



# Infiltration et transfert des eaux souterraines en pays karstique : le plateau du Mont Revard (Savoie) - Alpes françaises

Yves Lemordant

## ► To cite this version:

Yves Lemordant. Infiltration et transfert des eaux souterraines en pays karstique : le plateau du Mont Revard (Savoie) - Alpes françaises. Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1977. Français. NNT : . tel-00564648

**HAL Id: tel-00564648**

**<https://theses.hal.science/tel-00564648>**

Submitted on 9 Feb 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

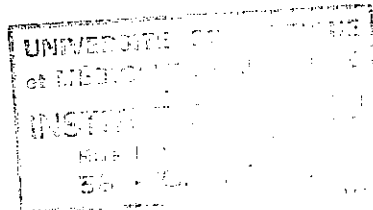


UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE DE GRENOBLE

THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE

Spécialité : sciences de la terre

Mention : géologie appliquée



2 cartons hors texte.

## INFILTRATION ET TRANSFERT DES EAUX SOUTERRAINES

EN PAYS KARSTIQUE

LE PLATEAU DU MONT REVARD (Savoie)

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1  
INSTITUT DE GEOLOGIE  
**DOCUMENTATION**  
RUE MAURICE-GIGNOUX  
B 38031 GRENOBLE CEDEX  
TEL (76) 87.46.43

par yves LEMORDANT

Soutenue le Novembre 1977 devant la commission d'examen :

|            |                      |                         |
|------------|----------------------|-------------------------|
| Président  | : R. BARBIER         | professeur              |
| Examineurs | : J. SARROT-REYNAULD | professeur              |
|            | J. ROCHAT            | maître assistant        |
|            | J.C. FOURNEAUX       | maître assistant        |
|            | P. MOREL             | ingénieur D.D.A. Savoie |

### AVANT-PROPOS

A l'issue de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui, à des titres divers, ont contribué à sa réalisation :

- Messieurs R. BARBIER, Président du Jury et J. SARROT-REYNAULD, rapporteur ;

- Mesdames F. KELLER et B. USELLE (spectrophotométrie), Messieurs J.C. FOURNEAUX (Labo. hydrogéologie), J.P. REVOL (Labo. sédimentologie), et tous mes camarades de l'Institut Dolomieu de Grenoble.

- Monsieur J. ROCHAT de la Faculté de Pharmacie de Grenoble (analyse traceurs).

- Le Service d'application des radioéléments et des rayonnements du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, et notamment Messieurs CALMELS et MOLINARI (réalisation et dépouillement multitraçages).

- Le Laboratoire de Géologie du Centre Universitaire de Savoie de Chambéry.

- Monsieur P. OLIVE du Centre de Recherche Géodynamique de Thonon (matériel hydrologie).

- Monsieur M. LEPILLER du Centre de Recherche d'Orléans.

- Le Spéléo-Club de Savoie.

- Enfin, la Direction Départementale de l'Agriculture de la Savoie, représentée par Monsieur MOREL, pour son aide financière qui a permis notamment la réalisation des nombreux traçages.

Et mes parents

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.  
MAISON DES GEOSCIENCES  
DOCUMENTATION  
B.P. 53  
F. 38041 GRENOBLE CEDEX  
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58  
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

## SOMMAIRE

### - INTRODUCTION

CHAPITRE I - HYDROLOGIE

CHAPITRE II - GEOLOGIE DU PLATEAU DU REVARD - POSSIBILITES HYDROGEOLOGIQUES  
DES FORMATIONS ET ROLE DE LA TECTONIQUE

CHAPITRE III - MISE EN EVIDENCE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES PAR TRACAGES

CHAPITRE IV - LES BASSINS VERSANTS KARSTIQUES

CHAPITRE V - ETUDE HYDROCHIMIQUE

CHAPITRE VI - APPROCHE DE LA DYNAMIQUE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES PAR  
L'ETUDE DES CRUES.

