion aréolaire a pu faire disparaître le sommet de l'une ou des deux lèvres: la cluse devient ainsi partie intégrante d'une combe anticlinale; la cluse d'Undervelier (lèvre E, fig. 10.II), celle du Vorbourg, sont de ce type.

b) Forme en canyon.

Les cluses en canyon (cluses-défilés) sont étroites, peu évasées. Elles tronçonnent des entablements calcaires subhorizontaux ou peu inclinés:

- larges plis coffrés (Taubenloch, Semplain);
- flancs très peu inclinés, monoclinaux, d'anticlinaux disymétriques (Areuse).

On constate que le niveau marneux principal (Oxfordien ou Argovien), facteur d'évasement rapide, n'est pas atteint.

Enfin, l'âge de la cluse doit aussi entrer en considération: une telle forme est certainement récente (cf. 13.1.2.), puisque l'érosion aréolaire ne réussit pas à "suivre" l'enfoncement linéaire rapide du cours d'eau.

On peut ainsi se demander si les cluses traversant la première chaîne jurassienne ne franchissent pas ce qu'il conviendrait d'appeler un gradin de confluence, dont la formation (récente ?) reste inexpliquée (réajustements glacio-eustatiques ?, mouvements tectoniques récents ?). Le creusement intense actuel est un "rattrapage" par l'érosion régressive; ces cluses sont en tout cas loin d'avoir atteint leur profil d'équilibre.

10.2.2. Orientation des cluses. (cf.6.2.)

Nous envisageons ici le problème de la perpendicularité des cluses par rapport à la direction des axes anticlinaux. A cet effet, nous avons mesuré, pour les cluses de notre territoire qui s'y prêtaient, l'angle formé par la direction générale de la cluse, prise entre les deux portails, et la direction axiale locale du pli. On constate (tabl. 10.B. et fig. 10.III.):

- que les cluses déterminant un angle α supérieur à 90° sont plus nombreuses (près de $2/3$ des échantillons) et mieux groupées; on peut y voir une tendance à s'aligner sur le système de cisaillement sénestre (fig. 10.III.b);
- les cluses très obliques ($\pm 30^\circ$ par rapport à la perpendicularité) sont des exceptions (8 %);

TABLEAU 10. B. : Orientation des cluses du Jura septentrional.

No	Nom	Type*	Axe cluse	Axe pli	Valeurs**
1	Biaufond	A	N 99	N 52	47°
2	Greifel	B	N 168	N 114	54°
3	Chenal	B	N 165	N 108	57°
4	Pichoux - Raimeux	A	N 175	N 110	65°
5	Chauvillers	C	N 140	N 72	68°
6	Crémines	A	N 137	N 62	75°
7	Tiergarten	A	N 146	N 70	76°
8	Pichoux-Raimeux (Malm)	A	N 170	N 92	78°
9	Vautenaivre	A	N 155	N 75	80°
10	Envelier	A	N 160	N 80	80°
11	Mervelier-Sud	A	N 102	N 19	83°
12	Undervelier Malm	A	N 175	N 92	83°
13	Rebeuvelier	B	N 145	N 58	87°
14	St Ursanne (Dogger)	A	N 164	N 76	88°
15	Choindez	A	N 152	N 61	91°
16	Pierre Pertuis	B	N 192	N 101	91°
17	Petite Gléresse	B	N 156	N 65	91°
18	Pichoux-Semplain	A	N 182	N 90	92°
19	Combe Grède	C	N 150	N 58	92°
20	Reuchenette	A	N 174	N 82	92°
21	Welschenrohr	A	N 153	N 57	96°
22	Undervelier Dogger	A	N 188	N 92	96°
23	Lajoux	B	N 188	N 92	96°
24	Soyhières	A	N 193	N 96	97°
25	Goumois	A	N 172	N 74	98°
26	Twannbach	A	N 146	N 47	99°
27	Vorbourg	A	N 195	N 94	101°
28	Court	A	N 187	N 85	102°
29	Liesberg	A	N 225	N 123	102°
30	Moutier	A	N 174	N 70	104°
31	Taubenloch	A	N 160	N 55	105°
32	Valbert	B	N 176	N 70	106°
33	Fontenais	B	N 170	N 61	109°
34	Voyeboeuf	B	N 171	N 61	110°
35	Lucelle	A	N 182	N 72	110°
36	Soulce (Fr.)	C	N 185	N 74	111°
37	Ste Colombe	A	N 193	N 74	119°
38	Le Pâquier	B	N 191	N 72	119°

* A= cl. drainée
 B= cl. sèche
 C= cl. régressive

** cf. fig. 10.III.

- en cumulant les valeurs de α symétriques par rapport à la perpendiculaire à l'axe du pli ($\alpha = 90^\circ$), on voit deux maxima: l'un entre ± 20 à 25° et l'autre entre ± 5 à 10° ; le troisième maximum (± 35 à 40°) ne nous paraît pas significatif.

Dans la règle, les cluses ne sont donc pas exactement perpendiculaires aux plis; elles ont tendance à s'aligner en fonction des systèmes de cisaillement sénestre ou dextre, plus pré-

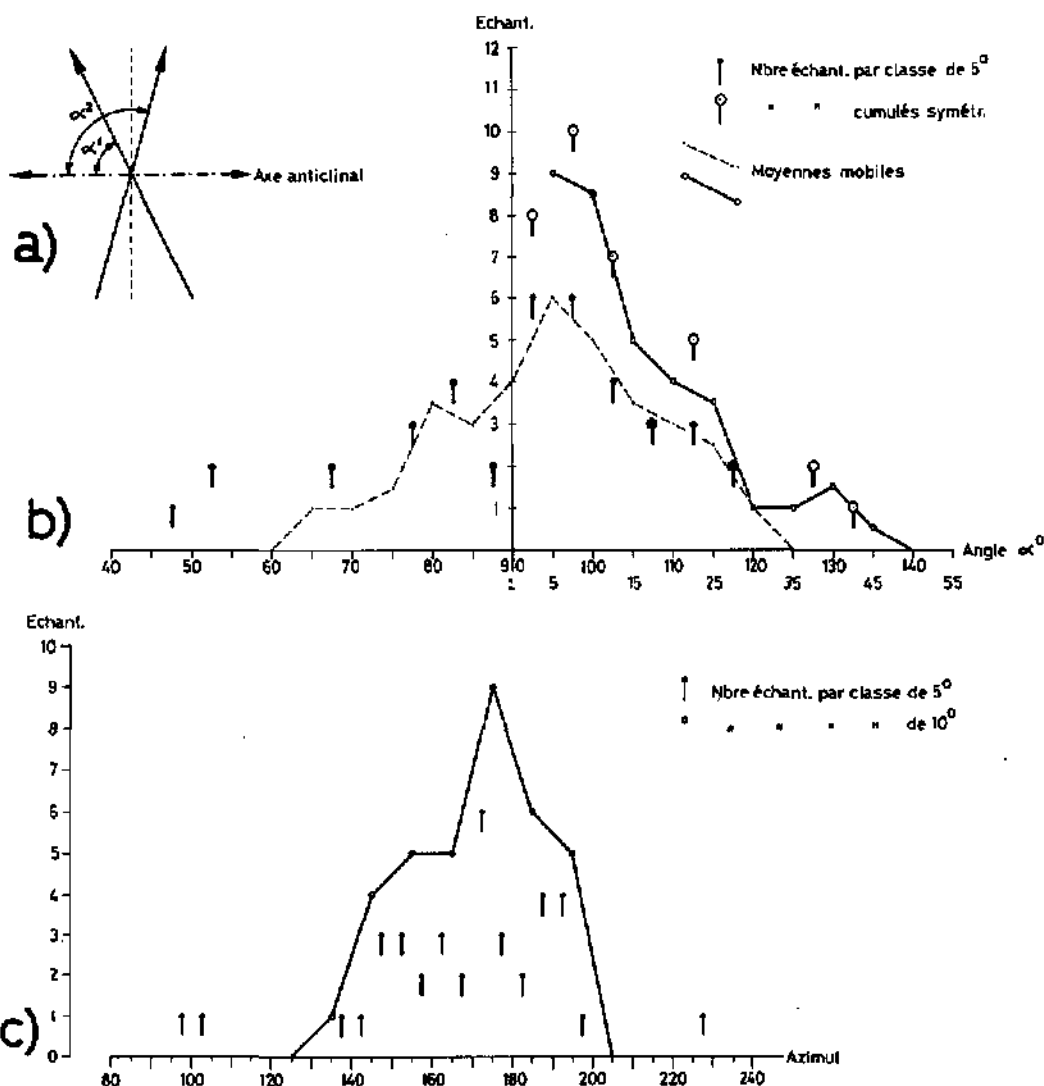


Fig. 10.III.

- a) Schéma définissant α (= angle formé par l'azimut de l'axe anticlinal et l'azimut de la cluse).
- b) Orientation des principales cluses du Jura septentrional par rapport à l'orientation des axes anticlinaux.
- c) Azimut des principales cluses du Jura septentrional..

cisément encore selon la bissectrice de l'angle déterminé par les fentes de cisaillements et les fentes de tension I (cf. 6.3.).

Si l'on tente de grouper les échantillons selon leur orientation régionale (orientation par rapport au N géographique), on obtient le diagramme de la fig. 10.IIIC). La direction la plus commune est située entre N 170 et N 180; les autres exemples semblent distribués normalement de part et d'autre de ce maximum. On constate enfin que près de 80 % des cluses de notre région sont axées entre N 150 et N 200. Nous verrons plus loin (11.3.3.) comment interpréter ces constatations du point de vue tectonique.

10.2.3. Incidence du plongement axial.

On peut vérifier très facilement dans tous nos exemples les règles de disymétrie constatées au Pichoux (cf. 7.2.), à savoir:

- le plongement axial influence la forme générale de la cluse;
- le versant conforme au plongement est moins raide que le versant contraire au plongement.

La figure 10.IV. montre quatre exemples particulièrement démonstratifs (Reuchenette, Court, Moutier, Tiergarten). On peut donc, par ce simple critère morphologique, connaître immédiatement le sens du plongement de l'axe à l'endroit de la cluse.

Comme au Pichoux, les versants conformes au plongement favorisent les mouvements gravifiques de grande envergure. Citons pour mémoire:

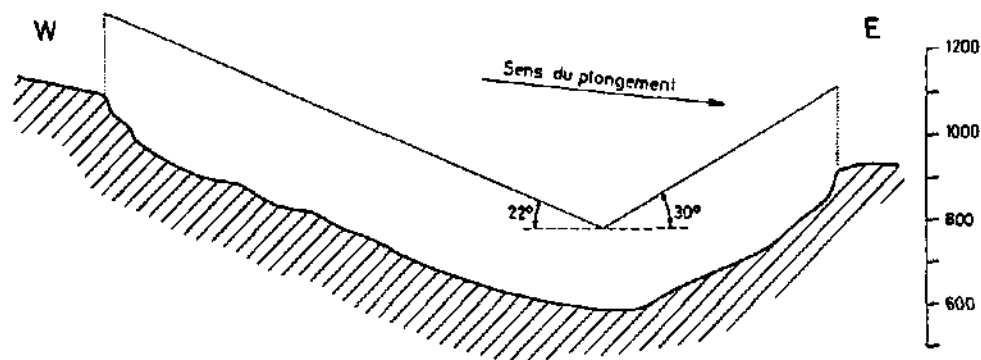
- les traces d'énormes tassements dans la Forêt de Châtel, sur la lèvre W de la cluse de Reuchenette (584/224-225);
- le grand glissement de 1938 dans la cluse de Court, versant E, qui accumula plus de 2 millions de m³ de matériaux au centre de la cluse, coupant toute communication pendant plusieurs semaines.

10.2.4. Relation profondeur - largeur des cluses.

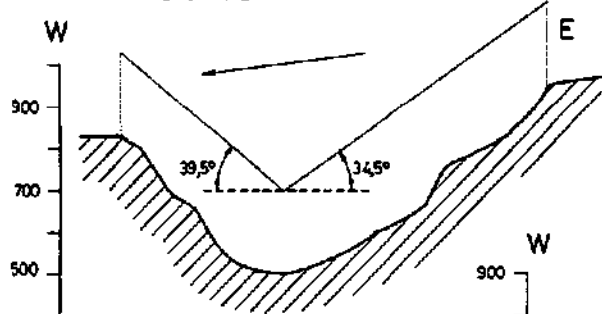
Il nous a paru intéressant de comparer deux paramètres, dont on pourrait penser qu'ils sont en relation directe (schéma, fig. 10 V):

- la profondeur de la cluse, autrement dit la valeur de l'enfoncement de la rivière à partir du sommet de l'anticlinal. Nous l'avons calculée dans l'état actuel, sans tenir compte de la tranche calcaire décapée par l'érosion aréolaire au sommet des plis;

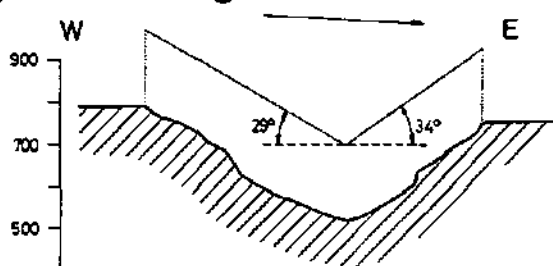
Reuchenette



Moutier



Tiergarten



Court

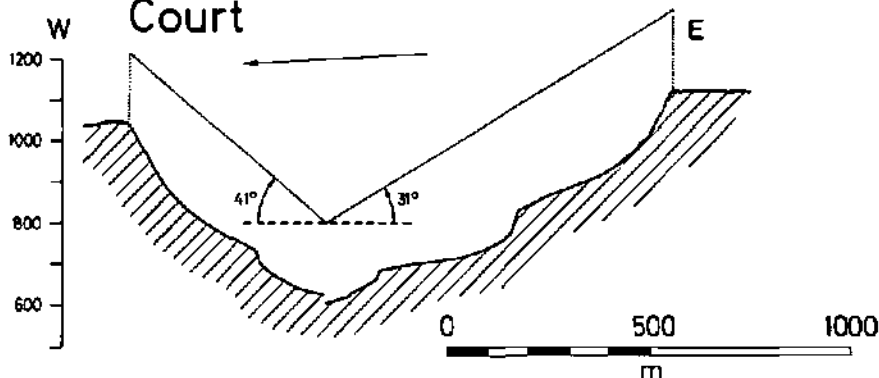


Fig. 10.IV.
Disymétrie de quelques cluses, due au plongement axial.

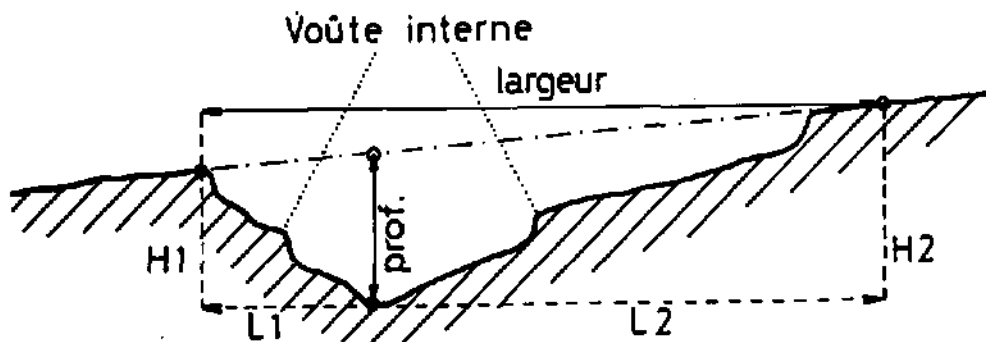


Fig. 10.V. Profondeur et largeur des cluses (schéma); situation de la voûte interne.

- la largeur de la cluse, soit la distance à vol d'oiseau (rabattue à l'horizontale) entre les deux points les plus éloignés des deux bords; ceux-ci se situent généralement sur la charnière principale du pli.

Bien entendu, nous n'avons pas mesuré la largeur des cluses ayant évolué en combe anticlinale, comme le Vorbourg, Roches ou Undervelier. En revanche, quand cela était possible, largeur et profondeur des voûtes internes (Argovien inférieur, Dogger) ont été déterminées (fig. 10.V).

On constate (fig. 10.VI et tabl. 10.C) qu'il existe une relation linéaire évidente entre profondeur et largeur pour les cluses de largeur inférieure à 1300 m. Cette relation linéaire devient moins nette pour les cluses plus larges: la courbe s'infléchit entre 1300 et 1800 m de largeur et semble devenir asymptotique au-dessus de 3000 m, ce qui peut s'expliquer de la manière suivante: la rivière ne peut s'enfoncer indéfiniment (niveau de base, profil d'équilibre atteint), alors que les deux lèvres peuvent théoriquement s'éloigner à l'infini, dans le cas d'un éventrement de la voûte en combe anticlinale à crêtes parallèles.

Les cluses sèches ou perchées sont trop peu profondes par rapport aux cluses actives; en effet, l'approfondissement est réduit à un soutirage karstique, moins actif qu'une érosion linéaire normale.

Remarquons encore la position particulière des cluses de Semplain et Moutier, situées très au-dessus de la courbe; il semble que l'érosion linéaire a travaillé particulièrement vite (près de deux fois plus vite qu'ailleurs), ce qu'atteste leur caractère juvénile (cf. 13.3.).

No**	Nom	Largeur m	ΔH lèvres W H ₁ l ₁	ΔH lèvres E H ₂ l ₂	Profondeur* m
A. Cluses drainées					
1	Ste Colombe	250	60/70	130/180	80
2	Twannbach	620	100/250	130/370	110
3	Taubenloch	420	130/200	130/220	130
4	St Ursanne-Dogger	700	180/400	130/300	151
5	Choindez interne	680	170/310	150/370	160
6	Mervelier Sud	750	200/320	220/430	208
7	Liesberg	1200	220/650	200/550	210
8	Tiergarten	890	260/530	220/360	236
9	Biaufond	2050	313/650	213/1400	280
10	Semplain (Bord sup.)	550	290/230	310/320	298
11	Semplain-Rauracien	170	80/100	65/70	71
12	Soyhières (Dogger)	1950	350/1130	970/820	305
13	Moutier	1020	320/350	450/670	365
14	Voûte interne	630	150/180	250/450	180
15	Reuchenette	2100	510/1400	330/700	390
16	Pichoux-Raimeux	2280	460/1450	360/830	396
17	Voûte interne	640	150/460	115/180	125
18	Goumois	3050	450/1800	360/1250	398
19	Crémines	3000	480/1600	425/1400	450
20	Court	2060	425/510	560/1550	458
21	Voûte interne	1300	150/290	2060/1010	175
22	Undervelier	2680	470/1350	470/1330	470
23	Voûte interne	880	230/450	210/430	220

B. Cluses sèches

a	Petite Gléresse	170	35/70		35/100		35
b	Valbert	240	35/100		35/140		35
c	Lajoux	410	45/200		70/200		57
d	Fontenais	480	65/180		55/300		61
e	Voyeboeuf	500	90/220		95/280		92
f	Le Pâquier	320	95/150		95/170		95
g	Rebeuvelier	900	110/280		150/620		122
h	Pierre Pertuis	700	100/250		180/450		128
i	Chenal	1160	210/640		160/520		185
j	Cul des Prés	1300	210/780		180/520		190
k	Greifel	1400	200/760		190/640		195

* Cf. définition fig. 10.V.

** Cf. fig. 10.VI.

TABLEAU 10 C. : Largeur et profondeur des cluses du Jura septentrional.

profondeur
m

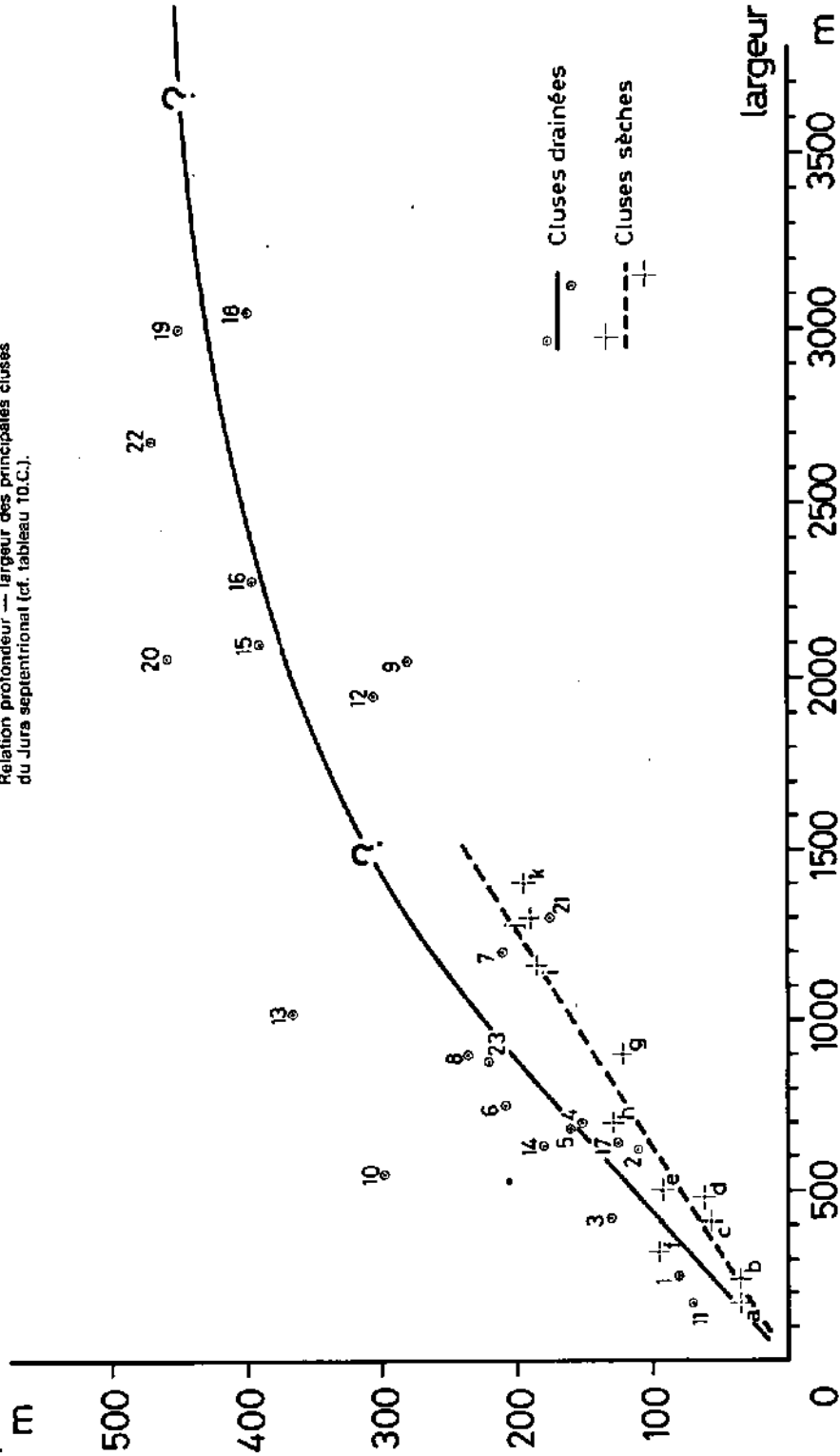


Fig. 10.VI.
Relation profondeur — largeur des principales cluses
du Jura septentrional (cf. tableau 10.C.).

En définitive, on peut se demander si les cluses de dimensions réduites (jusqu'à 1300 m de largeur) ne sont pas les plus récentes, les autres datant d'un "cycle" précédent, ce qui expliquerait la coupure entre 1300 et 1900 m de largeur (aucun exemple); les arguments manquent cependant pour le confirmer.

A part ces quelques considérations générales, aucun élément déterminant ne peut être tiré de cette étude.



Fig. 10.VII.

Erosion différentielle dans la cluse de Moutier (portail sud, rive droite). Les marnes, plus friables, ont été emportées par ruissellement. Photo J. Chausse

11. CLUSES ET TECTONIQUE JURASSIENNE

Il ne fait aucun doute que les cluses de ce territoire ont un lien direct, étroit, avec la tectonique jurassienne, à toutes les échelles. Les événements tectoniques qui ont affecté les séries calcaires (plissement, fracturation, etc.) ont en quelque sorte tissé la trame sur laquelle se sont imprimés les grands traits de la morphologie de notre région. Cependant, si évident qu'il soit, ce lien est difficile à démontrer de façon péremptoire.

11.1. COMPARTIMENTAGE DU JURA SEPTENTRIONAL

La chaîne jurassienne est découpée en "portions" par les grandes failles à décrochement (St Cergue - Morez; Pontarlier; etc.). Le décrochement le plus oriental est celui de La Ferrière (carte tectonique de la Suisse 1:500.000). La plupart des cluses qui nous occupent étant situées à l'E de ce décrochement, on peut se demander si leur localisation a un rapport avec cette situation particulière.

11.1.1. Photo - satellite et linéaments.

En examinant attentivement une vue par satellite de cette région, prise à très haute altitude (fig. 11.I.), il apparaît qu'on peut la subdiviser en plusieurs blocs.

Les limites de ces blocs sont marquées par des alignements de dislocations ou de structures tectoniques, qui tantôt modifient, tantôt soulignent l'ordonnance des compartiments morphologiques. Ces points d'accrochage structuraux peuvent être:

- des noeuds tectoniques (p.ex. Les Rangiers);
- des plis transverses (St Brais, Develier, Vicques, etc.);
- des relais axiaux;
- de brusques inflexions de direction des axes anticlinaux;
- des alignements de bordures synclinales; etc.

Nous désignerons ces alignements par le terme de linéaments (W. Hobbs 1904 in J.G. Dennis 1972).

A l'intérieur même des blocs, des linéaments secondaires déterminent des compartiments, dont l'agencement sera étudié plus loin (fig. 11.II.).

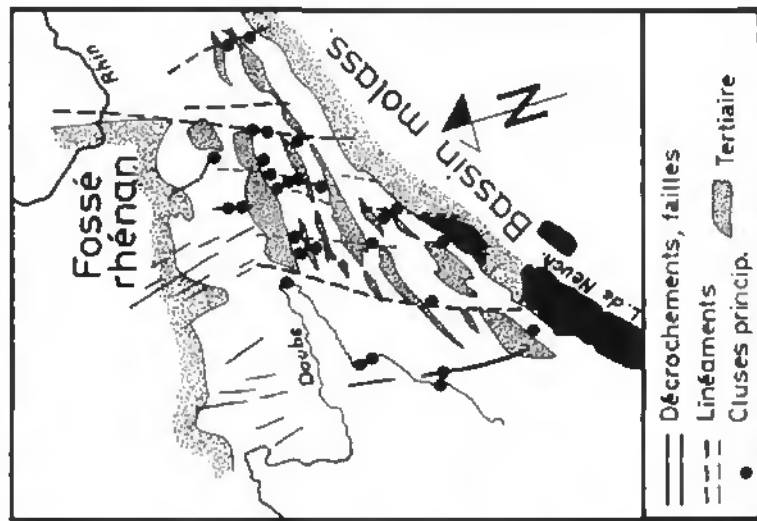
11.1.2. Linéaments et blocs principaux.

Dans la portion de chaîne qui nous intéresse, on reconnaît deux linéaments principaux (fig. 11.II. et 11.III.).

Le linéament A (L.A.) apparaît dans la région des Rangiers,

Fig. 11.1.