LES SYSTEMES KARSTIQUES DE LA "DORIA" ET DU "BOUT DU MONDE"

CHAPITRE VII - KARSTIFICATION ET ECOULEMENTS SOUTERRAINS

CHAPITRE VIII - LES RESSOURCES EN EAU DU PLATEAU DU MONT REVARD

- CONCLUSIONS GENERALES

- ANNEXES

- BIBLIOGRAPHIE

- LISTE DES FIGURES

- TABLE DES MATIERES

---

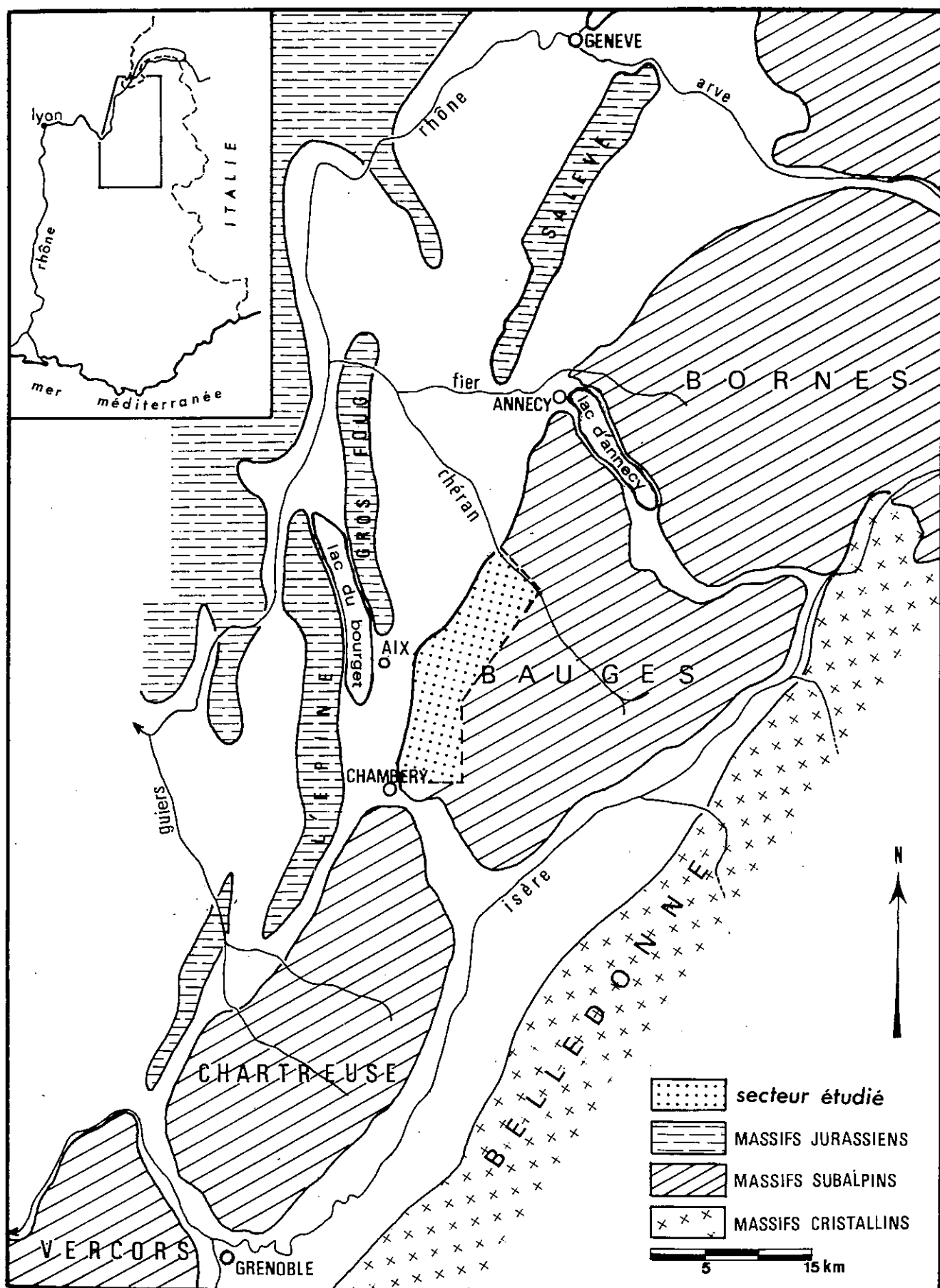


fig.1 CADRE GEOGRAPHIQUE

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

### I- ORIGINE ET BUT DE L'ETUDE.

Le plateau du Mont Revard fut l'un des tous premiers centres de sports d'hiver de France, grâce à une altitude moyenne de 1400 mètres et à la proximité d'agglomérations urbaines importantes. Mais son développement a été freiné par un manque d'eau à peu près total, puis par la concurrence due à la création de stations mieux placées pour la pratique du ski.

Récemment et notamment avec l'essor touristique lié au développement du ski de fond, auquel le plateau se prête admirablement bien ; il s'est avéré nécessaire de connaître les ressources en eau et les circulations souterraines de cette région, où les problèmes de pollution se font de plus en plus aigus.

L'un des caractères remarquables de ce plateau est effectivement l'absence presque totale de réseau hydrographique, liée à la disparition rapide des rares ruisseaux, à l'omniprésence de zones crevassées et de dolines de toutes dimensions. Si de grosses sources étaient connues tout autour du plateau et certaines utilisées, on ignorait tout de leurs origines et de leur fonctionnement.

C'est ainsi que cette étude hydrogéologique a été entreprise, avec l'aide de la Direction Départementale de l'Agriculture de la Savoie. On considérera successivement l'hydrologie et la géologie régionale, la physico-chimie des eaux et les circulations souterraines sous leur aspect hydrodynamique.

### II- CADRE GEOGRAPHIQUE (fig. n°1 ).

La région étudiée fait partie du massif des Bauges appartenant aux chaînes subalpines septentrionales, et parmi lesquelles il forme une unité bien individualisée.