- a) Photo-satellite de la partie nord-orientale du massif jurassien (20 mars 1973, Nasa Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland 20771)
- b) Interprétation tectonique: linéaments et position des principales cluses.



suit la chaîne de St Brais, prend en enfilade la bordure E des Franches-Montagnes, puis par Cormoret et Les Eguenets rejoint Chaumont et Neuchâtel. Il est orienté N 30 à 35 E.

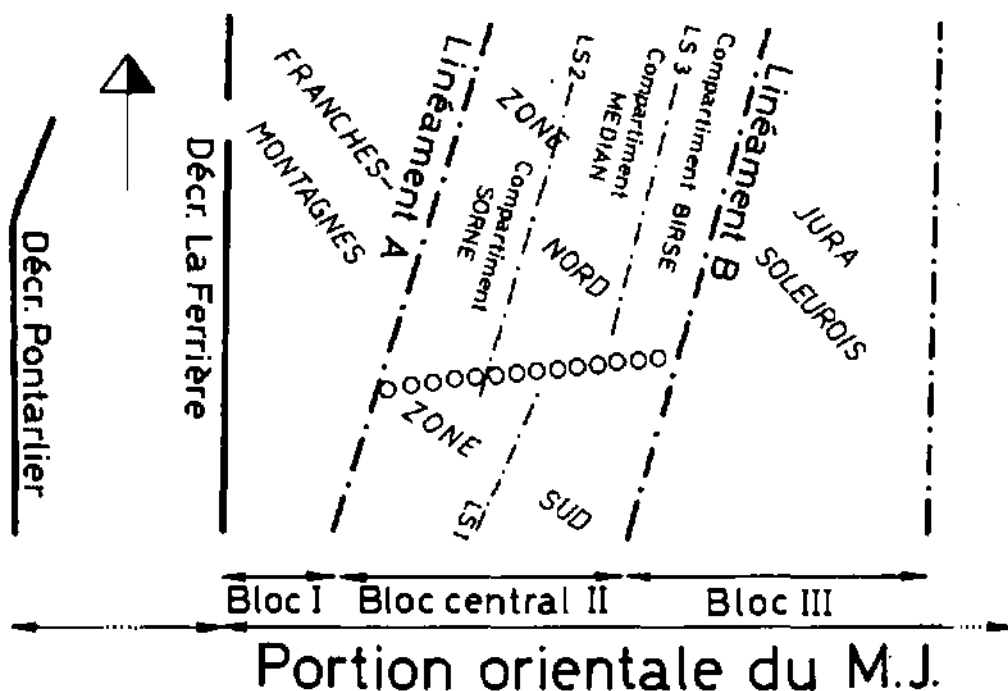


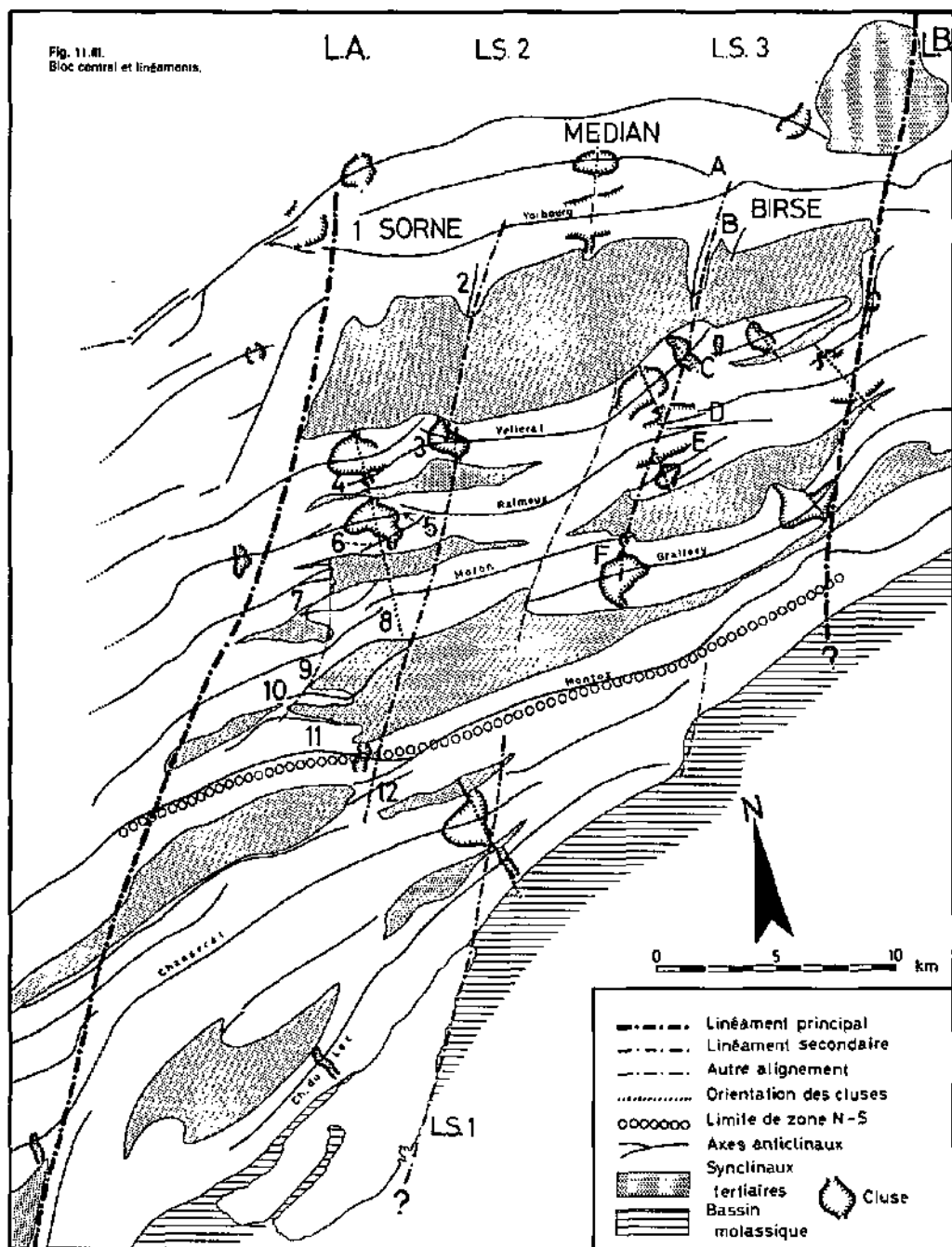
Fig. 11.II. Schéma montrant les subdivisions de la portion orientale du massif jurassien.

Le linéament B (L.B.) jalonne la bordure occidentale du Jura tabulaire bâlois; il longe ensuite la bordure E des bassins de Laufen et de Delémont, puis gagne le Weissenstein, par Envelier et Günsbrunnen; il se prolonge vraisemblablement sous le Bassin molassique (?). Il est orienté N 20 E environ.

Trois blocs principaux sont ainsi délimités:

- le bloc occidental I, situé entre le décrochement de La Ferrière et le linéament A; il comprend notamment les Franches-Montagnes;
- le bloc central II, entre les linéaments A et B, est étudié en détail ci-dessous;
- le bloc oriental III, limité à l'W par le linéament B,

Fig. 11. III.
Bloc central et linéaments.



comprend notamment les zones du Scheltenpass et du Passwang (Jura soleurois): sa limite orientale n'est pas discutée ici.

Les blocs occidental I et oriental III sont sous-compartimentés, tout comme le bloc central d'ailleurs. Ils comptent relativement peu de cluses, ce qui nous fait renoncer à en décrire l'agencement de détail.

11.2. LE BLOC CENTRAL (fig. 11.III)

Ce bloc, large de 20 à 25 km, comprend la majeure partie des bassins tertiaires jurassiens, qui jalonnent l'ancien détroit reliant le Fossé rhénan au Bassin molassique suisse. On y trouve aussi la plupart des cluses jurassiennes typiques. Loin d'être monolithique, il se subdivise encore longitudinalement en "zones" et transversalement en "compartiments", ces derniers limités par des linéaments secondaires (fig. 11.II.)

11.2.1. Zones.

Les linéaments secondaires (décrits plus loin) butent sur une dorsale longitudinale: la chaîne du Droit, relayée à partir de Pierre Pertuis par celle de Montoz - Weissenstein. Cette dorsale délimite ainsi deux zones, la zone Nord et la zone Sud.

Rappelons que cette dorsale est précisément la principale ligne de partage des eaux du Jura septentrional (bassins de l'Aar au S, du Rhin au NE, du Doubs au NW).

11.2.2. La zone Sud.

La zone méridionale ne nous retiendra que peu de temps. On n'y trouve d'ailleurs que deux ou trois cluses typiques, dont deux parfaitement alignées: la cluse de Reuchenette et celle du Taubenloch, qui recoupent sous un angle de 35 à 40° environ le linéament secondaire 1 (LS 1), orienté N 22 E environ.

Ce linéament débute à l'extrémité orientale du Vallon de Péry, passe par la dépression axiale d'Evilard, jalonne la rive SE du Lac de Biemme, et se prolonge peut-être sous le Bassin molassique (?).

11.2.3. Compartimentage de la zone Nord.

Deux linéaments secondaires (LS 2 et LS 3) sont définis dans la zone Nord:

- le linéament secondaire 2 (LS 2), orienté N 25 E environ, qui débute au pli transversal de Develier (= ligne de Develier, Heckendorn 1974), passe par Chenal - Soule - Le Perceux, franchit Moron près de Loveresse, et rejoint finalement Pierre Pertuis, seul endroit où la dorsale Montagne du Droit - Montoz soit quelque peu perturbée transversalement;

- le linéament secondaire 3 (LS 3), orienté en gros N 26 E, qui longe le pli transverse de Vicques, passe près des terminaisons périclinales de Vellerat et Tiergarten, franchit la cluse de Roches, évite celle de Moutier par l'W et se termine à l'entrée N de la cluse de Court.

Parallèlement à LS 3, 2 à 3 km plus à l'W, on distingue un autre alignement moins important, passant de Courrendlin (W du portail N de la cluse de Choindez) à la terminaison périclinale occidentale de Mont Girard - Graivery, en effleurant à l'W le bassin de Moutier.

On peut ainsi définir 3 compartiments principaux:

- le compartiment Sorne (à l'W), limité par L.A. et LS 2;
- le compartiment médian, limité par les deux linéaments secondaires;
- le compartiment Birse à l'E, limité par LS 1 et L.B.

Les compartiments Sorne et Birse, structuralement déprimés par rapport au compartiment médian, se comportent comme des gouttières transversales, où s'écoulent vers le N les deux rivières citées. Entre les deux, le compartiment médian correspond à une sorte de môle intermédiaire, caractérisé par la culmination axiale des trois plis principaux: Moron - Raimex - Vellerat. La relative simplicité tectonique de cette zone contraste étonnamment avec l'extrême complexité des structures des deux autres.

11.2.4. Le compartiment Sorne.

Ce territoire présente une succession de relais et de complications tectoniques de toutes natures. Pour ce qui est des axes anticlinaux uniquement, on a, du N au S (fig. 11.III):

- le noeud tectonique complexe des Rangiers (1)
- le pli transverse de Develier (2)
- l'ensellement de Chenal (3) et la montée axiale de Ste Colombe (4)
- l'ensellement du Pichoux (5) et la montée axiale de Semplain (6)
- l'ennoyage de l'anticlinal Les Bois - Pâturatte à Châtelat (7)
- la zone tectonique complexe de la Montagne de Saules (8)
- la selle du Fuet (9)
- la bordure E du bassin tertiaire de Tavannes, avec les structures d'Orange (10) et de La Tanne (11)
- le noeud tectonique de Pierre Pertuis, où l'anticlinal du Droit bute contre le Montoz et sa forte montée axiale (12)

Nous avons déjà remarqué ailleurs l'alignement presque parfait des dépressions d'Undervelier, du Pichoux et des Bouts de Saulles. Cet alignement forme un angle de 30 à 35° par rapport aux linéaments qui limitent le compartiment.

11.2.5. Le compartiment Birse.

Il est également caractérisé par une grande complexité tectonique. Les structures suivantes s'articulent le long de LS 3:

- l'anticlinal de Movelier (A)
- les plis transverses de Vicques (B)
- Vellerat et Tiergarten (C)
- les nombreux replis du noyau anticlinal de Raimex, ainsi que le synclinal perché de Trondai (D)
- le pli-apophyse des Gorges de Moutier (E)
- l'anticlinal de Moron (F)

Les cluses de ce compartiment s'orientent de diverses façons par rapport à la direction générale des linéaments. Certaines voient leur orientation coïncider avec cette direction; c'est notamment le cas de Court et de Roches, qui sont situées sur la trace même du linéament LS 3.

D'autres, les plus nombreuses, sont totalement transverses, entre 35 et 50° environ: Moutier, Choindez, Tiergarten, Günsbrunnen, etc.

11.3. INTERPRETATION

11.3.1. Linéaments et mouvements du socle.

Nous avons pu mettre en évidence plusieurs linéaments, tous obliques par rapport à la chaîne. Ceux qui intéressent notre région ont des orientations comprises entre N 20 et N 35 environ; ces directions coïncident avec les directions majeures de la tectonique de graben rhénane (Richter - Bernburg 1974).

A l'Oligocène et au Miocène, les failles normales d'orientation rhénane ont affecté le socle et la couverture du "Jura rhénan" dans la prolongation du Fossé (Laubscher 1961, 62, 65). Ces failles ont été réactivées lors du plissement pontien (Laubscher 1965); elles ont alors fonctionné comme décrochements sénestres, ainsi qu'Aubert (1959) l'a démontré pour le décrochement de Pontarlier. L'allure des structures, particulièrement l'inflexion des directions axiales dans le compartiment occidental du bloc III (fig. 11.1.a), attestent de tels mouvements.

Nous pensons que les linéaments que nous avons décrits jalonnent les déformations de la couverture, réponses de celle-ci aux mouvements transversaux sénestres du socle. En effet, les structures de la couverture, au voisinage des linéaments, s'accordent bien avec le modèle de "plissement par décrochement" proposé par Pavoni (1961).

L'existence de tels décrochements au niveau du socle ne saurait cependant être prouvée que par la mise en oeuvre de moyens considérables (notamment une sismique profonde à grande échelle). Les investigations à l'échelle du massif jurassien, entreprises depuis quelques années pour la recherche d'hydrocarbures, permettront peut-être un jour de préciser l'allure du socle sous la couverture secondaire. On peut s'attendre à ce qu'elles confirment l'existence de tels accidents, traversant tout le Jura et se poursuivant sous le Bassin molassique; elles préciseraient aussi l'influence de ces décrochements sur la tectonique de couverture.

Il n'est pas impossible que ces lignes de dislocation transversales profondes soient encore actives actuellement. L'analyse systématique des séismes et de leur répartition d'une part, des mensurations de précision le long de décrochements connus d'autre part (STF - Jeanrichard, mensurations de précision, en cours de réalisation) nous renseigneront dans les années à venir sur ce point très controversé.

11.3.2. Socle et compartiments longitudinaux.

Les indices de surface, qui ont servi à définir les linéaments transverses, sont inemployables lorsqu'il s'agit de déterminer des zones longitudinales; des accidents longitudinaux (flexures, failles, cf. Heckendorn 1974, "transform faults", cf. Laubscher 1970) existent certainement dans le socle, sous le Jura septentrional; les arguments morphologiques nous manquent cependant, ne serait-ce que pour en esquisser grossièrement l'allure et en préciser la position.

11.3.3. Alignement des cluses.

Nous avons déjà cité à plusieurs reprises ce fait indiscutable: certaines cluses paraissent se suivre à la file indienne. L'exemple classique est celui des cluses de la Birse, entre Moutier et Courrendlin, auxquelles on associe (à tort) la cluse de Court, décalée vers l'W. Cet exemple est cependant moins frappant que celui de la vallée de la Sorne, où les cluses du Pichoux et d'Undervelier se situent très exactement dans le prolongement l'une de l'autre. Les cluses du Doubs (Goumois - Vautenaivre), celles de la Suze (Reuchenette - Taubenloch) sont également très caractéristiques.

Les partisans de l'antécédence voient dans ces alignements le principal argument militant en faveur de leur théorie. Il faut d'emblée constater que les contre-exemples sont très nombreux:

- cluses absolument isolées, comme Tiergarten, ou Crémises;
- décalées les unes par rapport aux autres: Court - Moutier.

On peut même se demander si l'exemple "classique" Moutier - Roches - Choindex est valable; nous venons de voir en effet que Roches a une direction qui diverge nettement de celle de Moutier et Choindex.

Replacés dans le contexte que nous venons de définir, ces alignements peuvent s'expliquer différemment. Nous avons constaté

que, dans la majeure partie des cas, leur orientation divergeait de 35 à 50° environ par rapport à l'orientation générale des linéaments. Rappelons d'autre part que l'orientation la plus fréquente des cluses de la région est N 170 - N 180 (cf. 10.2.2.); elle diffère également de 30 à 50° par rapport aux linéaments de direction rhénane.

Or, on sait (Kiraly 1968, Ruhland 1974) que les failles à décrochement induisent dans une couverture sédimentaire des dislocations annexes, obliques par rapport à ces décrochements (fig. 11.IV). Nous pensons que de telles dislocations secondaires existent dans la couverture jurassienne, à proximité des linéaments. Elles sont caractérisées par des zones où les systèmes de fissuration, particulièrement bien développés, ont pu être mis à profit par l'érosion, selon un mécanisme défini ailleurs (zone drainante, cf. 12.4.1.); les cluses se sont creusées dans ces zones de faiblesse et sont de ce fait alignées obliquement par rapport aux linéaments.

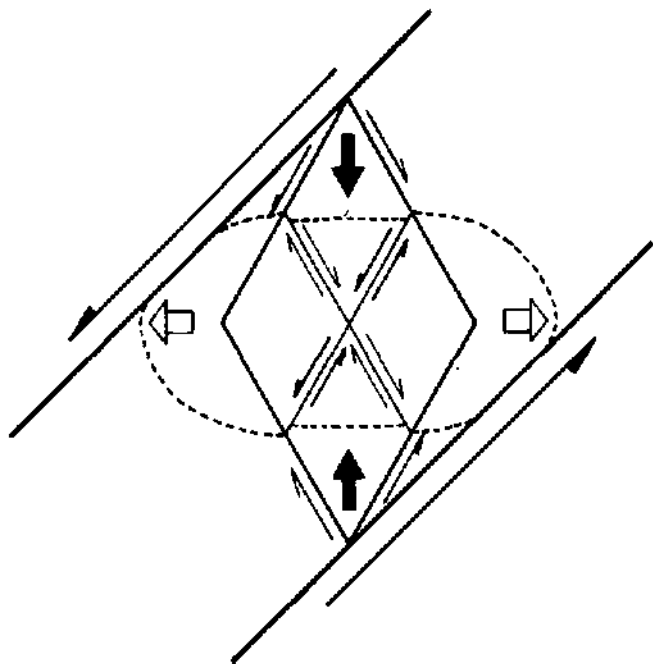


Fig. 11.IV. Modèle de déformation: décrochement sénestre majeur, avec cisaillements secondaires. Tiré de Ruhland (1974)

11.4. CONCLUSIONS

Pour façonner les cluses, l'érosion a mis à profit des zones de faiblesses de la couverture, prédisposées en quelque sorte par la tectonique. Cette prédisposition:

- a été préparée avant et au début du plissement, par la création de systèmes de fissuration, réponses de la couverture à des mouvements profonds;
- s'est affirmée tout au long du plissement, par l'adaptation de cet événement à la trame tectonique, et la création de structures favorables (selles, relais axiaux, etc.);
- s'est concrétisée après le plissement, par l'adaptation des écoulements à la structure et ses particularités.

Le phénomène cluse, dans sa globalité, participe donc à des événements tectoniques remontant très loin dans le temps.

Dans le détail, il existe toujours, sur le site même de la cluse ou tout proche de celui-ci (ordre de grandeur du km), un encllement axial ou une terminaison périclinale, souvent complété par un relais de plis. On constate dans toutes les cluses l'existence de dislocations tectoniques locales (failles, petits chevauchements, bourrages tectoniques, complications dans le coeur anticlinal, etc.); on ne peut affirmer que leur existence conditionne la présence de la cluse à cet endroit, car on ne peut certifier que ces dislocations n'existent pas ailleurs, où les plis sont encore préservés de l'érosion; on peut cependant être certain qu'elles ont favorisé l'action de l'érosion, et tout particulièrement la circulation interne des eaux karstiques.

Encore une fois, nous insistons sur le fait que nous proposons un modèle grossier, un schéma de travail, qui mériterait d'être repris en détail, avec d'autres moyens que les nôtres. Il serait nécessaire, notamment, de tester ce modèle dans d'autres massifs plissés possédant des cluses similaires.

12. CLUSES ET KARST

Quand on parle d'érosion ou de corrosion karstique, on leur associe immédiatement l'idée d'une action lente, diffuse, peu spectaculaire, incapable en tout cas de créer des cirques d'érosion tels que les cluses. Des dolines, oui; des cluses, non!

Il faut comprendre sous le terme de corrosion l'action diffuse, mais généralisée de l'eau météorique sur les surfaces calcaires. De nombreux auteurs ont étudié ce sujet; signalons pour ce qui concerne nos régions et leurs conditions climatiques particulières: Burger (1959), Aubert (1967, 1969), Barsch (1969), Miserez (1973), Pochon (à paraître).

Rappelons brièvement que l'eau de pluie, s'infiltrant dans le sol, s'enrichit en CO_2 et devient très agressive vis-à-vis du calcaire. Dans les conditions actuelles, la surface calcaire subit une ablation moyenne de:

<u>Auteur</u>	<u>Valeur annuelle</u>	<u>Valeur par M.A.*</u>	<u>Nature</u>
Burger (1959)	0,09 mm	90 m	Dissolution totale
Aubert (1967)	0,09 mm	90 m	" "
" (1969)	0,05 - 0,06 mm	50 - 60 m	Dissol. superf. excl.
Barsch (1969)	0,046 - 0,066 mm	46 - 66 m	Dissolution totale
Miserez (1973)	0,066 - 0,091 mm	66 - 91 m	" "
Monbaron**	0,075 - 0,081 mm	75 - 81 m	" "

* M.A. = million d'années

** cf. 8.3.11. et 8.4.4.

D'autres auteurs, utilisant la méthode des plaquettes calcaires enfouies dans différents types de sol, calculent des vitesses d'ablation plus faibles (0,020 - 0,030 mm/an, Werner 1958, Aubert 1969, Pochon 1974). Les valeurs de dissolution totale ne reflètent donc pas exactement ce qui se passe dans le sol ou juste au contact sol - roche. Cependant, Miserez (1973) a montré que, dans un karst couvert comme celui du Jura, les eaux d'infiltration se saturent très rapidement, dans les tout premiers mètres de roche, autrement dit pratiquement en surface. Nous pouvons donc considérer les valeurs de dissolution totale comme représentatives de l'ablation moyenne de la surface. Compte tenu de ces valeurs, on doit envisager que 300 à 500 m de calcaire ont ainsi pu être découpés depuis le plissement.

Cette valeur paraît excessive; en fait, elle n'est pas incompatible avec ce qu'on peut observer; en effet, la plupart de nos anticlinaux

sont épluchés jusqu'au Dogger: le Malm, soit 500 m de sédiments environ, a bel et bien disparu de nos sommets depuis le plissement, ceci sans préjudice de ce qui aurait pu disparaître avant cet événement tectonique, et même avant le dépôt du Tertiaire, au Sidérolitique (Aubert 1975).

Convenons pour l'instant que la corrosion, plus ou moins uniforme, s'exerce sur toute aire calcaire mise à découvert; c'est une action de minage, de défoncement peu spectaculaire, mais extrêmement active et constante, dans le temps comme dans l'espace. Elle prépare en profondeur le terrain à une action sub-sérienne, météorique.

12.1. LES SOURCES KARSTIQUES DU JURA SEPTENTRIONAL (planche VII)

Dans cette partie du Jura, on constate que les plus importantes sources karstiques connues jaillissent toutes dans des cluses, au voisinage immédiat de celles-ci, au pied de ruz importants, ou encore dans d'étroits défilés rocheux. Remarquons en revanche que toute cluse ne possède pas forcément une source importante.

La position des sources dans ces échancrures d'érosion est variable: elles sont parfois situées au centre (sources de Châtel dans la cluse de Reuchenette), parfois en aval de la cluse (La Foule, par rapport à la cluse de Court), parfois même au portail amont (Roches Fleureuses à Moutier).

Rappelons les nombreuses sources des cluses de la Sorne (cf. 8.2. à 8.5.), et décrivons rapidement les sources les plus importantes qu'on rencontre ailleurs*.

12.1.1. Cluses de la Birse.

La cluse de Court ne possède pas de source importante. Cependant, on peut considérer que la source de La Foule (coord. 593.530/235.330) y est étroitement liée. Elle jaillit au centre d'une petite cluse qui franchit la terminaison périclinale de Moron, appelée ici anticlinal de Pérouse. Cette cluse est située exactement dans le prolongement de la cluse de Court. Cette mini-cluse, dont la partie supérieure est sèche, doit sans doute son existence à la source elle-même. La Foule est une source importante; elle débite entre 5 et 10.000 l/min. au moins, et est captée par la Ville de Moutier. Nous en parlerons encore plus loin (cf. 12.2.4.).

* Il s'agit uniquement des sources que nous connaissons, ou qui sont indiquées sur la carte de protection des eaux de l'OEHE à Berne. Il doit en exister de nombreuses autres moins connues. Une carte de cadastre des eaux karstiques mériterait d'être dressée à l'échelle de tout le territoire. En général, les chiffres indiqués se rapportent aux débits de pompage concessionnés.

L'entrée S de la cluse de Moutier est marquée par plusieurs sources, dont la plus importante, non captée, est celle des Roches Pleureuses (coord. 595.750/237.080). Plus en aval encore, les cluses de Roches et de Choindez ne possèdent pas de sources de premier ordre; il existe bien une résurgence temporaire au voisinage du pt. 496 (coord. 597.570/238.350); une source Derrière le Vevay (exutoire du synclinal perché de Trondai, 595/239) et une autre en aval de Choindez complètent la liste. Enfin, quelques sources jalonnent les cluses du Vorbourg et de Soyhières - Nord, notamment la source de Soyhières, au lieu-dit Derrière l'Eglise (coord. 594.730/249.300).

12.1.2. Cluses de la Suze.

La cluse de Reuchenette possède trois sources importantes; les deux sources de Châtel (1000 à 5000 l/min.) jaillissent juste en aval du tronçon épigénétique de Rondchâtel. Quant à la fameuse source Merlin, captée par la Ville de Bienne (5 - 10.000 l/min.), elle est située près du portail sud de la cluse. Nous reviendrons également plus loin sur ces sources, qui sont importantes en ce qui concerne notre démarche de travail (cf. 12.2.5.).

La cluse du Taubenloch n'a pas de source importante. On y rencontre cependant d'importants amas de tuf calcaire, indices certains de sources anciennes (?).

12.1.3. Cluses isolées.

Seule une source temporaire à fort débit jaillit dans les Gorges de Douanne, à l'altitude de 470 m environ, peu avant la retombée brusque des couches vers le lac et le contact Malm-Crétacé. La source pérenne de Brunnmüli (coord. 578.030/215.610) pourrait en être l'exutoire inférieur, mais leur relation n'est pas encore prouvée (Schindler 1973, cf. 12.2.7.).

Dans la cluse de Crémines - Günsbrunnen, il existe deux ou trois sources, dont on ne peut assurer l'origine typiquement karstique, vu la conformation particulière de la cluse (chevauchement de la lèvre W sur du Tertiaire).