Il est limité au Nord-Est et au Sud-Ouest par deux cluses ; celles d'Ugine-Annecy et de Chambéry-Montmélian, qui le séparent respectivement des massifs subalpins des Bornes et de la Chartreuse.

Il est bordé au Nord-Est par la dépression molassique d'Aix-les-Bains-Annecy et séparé au Sud-Est du massif cristallin externe de Belledonne par le sillon subalpin de Montmélian à Ugine.

Sur le plan des activités économiques et du peuplement, les Bauges subissent un handicap dû à leur isolement par rapport aux vallées environnantes. Seule la cluse du Chéran permet un accès relativement aisé à l'intérieur du massif.

L'élevage demeure la principale activité de la région qui se dépeuple au profit des agglomérations urbaines avoisinantes. L'industrie du bois est un secteur important, mais le fait le plus marquant depuis quelques années est l'essor du tourisme, aussi bien estival que hivernal.

### III- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE REGIONAL.

La structure géologique du massif des Bauges consiste en une série de plis parallèles entre eux, plus ou moins déversés vers le Nord-Ouest.

Cette structure se traduit morphologiquement par une suite de vallées orientées Nord - Nord-Est - Sud - Sud-Ouest qui viennent se raccorder à la vallée transversale du Chéran orientée Nord-Ouest - Sud-Est. La cluse du Chéran sert ainsi d'exutoire pour toute la partie centrale du massif. Son modelage par les glaciers a entraîné des surcreusements et le remplissage par du matériel fluvio-glaciaire a permis l'établissement de petits aquifères, notamment à l'amont du Châtelard (thèse G. NICLOUD, 1975).

Du point de vue lithologique, la présence de niveaux calcaires épais, perméables en grand et séparés par des niveaux marneux peu perméables a permis l'existence de circulations souterraines. Celles-ci se sont particulièrement bien développées sur toute la bordure Ouest du massif (Mont Margeriaz, Mont Revard, Montagne du Semnoz), du fait d'une tectonique moins intense qui a défini de vastes structures monoclinales.