12.1.4. Cluses sèches, cluses perchées.

La source de la Birse sort au pied N de la cluse perchée de Pierre Pertuis. Chenal possède la source de La Tuilerie, au SW de Courfaivre. Citons encore une source temporaire au centre de la cluse du Cul des Prés - La Ronde.

12.1.5. Cluses du Doubs.

Envisageons tout d'abord les cluses franchies par le Doubs lui-même. Celle de Biaufond voit les eaux de la Ronde et des territoires karstiques des environs du Valanvron émerger à son portail SE. A l'entrée S de la cluse de Goumois jaillissent

les sources du Theusseret (cf. 12.2.3.), alors que les sources de la Vauchotte sortent à flanc de coteau, sur rive droite, entre les cluses de Goumois et de Vautenaivre. La situation sur rive française n'est pas connue.

Le canyon du Doubs, profondément entaillé dans les structures, compte d'innombrables sources karstiques; presque chacune des cluses régressives qui y débouche en possède une ou plusieurs. Citons parmi les plus impressionnantes, celles du Moulin de Soubey - Côte au Bouvier (571/238).

La vallée du Doubs a représenté de tout temps une zone de décharge importants pour les eaux karstiques des Franches-Montagnes et du Plateau de Maiche. Ces apports permanents et très anciens ont favorisé l'établissement du canyon et son façonnement.

12.1.6. Pied de Chasseral et de Mont Soleil.

Parmi les nombreuses cluses régressives du flanc N, complexe, de Chasseral, seule la Combe du Bez possède actuellement une source karstique permanente importante, avec des exutoires temporaires étagés en altitude: les sources de La Tuilerie au S de Corgémont. Les autres échancrures d'érosion sont le siège de débâcles importantes et assez fréquentes; en revanche, aucune source karstique ne semble y jaillir régulièrement. On ne peut bien sûr certifier que des refoulements karstiques ne se produisent pas, lors des débâcles, à certains endroits des étroits chenaux calcaires.

Le flanc S de Mont Soleil - Montagne du Droit n'a pas à proprement parler de cluse régressive. En revanche, des sources karstiques jaillissent à son pied, dans des sortes de reculées; les principales sont: les sources de La Doux - Le Torrent (569/224), en partie captées pour l'alimentation en eau potable des Franches Montagnes, et celles de la Raisetette (570/224) alimentant St Imier; elles peuvent atteindre chacune des débits dépassant le m³/sec.

12.1.7. Autres sources.

De curieuses émergences karstiques jalonnent le thalweg de la Suze, sur son tronçon épigénétique de Tournedos (580/226). Cette combe monoclinale, profonde entaille dans le flanc S de la voûte de Châtillon - Montoz, ne peut s'expliquer à notre avis que par la présence de ces sources; la situation se présente ici de la même manière qu'à Montoit - Miéry près d'Undervelier (cf. 8.4.1.).

Même situation encore dans le défilé de Forêt d'Enfer, le long de la Trame (579/231), où une source karstique temporaire jaillit en période de crue. La source de La Combe près de Glovelier (cf. 8.6.3.) est aussi de ce type.

12.1.8. Ailleurs dans la chaîne jurassienne.

Les exemples ne manquent pas ailleurs dans le Jura. Mentionnons la relation indubitable entre la cluse du Seyon et la

source de la Serrières (Mathey et Simeoni 1972). Citons la cluse - reculée de St Sulpice avec la source de l'Areuse, la cluse régressive de la Rançonnière au Locle - Col des Roches, la cluse de Covattane en aval de Ste Croix, avec les puissantes sources du Fontannet (530/185), etc.

12.1.9. Conclusions.

Notre propos n'était pas d'établir ici un catalogue complet des sources karstiques du Jura, mais d'attirer l'attention sur la relation évidente qui existe entre cluses et sources karstiques. Ces sources, et les circulations souterraines qui y aboutissent, ont joué et jouent encore un rôle essentiel dans le façonnement de l'échancrure, et surtout dans la "préparation du terrain" en vue de l'intervention des autres agents de l'érosion. On peut même voir, dans chaque dépression d'érosion actuellement asséchée, un lieu potentiellement favorable à une source karstique, qui a dû fonctionner à un stade moins évolué du réseau karstique.

A notre avis, le problème mériterait d'être repris dans une phase ultérieure de recherches. On connaît en fait très mal les sources karstiques de notre région. Le cadastre exact devrait en être dressé. Outre la localisation, les fluctuations de débit et les caractères physico-chimiques, on devrait en déterminer soigneusement les bassins d'alimentation. Ceci est une condition essentielle pour une exploitation plus rationnelle des eaux souterraines, et pour éviter des erreurs qui pourraient s'avérer irréparables dans les années à venir.

12.2. EXPERIENCES DE COLORATION: SYNTHESE

Des expériences de coloration semblables à celles de la région des cluses de la Sorne ont eu lieu ailleurs dans le Jura septentrional. En compilant leurs résultats, on voit qu'un schéma cohérent des circulations karstiques dans cette partie du Jura se précise. Les pages suivantes seront consacrées à leur analyse. La plupart de ces données sont inédites, et nous remercions les auteurs et "maîtres d'oeuvre" de nous avoir autorisé à en faire état.

La carte (pl. VII) et le tableau 12. A. donnent une vue d'ensemble des principales expériences de coloration réalisées dans le karst de la partie centrale de notre territoire, soit principalement dans la vallée de la Sorne (cf. chap.8.), dans celle de la Suze, dans les Franches-Montagnes et en Ajoie. D'une manière générale, les essais de traçage ont été beaucoup moins nombreux dans la partie orientale, où alors nous sont demeurés inconnus.

On peut d'emblée signaler que tous ces essais, pratiquement sans exception, ont abouti dans une cluse ou à sa proximité immédiate. Cette constatation est extrêmement importante pour la suite de notre raisonnement.

TABLEAU 12.A. Expériences de coloration dans le dur septentrional

No	Date	Lieux d'application	Coordonnées	Références	Urbanisation + Distance parcourue	Vitesse de circulation	Auteur	Remarque
1	Octobre 66	Le Varendin	568.900/252.800	S du Varieu	1000m/120m	75-100m/h	Serv. eaux P'trey in Schweizer	-
2	Août 67	Courtedoux (perte égoûto)	570/250	La Beuchire	3000m/6-10m	45m/h	Schweizer	-
3	Juillet 68	Bressaucourt	570/249	La Béchvoine	2900m/57m	36m/h	Schweizer	-
idem		Bressaucourt	idem	La Beuchire	1400m/19m	230m/h	Schweizer	Sous-écoulement
4	1945	Willars/Pontenais	572/248	La Béchvoine	1800m/?	?	Conrad	in Schweizer
5	Mai 66	Ruiss. de Bourgenay	575/250	S. de Voyetouf	?	99. heures ?	Rundel	in Schweizer
6	1939	Ruiss. des Enfers	570/237	Les Moulins	2000m/350m	50-60m/h	Schwabe	-
7	Mars 69	Recluse Ballément	576.225/238.350	Le Gola	7100m/180m	150m/h ?	della Valle	témoignage oral
8	1939	Sortie Etang Pinin de Seigne	573/236	Les Forges	10.5km/230m	?	Schwabe	réult. douteux
9	Décembre 73	Portail N cluse de Lajoux	577.700/237.870	Monteilt	5425m/355m	230m/h	Monbaron	vit. de pointe
10	Avril-mai 73	Gouffre de Lajoux	578.410/236.300	Blanches Fontaines	5400m/365m	270m/h	Monbaron	vit. de pointe
11	Décembre 58	Sorne-Le Catinat	580.920/235.380	"	3200m/260m	?	Morand	réparation ob- servée par tiers
12	Mars 59	Perte Rouge Eau	580.720/233.470	"	5090m/345m	109m/h	Morand	réult. douteux
idem		idem	idem	La Foulle	13 km	2-31 ?	Schwabe	vit. approx.
13	Juin 74	Diablasse-Les Oreaux	583.555/234.830	Blanches Fontaines	2800m/475m	10-20m/h	Monbaron	vit. de pointe
14	Novembre 58	Perte égoûte Champes	589/234	La Foulle	3500m/280m	73m/h	Morand	réult. douteux
15	1939	Sclerie Etang de Grèdre	570/231	Tramelan Dessous	4000m/100m	250-270m/h ?	Schwabe	réult. douteux
16	Novembre 72	Bassin fermé Les Breuleux	567.720/228.710	Moulin Theusseret	5500m/500m	35m/h	della Valle	-
17	Juin 74	Doline près de Petite Gléresse	577.275/223.125	Châtel Eyraud	8400m/680m	190m/h	Monbaron	Vit. de pointe cf annexe 28
18	Avril-Mai 68	Les Prés d'Orvin	579.400/221.950	Merlin	7000m/500m	437m/h	Rutoch	vit. de pointe
19	Juin 72	Puits près de Vauffelin	590.025/226.485	Merlin	4690m/170m	98m/h	CSD	-
20	Avril 73	La Combe près Remont	592.855/226.745	Mosbach	2600m/?	135m/h	CSD	sauf rhodamine
idem		Egoûte Remont	592.780/226.733	"	2600m/?	81m/h	CSD	fluorescence
21	Octobre 73	Gravière Les Roches	580.700/220.960	Brunnwilli	5850m/410m	20.3m/h	Schindler	dén. perte défin.
idem		-	579.200/220.100	"	4650m/470m	14.6m/h	"	traité filtré
22	Octobre 69	Ruissseau de Vaux	572.000/214.275	Les Moulins Le Neuverville	2000m/285m	47.6m/h	Muthay	plus. sources colorées

Sans revenir sur les expériences de la Sorne, passons immédiatement aux autres, en allant du N vers le S.

12.2.1. Région de Haute Ajoie - Anticlinal du Banné.

Plusieurs expériences sont relatées par Schweizer (1969).

- a) La plus importante pour nous est celle réalisée à Bresaucourt (p. 139). Le colorant injecté dans une perte à l'E du village est ressorti à deux endroits, presque simultanément:

- à la source du Bacavoine à Fontenais (572/250), soit au portail S de la cluse de Fontenais, après 80 heures de trajet souterrain;

- à la source de la Beuchire à Porrentruy (572/251), c'est-à-dire dans la prolongation directe de la cluse de Fontenais, 86 heures après l'injection.

L'auteur envisage que la majeure partie des eaux s'est écoulée vers l'E, parallèlement aux structures, le long de la zone synclinale au S du Banné, pour refaire surface à Fontenais. Une moindre portion des eaux s'est écoulée par des zones faillées à travers le Banné, et a rejoint le cours de l'Ajoulotte, rivière souterraine de la Haute Ajoie, dont la Beuchire représente l'exutoire pérenne principal (Lièvre 1955).

Cette explication ne nous satisfait pas entièrement. N'est-il pas plus judicieux d'envisager un écoulement conforme jusqu'à Fontenais (vitesse 36m/h), où la majeure partie des eaux ressort; le reste franchit transversalement la chaîne du Banné, en sous-écoulement rapide favorisé par une zone de fissuration très ouverte (faille cartographiée dans la cluse de Fontenais); ces eaux mettent 6 h. pour franchir 1450 m, soit une vitesse de 240 m/h, ce qui est très plausible dans une zone très karstifiée. Il serait intéressant de reprendre ce problème d'hydraulique souterraine.

- b) Il a été prouvé que les eaux karstiques de la région de Villars (572/248) ressortent également à l'entrée S de la cluse de Fontenais (Conrad, in Schweizer).
- c) Enfin, la source qui sourd à l'amont de la cluse de Voyeboeuf (573/251) est alimentée par les eaux karstiques de Combe Vatelín - région S de Courgenay (Künzi, in Schweizer).

12.2.2. Coloration aux Enfers.

En 1939, Schwabe a coloré les eaux d'un marécage près des Enfers (570/237?). Il a pu constater leur réapparition dans les Côtes du Doubs, à la source du Moulin de Soubey (571/238). Nous avons par ailleurs mentionné les essais réalisés par cet auteur, et dont les résultats sont sujets à caution (cf. 8.6.3.). Seul celui des Enfers ne saurait être mis en doute.

12.2.3. Coloration aux Breuleux.

En 1972, l'OEHE a procédé à divers essais simultanés; un seul d'entre eux a donné un résultat positif. Il a en effet été prouvé à cette occasion que les eaux météoriques s'infiltrant au fond du synclinal des Breuleux (566-67/228) ressortent à la source du Theusseret, située 5,5 km au NW du point d'injection, dans le canyon du Doubs.

Ce résultat est assez surprenant. En effet, le colorant était attendu au S ou SE du point d'injection, à l'une des sources du pied de Mont Soleil (cf. 12.1.6.); il n'y a qu'un anticlinal à franchir pour y parvenir. Pour se déverser dans le Doubs, le cheminement est beaucoup plus malaisé: l'eau doit franchir 3 ou 4 anticlinaux successifs, avant de ressortir au portail S de la cluse de Goumois. Il semble ici que la plus forte attractivité du niveau de base que constitue le canyon du Doubs, a été prédominante (pente moyenne de plus de 70 ‰, contre un peu plus de 50 ‰ en direction du Vallon de St Imier). L'existence d'une zone de drainage transversale, dans le prolongement S des 2 cluses de Goumois et Vautenaivre, est ainsi mise en évidence. La vitesse de circulation reste cependant assez faible (35 m/h).

12.2.4. Région de Moutier.

De toutes les colorations réalisées pour l'étude de la source de La Foule à Moutier, une seule a abouti à la source même. Il s'agit de l'expérience réalisée par L. Mornod (1959 b). L'auteur a prouvé que les eaux usées du village de Champoz (589-233-234), qui s'infiltrèrent dans le fond du thalweg, à l'E du village (Combe Fabet, partie supérieure), influencent directement La Foule. Ce résultat a d'ailleurs obligé les autorités à prendre de sérieuses mesures de protection.

Mentionnons ici les curieux effets qu'a eu le percement du tunnel Moutier - Granges à travers le Graiter. Les travaux ont été entravés par de nombreuses venues d'eau sous forte pression. Conséquence: plusieurs sources de surface, toutes situées à l'W de la galerie, ont tari brusquement ou ont vu leur débit fortement affecté par ce drain artificiel (fig. 12.1). On peut ainsi, indirectement, se rendre compte du sens de l'écoulement des eaux souterraines vers la cluse de Court et ses abords, à partir de l'E cette fois-ci.

12.2.5. Source Merlin - Cluse de Reuchenette.

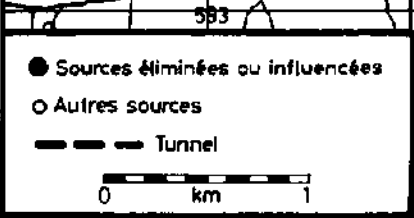
Mentionnons l'importante expérience réalisée par Rutsch et al. (1969) dans la région des Prés d'Orvin. Ses auteurs ont pu montrer la relation directe qui existe entre cette zone synclinale et la source Merlin, au portail de sortie S de la cluse de Reuchenette, rive droite de la Suze. Comme dans le cas de la relation Gouffre de Lajoux - sources de Blanches Fontaines (cf. 8.3.5.), les eaux s'écoulent parallèlement aux structures, sans être contrecarrées par quelque barrage tectonique que ce soit. On a pu, à cette occasion, mesurer la vitesse de circulation karstique la plus importante con-

Fig. 12.1.
Région de la cluse de Court:
sources affectées par la per-
cément du tunnel Moutier-
Granges (diminution du dé-
bit ou tarissement). D'après
Mornod 1960.

237

235

233



595

nue à ce jour dans le Jura septentrional, soit 437 m/h pour les premières traces de colorant.

Lors d'une étude hydrogéologique, menée par le bureau CSD* dans la région de Plagne - Romont - Vauffelin, pour le compte de ces communes, il a été démontré que l'eau s'infiltrant dans le vallon de Vauffelin, à l'E de ce village (589-90/226) ressort également à la source Merlin. Elle suit donc les structures, d'est en ouest, et passe en siphon sous la rivière pour ressortir sur rive droite. La vitesse de circulation a été de l'ordre de 98 m/h, donc bien plus faible que depuis les Prés d'Orvin (pente moyenne de 36 o/oo, contre 73 o/oo aux Prés d'Orvin; les conditions hydrologiques étaient également fort différentes dans l'un et l'autre cas). Une autre expérience, près de Romont, a révélé au contraire un écoulement vers l'E (résurgence près de Granges).

12.2.6. Coloration sur la chaîne de Chasseral.

Une expérience de coloration à la fluorescéine (conduite selon les mêmes principes que celle des Bouts de Saules, cf. 8.3.4.) a eu lieu en juin - juillet 1974, dans la région de la Métairie de Gléresse (577/223)**.

Au SW de la Métairie, une lignée de dolines jalonnent le fond de la combe argovienne. Nous souhaitons savoir si les eaux qui y disparaissent s'écoulent transversalement à la chaîne (en sous-écoulement par la cluse sèche de Petite Gléresse, puis par la Combe du Bez) pour ressortir à la source de La Tuilerie (576/225). Il existait aussi une possibilité d'écoulement, vers le S cette fois, selon le pendage des couches; l'eau aurait ainsi pu rejoindre le système karstique Prés d'Orvin - Source Merlin. En plus de cette source, et par mesure de précaution, nous avons encore placé des fluocapteurs aux sources de Tournedos (580/226), à la source de Châtel N, source captée par la commune d'Evilard (585.620/224.780), ainsi qu'à Brunnmüli - Twann (578/215). C'est à l'avant-dernière source qu'est réapparu le colorant. Résumons les données essentielles de cette expérience:

Nature du traceur: fluorescéine

Quantité: 2 kg

Date et heure d'injection: 27.6.74 à 14.00 h.

Lieu d'injection: doline au fond de la combe argovienne, en amont du portail d'entrée d'une mini-cluse sèche, coord. 577.275/223.125, alt. 1230 m.

* CSD = Colombi - Dorthé - Schmutz, Berne - Liebefeld.

** Nous avons bénéficié de la collaboration de I. Ammann et M. d'Agostini, étudiants, au cours d'une étude géomorphologique de ce secteur.

Temps d'infiltration: 15 minutes

Ringage: environ 200 l d'eau de citerne

Source colorée: source de Châtel - Evilard, coord. 585.620/
224.780, alt. 550 m.

Longueur du trajet: 8,5 km

Dénivellation et pente: 680 m, soit 80 o/oo

Réapparition du colorant: déterminé par fluocapteur:

No	Pose	Retrait	Temps d'exposition	Résultat
C1	27.6. - 15 h	29.6. - 16 h	49 h	négatif
C2	29.6. - 16 h	4.7. - 11 h	115 h	+++
C3	4.7. - 11 h	11.7. - 16 h	173 h	+
C4	11.7. - 16 h	6.8. - 16 h	26 j.	traces

Temps de passage: entre 2 et 7 jours pour les premières traces.
Compte tenu de la méthode, le calcul de la
vitesse de circulation est impossible.*

La source de Châtel sort au niveau des couches de Birmenstorf (Argovien inférieur calcaire). C'est également dans ce niveau que l'infiltration a eu lieu. On peut donc conclure que l'é-tage karstique de l'Argovien inférieur est bien étanche, à son toit grâce aux couches d'Effingen, et à son mur grâce à l'Oxfordien marneux, d'une puissance de 3 - 5 m dans la chaîne du Chasseral.

Contrairement à ce que les indices de surface laissent prévoir, il n'y a pas de connexion karstique entre la combe argovienne sud de Chasseral et la Combe du Bez - La Tuilerie. La provenance de ces sources importantes reste encore inexp-
liquée.

12.2.7. Coloration au Vallon du Jorat.

Le bureau Schindler à Prêles a procédé à une coloration dans la région La Preisse - Vallon du Jorat, aux environs du pt 893 (579/219-220), pour le compte de la commune de Lamboing. Il ressort du rapport que le colorant s'est écoulé en direc-
tion du NE dans le Vallon du Jorat, tantôt dans le lit du ruisseau à l'air libre, tantôt dans les alluvions du thalweg. La perte définitive (disparition dans le karst) est située au débouché du défilé du Jorat dans le Vallon d'Orvin (580. 700/220.960).

* Depuis la rédaction de ce chapitre, d'autres précisions nous sont parvenues sur cet essai. Voir à ce sujet l'annexe 28.

Finalement, le colorant est réapparu à la source karstique de Brunnmüli à Douanne (578/215). Selon Schindler, le colorant, après sa disparition dans le karst, a "rebroussé" chemin, traversé tout l'anticlinal de la Chaîne du Lac, pour ressortir à Douanne.

Compte-tenu des constatations faites ailleurs, nous proposons une autre solution, plus conforme aux conditions structurales. Le colorant qui s'est perdu définitivement au SW d'Orvin n'a pas été retrouvé. Une autre partie du colorant s'est infiltrée directement dans le karst au point d'infiltration primitif, s'est écoulée souterrainement vers le SW, au fond du synclinal du Plateau de Diesse, conformément à la structure, puis a été drainée transversalement par la zone des Gorges de Douanne (sous-écoulement), et a fini sa course dans l'émissaire pérenne de Brunnmüli. La faible vitesse de circulation (14,6 m/h dans la solution que nous proposons) s'explique sans doute par une progression en zone noyée sous la couverture synclinale d'une part, par la faible pression dans le karst d'autre part.

12.3. LES CAVITES KARSTIQUES DU JURA SEPTENTRIONAL

Les sources karstiques, dont on vient de faire l'inventaire, sont (ou devraient normalement être) en relation avec des réseaux de cavités importantes (cf. 8.8.1.). Ceux-ci devraient être plus développés et plus nombreux au voisinage des grandes sources karstiques, donc en fait à proximité ou à l'intérieur des cluses (ou autres échancrures d'érosion comparables).

12.3.1. Carte des cavités karstiques.

Sur la planche VIII, qu'accompagne le tableau 12.B., nous avons situé toutes les cavités connues importantes du Jura septentrional, d'après les données de Audétat (1962)* et des compléments d'informations recueillis çà et là (Spéléo Club Jura, Triangle Rouge, Berner Höhlenforscher, etc), en les classifiant par ordre d'importance. On a cherché à distinguer les puits ou gouffres des cavités et grottes à développement plutôt horizontal.

D'emblée on constate une répartition différente des gouffres et des grottes, et on remarque que les cluses et leurs abords sont particulièrement riches en cavités de toutes sortes.

12.3.2. Les gouffres, ou puits.

D'une manière générale, les puits (verticaux ou sub-verticaux) sont localisés dans les zones tabulaires ou à faible pendage.

* De nombreux contrôles sur le terrain nous ont montré que sur la liste d'Audétat, les coordonnées de bon nombre de cavités n'étaient pas rigoureusement exactes (différence de plusieurs dizaines, voire centaines de m). Cependant, cette précision relative suffit à notre démonstration.

On distingue plusieurs grandes zones:

- la Haute Ajoie, zone tabulaire riche en puits de toutes dimensions, sans aucun doute en rapport étroit avec le cours de la rivière souterraine l'Ajoulotte (Lièvre 1955);
- la bordure E des Franches Montagnes possède les gouffres les plus profonds connus dans cette partie du Jura (Entier, G. de Lajoux, etc, cf. 8.3.8.). Ils se situent généralement dans de larges synclinaux. Les puits de La Tuilerie près de La Chaux d'Abel (562/225) sont également de ce type;
- la chaîne de Chasseral compte également un certain nombre de gouffres; leurs positions structurales sont plus diversifiées;
- il y a peu de puits dans la partie orientale de notre territoire; ceux qui existent sont souvent localisés sur les sommets coiffés des anticlinaux.

Le gouffre de la Rouge Eau (P 7) ou les puits des Tuileries (P 19-20), fonctionnant actuellement comme pertes de rivières, permettent de se faire une idée de l'évolution de ces cavités. Ces deux pertes se situent au contact d'une couche imperméable (Tertiaire, ou placage d'argiles de décalcification) avec des calcaires fissurés, et absorbent les eaux d'un bassin fermé.

Quand la couche imperméable a été enlevée par érosion, la perte cesse de fonctionner (Creux d'Entier P 5, Narines de Boeufs P 8, etc.) ou ne fonctionne plus qu'au ralenti, comme par exemple le Gouffre de Lajoux (P 4).

Certains gouffres de la Haute Ajoie ont un comportement mixte; ils fonctionnent à la fois comme perte (diffuse ou concentrée) en étiage, et refoulent de l'eau en crue, lorsque la rivière souterraine est en surpression (Creux Genat, Trou de Mavalau).

Evidemment, nous n'avons pas mentionné sur notre carte les innombrables empoisseurs qui perforent la région comme une écumoire; ces trous, de dimensions modestes, possèdent exactement la même fonction que les gouffres plus importants dont nous venons de parler, à savoir: celle de points d'infiltration privilégiés (Aubert 1966).

12.3.3. Les grottes et galeries.

Ces réseaux se rencontrent principalement dans le voisinage des échancrures majeures d'érosion: cluses, ruz, etc. Ils se développent horizontalement ou obliquement, souvent selon le pendage des couches. Les principaux sont localisés tout au long du canyon du Doubs, dans la vallée du Tabeillon, le long des cluses de la Sorne et de la Birse, dans la cluse de Crémines, dans la vallée de la Lucelle, etc.