### IV- CADRE DE L'ETUDE.

La présente étude concerne la bordure sud occidentale du massif des Bauges, entre la cluse du Chéran au Nord et celle de Chambéry au Sud.

Dominant la dépression molassique Chambéry-Aix-les-Bains, le plateau du

Mont Revard proprement dit n'est que la partie centrale du secteur étudié qui comprend, au Sud, le Mont Peney et le Mont du Nivolet, au Nord, le Bois de Pré-poulain et la Montagne de Bange. En fait, aussi bien sur le plan morphologique qu'hydrogéologique l'ensemble forme un tout. La désignation "plateau du Mont Revard" s'adressera donc à toute la zone étudiée.

La superficie totale représente environ 86 km<sup>2</sup> et s'étend généralement entre 1200 et 1500 mètres d'altitude.

La morphologie détaillée consiste en de vastes surfaces calcaires au modelé karstique caractéristique : lapiez, dolines, gouffres, nombreux entonnnoirs d'ablation et reliefs chaotiques résultant de phénomènes de dissolution intense.

Sur le plan de la végétation, on note des forêts de feuillus et de résineux avec des sous-bois bien fournis. Sur les zones marneuses se trouvent de vastes alpages agrémentés de bosquets de feuillus.

CHAPITRE 1

HYDROLOGIE

## CHAPITRE I - H Y D R O L O G I E

### I- LE CLIMAT - GENERALITES.

#### 1°/- Les massifs subalpins septentrionaux :

Formant les premiers reliefs à l'Ouest de la chaîne alpine, ces massifs seront les premiers intéressés par les dépressions venues de l'Atlantique. Ils seront donc bien arrosés et du fait de leur altitude moyenne, relativement froids.

Seul, le massif du Vercors situé le plus au Sud subit des influences méditerranéennes qui se traduisent par une pluviosité moindre et un adoucissement des températures.

En remontant vers le Nord, les massifs subalpins seront de mieux en mieux abrités des dépressions venues de l'Ouest ou du Nord-Ouest, par les derniers chaînons méridionaux du Jura.

#### 2°/- Le massif des Bauges :

Situé immédiatement à l'Est des chaînons jurassiens de l'Epine, culminant à mille cinq cents mètres d'altitude et du Gros Foug, d'altitude plus modeste, il semble donc mieux protégé des précipitations que le massif de la Chartreuse qui le relaye au Sud.

Entouré de larges vallées, il bénéficiera aussi bien des influences des vents venus du Nord que du Sud. Enfin, avec des altitudes généralement comprises entre douze cents et quatorze cents mètres, les précipitations neigeuses seront particulièrement abondantes.

### II- LES VENTS.

On constate une prédominance du vent du Nord, appelé dans la région "la Bise" et du Sud-Ouest appelé "le Vent".

On enregistre également un vent d'Ouest et un vent du Sud ou "Foehn" qui fait fondre rapidement la neige, en hiver.

Les précipitations sont le plus souvent liées au vent de secteur Sud-Ouest.

### III- LES PRECIPITATIONS.

#### 1°/- Le réseau pluviométrique existant (Météorologie Nationale) :

Les relevés pluviométriques journaliers concernant les Bauges et sa bordure Ouest sont particulièrement nombreux, mais les stations de mesures sont presque toutes situées à basse altitude, inférieure à 1.000 mètres. En ce qui concerne le plateau du Mont Revard et ses bordures, on note les stations suivantes :

|                                           |   |                                                       |
|-------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------|
| Sur la bordure Ouest<br>et du Nord au Sud | : | - Cusy<br>- Voglans<br>- Joppet<br>- Challes-les-Eaux |
| Sur la bordure Est                        | : | - Lescheraines<br>- Les Déserts                       |
| Plus à l'intérieur du massif              | : | - Ecole<br>- Aillon-le-Jeune                          |

#### 2°/- Le matériel complémentaire mis en place :

Etant donné l'altitude moyenne du plateau du Mont Revard, de l'ordre de 1350 mètres, il était nécessaire de mesurer la pluviosité à des altitudes supérieures à 1000 mètres.