TABLEAU 12.B.: Principales cavités karstiques du Jura septentrional.I. Puits

<u>Numérotation</u>	<u>Nom</u>	<u>Profondeur</u>	<u>Remarque</u>
<u>Plus de 60 m</u>			
P 1	Gouffre des Aidjolats	- 70 m	
P 2	Gouffre Dicky	- 63 m	
P 3	Gouffre d'Erswil	- 85 m	
P 4	Gouffre de Lajoux	- 173 m	cf. 8.3.5.
P 5	Creux d'Entier	- 198 m	cf. 8.3.8.
P 6	Gouffres Sur la Chèvre	- 65 m	
P 7	Gouffre de la Rouge Eau	- 125 m	cf. 8.3.3.
P 8	Narines de Boeufs	- 123 m	cf. 12.3.2.
P 9	Gouffre de Pertuis (NE)	- 156 m	dév. 340 m

De 30 à 60 m

P 11	Gouffre du Perchet	- 40 m	
P 12	Gouffre de Pré Pétusat	- 30 m	
P 13	Gouffre de l'Ascension	- 42 m	
P 14	Gouffre de Braire	- 54 m	
P 15	Gouffre de la Loge	- 35 m	
P 16	Gouffre de Graiteray	- 30 m	
P 17	Creux des Glaces I	- 37 m	
P 18	Creux des Glaces II	- 58 m	
P 19	Gouffre I Tuilerie	- 48 m	cf. 12.3.2.
P 20	Gouffre II Tuilerie	- 38 m	idem
P 21	Creux de la Tanne	- 30 m	ou Creux du Château
P 22	Creux de Glace Courtelary	- 32 m	
P 23	Tanna Meyer	- 34 m	
P 24	Gouffre du Grabe	- 45 m	
P 25	Puits Gros Crêt	- 36 m	
P 26	Gouffre Mauley-Bourcart	- 40 m	
P 27	Gouffre Sous le Mont	- 31 m	

II. Grottes et galeries

	<u>Plus de 250 m</u>	<u>Développement</u>	
1	Grotte d'Ocourt	275 m	
2	Grotte de Cholbert	275 m	
3	Grotte des Moulins	420 m	
4	Grotte Lina	1198 m	cf. 12.3.3.
5	Nidlenloch	1539 m	
6	Perte de la Ronde	270 m	dénivel. -75m
<u>De 250 à 150 m</u>			
7	Grotte de Réclère	250 m	Cavité touristique
8	Grotte de la Motte	170 m	
9	Grotte de Vautenaivre	250 m	dével. approx.
10	Grotte de la Rochette	165 m	

TABLEAU 12.B. (suite)

<u>Numérotation</u>	<u>Nom</u>	<u>Développement</u>	<u>Remarque</u>
11	Grotte de Sèche Chenal	244 m	
12	-	170 m	pas nommée
13	Grotte de Crémines 4	168 m	
14	Gouffre de Leujac	167 m	en réalité: grotte
15	Grotte de Blanches Fontaines	200 m	dév. connu
	<u>De 50 à 150 m</u>		
16	Creux des Bêtes	98 m	déniv. -12m
17	Grotte aux Bêtes	57 m	" -13m
18	Grotte du Hasenschell	88 m	
19	Grotte de Röschenz	60 m	
20	Caverne de la Condor	55 m	
21	Creux de Prescendaine	103 m	déniv. -12 m
22	Grotte de la Fenatte (Epauvillers)	51 m	
23	Trou de St Brais	68 m	
24	Grotte St Antoine	126 m	
25	Grotte au Pucin	70 m	cf. tabl. 8.J.
26	Trou de la Sot	122 m	
27	Grotte de la Fenatte (Soyhières)	82 m	
28	Grotte sur le Vevay	127 m	cf. 12.3.3.
29	Grotte des Moines	71 m	
30	Silberjoch	52 m	
31	Grotte de la Vauchotte	56 m	
32	Grotte de Lajoux	112 m	
33	Grotte Bec du Corbeau	126 m	
34	Grosse Grotte (Bacon I)	52 m	cf. 8.8.1.
35	Grotte du Pichoux	92 m	cf. 8.8.2.
36	Gouffre du Pichoux	125 m	cf. 8.3.8.
37	Grotte Rebetez	118 m	
38	La Foule	55 m	cf. 12.3.3.
39	Giziloch	73 m	
40	Gouffre Harzer	68 m	déniv. -28m
41	Grotte de Montrembert	114 m	
42	Grotte de Corcelles	71 m	
43	Grotte du Tunnel	95 m	
44	Grotte de Crémines 2	135 m	
	Grotte de Crémines 6	83 m	
45	Franzosenloch	136 m	déniv. -30m
46	Grotte du Baki	70 m	
47	Grotte du Lierre	69 m	déniv. -37m
48	?	60 m	
49	Grotte de la Brotheiteri	52 m	
50	Grotte de Frinvillier	?	en exploration
51	Grotte du Boulevard	101 m	
52	Grotte Roche aux Crocs	100 m	
53	Grotte du Landeron	118 m	
54	Grotte de Twann	62 m	cf. 12.3.3.
55	Puits Californie	69 m	

Ces cavités sont souvent associées à des sources ou à des zones de suintements concentrés; citons par exemple la Grotte de La Foule à Moutier (38), la Grotte des Gorges de Douanne (54); rap- pelons le réseau des Blanches Fontaines au Pichoux (cf. 8.8.1.) etc.; la plus considérable des grottes jurassiennes, celle de Milandre (développement reconnu env. 10 km), bien que située hors du Jura plissé, peut aussi être citée ici. D'autres ré- seaux, actuellement fossiles, présentent toutes les caractéris- tiques d'anciens réseaux d'écoulement actifs (forme des chenaux, traces de corrosion, encroûtements, etc.); ainsi en est-il en- tre autres de la Grotte Sur le Vevay (près de Roches, 28), la grande Grotte Lina à Crémines (4), la grotte Merlin près de Frinvillier (50), etc.

12.3.4. Liaisons puits - galeries.

Il existe souvent une liaison directe entre des zones de puits verticaux et des réseaux de grottes et galeries. Maintes fois, la preuve en a été apportée par coloration (cf. 8.3.3. et 8.3.5.). Ces relations indubitables montrent à l'évidence la complémen- tarité des deux phénomènes: infiltration - résurgence, et l'in- terdépendance étroite des grandes aires d'alimentation karsti- que et des exutoires principaux, pour la plupart situés dans des cluses.

12.4. COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS

12.4.1. Zones drainantes transversales.

La répartition des grandes sources et des cavités karstiques d'une part, les résultats des expériences de coloration d'au- tre part, tendent à confirmer (cf. 9.2.):

- que la circulation karstique actuelle, dans le Jura plis- sé septentrional, se conforme à la structure; les écou- lements se font parallèlement aux structures, parfois sur de grandes distances;
- que les cluses sont situées dans des zones privilégiées de décharge karstique; elles fonctionnent comme niveau de base karstique pour de vastes territoires, à l'E et à l'W; ces zones drainantes transversales, dont les clu- ses sont des éléments essentiels, permettent aux eaux souterraines de franchir les anticlinaux et quitter le massif.

Les principales zones de drainage transversales de notre secteur sont, d'ouest en est (planche VII):

- I le décrochement de La Ferrière aboutissant à la cluse de Biaufond;
- II la transversale: Les Breuleux - cluses de Goumois et de Vautenaivre;
- III les cluses de la Sorne;
- IV les cluses de la Birse.

Au sud de la dorsale Montagne de Droit - Montoz (cf. 11.2.1.), les cluses de la Suze jalonnent aussi un axe de drainage important (V).

12.4.2. Bassins karstiques intermédiaires.

Les territoires karstiques situés entre les zones drainantes approvisionnent celles-ci :

- entre I et II, la région Le Boéchet - Les Bois - Chaux d'Abel
- entre II et III, la région de La Gruère - Le Prédame - Lajoux
- entre III et IV, les chaînes de Moron, Rameux et Vellerat
- à l'E de IV, les chaînes de Graiteray et Rameux E.

La zone drainante des cluses de la Suze est surtout alimentée à partir de l'W (chaîne de Chasseral).

12.4.3. Limites d'influence des zones drainantes.

Il est difficile de tracer exactement la limite d'influence de chaque zone drainante, les expériences de coloration étant encore trop peu nombreuses. On en est réduit à s'appuyer essentiellement sur des critères structuraux et morphologiques.

A ce point de vue, l'intervalle entre les zones drainantes Doubs - Les Brauleux (II) et Sorne (III) est le mieux connu. Il existe, exactement à mi-distance entre II et III, une région karstique au relief incertain, structuralement élevée (Bois Rebstez - Le Prédame - Vacherie des Genevez, 574/233-235), dont l'écoulement ne peut se faire que vers l'un ou l'autre des 2 systèmes de cluses, dans les deux cas longitudinalement par rapport aux structures. C'est un seuil de diffuence karstique: la limite exacte entre les deux bassins ne peut y être exactement tracée (cf. 8.3.8. et pl.V).

On peut, par analogie, fixer la limite d'influence des zones drainantes I et II dans la région Le Boéchet - La Tuilerie; pour les zones III et IV, elle correspondrait à la culmination axiale des chaînes de Moron, Rameux et Vellerat.

12.4.4. Cluses isolées.

Les cluses isolées (Crémines, Envelier, Tiergarten, etc.) font office de drains locaux cantonnés chaque fois dans une seule chaîne; celle-ci constitue l'aire d'alimentation en eaux karstiques.

12.4.5. Début des écoulements souterrains.

La conjonction: écoulement structural longitudinal - drainage transversal a dû s'organiser dès que la chaîne a été plissée (et même peut-être avant). Il a suffi qu'en un point quelconque elle soit débarrassée de sa chape imperméable ter-

tiaire, pour que l'infiltration se produise. Ces eaux d'infiltration n'ont jamais fait que transiter dans le massif, pour finalement en ressortir transversalement.

Les formes d'érosion grandioses (cluses) qui jalonnent les zones de drainage transversales attestent la pérennité des écoulements transversaux au cours des derniers millions d'années. Les plus importantes ont peu à peu affirmé leur prépondérance, en court-circuitant des zones intermédiaires (cluses sèches de Lajoux, Chenal, Rebeuvelier, etc.).

13. AGE DES CLUSES

Jusqu'à présent, nous n'avons rien dit de l'âge des cluses: nous avons émis l'hypothèse, au paragraphe 7.1.3., que la cluse de Semplain pourrait bien être plus jeune que la cluse de Blanches Fontaines. En revanche, aucun indice n'a permis jusqu'ici de dater le phénomène en valeur absolue. Un moyen indirect permet d'obtenir un ordre de grandeur pour le Pichoux, et plus particulièrement le pli coffré de Semplain.

13.1. CLUSE DE SEMPLAIN

13.1.1. Données de base.

On remarque que la voûte de Semplain, et particulièrement la zone tabulaire sommitale, présente une série calcaire relativement complète, autrement dit peu découpée par l'ablation karstique; on peut en déduire qu'à une époque relativement récente, cet entablement devait encore être couvert de Tertiaire, qui protégeait les bancs calcaires.

Cette voûte est tranchée en coup de scie par la Sorne, qui s'y est enfoncée de plus de 300 mètres! Cet enfoncement n'a pu débuter qu'après l'ablation du Tertiaire du sommet; c'est également à ce moment-là que les surfaces calcaires ont commencé à être découpées.

Connaissant la stratigraphie du Malm supérieur, on peut déterminer que l'épaisseur de la tranche enlevée par l'ablation karstique (appendice, chf. 29), est de 50 à 60 m sur le rebord W, et de 80 à 90 m sur le rebord E de la cluse. On voit donc que le versant W est moins découpé que le versant E. On peut admettre qu'à mi-distance entre les deux falaises actuelles, la tranche calcaire manquante est de 65 - 75 m en moyenne.

Enfin, on admet que la valeur de l'ablation karstique actuelle (cf. 8.3.11.) est représentative des conditions moyennes de la région depuis le plissement; rappelons que cette valeur est de 0,081 à 0,082 mm/an; nous admettons pour nos calculs 0,080 mm/an en moyenne (ablation totale).

13.1.2. Age de la cluse de Semplain.

Selon notre hypothèse, l'âge de la cluse, qui est équivalent à la durée du décapage moyen à l'aplomb de la Sorne, peut dès lors être calculé aisément. Il est de:

$$\begin{aligned} 65 \text{ à } 75 \text{ m} & : 0,08 \text{ mm/an} = 812 \text{ à } 938.000 \text{ ans} \\ \text{moyenne} & = 880.000 \text{ ans} \end{aligned}$$

Cette valeur nous permet d'estimer d'autres paramètres.

13.1.3. Vitesse de creusement de la cluse.

La profondeur actuelle de la cluse est de 300 m au milieu du canyon; en y ajoutant les 65 à 75 m déjà décapés, on obtient la valeur de l'enfoncement linéaire réel de la rivière, depuis le début de son action, soit 365 à 375 m (= env. 370 m);

La vitesse moyenne d'enfoncement linéaire de La Sorne est donc:

$$370 \text{ m} : 812 \text{ à } 938.000 \text{ ans} = 0,395 \text{ à } 0,455 \text{ mm/an}$$

$$\text{moyenne} = 0,425 \text{ mm/an}$$

Cette vitesse de creusement, inférieure à 1/2 mm/an, n'est pas excessive, et reste compatible avec des résultats obtenus ailleurs (Monbaron 1973).

13.1.4. Vitesse d'élargissement de la cluse.

L'éloignement des deux falaises du canyon est de 610 à 650 m (moyenne 630 m) d'un rebord supérieur à l'autre. Connaissant le temps nécessaire pour créer ce vide (880.000 ans en moyenne), on peut calculer la vitesse d'élargissement du canyon; elle est de:

$$630 \text{ m} : 880.000 \text{ ans} = 0,72 \text{ mm/an}$$

Ceci implique un recul moyen de 0,36 mm/an pour chaque paroi, en moyenne. On a vu que cette vitesse devait être un peu plus rapide sur versant E que sur versant W, à cause du plongement axial (cf. 7.2.1.). Un tel recul est compatible avec les résultats d'autres auteurs (Pancza, en préparation).

Si l'on se livre au même calcul à différents niveaux de la cluse, on obtient des résultats comparables:

- recul de la base de la paroi de Malm supérieur:

0,55 mm par paroi et par an;

- recul du sommet de la paroi de Rauracien:

0,45 mm par paroi et par an.

Ces deux valeurs sont de même ordre de grandeur que celle trouvée plus haut.

13.2. AUTRES CLUSES

En raisonnant comme pour la voûte de Semplain, on peut estimer par analogie l'âge de quelques autres cluses, en tenant compte également du temps écoulé depuis le début du décapage karstique au sommet du pli.

13.2.1. Cluse de Blanches Fontaines.

On remarque que l'anticlinal de Raimeux est environ quatre fois plus décapé à son sommet que Semplain (tabl. 13.A). En admettant une vitesse d'ablation constante de 0,08 mm/an, cette cluse serait âgée de:

$$315 \text{ à } 320 \text{ m} : 0,08 \text{ mm/an} = 3,9 \text{ à } 4 \text{ millions d'années.}$$

La largeur de la cluse à son sommet étant de 2.280 m, le recul moyen de chaque lèvres est d'environ 0,3 mm/an; l'ordre de grandeur correspond bien à celui de Semplain.

13.2.1. Autres exemples.

Sur le tableau 13.A., plusieurs cluses sont classées dans l'ordre croissant de leur âge présumé. Nous n'avons choisi que des cluses typiques, possédant encore au moins une lèvre à carapace de Malm calcaire si mince soit-elle. La valeur de l'ablation au sommet de l'anticlinal a été déterminée d'après les coupes géologiques établies par divers auteurs.

TABLBAU 13 A : Age présumé de quelques cluses jurassiennes.

Cluse	Tranche décapée		Moyenne (aplomb riv.)	Age	Coupes géol. de référence
	W	E			
Moutier	50 m	30 m	40 m	500.000 a.	Elber 1920
Semplain	50-60 m	80-90 m	65-75 m	880.000 a.	cf. 13.1.2.
Tiergarten	125 m	115 m	120 m	1.500.000 a.	Liniger 1925
Court	175 m	235 m	200 m env.	2.500.000 a.	Schlaich 1934
Choindez		210 m	210 m	2.600.000 a.	Elber 1920
Reuchenette	265 m	280 m	270 m	3.400.000 a.	Antenen 1971 Schürer 1928
Blanches Font.	330 m	310 m	315-320 m	4.000.000 a.	Birkhäuser 1925
Undervelier	310 m	350 m	330 m	4.100.000 a.	Birkhäuser 1925

13.3. COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS

Nous convenons de la relativité de tous ces chiffres qui n'expriment que des ordres de grandeur. Il faut se rendre compte des approximations et simplifications que nous avons admises:

- les distances (éloignement, profondeur) sont mesurées sur carte ou sur photos aériennes, et non télémétrées sur le terrain;
- les différences lithologiques ne sont pas prises en considération; il est bien clair qu'un banc calcaire gélif ne recule pas à la même vitesse qu'un banc massif, et que l'érosion linéaire travaille plus aisément dans des marnes que dans des calcaires; nos résultats sont des intégrations globales;
- les conditions actuelles ne sont pas forcément une bonne image des conditions ayant régné ici tout au long de si longues périodes, en particulier les périodes glaciaires;
- enfin, le processus d'enfoncement peut être lent au départ, pour s'accélérer ensuite, ou tout au contraire être d'abord très rapide, pour diminuer d'intensité par la suite.

Nous pouvons cependant tirer quelques conclusions générales.

13.3.1. Les cluses de la Sorne.

Un million d'années a pu suffire pour façonner la cluse à travers Semplain. D'autre part, il n'est pas nécessaire de faire intervenir des "cycles" d'érosion antérieurs pour expliquer cette coupure. Elle se justifie aisément par l'action des seuls agents érosifs habituels (eaux superficielles et karstiques). En corollaire, on peut admettre que le sommet de Semplain était encore recouvert de Tertiaire voici moins d'un M.A.

Il se confirme que la cluse de Blanches Fontaines est plus ancienne que celle de Semplain; elle serait d'autre part contemporaine de la cluse d'Undervelier, ce qui est logique vu leur interdépendance au point de vue hydrologique.

13.3.2. Autres cluses.

Les autres cluses envisagées dans le tableau 13.A. ont des âges inférieurs aux deux cluses de la Sorne. On remarque qu'il existe une bonne corrélation entre l'âge présumé de la plupart d'entre elles et leur largeur respective: le coefficient de corrélation est de 0,957 (fig. 13.1.); seule la cluse de Moutier donne une largeur peu compatible avec l'âge que nous lui avons attribué. Certaines imprécisions dans la détermination de la valeur de l'ablation d'après les profils de Schlee, peuvent expliquer cette différence.

Il existe certainement dans notre région des cluses encore plus anciennes que celles de la Sorne, par exemple celle du Vorbourg, ou celle de Soyhières; leur carapace de Malm ayant été totalement décapée, elles ont évolué en combes anticlinales; il est de ce fait impossible d'appliquer les critères employés plus haut pour en estimer l'âge.

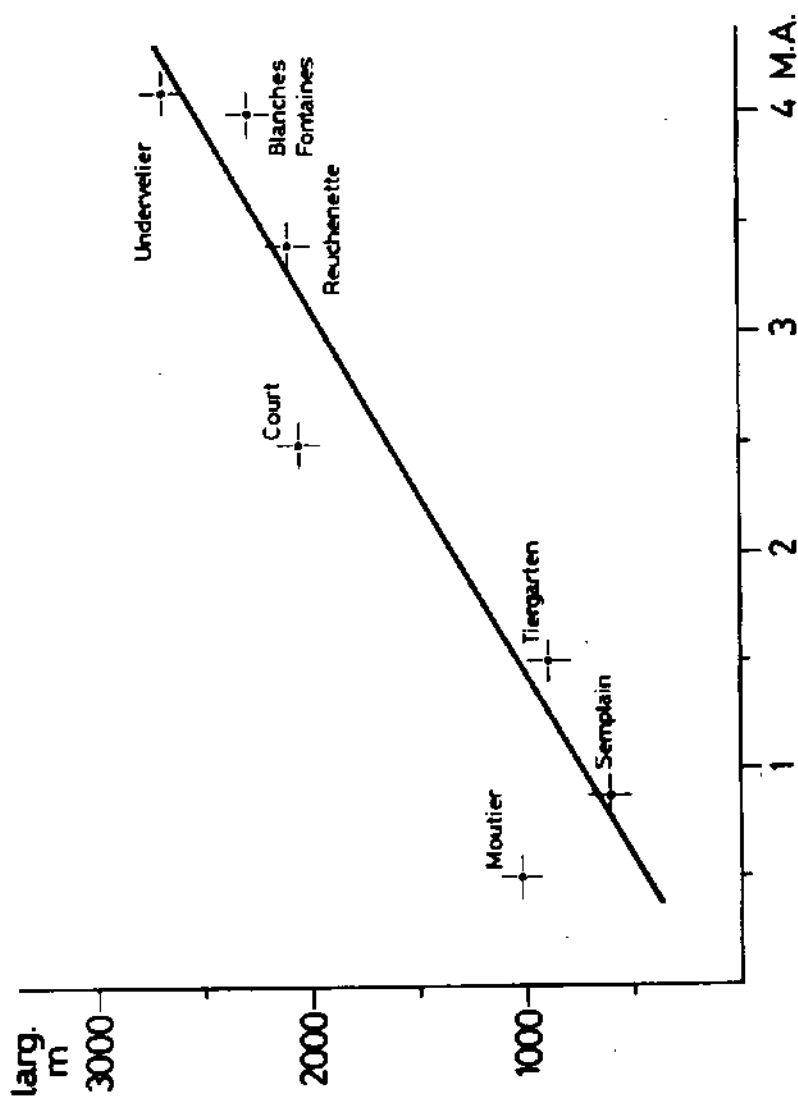


Fig. 13.1.
Relation largeur — âge estimé, pour quelques cluses du Jura septentrional.

Quatrième partie:

S Y N T H E S E

14. GENESE DE LA CLUSE DU PICHOUX

Une fois encore, c'est au Pichoux que nous nous référons, cette fois-ci pour essayer de reconstituer à grands traits le déroulement des événements qui ont engendré la cluse. Nous allons envisager deux solutions:

- a) une érosion mixte, fluviale et karstique (fig. 14.I)
- b) un processus essentiellement karstique (fig. 14.II)

14.1. EROSION MIXTE: FLUVIALE ET KARSTIQUE

14.1.1. Avant le plissement (schéma 14.I.a)

On sait que les Franches Montagnes, et en particulier leur bordure E, possédaient une couverture tertiaire réduite au seul Miocène marin (Aubert 1975), tandis que la "Dépression rauraque" (Raurachische Senke), dont la limite occidentale coïncide à peu près avec la région des cluses de la Sorne, contenait des sédiments datant de l'Eocène et de l'Oligocène (200 à 300 m dans le bassin de Delémont, 400 à 500 m dans la vallée de Tavannes). Ces formations tertiaires reposaient sur le Jurassique, décapé en biseau par l'érosion éocène. Elles constituaient un vaste glacis peu vallonné sur lequel des cours d'eau s'écoulaient, selon toute probabilité vers le sud (Liniger 1966).

14.1.2. Début du plissement.

a) Situation générale.

Dès l'amorce des mouvements tectoniques, les structures actuelles se sont dessinées. Le sens d'écoulement général s'est inversé. Les plis franc-montagnards ont été rapidement débarrassés de leur chape tertiaire, livrant à l'érosion karstique des aires de plus en plus vastes, alors que plus à l'E, les anticlinaux restaient encore passablement empâtés par leur couverture imperméable. L'écoulement des eaux (superficielles et souterraines) a dû très rapidement se conformer aux structures naissantes; la circulation karstique notamment, à partir des Franches-Montagnes, épousait les structures et s'écoulait d'W en E.

Ces eaux souterraines ne restaient cependant pas piégées dans le massif; elles devaient s'en échapper, mettant à profit les ensellements qui se dessinaient transversalement aux plis de Moron, Raimeux et Vellerat; dans cette zone, une sorte de reculée se constituait, dans laquelle des sources karstiques jaillissaient, assurant le dénoyage de l'arrière-pays karstique et permettant ainsi une circulation et une érosion souterraines actives. C'était l'ébauche de la zone drainante transversale.

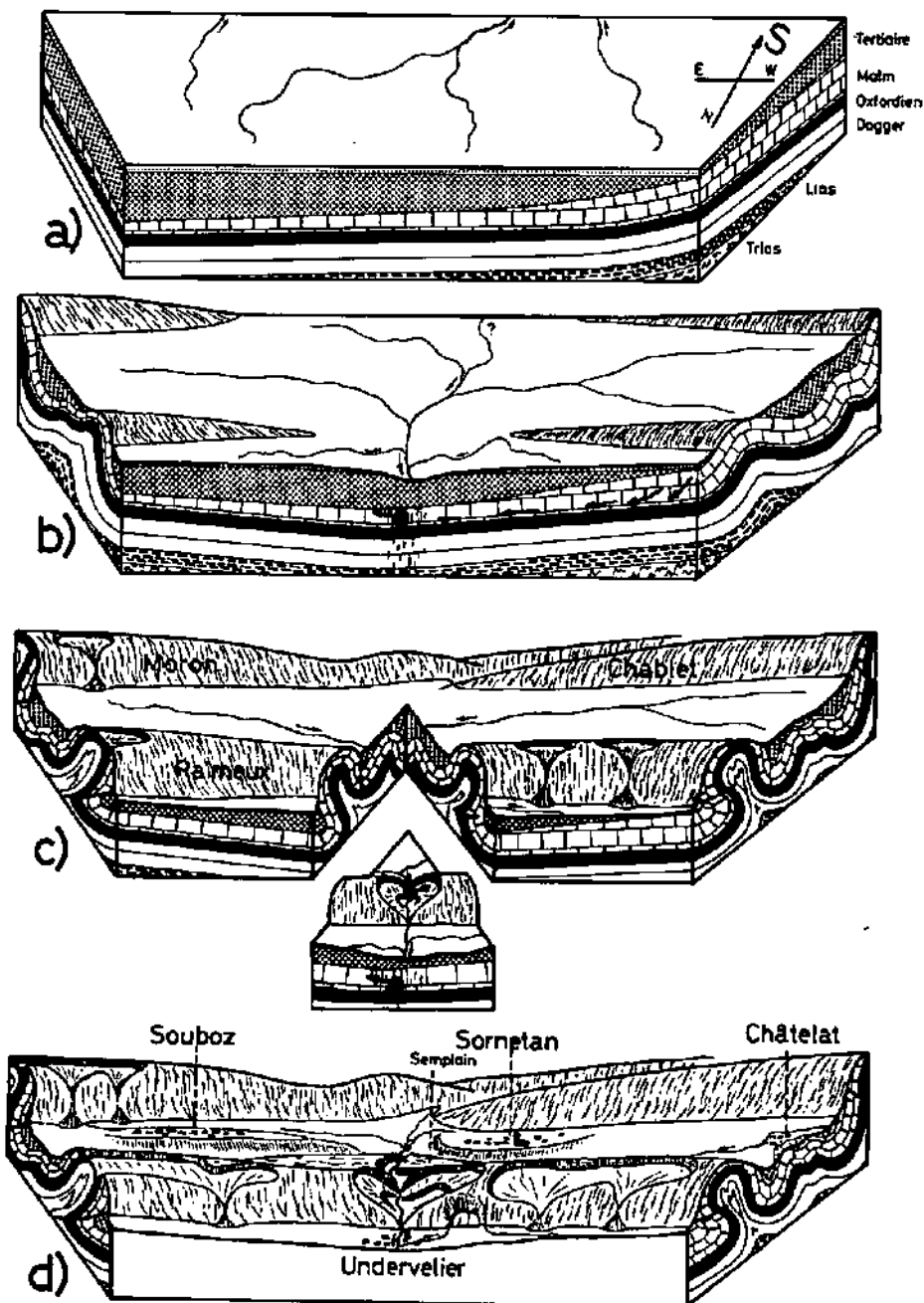


Fig. 14.1.
Génèse de la cluse du Pichoux (schéma); processus
d'érosion mixte, fluviale et karstique:

- a) avant le plissement
- b) début du plissement
- c) à la fin du plissement
- d) état actuel

b) Cluse du Pichoux

Le pli principal de Raimeux (schéma b) doit avoir été dégagé rapidement du Tertiaire, surtout à l'endroit de ses culminations axiales à l'E et à l'W de la cluse actuelle.

Le ruissellement superficiel mit rapidement à profit la selle axiale qui se dessinait pour passer du Petit Val dans le Vallon de Soult - Undervellier; il n'est pas exclu qu'une partie des eaux de la Haute Trame ait rejoint ce bassin par l'ensellement des Bouts de Saules, ou celui du Puet.

En profondeur, les marnes du Séquanien faisaient sans doute office de niveau de base karstique. La zone drainante transversale, minée par le soutirage karstique, s'affirmait de plus en plus.

On a donc très rapidement assisté à deux phénomènes différents, qui alliaient leurs effets pour façonner une dépression axée transversalement aux structures:

- une érosion linéaire, normale, s'imprimant du dessus;
- une érosion souterraine, karstique, minant l'infrastructure et préparant par-dessous le chemin à la première.

14.1.3. A la fin du plissement (schéma 14.I.C.)

Au stade suivant, le niveau de décharge du karst s'est enfoncé, vraisemblablement sous l'influence d'un niveau de base (Bassin de Delémont ?) évoluant parallèlement. L'édification des plis est pratiquement achevée; Semplain n'est cependant pas encore dégagé de son Tertiaire. Moron constitue un barrage au Sud. La voûte de Raimeux est entaillée, et le cirque des Blanches Fontaines ébauché.

Des émergences karstiques se manifestent au fond de ce cirque, dans la gouttière structurale (= bassin fermé entre les deux anticlinaux, cf. 5.4.): ce sont les sources de Blanches Fontaines à leur stade initial. Elles occupent une position à peu près analogue à celle de la source actuelle de l'Areuse à St Sulpice. Les eaux superficielles en provenance du Petit Val franchissent en chute le "gradin de confluence" séparant ce vallon des Blanches Fontaines.

14.1.4. Etat actuel (schéma 14.I.D)

L'action conjuguée de l'érosion fluviale et de l'érosion karstique s'est poursuivie sans interruption jusqu'à nos jours. La Haute Sorne s'est enfoncée linéairement dans le pli de Semplain, par surimposition locale (pour établir un profil d'équilibre). Elle a été aidée en cela par les sources, dont l'action régressive a contribué de manière déterminante au façonnement de la "reculée" de Semplain. Nous avons vu que le début de l'enfoncement pouvait être relativement récent (moins

de un million d'années). Le profil d'équilibre est encore loin d'être atteint aujourd'hui.

Plus rien n'est venu perturber par la suite les actions conjuguées de ces deux phénomènes, sauf peut-être les variations climatiques du Quaternaire récent, qui tantôt ont inhibé, tantôt ont exacerbé leur pouvoir érosif respectif. La cluse du Pichoux, en son état actuel, participe encore et toujours à ces deux phénomènes.

14.2. PROCESSUS KARSTIQUE

On peut envisager une deuxième solution, qui réduirait l'importance de l'action strictement linéaire de la Haute Somme à travers l'anticlinal de Semplain.

Lors du plissement, le synclinal du Petit Val a fort bien pu évoluer en bassin fermé structural, à l'exemple des synclinaux de Bellelay ou de la Vallée des Ponts (Metz 1967, Barsch 1968). Les eaux superficielles s'en seraient échappées par des ponors, en liaison avec les Blanches Fontaines (fig. 14.II.).

14.2.1. Stade "Creux d'Entier" (Schéma 14.II.a).

Dans un premier "stade", une fois le synclinal formé, la majeure partie des eaux superficielles du Petit Val se seraient perdues dans le Creux d'Entier (- 198 m, développement total actuel: près de 1000 m), au contact Tertiaire - calcaire; ainsi s'expliqueraient:

- la position aberrante de ce gouffre, qui s'ouvre à flanc de coteau, à une altitude de 943 m, loin de tout réseau d'écoulement superficiel actuel;
- les dimensions impressionnantes des divers puits qui le composent;
- sa relation plus que probable avec les Blanches Fontaines (cf. 8.3.8.).

Dans cette situation, le pli de Semplain n'apparaissait pas encore dans la topographie, et comme les eaux superficielles du Petit Val quittaient ce territoire par voie souterraine, la partie supérieure de la cluse n'avait pas de raison d'exister.

Comme dans la solution précédente (fig. 14.I. stade c), les eaux karstiques se déchargeaient aux Blanches Fontaines primitives.

14.2.2. Stade "Semplain" (schéma 14.II.b)

Les structures étant définitivement constituées, l'érosion a décapé Semplain de sa chape tertiaire. L'érosion dorsale des bancs débute. Parallèlement, et grâce à leur puissance d'érosion régressive, les sources de Blanches Fontaines réussissent à opérer une percée vers le S à travers Semplain (reculée); les

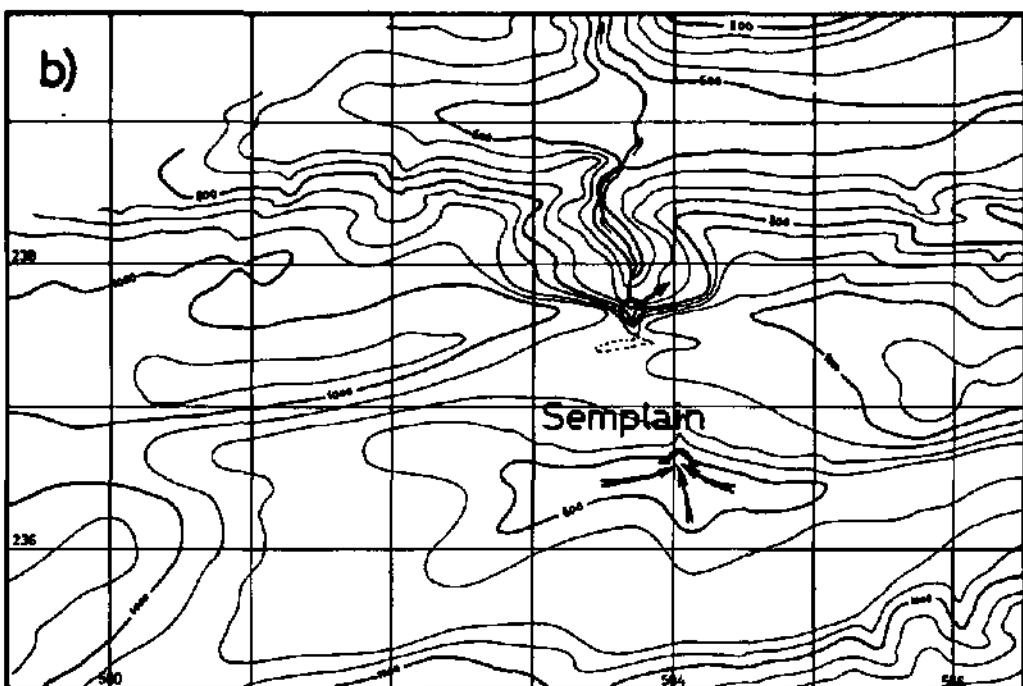
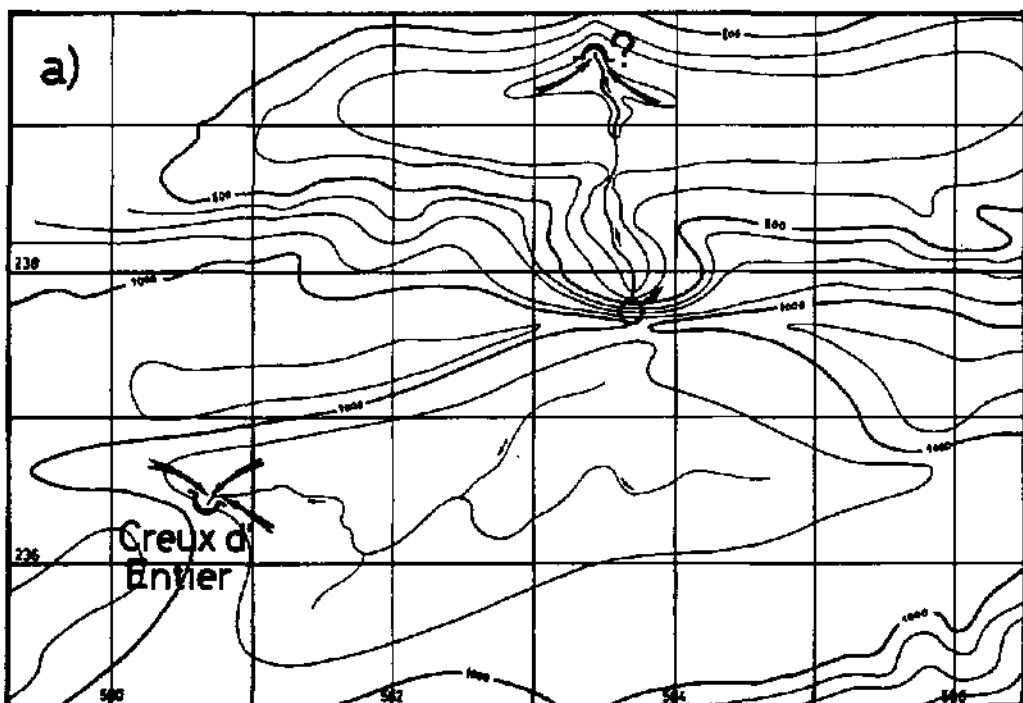


Fig. 14.II. Cluse du Pichoux; processus d'érosion karstique:
 a) stade Creux d'Entier
 b) stade Semplain

eaux du Petit Val sont capturées directement à leur profit, et disparaissent dans un ponor, à peu près dans la zone de la cluse actuelle (situation analogue à La Rançonnière au Locle); le tronçon souterrain de la Haute Sorne s'élargit rapidement, pour finalement évoluer vers un écoulement à l'air libre (par effondrement ? ou évolution normale d'une reculée ?). Nous en sommes actuellement à ce stade.

14.3. COMMENTAIRES

Si séduisantes qu'elles soient, les deux solutions proposées n'en posent pas moins de nombreuses questions.

14.3.1. Importance du Tertiaire.

Les premières ont trait à la masse énorme de Tertiaire qu'il faut envisager pour "combler" le Petit Val jusqu'à une altitude de 950 à 980 m de façon à ce que Semplain n'apparaisse pas dans la topographie.

La couche tertiaire la plus récente du Petit Val est le calcaire d'eau douce du Delémontien (Stampien, cf. 4.2.2.). Or, les affleurements actuels les plus élevés en altitude sont ceux qui forment le sommet des collines de Souboz (585/235) à 880-890 m, de Sornetan (850 m à peine) et de Monible (870 m). Y a-t-il eu d'autres formations au-dessus du Delémontien, disparues sans laisser de traces ? De tels sédiments existent en effet dans la vallée de Tavannes au S (notamment un Burdigalien très épais), et dans le vallon de Soulce au N (Helvétien). Il n'est pas impossible qu'il y en ait eu aussi dans le Petit Val.

Il est possible aussi que des glissements d'importantes masses tertiaires se soient produits à partir des anticlinaux adjacents, au cours du plissement, augmentant ainsi l'épaisseur du Tertiaire dans les synclinaux.

Enfin, les processus d'érosion décrits étaient déjà engagés, quand bien même les plis n'avaient pas encore atteint leur plein développement; les synclinaux étaient moins profonds et les obstacles anticlinaux moins élevés: leur empatement par le Tertiaire peut donc très bien être envisagé.

14.3.2. Relation Sorne - Sources de Blanches Fontaines.

Une autre objection est d'ordre plus pratique: le résultat négatif de la coloration de la Sorne sur les sources de Blanches Fontaines (cf. 8.3.7.) semble exclure une liaison karstique entre le lit de la Sorne et les sources, ce qui remet en question la capture des eaux superficielles du Petit Val, envisagée plus haut (14.2.2.).

Cependant, ce problème devrait être repris; il n'est pas exclu en effet que, vu l'extrême dilution du colorant, celui-ci soit

finalement passé inaperçu à l'analyse. Dans la cluse de Reuchette notamment, la relation entre le lit de la Suze et les sources karstiques (notamment les sources de Châtel) a été prouvée par coloration (B. Schindler, communication orale). Il est fort probable qu'il en est de même au Pichoux.

14.3.3. Cluse de Semplain: formation par effondrement ?

Dernière question à se poser: le tronçon supérieur souterrain de la cluse de Semplain a-t-il évolué brutalement (par effondrement) en tronçon à ciel ouvert ? Il n'existe aucune trace d'un tel événement, qui nous paraît de ce fait difficile à admettre.

14.4. CONCLUSION

Deux "modèles" de genèse possibles, valables pour la cluse du Pichoux, ont été envisagés. Tous deux font intervenir l'action des eaux karstiques dans le processus de façonnement; dans le premier, elles ont une importance au moins égale à celle des eaux superficielles, alors que dans le second, elles tiennent le rôle principal. Il est en tout cas certain que les deux modes d'action, karstique et normal, ont concouru ensemble au façonnement de la cluse du Pichoux; en fin de compte, nous pensons que le mécanisme de façonnement est un compromis entre la solution "érosion mixte" (14.1.) et la solution "karstique" (14.2.).

Jusqu'ici, trop d'auteurs ont attribué à l'érosion fluviale une importance excessive dans le façonnement des cluses, et n'ont pas tenu suffisamment compte de l'appoint karstique. Nous pensons avoir démontré qu'au Pichoux, les rôles étaient inversés.

Enfin, il va de soi que la valeur de ce "modèle" dépend en grande partie de l'existence et de l'évolution simultanée de la cluse d'Undervelier, située plus au N. Cette dernière a dû se créer et évoluer selon un schéma semblable, avec la participation plus "active" d'eaux souterraines en provenance de l'étage inférieur (Dogger; cf. 13.3.1.).

15. RESUME ET CONCLUSIONS

L'étude des cluses du Jura septentrional a permis de préciser certains points essentiels pour la compréhension des phénomènes morphogénétiques dans cette portion de la chaîne jurassienne.

15.1. THEORIE DES ZONES DRAINANTES TRANSVERSALES

Nous avons démontré l'existence dans le Jura septentrional, de zones drainantes transversales d'origine tectonique; elles attirent les eaux karstiques qui y jaillissent en sources, ainsi que les eaux superficielles. L'influence des zones drainantes a dû s'exercer dès le début du plissement.

Le long des zones drainantes, pendant la période de façonnement:

- l'érosion karstique a miné l'infrastructure et créé des cirques et des reculées;
- l'érosion fluviale a façonné des sillons d'érosion.

Les cluses sont la résultante de ces deux actions simultanées. Elles représentent donc des tronçons évolués de zones drainantes transversales.

En ce qui concerne les théories classiques, nous constatons que les cluses ne sont dues ni à l'antécédence pure, ni à l'épigénèse exclusive, ni à l'érosion karstique seule, ni à des influences exclusivement tectoniques. Elles résultent plutôt d'une combinaison de tous ces phénomènes, selon un "dosage" subtil, dont seule la nature a le secret, et qui ne peut se mettre en équation!

En un mot, les cluses sont pluricausales.

15.2. POURSUITE DES RECHERCHES

En énonçant cette théorie, nous ne prétendons pas épuiser le sujet, loin de là! Nous avons évoqué plusieurs domaines qui mériteraient d'être explorés plus avant. Leur étude infirmerait (sans doute!) ou confirmerait (peut-être!) ce qui précède. Résumons en quelques mots les points à reprendre:

a) Aspects théoriques:

1° Affinement de notre modèle, surtout en ce qui concerne les données stratigraphiques (sédiments tertiaires et quaternaires, "témoins" du creusement des cluses) et paléoclimatologiques (intensité de l'ablation, vitesse de creusement, etc.);

2^o Confrontation des données nouvelles de la géophysique de la chaîne jurassienne (sismicité, mensurations de précision, sismique profonde, etc.) avec notre modèle (linéaments, zones perturbées, drainage transversal, etc.);

3^o Etude comparative de divers massifs plissés, et des sites de cluses qu'on y rencontre;

4^o Application de notre modèle à ces régions.

b) Implications pratiques:

Poursuite de l'étude du karst des Franches-Montagnes et du Jura septentrional plissé (spéléologie, bassin-versant témoin, cadastre des sources karstiques, expériences de coloration, etc.) en vue d'une exploitation plus judicieuse et d'une protection accrue des ressources en eau de la région.

15.3. CONCLUSIONS

Lorsque nous avons commencé notre étude, nous nous étions fixé un but bien ambitieux: celui de "régler son compte" une fois pour toutes au problème des cluses jurassiennes. Nous nous sommes bien vite aperçu de notre présomption, et devons reconnaître aujourd'hui humblement que nous n'avons rien résolu définitivement. Les quelques précisions que nous apportons ont suscité une foule de questions nouvelles (ou réactualisées), qui nécessiteraient tout autant, sinon plus, d'efforts et de temps pour les résoudre.

Au cours de nos travaux, nous avons maintes fois pu apprécier le réalisme de nos devanciers. Leur réticence à parler des cluses, ou le fait d'en parler en termes vagues, généraux, n'était pas un aveu d'ignorance. Tous avaient saisi l'extrême complexité de ce problème, et ont craint de s'avancer trop loin en terrain inconnu; d'où leur retenue. Face à leur attitude, nous mesurons d'autant mieux l'audace de nos affirmations; nous rendons hommage à leur probité de savants.

Nous tirons une autre grande leçon de ce travail: il nous paraît essentiel de ne jamais se couper de la pratique. Nous avons énormément apprécié le contact avec les collectivités (communes, organismes d'aménagement du territoire, etc.) et avons contribué, bien modestement, à certains aménagements locaux. Souhaitons que quelques-unes de nos propositions puissent être reprises, au bénéfice de la collectivité et de l'aménagement de notre cadre de vie!

Nous avons enfin appris, en le parcourant en tous sens, à connaître notre Jura. A le connaître, c'est-à-dire à le ressentir très intimement, très profondément! Nous le déclarons digne d'intérêt, digne d'être préservé des erreurs que l'homme commet envers son milieu, en un mot digne d'être aimé!

A P P E N D I C E

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

1° Foerste, Aug. F. (1891).

(p. 417) "The chief streams of the Bernese Jura follow consequent synclinal valleys for the most part; but they frequently pass from one synclinal valley to another by transverse cirques, which seem to be persistent courses of streams that flowed here antecedent to the folding of the region..."

2° Brückner, Ed. (1898).

Durchbruchthäler.

(p. 318) "...Thatsächlich ist bis heute für kein einziges Durchbruchthal eine tektonische Entstehung etwa durch Bildung eines Grabens nachgewiesen, wenn sie auch in manchen Fällen denkbar ist; die erdrückende Mehrzahl muss jedenfalls der Arbeit der Flüsse auf Rechnung gesetzt werden"

(p. 320) "...Nicht selten führt sich die Entstehung von Durchbruchthäler darauf zurück, dass sich im Bett eines Flusses eine Scholle oder eine Falte hebt und während der Hebung durchschnitten wird (antecedente Durchbruchthäler). Auch hier ist der Fluss älter als das Durchbruchthal. ...Auch der Durchbruch der Donau..., ebenso die Bildung zahlreicher Querthäler (Clusen) im Schweizer Jura, wie z.B. der Cluse von Münster..."

3° Lugeon, M. (1901).

(p. 315) " Bien qu'aucune alluvion ne témoigne d'une ancienne action fluviale, cette tranchée doit incontestablement son origine à un cours d'eau, soit l'Arve, soit la Menoge..."

"... La coupure du Salève a évidemment la même histoire que celle du Semnoz. Là aussi, la théorie de l'antécédence permet d'expliquer aisément le sillon, mais ici la rivière aurait bénéficié de conditions particulières. Le pli du Salève s'enfoncé sous la région molassique du pied des Voirons. L'érosion n'a pas tardé à se faire sentir avec plus d'intensité sur cette partie plus tendre du sol, et la coupure a été abandonnée par voie de capture..."

"... Le cas du Fier est tout aussi digne d'attention. Là aussi, la théorie de l'antécédence s'applique facilement."

4° Heim, A. (1919)

(p. 679, pt.6) "... Die Rückwärts-erosion, die ganze Ketten überwinden soll, musste ihrer geringen Arbeitskraft halber

in der Regel im Rückstand bleiben gegenüber der Erosion durch präexistente Flussläufe. Solche mussten aber sich einstellen und vorhanden sein vom ersten Momente an, da die Molasse aus ihrer Mutterlauge tauchte, und sie waren schon da, als die Faltung deutlich einsetzte...

5° Schlaich, E. (1934)

(p. 39) "... Alles deutet vielmehr darauf hin, dass die Birskluse von Court einer alten Anlage entspricht, wie dies auch für die übrigen Quertalstracken dieses Flusses gilt; die wahrscheinlichste Erklärung bietet meines Erachtens die Annahme der Antecedenz des Flusses".

6° Schwabe, E. (1939)

(p. 82) "... Alb. Heim nimmt entgegen Machatschek auch für die Durchbrüche von Pichoux und Undervelier Antecedenz an, hauptsächlich deshalb, weil sonst die Klusen kaum in demselben Talweg sich aneinandersiehten. Ich möchte die Recedenz (note: l'érosion régressive) gleichfalls ablehnen; die Antecedenztheorie scheint mir das Problem besser lösen zu helfen."

7° Elber, R. (1920)

(p. 88 et es) "... Was die Birsklusen betrifft, so bin ich bei meinen Aufnahmen zum Gedanken geführt worden, wie sie erstmal Aug. F. Foerste von 25 Jahren ausgesprochen hat, d.h. ich schliesse mich denen an, die für die Birs Antecedenz und für ihre Klusen hohes Alter annehmen..."

"... Stellen wir uns auf den Boden der Antecedenztheorie, so scheint es mir aber doch nicht angängig, einfach Antecedenz der heutigen Birs anzunehmen. Wir haben oben ausgeführt, wie wahrscheinlich während des Altpliocäne das Gebiet des jetzigen hohen Kettenjura zur Süabdachung des Schwarzwaldes und der Vogesen Gerölln überstreut wurde..."

"... Sobald aber einmal die Abflussrichtung nach N gegen den Rheintalgraben erfolgte, setzte ein weiteres Vertiefen der schon vorhandenen Quertalstracken ein und so entstanden die Birsklusen in ihrer heutigen Gestalt."

8° Liniger, H. (1953)

(p. 291 et es) "... so muss der Fluss aus dem N, der die Rinne ins Oligozän eingeschnitten hat, vortortonisch erodiert haben. Die Breite dieses tertiären Tales betrug ca 4 km; es hatte Talränder von 80 m Höhe. Es liegt deshalb eine Rinne von beachtlichem Ausmass vor, die natürlich auch Fortsetzungen nach N und S gehabt hatte, obschon bei Deleberg die Rinne aufgefüllt wurde und weiter s. keine Vogesensande festzustellen sind."

Dagegen fällt nun sofort auf, dass in der s. Fortsetzung der Chaibeuxrinne die Klusen von Moutier und in der n. Fortsetzung diejenigen von Soyhières liegen. Daraus möchte ich den Schluss ziehen, dass damit ein erster Hinweis einer Urbirs aus dem N vorliegt, womit die Theorie ELBERS Gestalt annimmt..."

"... Gestützt auf diese Befunde lassen sich nun vorerst die Klusenverhältnisse im Gesamtjura einer ersten Analyse unterziehen. Überall dort, wo jungtertiäre Schotter aus dem N bekannt sind, wo sich auf den Ketten auffällige Passlücken finden (z. B. Pierre Pertuis), wo sich sonderbar verlaufende Flussabschnitte zeigen, wo Klusen auftreten, kann vorerst auf eine vortortonische Anlage geschlossen werden..."

9° Schlee, P. (1913)

(p. 39) " Die deutliche Beziehung der Durchbruchtäler zu den Höhenminima der Gewölbeachsen scheint folgendermassen erklärlich zu sein: Als nach Ablagerung der Meeres- und Süswasserbildungen des Miozäns die Faltung langsam einsetzte, befand sich jedenfalls in unserem Gebiet ein sehr wenig modelliertes Flachland. Den neu entstehenden orographischen Verhältnissen entsprechend, bildete sich nun auf dem ziemlich undurchlässigen Tertiärboden ein System von Entwässerungsadern aus. Das Wasser sammelte sich in Bächen, die in den langen zunächst noch ganz flachen Synklinalen dahinflossen, und gelangte von einer Mulde zur anderen durch Senken, die sich noch zwischen den länglichen sich allmählich erhebenden Buckeln fanden..."

"... Als sich nun aber die Gewölbe weiter hoben, kamen auch ihre niedrigsten Stellen viel höher zu liegen als die Mulden, und nachdem zunächst die Tertiärdecke der Antiklinalen durchschnitten war, mussten die Flüsse allmählich in den aufsteigenden Jurakalk hineinsägen."

10° Jenny Fr. (1897)

"Der gegenwärtiger Lauf der Birs ist kein zufälliger, sondern ist bedingt durch die tektonischen Verhältnisse der Gegend, welche sie durchfliesst. Die Birs hat durch Änderung ihrer ursprünglichen Lage Anpassung an die Struktur der von ihr durchflossenen Gebirge ihre heutige Gestalt erhalten. Und da halte ich mich dafür, dass die Anpassung im Birsgebiet meistens mittelst rückläufiger Erosion geschehen ist. Ich glaube das um(so)-mehr als ich direkt habe nachweisen können, dass eine vollständige Klus (Erschwil) auf die Weise entstanden ist und um so mehr als alle Wahrscheinlichkeit dafür spricht, dass auch die Klusen von Court und Günsbrunnen auf retrograde Erosion zurückzuführen sind. Ich stelle mir vor, dass bei beginnender Faltung die tektonischen Störungen sich bald bemerkbar gemacht und frühzeitig zur Anlage der heutigen Flussläufe geführt haben..."

11° Machacek, Fr. (1905)

(p. 93) "Wir betrachten also die fünf Birsklusen dieser Strecke

als Werke eines antezedenten Flusses, der sich den vorgefundenen, oder im Entstehen begriffenen tektonischen Verhältnissen und der Gesteinsbeschaffenheit der Ketten in hohem Masse angepasst hat."

(p. 95) "Die Klusen der Birszuflüsse erscheinen uns also durchweg als Werke der subsequence Erosion, entstanden nach dem definitiven Aufbau der von ihnen durchbrochenen Ketten. Die Verhältnisse, die für die Birsklusen selbst die Antezedenz des Flusses nahe legen, konnten wir in den untergeordneten Durchbruchstäler nicht wieder finden".

12° Fournier, E. (1900)

(p. 221) "...La plupart des cluses de la haute chaîne ont une origine identique. Mr de Lapparent a bien indiqué cette origine lorsqu'il dit: "... l'axe d'un anticlinal n'est pas non plus à pente constante. Il peut offrir des ensellements, constituant des points faibles, qui procureront une voie de sortie aux eaux enfermées dans des synclinaux sans issue. Le cas est fréquent au Jura, où des cluses, c'est-à-dire des coupures transversales, établies aux points les plus bas des bourrelets anticlinaux, permettent à certains cours d'eau de traverser les plis saillants." (p. 128 Leçons de Géographie 1898)..."

13° de Margerie, Em. (1909)

(p. 60 et ss) "L'un des exemples qui a provoqué le plus de spéculations est celui des cluses alignées de la Birse,..."
"... Il est certain que si l'on suppose les parois de ces cluses redevenant continues, sans que la topographie du pays subisse d'autre modification, un cours d'eau ne s'établirait pas suivant l'emplacement actuel de ces coupures: la Birse, par exemple, au lieu de percer la voûte du Graiteray dans la cluse de Court, en contournerait l'extrémité à gauche, par le col de Champoz; de même qu'en aval de Moutier, elle éviterait le Raimieux en profitant du couloir qui s'amorce, au nord de cette ville, dans les Pâturages du Droit.

Mais il n'en demeure pas moins vrai que le tracé général de la rivière, à voir les choses de haut, diffère très peu de ce qu'il devrait être en admettant qu'il soit exclusivement commandé par les conditions tectoniques. L'examen de la carte géologique et l'étude de nos courbes structurales, quelque imparfaites qu'elles soient dans cette région, - ayant été tracées d'après les contours de la première édition de la feuille VII - ne laissent aucun doute sur la réalité du fait. Et la même conclusion s'impose avec une égale force dans toutes les parties du Jura, pour peu qu'on prenne la peine d'en analyser avec soin l'hydrographie. Dès lors, n'est-il pas infiniment probable que cette relation constante entre l'allure des couches et le tracé des cours d'eau est l'indice d'une dépendance directe de l'un vis-à-vis de l'autre, et que l'hypothèse d'une origine antécédente, par exemple, imaginée pour rendre compte de ces anomalies de détail, porte à faux ?

Je vous disais que cette coïncidence, d'ailleurs si naturelle, entre les points bas des surfaces structurales et les lignes d'eau, c'est-à-dire les vallées, se retrouve partout dans notre chaîne..."

14° Barré, Cdt. (in Berthaut 1913)

(p. 241) "... L'ouvrage sur les Formes du terrain s'explique plus catégoriquement sur les causes des cluses et en particulier de celles du Jura. Il admet la formation de lacs, à la surface structurale, dans certaines dépressions synclinales de cette surface, lesquelles originairement n'avaient pas d'issue naturelle, et le déversement de ces lacs par les ensellements des anticlinaux. Cette forme de cluse est notamment attribuée à celles du Jura bernois, que nous donnons plus loin comme des exemples très typiques. Le même ouvrage indique aussi l'action régressive d'un ruz, entamant le flanc extérieur de l'anticlinal qui forme barrage aux eaux du lac, comme ayant pu atteindre le niveau de ce lac et déterminer la cluse, avant que le lac ne soit arrivé à se déverser par-dessus l'ensellement de la crête. Cette explication est celle qui, on se le rappelle, convient le mieux à certaines cluses couvertes dans les anticlinaux de la chaîne saharienne du Sud-Oranais."

15° Heim, A. (1919)

(p. 679) " Von anderer Seite wurde behauptet, es gebe im Jura nicht nur etwa zehn horizontale Transversalverschiebungen, sondern deren hundert kleine, und die Klusen schaffende Erosion habe diesen Querbrüchen nachgetastet; die Querbrüche hätten die Klusen bestimmt. Es gibt im Juragebirge noch viele Querbrüche, die tektonisch bedeutungslos und die auch nicht Transversalverschiebungen sind, auch an Stellen, wo keine Klusen sind. Ein kleiner Querbruch hat keine Bedeutung für die Bestimmung eines Flussweges, und dass die meisten Klusen auf Querverschiebungen fallen, ist völlig unrichtig. Es trifft dies z.B. zu beim Col des Roches unterhalb Le Locle gegen Les Brenets, nicht aber bei den Biraklusen von Moutier abwärts und nicht bei der Mehrzahl der andern."

16° Vouga, Dr. (1868).

(p. 39) " M. le Dr Vouga... s'est demandé si les rivières suivent un lit qu'elles ont formé par érosion ou si celui-ci est le résultat d'une déchirure pré-existante ? Ses recherches au Vausseyon et à l'Areuse sont favorables à la dernière opinion, au moins pour ces 2 rivières. Celle-ci présente plusieurs méandres au contour desquels les dépôts diluviens ont été ménagés par l'eau. Si elle n'eût pas suivi une suite de déchirures déjà faites, elle aurait certainement entraîné ces lambeaux."

17° Cuvier, F. (1879)

"Je crois qu'on a souvent exagéré la puissance érosive des eaux en lui attribuant la formation de vallées ou de cluses que je regarde comme dues, le plus souvent, à la préexistence de failles, de cassures ou d'inégalités dans les roches encaissant aujourd'hui les cours d'eau."

18° Aubert, D. (1969)

(p. 377) "... Les combes karstiques (note: dépressions sèches allongées)... seraient donc des formes de dissolution...; elles auraient bénéficié d'un développement privilégié, dans une direction déterminée par celle des diaclases. Cette explication repose sur une coïncidence extrêmement nette entre leur orientation et celle de ces fissures..."

(P. 379) "... Au contraire, s'il existe des faisceaux de diaclases prédominants bien déterminés, l'érosion, polarisée en quelque sorte dans leur direction, engendre une combe karstique."

19° Penck, A. (in Foerste 1892)

(p. 402) "A. Penck states that many a cluse in the Jura may have been formed by subterranean streams widening their channels until the covering broke down and their subterranean valleys became exposed to the open air."

20° Hettner, A. (1912)

(p. 517, concerne la Combe Grède) "Die Ursache seiner Bildung ist eher darin zu suchen, dass das Wasser, das sonst überall im Boden versinkt, an dieser Stelle zur Talbildung gelangt ist. Vielleicht ist das Tal zuerst unterirdisch in der Form von Höhlengängen, wie deren viele im Innern vorhanden sein mögen, angelegt und nachträglich durch Einsturz der Decke geöffnet worden."

(p. 518, concerne La Rançonnière, au Locle) "Er (der Fluss) hat das tiefe enge Tal offenbar erst in junger Zeit, vielleicht durch die Umwandlung unterirdischer Höhlengänge, geschaffen. Man hat den Eindruck, als ob er sich noch weiter nach hinten einschneiden und im Lauf der Jahrtausende das Polje von Locle anzapfen und dem offenen Abfluss zum Meere gewinnen wolle."

(p. 519, concerne la cluse du Seyon) "Diese Klus (Le Seyon) mag erst nachträglich, vielleicht aus einem unterirdischen Höhlengänge, entstanden sein."

21° Rickenbach, E. (1925)

(p. 73) "Le cirque de Saint Sulpice, par contre, doit son exis-

tence à la présence d'un enfoncement sur le sommet de la voûte surbaissée. Lorsque la calotte du Malm était encore intacte, il y avait peut-être, au milieu de ce synclinal, un grand entonnoir, qui s'est élargi peu à peu. Dès que le cours d'eau souterrain eut atteint l'Argovien ou même seulement la partie supérieure du Séquanien, la première source put se former, encore très haut au-dessus du niveau actuel, sur le flanc de l'anticlinal, à peu près vers le défilé de la Roche. Mais le réseau hydrographique souterrain s'étendit et sollicita l'arrivée d'eaux plus lointaines, en particulier celles des synclinaux des Verrières et de La Brévine, ce qui a multiplié presque à l'infini son effet corrosif et conduit à la formation du Cirque de Saint Sulpice. L'érosion glaciaire qui a accompagné et suivi cette action souterraine a fait le reste.

22° Barsch, D. (1969)

(p. 187) "... Unter dem Einfluss der weitergehenden Faltung begann es sich in die Antiklinalen einzutiefen und ein in Synclinal - und Quartäler differenziertes Talsystem zu schaffen. Dabei werden die Klusen in den höheren Antiklinalen als antezedente, die in den kleineren Gewölben als epigenetische Talstrecken gedeutet."

23° Laubscher, H.P. (1967)

(p. 228) "Für die Entstehung der Birsklusen gibt es eine Reihe rivalisierender Hypothesen; mangels entscheidender Daten müssen sie alle mehr oder weniger spekulativ bleiben. Immerhin scheint eine rein tektonische Anlage (Querbrüche, Axialdepressionen) ausgeschlossen und eine rein antezedente Entstehung (Umkehrung obermiozäner Schwarzwald- und Vogesenflüsse, vgl. Liniger. 1953, 1954) höchst unwahrscheinlich. Das heutige Entwässerungssystem des Juras ist wohl sozusagen "organisch" gewachsen, indem eine Vielfalt sich ständig wandelnder Faktoren mitgewirkt hat..."

Suit une description du plissement du Jura, ainsi que de l'ébauche du système fluvial. Enfin:

"... Dabei werden in den Muldenzügen eine Reihe geschlossener Depressionen entstanden sein, die wohl während der langen pliozänen Vergreisungsperiode miteinander grossenteils durch Karstsysteme verbunden waren. Bei der Lokalisierung dieser Systeme mögen tektonische Zerrüttungszonen, wie sie mutmasslich im Gebiet des Kernaustausches der Raimsekette vorhanden waren, eine grössere Rolle gespielt haben. Ganz allgemein war wohl die chemische Verwitterung an der langsamen pliozänen Vergreisung des Juragebirges massgebend beteiligt. Karstsysteme dürften einen Teil der späteren Flussrinnen vorgezeichnet haben, und zwar nicht nur längs tektonischer Zerrüttungszonen, sondern auch an der längere Zeit fixierten Grenze zwischen Tertiärmergeln und Jurakalken (Dolinenreihen!)"

24° Calcul du débit de la Sorne à son entrée dans la cluse du Picheux.

Aire des affleurements tertiaires du Petit Val: $6,61 \text{ km}^2$

Précipitations moyennes (Bellsay 1901-1940) : 1330 mm/an

Evapotranspiration moyenne (Tertiaire imperméable):

env. $40 \% =$

530 mm/an

Ecoulement superficiel: $800 \text{ mm par an en moyenne}$

Volume d'eau correspondant: $5.288.000 \text{ m}^3/\text{an}$

= $14.500 \text{ m}^3/\text{jour}$

= $600 \text{ m}^3/\text{h.}$

= $10 \text{ m}^3/\text{min.}$

= 166 l/sec

25° Calcul du débit des Blanches Fontaines.

Précipitations moyennes (Bellsay 1901-1940): 1330 mm/an

Surfaces karstiques du bassin de réception : $37,25 \text{ km}^2$

- évapotranspiration moyenne: env. $25 \% = 330 \text{ mm/an}$

- infiltration dans le karst $= 1000 \text{ mm/an}$

Surfaces tertiaires (Bassin de Bellelay): $2,95 \text{ km}^2$

- évapotranspiration et ruissellement: cf. app. chf. 24

Surfaces totale du bassin des Blanches Fontaines: $40,2 \text{ km}^2$

Volume d'eau aux sources

- provenant des zones karstiques: $37.250.000 \text{ m}^3$

- provenant du Bassin de Bellelay: $2.360.000 \text{ m}^3$

Total: $39.610.000 \text{ m}^3$

= $108.500 \text{ m}^3/\text{j.}$

= $4.520 \text{ m}^3/\text{h.}$

= $75 \text{ m}^3/\text{min.}$

= $1,25 \text{ m}^3/\text{sec}$

26° Volume de roche calcaire exporté par les Blanches Fontaines.

Dureté moyenne des eaux (tableau 8. B) : 230 mg/l

Débit moyen des sources : env. $1,2 \text{ m}^3/\text{sec}$

Les sources exportent: 276 g de calcaire par sec.
 16,560 kg " " " min.
 999 kg " " " heure
 23.800 kg " " " jour
 8700.000 kg " " " an

Densité du calcaire: 2,65

Volume de calcaire correspondant: 3.280.000 dm³

Epaisseur de la tranche dissoute (répartition sur la surface totale du bassin, soit 40,2 km²): 0,0816 mm/an

27° Débit de la source de Montoit et volume de calcaire exporté.

Pluviosité moyenne : 1330 mm/an
 Surface totale du bassin : 9,5 km²
 dont 2,37 km² imperméables (800mm)
 et 7,13 km² karstiques (1000mm)

Volume d'eau s'écoulant aux sources

provenant de zones imperméables: 1.896.000 m³
 " " " karstiques : 7.130.000 m³
 9.026.000 m³
 = 24.730 m³/jour
 = 1.030 m³/heure
 = 17 m³/min
 = 280 l/sec

Dureté moyenne des eaux (tableau 8. B) : 215 mg/l

La source exporte: 60,2 g. de calcaire par sec.
 3,61 kg " " " min.
 216,6 kg " " " heure
 5.198 kg " " " jour
 1.897.270 kg " " " an

Densité du calcaire: 2,65

Volume de calcaire correspondant: 715.950 dm³

Epaisseur de la tranche dissoute: 0,0754 mm/an

28° Complément au § 12.2.6.: Coloration sur la chaîne de Chasseral.

Nous avons obtenu confirmation de nos résultats dans un rapport daté du 18.9.75. Il s'avère en effet que, par hasard, les sources de la cluse de Reuchenette se trouvaient à cette époque sous contrôle de l'OEHE, suite à un important essai de coloration*.

Notre colorant a bien été repéré aux deux sources de Châtel (Bienne et Evillard), ainsi qu'à Merlin. Voici d'ailleurs un tableau récapitulatif des quantités de colorant mesurées (en $\mu\text{g/l}$).

<u>Date</u>	Sources: <u>Châtel-Evillard</u>	<u>Châtel-Bienne</u>	<u>Merlin</u>
27.6/20h	-	-	-
28.6/ 7h	-	-	-
29.6/11h	0,09	0,1	-
30.6/12h	12,5	13,5	-
1.7/ 6h30	1,8	2,8	2,0
2.7/10h30	1,6	1,8	1,9
3.7/10h30	1,0	1,1	1,3
4.7/10h	0,69	0,7	0,9
5.7/10h	0,60	0,62	0,8
6.7/	-	-	-
7.7/	-	-	-
8.7/10h	0,25	0,27	-
9.7/10h	0,29	0,16	-
10.7/10h	0,30	0,12	-
11.7/ 9h30	0,27	0,12	-
12.7/10h	0,33	0,13	-
13.7/10h	0,33	0,15	-
14.7/16h	0,21	0,07	-
15.7/10h	0,16	-	-
16.7/ 9h	0,10	-	-
4.8/10h	-	-	-

On peut tirer les conclusions suivantes:

- à Châtel, la vitesse de circulation est de 190 m/h environ pour la première vague; l'arrivée de la pointe du colorant

*Office de l'économie hydraulique et énergétique du Canton de Berne: Essai de coloration Trame - Suze, juin 1974.

n'a pas été mesurée avec précision; pour parvenir à Merlin, les premières traces ont mis à peu près deux jours de plus;

- les concentrations sont très semblables pour les deux Châtel, mais bien moindres à Merlin;
- le colorant a sans doute suivi deux chemins différents pour parvenir à Châtel et à Merlin; notre conclusion (cf p. 157) sur l'alimentation des sources de Châtel reste valable; la liaison avec Merlin est plus difficile à expliquer.

Cette expérience mériterait d'être refaite dans des meilleures conditions d'observation.

29° Epaisseur de la tranche calcaire décapée (anticlinal de Semplain).

- Epaisseur du Malm supérieur dans la région du Pichoux.

Portlandien	15 - 20 m
Marnes à <i>Exogyra virgula</i>	5 - 10 m
Kimméridgien	120 - 130 m
Séquanien sup. calcaire	45 - 50 m
	<u>185 - 210 m</u>
soit en gros	<u>200 à 210 m</u>

- Hauteur actuelle de la falaise (depuis la base du Séquanien calcaire jusqu'au bord des deux lèvres):

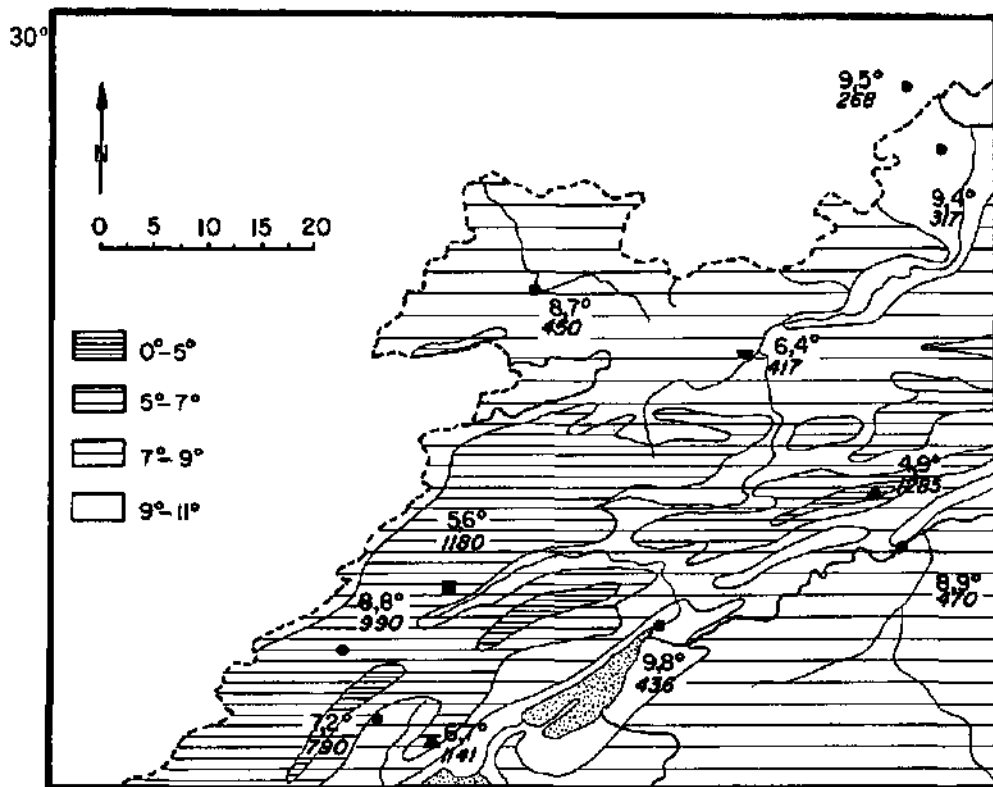
	<u>lèvre W</u>	<u>lèvre E</u>
alt. bord lèvre	905 m	935 m
alt. base Séquan.	<u>755 m</u>	<u>815 m</u>
différence	<u>150 m</u>	<u>120 m</u>

- Tranche manquante

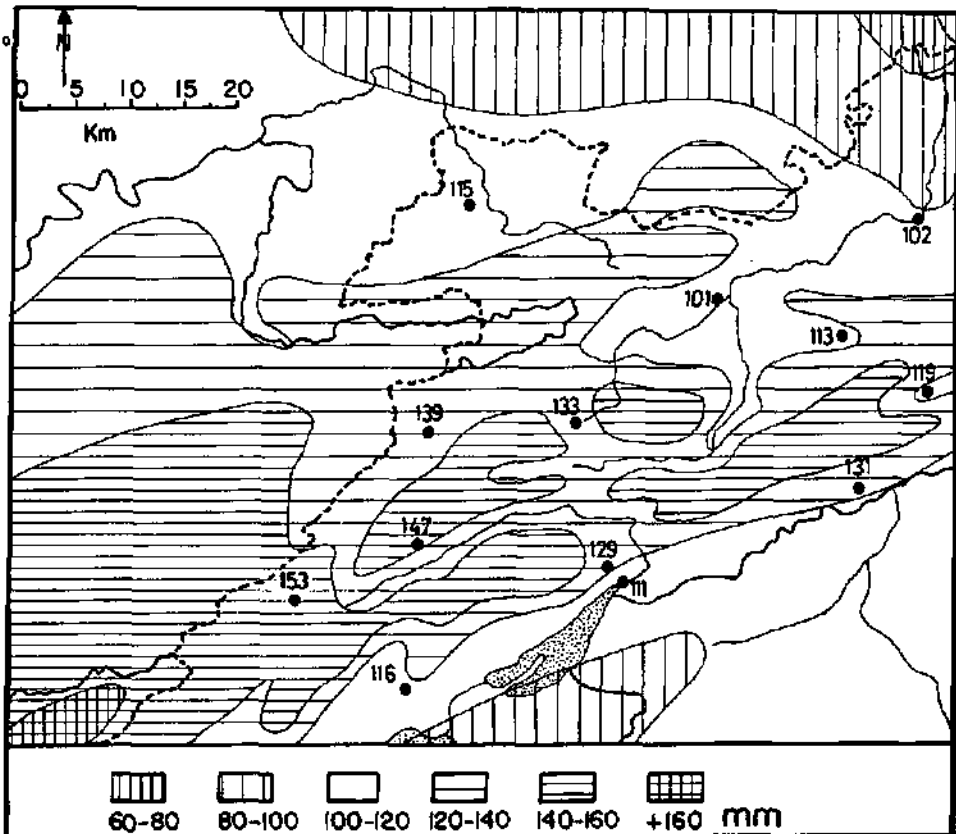
	<u>lèvre W</u>	<u>lèvre E</u>
épais. du Malm	200-210 m	200-210 m
hauteur falaise	<u>150 m</u>	<u>120 m</u>
différence	<u>50 - 60 m</u>	<u>80 - 90 m</u>
moyenne admise:	<u>65 - 75 m</u>	(mi-distance entre les deux lèvres)

30° - 34° Quelques données climatiques du Jura septentrional.

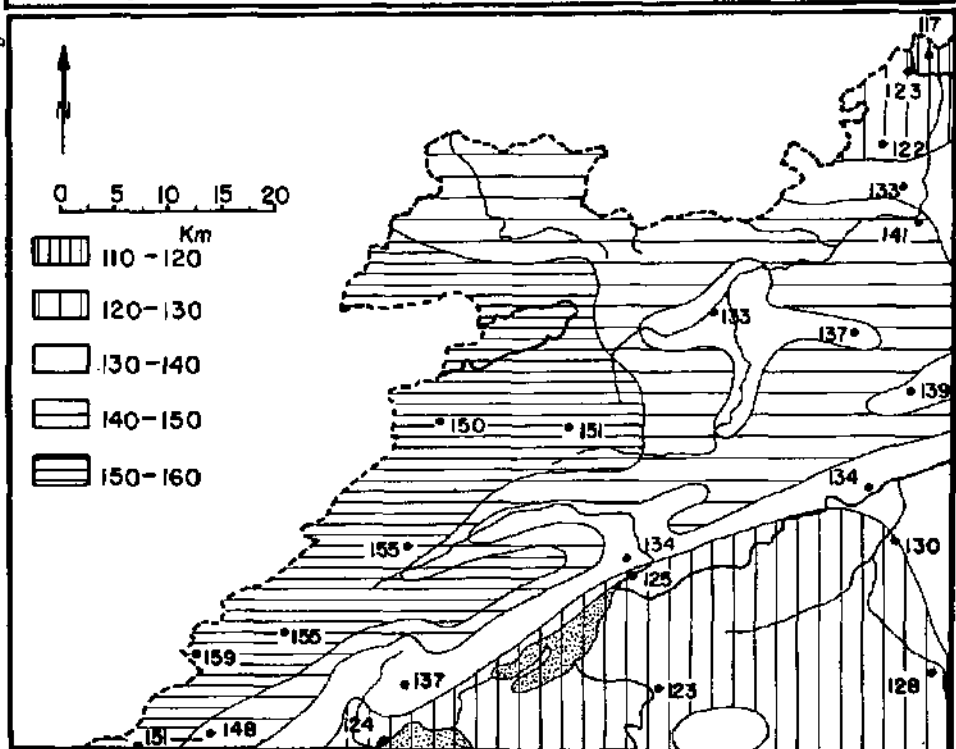
- 30° Températures moyennes annuelles. D'après l'Atlas de la Suisse, feuille 11, S.T.F. Chiffres en italique = altitude en m de la station d'observation.
- 31° Hauteurs annuelles de pluie en cm. Moyennes de la période 1901 - 1940. D'après l'Atlas de la Suisse, feuille 12, S.T.F.
- 32° Nombre moyen de jours de pluie (≥ 1 mm de pluie), période 1901 - 1960. D'après l'Atlas de la Suisse, feuille 12, S.T.F.
- 33° Répartition des précipitations durant l'année, moyennes de la période 1901 - 1960.
- 34° Régime de deux cours d'eau jurassiens, moyennes de la période 1912 - 1973 (Birse) et 1961 - 1973 (Suze).

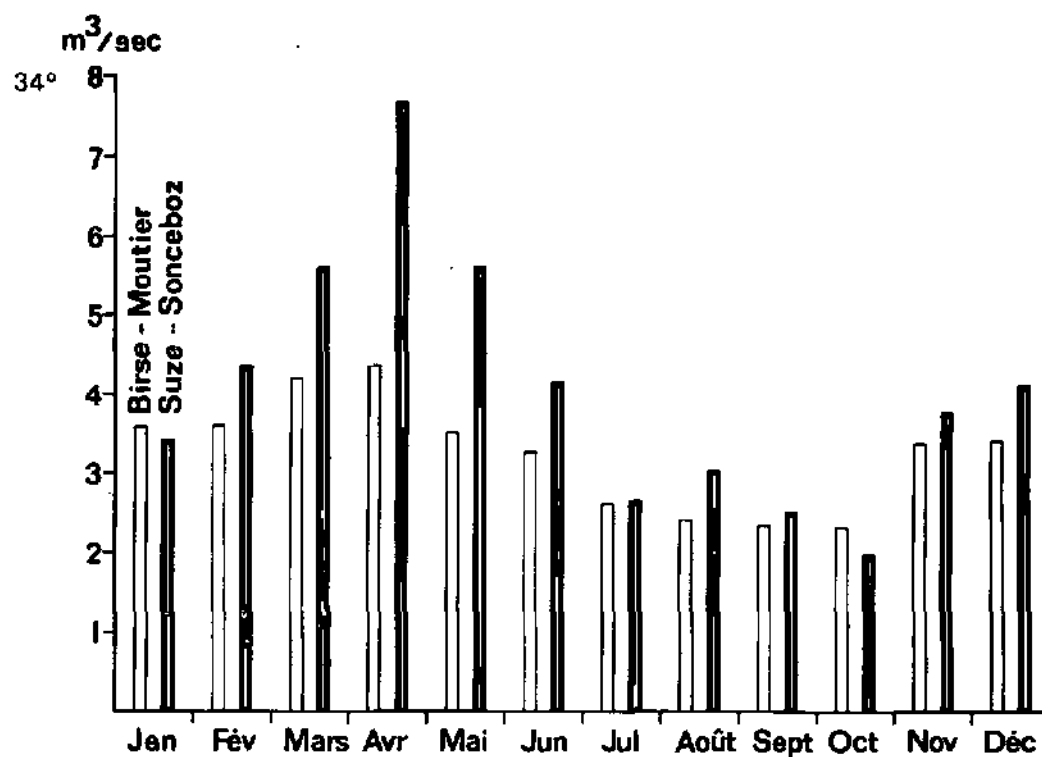
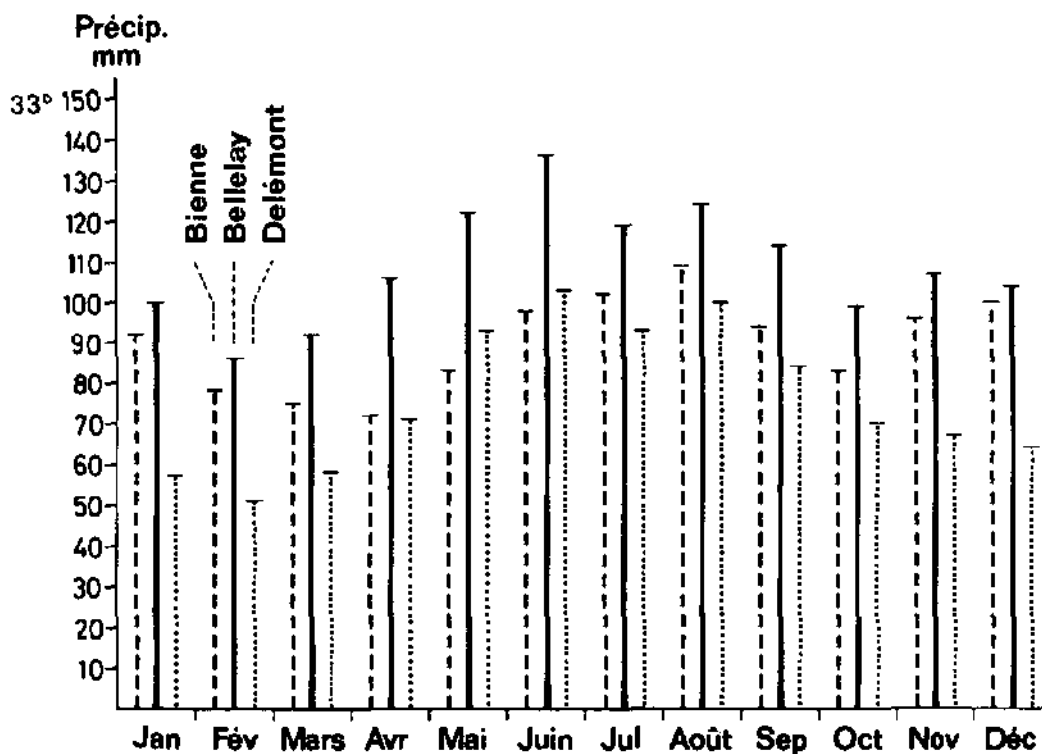


31°



32°





BIBLIOGRAPHIE

Note: abréviations selon liste publiée par la Commission géologique suisse (1974).

AEBERHARDT, B. (1907) : Les gorges de la Suze. Notice stratigraphique, paléontologique et géographique.- Beil. z. Jber. d. Gymnasiums Biel 1906/07.

ANTENEN, M. (1971) : Die Geologie der Regio Bienensis.- Nouv. Ann. biennoises, 52-112.

- (1973) : Geologie der Montozkette zwischen Péry und Court, mit besonderer Berücksichtigung der Molassebildungen in den Mulden von Tavannes und Péry.- Thèse Univ. de Berne, inédite.

ARKELL, W.J. (1956) : Jurassic Geology of the World.- Oliver and Boyd Ltd, Edinburg-London.

Atlas de la Suisse : Service topographique fédéral.

AUBERT, D. (1956) : Hydrographie ancienne et tectonique récente de la gorge de l'Orbe.- Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 66/291, 259-271.

- (1959) : Le décrochement de Pontarlier et l'orogénèse du Jura.- Mém. Soc. vaud. Sci. nat. 76/12, Fasc.4, 93-152.

- (1966) : Structure, activité et évolution d'une doline.- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 89, 113-120.

- (1967) : Estimation de la dissolution superficielle dans le Jura.- Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 69/8, 365-376.

- (1969) : Phénomènes et formes du Karst jurassien.- Eclogae geol. Helv. 62/2, 325-399.

- (1971) : Le Risoux, un charriage jurassique de grandes dimensions.- Eclogae geol. Helv. 64/1, 151-156.

- (1972) : Le lapié fossile des Verrières (Doubs).- Ann. sci. Univ. Besançon, 3e sér. Géol. 17, 85-88.

- (1975) : L'évolution du relief jurassien.- Eclogae geol. Helv. 68/1, 1-64.

AUBERT, D., PETCH, M. et JEMELIN, L. (1970) : Expérience de coloration à la Dôle (Jura vaudois).- Bull. Soc. vaud. Sci. nat. 70/333, 375-382.

AUBERT, D. & GUIGNARD, J.P. (1972) : Découverte du Jura calcaire.- Mém. Soc. vaud. Sci. nat. 92/15 fasc. 2, 91-113.

AUDETAT, M. (1962) : Essai de classification des Cavernes de Suisse.- Stalactite, V/7, 251-300.

BARSCHE, D. (1967) : Luftbild von Choindenz im Berner Jura. Versuch einer geomorphologischen Interpretation.- Regio basil. VIII/1, 5-10.

- (1968 a) : Periglaziale Seen in den Karstwannen des Schweizer Jura.- Regio basil. 9, 115-134.
 - (1968 b) : Die pleistozänen Terrassen der Birs zwischen Basel und Delsberg.- Regio basil. IX/2, 363-383.
 - (1968 c) : Die geomorphologische Karte 1:250.000 der Basler Region.- Regio basil. IX/2, 384-403.
 - (1969) : Studien zur Geomorphogenese des zentralen berner Juras.- Basler Beitr. Geogr. 9.
 - (1974) : La carte "Jura".- Atlas de la Suisse 9, Géomorphologie II: Exemples régionaux.- Serv. topogr. féd., Wabern/Bern
- BAULIG, H. (1956) : Vocabulaire franco-anglo-allemand de Géomorphologie.- Les Belles Lettres, Paris-VI^e.
- BERTHAUT, Gén. (1913) : Topologie. Etude de terrain.- Serv. géogr. Armée, Paris.
- BIRKHAUSER, M. (1925) : Geologie des Kettenjura der Umgebung von Undervelier (Berner Jura).- Verh. natf. Ges. Basel 36, 234-297.
- BOEGLI, A. (1971): Karstdenudation - das Ausmass des korrosiven Kalkabtrages.- Regio basil. 12/2, 352-361.
- BOLLIGER, W. & BURRI, P. (1970) : Sedimentologie von Schelf-Carbonaten und Beckenablagerungen im Oxfordien des zentralen Schweizer Jura.- Beitr. geol. Karte Schweiz, (n.s.) 140.
- BRUCKNER, Ed. (1898) : Die feste Erdrinde und ihre Formen.- Allg. Erdkd.
- BUGMANN, E. (1969) : Ein aktuomorphologischer Gesichtspunkt zum Klusenproblem.- Geogr. Helv. 24/2, p.88.
- BURGER, A. (1959) : Hydrogéologie du Bassin de l'Areuse.- Bull. Soc. neuchât. Géogr. 52/1.
- BUXTORF, A. (1916) : Prognosen und Befunde beim Hauensteinbasis - und Grenchenbergtunnel und die Bedeutung der letztern für die Geologie des Juragebirges.- Verh. natf. Ges. Basel 27, 184-254.
- BUXTORF, A. & TROESCH, A. (1917): Geologie des Grenchenbergtunnels, mit Berücksichtigung der hydrographischen und thermischen Verhältnisse und der Tunnelbeben.- Separatdruck aus dem Schlussbericht, Berner-Alpenbahn - Ges. Bern - Lötschberg - Simplon.
- BUXTORF, A. & KOCH, R. (1920) : Zur Frage des Pliocaenbildungen im nordschweizerisch. Juragebirge.- Verh. natf. Ges. Basel. 31, 113-132.
- CHAUVE, P. (1971) : Rôle des failles dans les circulations souterraines du Jura, exemples et applications.- Ann. sci. Univ. Besançon, 3^e sér. Géologie, 65-69.
- CHAUVE, P., METTETAL, J.P., PASQUIER, C. & ERNIN, C. (1973) : Coloration de la perte de Velesmes-Bessarts (Doubs).- Ann. sci. Univ. Besançon, 3e sér. Géol. 20, 33-36.

- CONTINI, D. & THEOBALD, N. (1974) : Relations entre le Fossé rhénan et le Fossé de la Saône. Tectonique des régions sous-vosgiennes et préjurassiennes. In: Illies, J.H. & Fuchs, K. (Ed.): Approaches to Taphrogenesis (p. 310-321).- Schweizerbart, Stuttgart.
- CORBET, J. (1959) : Erosion en terrain calcaire.- Ann. Géogr. 68, 97 - 120.
- CUVIER, F. (1879) : Erosion des roches par les cours d'eau.- Bull. Soc. géol. France, III^e sér., VIII, 163-171.
- DANSGAARD, W., JOHSEN, S.J., CLAUSEN, H.B. & LANGWAY, C.C., jr. (1971) : Climatic record revealed by the Camp Century ice core.- In: The Late Cenozoic Ages, 37-56.- Karl R. Turekian, Editor, Yale University.
- DELLA VALLE, G. (1969) : Essai de coloration à Glovelier.- Chimiste cantonal Berne, rapport inéd.
- (1973) : Essai de marquage Les Breuleux - Les Bois - La Ferrière.- Office écon. hydraulique et énergétique du Canton de Berne, rapport inéd.
- DENNIS, J.G. (1972) : Structural Geology.- The Ronald Press Company - New York.
- DERRUAU, M. (1956) : Précis de Géomorphologie.- Masson et Cie, Paris.
- DROGUE, C. (1971) : Réflexions sur les possibilités offertes par les traceurs, pour la mesure de la vitesse d'écoulement dans les roches calcaires fissurées.- BRGM, section III, 4, 22-31.
- DUPLESSIS - KERGMARD, D. & MARTIN, J. (1968): Observations sur le réseau supérieur de la Seille (Reculées de Ladoye - sur - Seille et Baume - les - Messieurs Jura).- Bull. Féd. Soc. Hist. nat. Franche - Comté LXX/1, 1-3.
- ELBER, R. (1920) : Geologie der Raimeux- und der Velleratkette im Gebiete der Durchbruchtäler von Birs und Gabiare (Berner Jura).- Inaug. Diss. Univ. Basel. E. Birkhäuser & Cie, Basel.
- EPFLE, P. (1947) : Geologische Beschreibung der Umgebung von Sonceboz im Berner Jura.- Inaug. - Dissert. Univ. Bern.
- ERZINGER, E. (1943) : Die Oberflächenformen der Ajoie.- Inaug. Dissert. Univ. Basel.
- EVANS, P. (1974) : Late Pleistocene chronology and the glacial - interglacial cycle.- Geological Mag. 111/5, 421-430.
- FAIRBRIDGE, Rh.W. (1968) : The Encyclopedia of Geomorphology.- Rh. W. Fairbridge, New York.
- FISCHER, H. (1969 a) : Geologischer Überblick über den südlichen Oberrheingraben und seine weitere Umgebung.- Regio bas. X/1, 57-84.
- (1969 b) : Einige Bemerkungen zur "Übersichtstabelle zur Geologie der weiteren Umgebung von Basel".- Regio bas. X/2, 234-238.

- FOERSTE, A.F. (1892) : The drainage of the Bernese Jura.- Proc. Boston Soc. nat. Hist., XXV, 392-420.
- FORKERT, E. (1933) : Geologische Beschreibung des Kartengebietes Tramelan im Berner Jura.- Eclogae geol. Helv. 26, 2-41.
- FOURNIER, E. (1900) : Les réseaux hydrographiques du Doubs et de la Loue dans leurs rapports avec la structure géologique.- Ann. Géogr. IX/45, 219-228.
- FRENZEL, B. (1967) : Die Klimaschwankungen des Eiszeitalters.- Visweg & Sohn, Braunschweig.
- GIGON, R. & AELLEN, W. (1960) : Contribution à la spéléologie du bassin suisse du Doubs.- Stalactites IV/4, 79-123.
- GLAUSER, A. (1936) : Geologische Beschreibung des Kartengebietes von Blatt Montfaucon im Berner Jura.- Verh. natf. Ges. Basel 47, 67-124.
- HAFELI, C. (1966) : Die Jura-Kreide-Grenzsichten im Bielerseegebiet (Kt. Bern).- Eclogae geol. Helv. 59/2, 565-695.
- HAUBER, L. (1971) : Die wichtigste geologische Literatur über die Basler Region 1960-1970.- Regio basil. XII/2, 395-399.
- HECKENDORN, W. (1974) : Zur Tektonik der Vellerat - Antiklinale.- Beitr. geol. Karte Schweiz, NF 147.
- HEIM, A. (1919) : Geologie der Schweiz.- Leipzig.
- HETTNER, A. (1912) : Aus dem Schweizer Jura. Eine morphologische Skizze.- Geogr. Z. XVII, 515-521.
- HOTTINGER, L. (1967) : Die Erdgeschichte in der Umgebung von Basel.- Veröff. nathist. Mus. Basel 6.
- JACOT-GUILLARMOUD, C. (1909) : Carte des bassins fermés du Jura.- Serv. topogr. fédéral.
- JENNY, Fr. (1897) : Das Birsthal (Ein Beitrag zur Kenntnis der Thalbildung im Faltengebirge).- Wiss. Beil. zum Ber. der Realschule Basel.
- JEANRICHARD, F. (1972) : Contribution à l'étude du mouvement vertical des Alpes.- Boll. Geodesia XXXI.
- JORAY, M. (1942) : L'étang de la Gruyère (Jura bernois). Etude pollen-analytique et stratigraphique de la tourbière.- Beitr. geobot. Landesaufn. Schweiz 25.
- KELLERHALS, P. (1972) : L'éboulement du Pichoux, près d'Undervelier.- Inspectorat des forêts du Jura. Commune d'Undervelier. Inédit.
- KIRALY, L. (1968) : Eléments structuraux et alignement de phénomènes karstiques. (Région du gouffre du Petit Pré de St Livres, Jura vaudois).- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 91, 129-146.
- (1969) : Bref commentaire à la carte structurale de la surface Argovien - Séquanien dans le canton de Neuchâtel.- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 92, 71 - 73.

- (1969) : Statistical Analysis of Fractures (Orientation and Density).- Geol. Rdsch. 59/1, 125-151.
 - (1973) : Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel.- Suppl. Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 96.
- KIRALY, L. & SIMEONI, G.P. (1971) : Structure géologique et orientation des cavités karstiques: la grotte de "Chez le Brandt" (Jura neuchâtelois).- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 94, 91-97.
- KIRALY, L., MATHEY, B. & TRIPET J.P. (1971) : Fissuration et orientation des cavités souterraines. Région de la grotte de Milandre (Jura tabulaire).- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 94, 99-114.
- KRAHENBUHL, Ch. (1973) : Propos autour de la création d'un site protégé dans la Combe Tabeillon.- Actes Soc. jurass. Emul., 223-267.
- LAPPARENT, A. de (1898) : Leçons de Géographie physique.- Masson et Cie, Paris.
- LAUBSCHER, H.P. (1948) : Geologie des Gebietes von Siegfriedblatt St Ursanne.- Beitr. geol. Karte Schweiz NF 92.
- (1961) : Die Fernschubhypothese der Jurafaltung.- Eclogae geol. Helv. 54/1, 221-282.
 - (1962) : Die Zweiphasenhypothese der Jurafaltung.- Eclogae geol. Helv. 55/1, 1-22.
 - (1965) : Ein kinematisches Modell der Jurafaltung.- Eclogae geol. Helv. 58/1, 231-318.
 - (1967) : Exkursion Nr. 14 Basel-Delémont-Moutier-Biel.- Geol. Führer Schweiz 4. Wepf & Co, Basel.
 - (1970) : Grundsätzliches zur Tektonik des Rheingrabens. In: Illies, J.H. & Mueller, St. (Ed) : Graben Problems (p.79-87).- Schweizerbart, Stuttgart.
- LIEVRE, L. (1955) : Etudes, recherches et travaux dans différents domaines des sciences naturelles en Ajoie, dans le Jura et les régions avoisinantes.- Recl. Etudes et Trav. sci., Soc. jurass. Emul., 113-157.
- LINIGER, H. (1925) : Die Tertiärbildungen des Delsberger Beckens und seiner nördlichen Umgebung.- Inaug. Dissert. + Beitr. geol. Karte Schweiz, NF 55/4.
- (1953) : Zur Geschichte und Geomorphologie des nordschweizerischen Jura gebirges.- Geographica helv. 8/4, 289-303.
 - (1963) : Zur Revision des Pontien im Berner Jura.- Eclogae geol. Helv. 56/1, 165-174.
 - (1964) : Sundgauschotter in der nördlichen Ajoie.- Regio basil. V/1, 73-77.
 - (1964) : Beziehung zwischen Pliozän und Jurafaltung in der Ajoie.- Eclogae geol. Helv. 57/1, 75-90.
 - (1966) : Das Plio-altpleistozäne Flussnetz der Nordschweiz.- Regio basil. VII/2, 158-177.

- (1970) : Bemerkungen zur Tektonik am Süden des Rheingrabens.
In Illies, J.H. & Mueller, St. (Ed): Graben Problems (p. 103-106).-
Schweizerbart, Stuttgart.
- LINIGER, H. & ROTHPLETZ, W. (1964) : Ein neuer Aufschluss in den
Vogesenottern westlich Delsberg.- Regio basel. V/1, 78-83.
- LELOYD, A. (1959) : Geology of the region between Le Locle and Les
Ponts de Martel. Rapport inédit, Univ. Neuchâtel.
- (1963) : Cover Folding in the Sonmartel Chain (Jura neuchâtelais).-
Geol. Rdsch. 53, 551-580.
- LUGEON, M. (1901) : Origine des vallées des Alpes occidentales.-
Ann. de Géogr. X, 295-317 et 401-428.
- LUTHI, E. (1954) : Geologische Untersuchungen im Gebiete zwischen
Tessenberg und St Immortal.- Promotionsarbeit eidg. tech. Hochschule.
Zürich 2312.
- MACHACEK, F. (1905) : Der Schweizer Jura. Versuch einer geomorpho-
logischen Monographie.- Peterm. geogr. Mitt., Ergänz. 150.
- MARGERIE, Em. de (1909) : La structure du Jura.- Actes Soc. helv.
Sci. nat. 92/I, 40-68.
- (1922) : Le Jura. Mémoire pour servir à l'explication de la
carte géologique détaillée de la France. Paris.
- MATHEY, B. (1970) : La méthode au charbon actif dans les essais de
coloration à la fluorescéine.- Actes 4^e Congrès suisse Spéléol.
Neuchâtel, 53-61.
- (1971) : Essai de coloration des pertes du ruisseau de Vaux à
Lignières (NE).- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 94, 119-126.
- MATHEY, B. & SIMEONI, G.P. (1971) : Fluctuation du niveau piézomé-
trique dans les réservoirs calcaires du Jura neuchâtelais.- Bull.
Soc. neuchât. Sci. nat. 94, 115-118.
- (1972) : Etude de la vitesse de circulation de l'eau dans un a-
quifère calcaire par essais de traçage (bassin de la Serrière/NE).-
Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 95, 173-180.
- MEIA, J. (1969) : Géologie du Mont Aubert et de l'anticlinal Soliat-
Montagne de Boudry au nord du Lac de Neuchâtel.- Bull. Soc. neu-
chât. Géogr. LIII/3, 1-69.
- (1969) : Relations entre les anticlinaux Chasseron - Dénériaz et
Soliat - Creux du Van (Jura vaudois oriental et Jura neuchâte-
lois méridional).- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 92, 65-69.
- METZ, B. (1967) : Beiträge zur geomorphologische Entwicklung dreier
Becken im Neuenburger Jura.- Frankfurter geogr. H. 43.
- MISEREZ, J.J. (1973) : Géochimie des eaux du karst jurassien.- Thèse
Université de Neuchâtel.

- MONBARON, M. (1973 a) : Incidences morphologiques d'une trombe d'eau dans le Val de Travers (NE/Suisse).- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 96, 109-121.
- (1973 b) : Essai de coloration du Gouffre de Lajoux (Creux Koby).- Inst. Géol. Univ. Neuchâtel, rapport inéd.
 - (1974) : Aspects de la géologie jurassienne.- Cahier de Pro Jura 3.
 - (1974) : Double coloration dans la région de Lajoux - Fernet Des-sous.- Office écon. hydraulique et énergétique du Canton de Berne, rapport inéd.
 - (1975) : Coloration dans le gouffre de Lajoux (Jura suisse).- Actes 5e Congr. national de Spéléologie Interlaken, 130 - 137.
- MORNOD, L. (1959 a) : Rapport sur l'essai de coloration de la perte totale de la Rouge Eau, le 2 mars 1959. Remarques concernant l'essai de coloration de la Sorne, en amont de Châtelat, le 11.12.1958.- Commune de Moutier, inéd.
- (1959 b) : Rapport sur un essai de coloration de la perte des eaux usées du village de Champoz et de son influence sur la source de La Foule alimentant Moutier.- Commune de Moutier, rapport inéd.
 - (1960) : Rapport sur des recherches hydrogéologiques, en particulier: sources de La Foule et du Tunnel Moutier - Granges.- Commune de Moutier, rapport inédit.
 - (1965) : Grande source de La Foule.- Rapport hydrogéologique sur son bassin d'alimentation et sur sa protection.- Commune de Moutier, rapport inéd.
- MORNOD, L., BERTRAND, J. & BARRAUD, J.P. (1970) : Construction du premier puits profond à grand diamètre dans le karst jurassien suisse, à Moutier.- Gaz-Eaux-Eaux usées 10, 5-11.
- NABHOLZ, W.K. (1956) : Untersuchungen über Faltung und Klüftung im nordschweizerischer Jura.- Eclogae geol. Helv. 49/2, 373-406.
- NUFFER, R. (1973) : Hydrologie souterraine du bassin de la Haute Loue.- Ann. sci. Univ. Besançon., 3^e sér. Géol. 20, 73-81.
- PAVONI, N. (1961) : Faltung durch Horizontalverschiebung.- Eclogae geol. Helv. 54/2, 515-534.
- PERONNE, A. (1955) : Observations aérotectioniques en contradiction avec les théories actuelles sur la formation du Jura.- Recl. Etudes et Trav. sci., Soc. jurass. Emul., 23-45.
- PERSOZ, F. (1973) : Note sur la distribution des dolomites du Jura méridional neuchâtelois.- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 96, 149-162.
- PERSOZ, F. et KUBLER, B. (1968) : Etude pétrographique des roches carbonatées: la limite Jurassique - Crétacé dans quelques sondages et affleurements du Jura neuchâtelois.- Eclogae geol. Helv. 61/2: 504-507.
- PERSOZ, F. & REMANE, J. (1973) : Evolution des milieux de dépôt au Dogger supérieur et au Malm dans le Jura neuchâtelois méridional.- Eclogae geol. Helv., 66/1, 41-70.

- POCHON, M. (1973) : Apport allochtone dans les sols jurassiens (Jura vaudois et neuchâtois). - Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 96, 135-147.
- (1974) : Origine, évolution de sols et phénomènes d'altération en pays calcaire tempéré humide. Haut-Jura suisse. - Thèse Université de Neuchâtel (à paraître).
- PUMPIN, V.F. (1965) : Riffsedimentologische Untersuchungen im Rauracien von St Ursanne und Umgebung (Zentraler Schweizer Jura). - Eclogae geol. Helv. 58/2, 799-876.
- OEHE & COMMUNES DE PLAGNE, ROMONT ET VAUFFELIN (1973) : Etude hydrogéologique. Ière et II^e étape. - Rapport inédit, Colombi - Dorthe - Schmutz.
- PETER, A. (1942) : Travaux exécutés dans les Gorges de Court à la suite du glissement de terrain de 1937. - Strasse und Verkehr 10, 131-138.
- RICHTER - BERNBURG, G. (1974) : The Oberrhein Graben in its European and Global Setting. In : Illies, J.H. & Fuchs, K. (Ed.) : Approches to Taphrogenesis (p 13-43). - Schweizerbart, Stuttgart.
- RICKENBACH, E. (1925) : Description géologique du Val de Travers entre Fleurier et Travers, du cirque de St Sulpice et de la vallée de La Brévine. - Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 50, 1-76.
- ROLLIBR, L. (1893) : Structure et histoire géologique de la partie du Jura central comprise entre le Doubs (Chaux de Fonds), le val de Delémont, le Lac de Neuchâtel et le Weissenstein. - Matér. Carte géol. Suisse, n.s. 8.
- (1898) : Deuxième supplément à la description géologique de la partie jurassique de la feuille VII. - Mat. Carte géol. Suisse, n.s. 8.
- (1907) : Bibliographie géologique de la Suisse pour les années 1770 à 1900. - Mat. Carte géol. Suisse, XXIX.
- (1910) : Troisième supplément à la description géologique du Jura central. - Mat. Carte géol. Suisse, n.s. 15.
- ROTHPLETZ, W. (1933) : Geologische Beschreibung der Umgebung von Tavannes im Berner Jura. - Verh. natf. Ges. Basel 43, 12-150.
- RUHLAND, M. (1974) : Le rôle des décrochements dans le socle vosgien et en bordure du Fossé rhénan. In : Illies, J. H. & Fuchs, K. (Ed): Approches to Taphrogenesis (p. 13-43). - Schweizerbart, Stuttgart.
- RUTSCH, R., SCHWAB, W. & THALMANN, H. (1969) : Zur Karsthydrogeologie im südlichen Berner Jura. - Eclogae geol. Helv. 62/1, 285-302.
- SCHAEER, J.P. & JEANRICHARD, F. (1974) : Mouvements verticaux anciens et actuels dans les Alpes suisses. - Eclogae geol. Helv. 67/1, 101-119.
- SCHAEER, U. (1966) : Gliederung und Fazies der Twannbach - Formation ("Portlandien") im Bielerseegebiet. Eclogae geol. Helv. 59/2, 925-931.

- SCHINDLER, B. (1973) : Gravière des Roches, essai de coloration.- Bureau Schindler Prêles, rapport inédit.
- SCHLAICH, E. (1934) : Geologische Beschreibung der Gegend von Court im Berner Jura, mit besonderer Berücksichtigung der Molassebildungen.- Beitr. geol. Karte Schweiz N.F. 26/1.
- SCHLEE, P. (1913) : Zur Morphologie des Berner Jura.- Mitt. Geogr. Ges. Hamburg, XXVII, 79-118.
- SCHMALZ, K.L. (1973) : Naturschutztätigkeit im Kanton Bern - 1972.- Mitt. Naturforschenden Gesell. Bern NF 30.
- SCHURER, W. (1928) : Geologische Aufnahmen des Jura - und Molassegebietes zwischen Dotzigen und Tavannes.- Inaug.- Dissert. Univ. Zürich.
- SCHWABE, E. (1939) : Morphologie der Freiberge.- Inaug. Diss. Univ. Basel. Druck und Verlag Zbinden & Hügin, Basel.
- SCHWEIZER, H.U. (1968) : Beiträge zur Hydrologie der Ajoie (Berner Jura).- Inaug. Dissert. Univ. Bern.
- STAUBLE, A.J. (1959) : Zur Stratigraphie des Callovian im zentralen Schweizer Jura.- Eclogae geol. Helv. 52/1, 57-176.
- S.E.F. (1972) : Syndicat pour l'alimentation des Franches-Montagnes en eau potable. Plaquette.
- THALMANN, H.K. (1966) : Zur Stratigraphie des oberen Malm im südlichen Berner und Solothurner Jura.- Inaug. Diss. Univ. Bern. Vogt-Schild AG, Solothurn.
- THURMANN, J. (1836) : Essai sur les soulèvements jurassiques. Second cahier.- Impr. typographique de Vr. Michel et Cie, Porrentruy.
- TRIPET, J.P. (1972) : Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois).- Thèse Univ. Neuchâtel.
- VERNEAUX, J. (1973) : Cours d'eau de Franche-Comté (massif du Jura). Recherches écologiques sur le réseau Hydrographique du Doubs.- Thèse Univ. Besançon. Service de reproduction.
- VIRIEUX, A. (1950) : Contribution à l'étude de la genèse des cluses.- Actes Soc. jurass. Emul., 1-15.
- VONDERSCHMITT, L. (1942) : Die Geologischen Ergebnisse der Bohrungen von Bitzbach bei Altkirch (Ober-Elsass).- Eclogae geol. Helv. 35/1, 67-99.
- VOSSLER, P. (1938, 1947) : Einführung in die Geologie von Basel mit 12 Exkursionen. Helbling & Lichtenhan, Basel.
- VOUGA, Dr. (1868) : C.R. Séance du 9 janvier 1868.- Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. VIII, 39-40.
- WERNER, J. (1958) : Zur Kenntnis der braunen Karbonatböden (Terra fusca) auf der Schwäbischen Alb.- Arb. geol.-paleont. Inst. tech. Hochsch. Stuttgart 16.

- WINNOCK, E. (1961) : Résultats géologiques du sondage Risoux I.-
Bull. Ver. schweiz. Petroleum - Geol. u.- Ing. 28/74, 17-26.
- WITTWEN, R., WASER, H. & MATHEY, B. (1970) : Essai de fixation de
la sulforhodamine B et de la sulforhodamine G extra sur charbon
actif.- Actes 4^e Congrès suisse Spéléol. Neuchâtel, 78-83.
- ZIEGLER, P.A. (1956) : Geologische Beschreibung des Blattes Cour-
telary. Zur Stratigraphie des Sequanien im zentralen Schweizer
Jura.- Beitr. geol. Karte Schweiz, NF 102.

Planche I

Carte topographique des cluses de la Somme (Pichoux et Underveller). Plan d'ensemble au 1:10 000, réduit 2 x. Reproduit avec l'autorisation de la Direction fédérale des mensurations du 15.6.76.

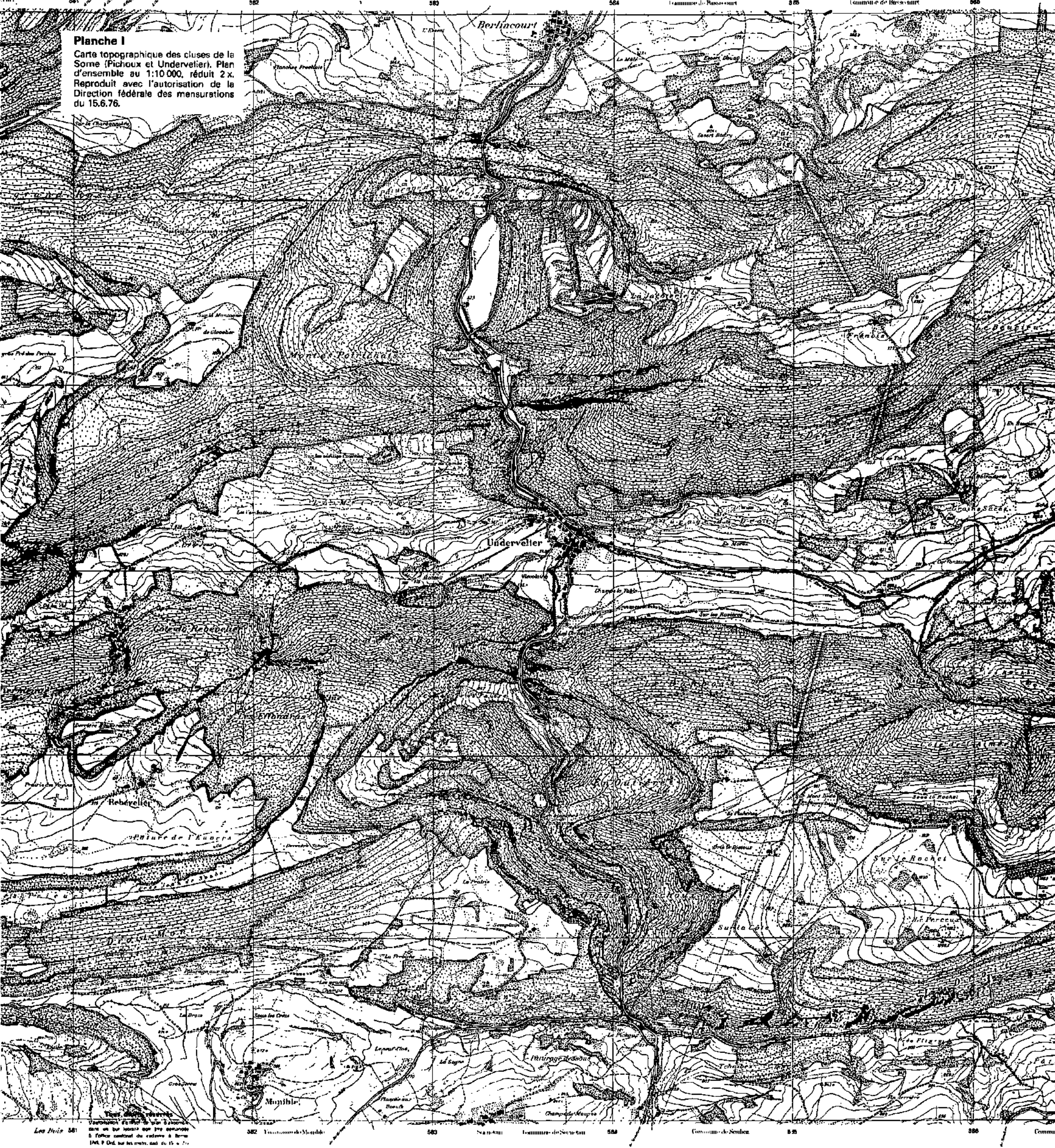
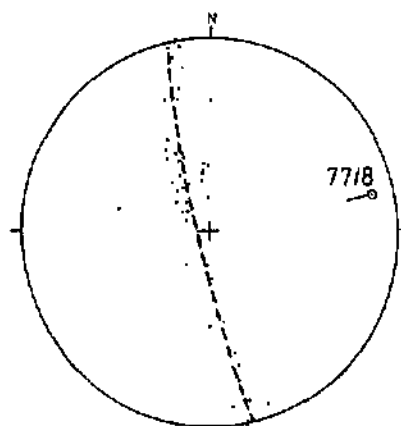
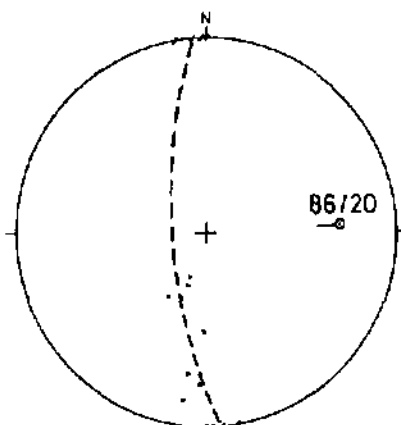


Planche III

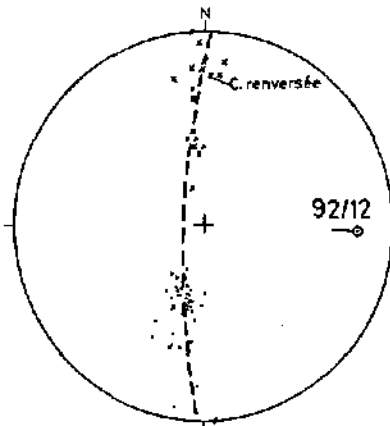
Divers axes structuraux de la chaîne de Raimeux dans la région du Pichoux.
Reproduit avec l'autorisation du Service topographique fédéral du 2.6.76.



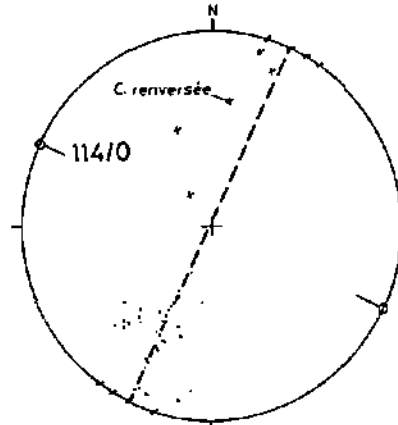
Raimeux - Rebévelier



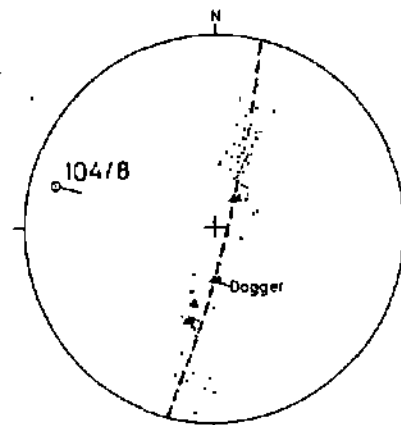
Côte de Corbon



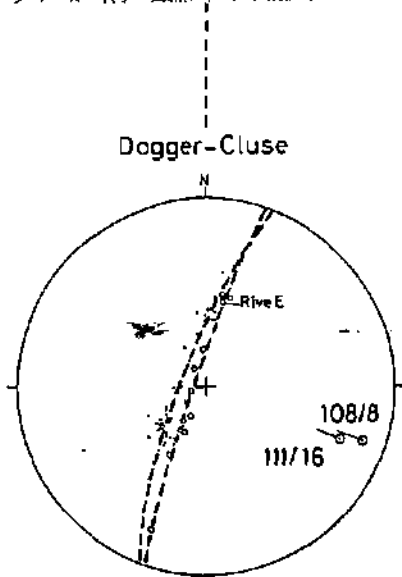
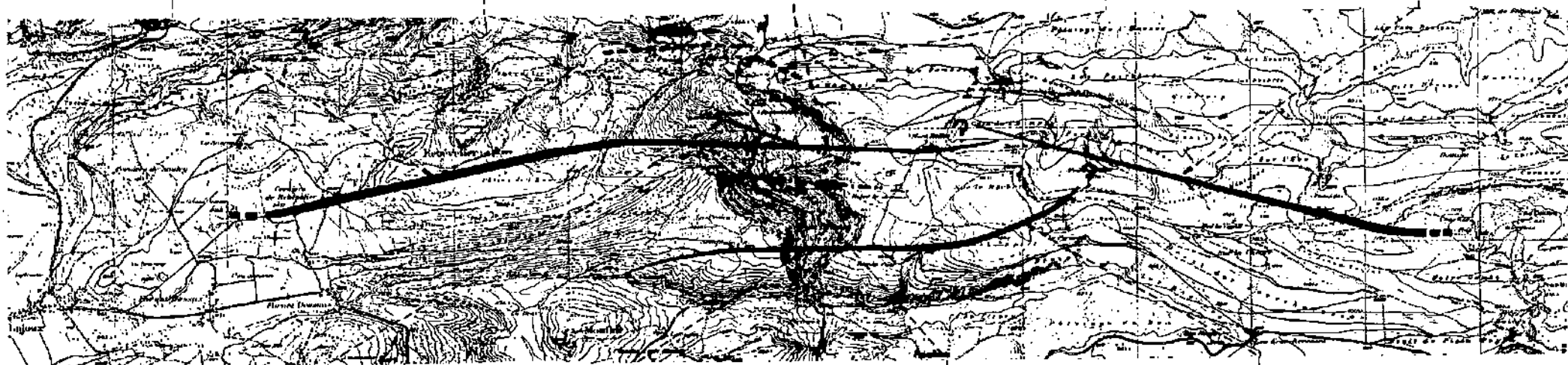
Raimeux - Cluse



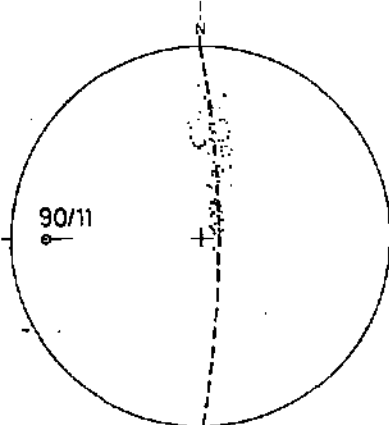
Corbés - Bambois



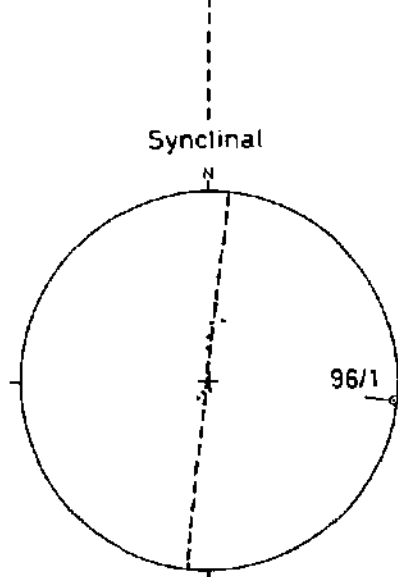
Raimeux - Pré Derrière



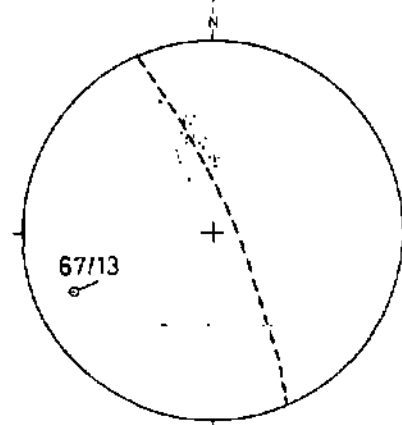
Dogger - Cluse



Semplain - Cluse



Synclinal

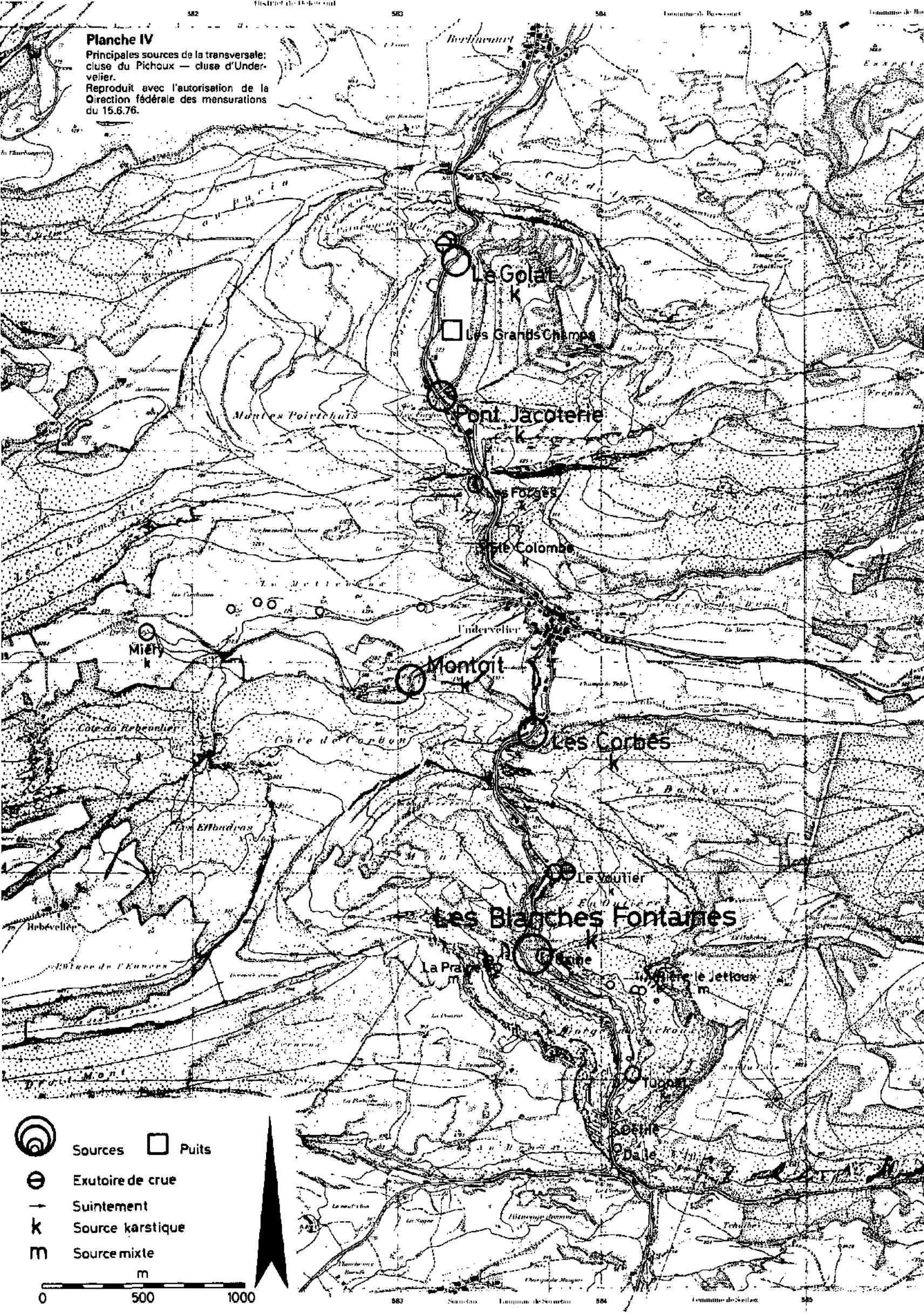


Semplain - Est



Planche IV

Principales sources de la transversale:
cluse du Pichoux — cluse d'Under-
velier.
Reproduit avec l'autorisation de la
Direction fédérale des mensurations
du 15.6.76.



- Sources
- Exutoire de crue
- Suintement
- Source karstique
- Source mixte

0 500 1000 m

Planche V

— Bassin-versant des sources karstiques de Blanchès Fontaines (BF) et de Montroît (Mo) (état actuel des connaissances). Les secteurs de synclinaux tertiaires imperméables, désignés par S (= Sorne dans le Petit Val) et Mi (= Miéry), n'appartiennent pas aux bassins karstiques de ces deux sources.

— Principaux essais de coloration réalisés dans la région.
Reproduit avec l'autorisation du Service topographique fédéral du 2.6.76.



Carte des principales cluses caractéristiques du Jura septentrional (cf. tableau 10.A.).

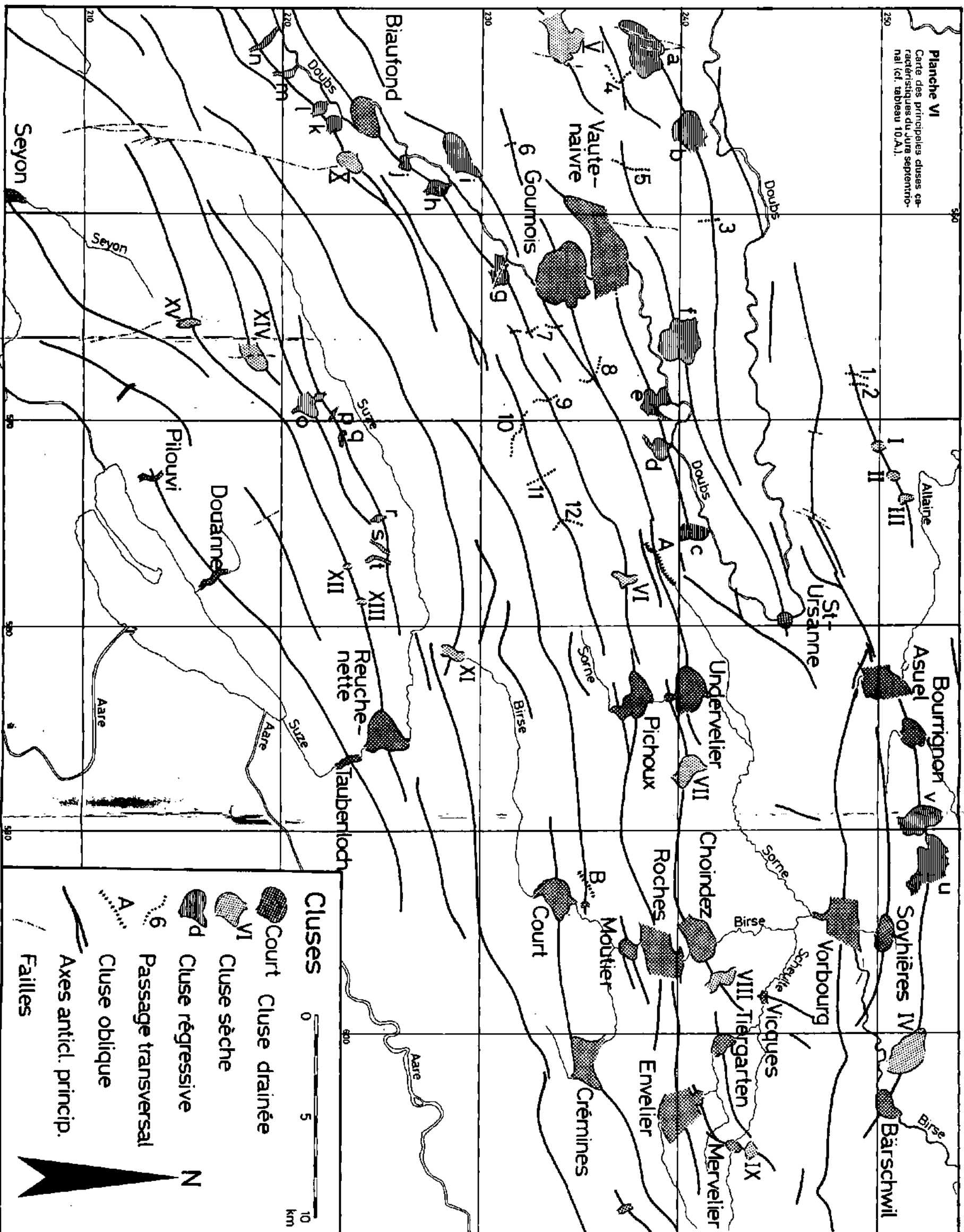


Planche VII

Principaux essais de coloration effectués dans le karst du Jura septentrional (cf. tableau 12.A.); situation des principales zones de drainage transversales (I-V).

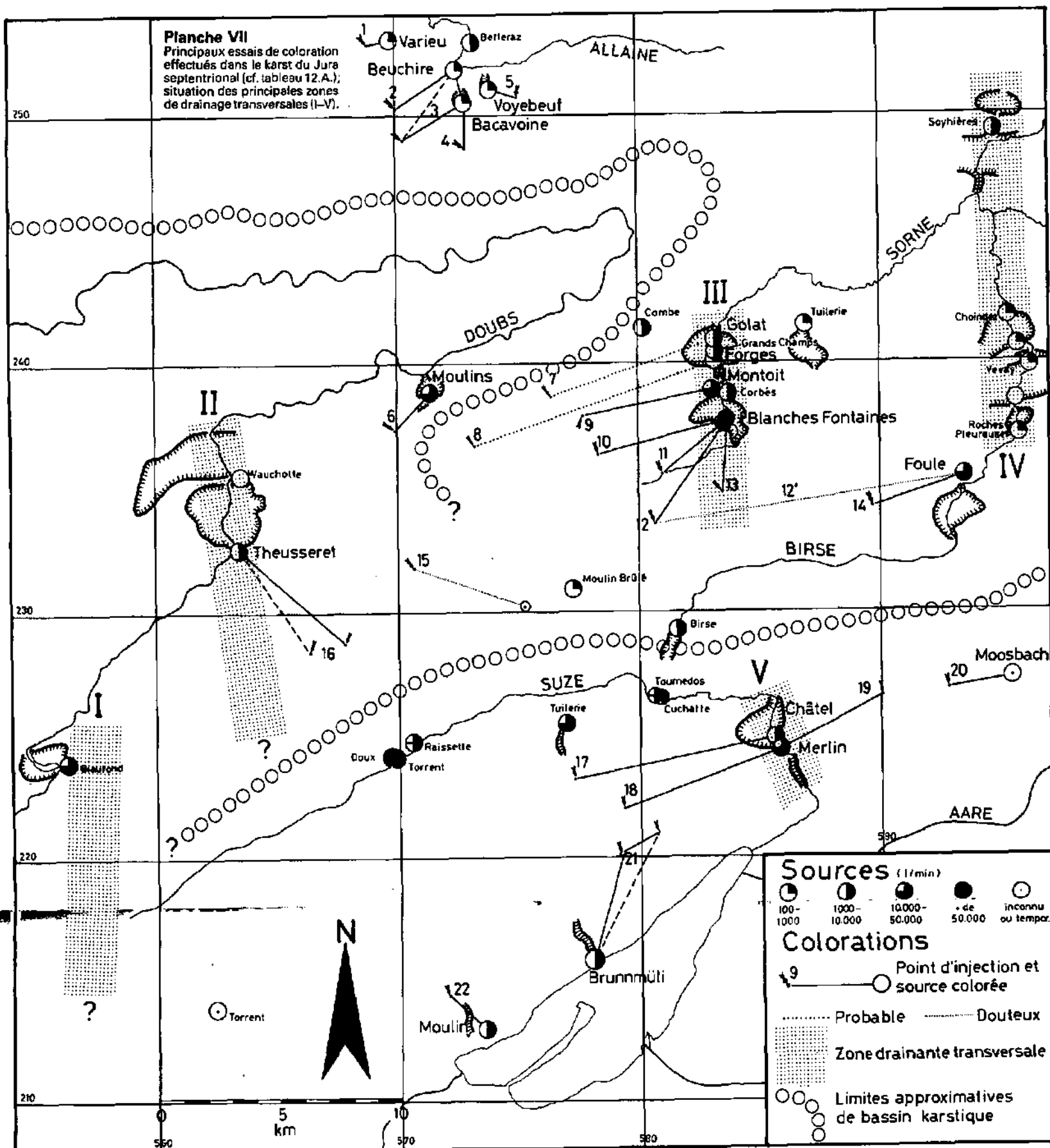
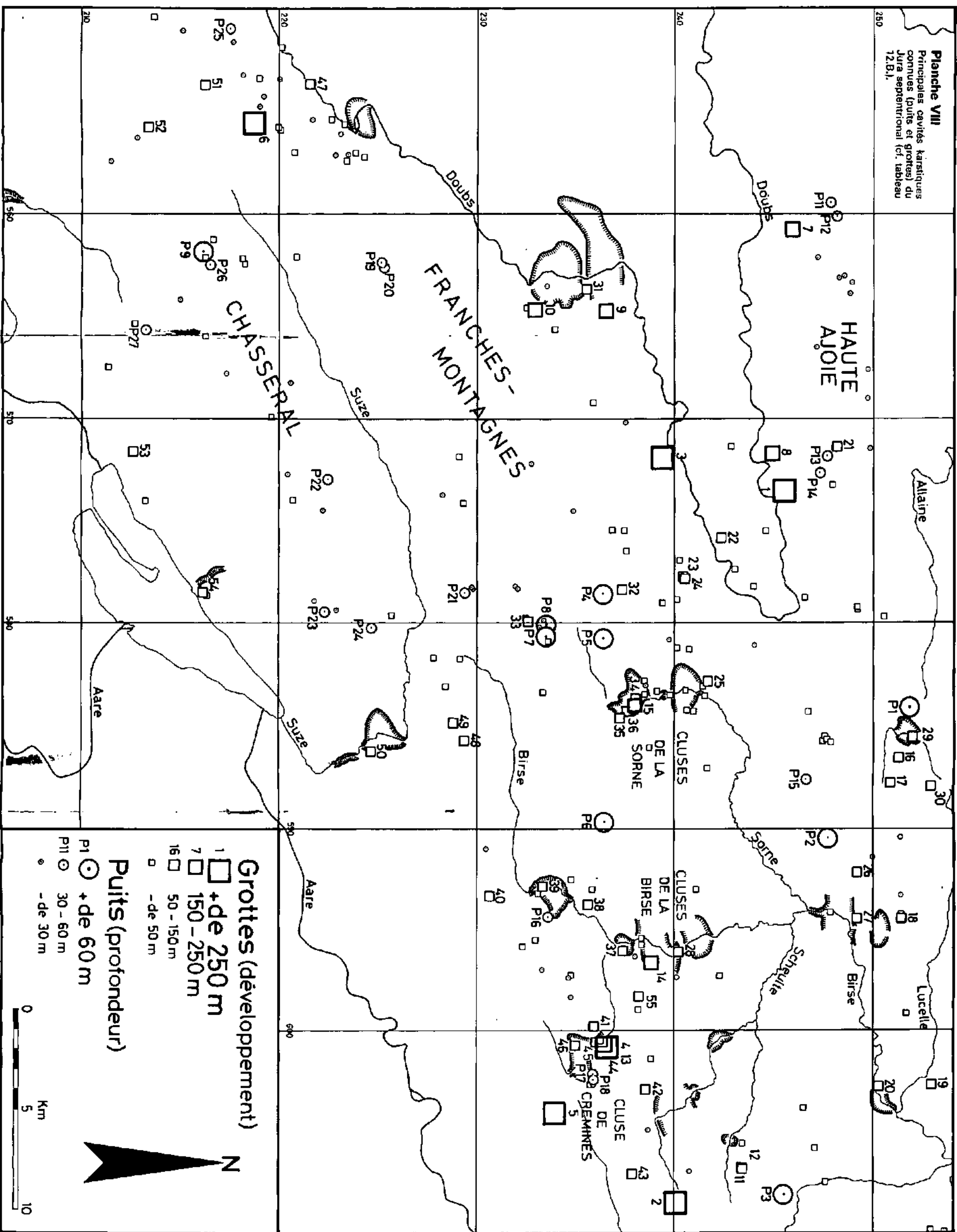


Planche VIII
Principales cavités karstiques
connues (puits et grottes) du
Jura septentrional (cf. tableau
12.B.1).



Grottes (développement)

1 □ + de 250 m

7 □ 150 - 250 m

16 □ 50 - 150 m

□ - de 50 m

Puits (profondeur)

P1 ○ + de 60 m

P11 ○ 30 - 60 m

○ - de 30 m