Ainsi trois tubes totalisateurs ont été implantés à 1275, 1365 et 1525 mètres d'altitude sur une même ligne Est-Ouest, afin d'enregistrer les variations liées à la disposition des reliefs qui est assez homogène du Nord au Sud.

Ces tubes totalisateurs (ou tubes à neige) sont des tubes en matière plastique (P.V.C.) ou fibre de verre, plus ou moins transparents, de 100 à 250 cm<sup>2</sup> de section et de 2 à 3 mètres de hauteur. Ils contiennent un antigel et un peu d'huile minérale. Cette dernière sert à éviter l'évaporation et facilite la lecture du niveau d'eau lorsque la transparence du tube est faible.

### 3°/- Tableau des postes pluviométriques ayant servi à l'étude :

| <u>Situation</u>           | <u>Altitude</u> | <u>Appareillage</u>                                |
|----------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|
| Voglans                    | 237m            | pluviomètre type "Association", 400cm <sup>2</sup> |
| Joppet                     | 272m            | pluviomètre type "Association", 400cm <sup>2</sup> |
| Challes-les-Eaux           | 291m            | pluviomètre type "Association", 400cm <sup>2</sup> |
| Cusy                       | 555m            | pluviomètre type "Association", 400cm <sup>2</sup> |
| Lescheraines               | 588m            | pluviomètre type "Association", 400cm <sup>2</sup> |
| Ecole                      | 732m            | pluviomètre type "Association", 400cm <sup>2</sup> |
| Aillon-le-Jeune            | 900m            | pluviomètre type "Association", 400cm <sup>2</sup> |
| Leschaux                   | 940m            | tube totalisateur                                  |
| Les Déserts (Les Bouvards) | 1030m           | pluviomètre type "Association", 400cm <sup>2</sup> |
| La Fèche (Vignoble)        | 1275m           | tube totalisateur 200cm <sup>2</sup>               |
| Le Revard (Bois brûlé)     | 1365m           | tube totalisateur 115cm <sup>2</sup>               |
| La Fèche (Orionde)         | 1525m           | tube totalisateur 177cm <sup>2</sup>               |

De plus on a utilisé des relevés fournis par G. NICOUD pour Pragondran (850m - à partir du 01-01-1976) et par M. LEPILLER pour Leschaux (940m) et Le Semnoz (Le Villard - 1420m), notamment pour l'établissement de la carte pluviométrique (fig. n°3 p.17).

### 4°/- Homogénéité des hauteurs de précipitations enregistrées par différents appareils :

Les hauteurs pluviométriques données par différents appareils semblent varier, dans une certaine mesure, d'après le surface de réception de chaque appareil. Ainsi, M. HAUBERT a comparé les valeurs données par un pluviographe de 2000 cm<sup>2</sup> de section à celles données à la même station par un tube totalisateur de 240 cm<sup>2</sup> de section. Il en déduit que le tube a reçu 94% des précipitations mesurées au pluviographe, sur une période de 9 mois. Un tel déficit pour le tube totalisateur entraîne un facteur correctif de + 10% à affecter aux hauteurs données par cet appareil.

Pour G. NICOUD, la comparaison entre les résultats obtenus à l'aide d'un tube totalisateur (115cm<sup>2</sup>) et d'un pluviomètre (400cm<sup>2</sup>) montre un déficit de 11% pour le tube totalisateur (observations pendant 3 mois d'été).

J.P. TRIPET (1973) note que : "Rodda a comparé les mesures faites au moyen de deux pluviomètres placés à 5m l'un de l'autre ; pour une période de 5

ans, le premier instrument, placé au ras du sol, a indiqué une hauteur de précipitations supérieure de 6,6% à celle mesurée par l'autre, placé sur un pied haut de 30,5 cm ; la cause de cette différence n'a pas pu être définie d'une façon satisfaisante. L'auteur considère qu'un pluviomètre placé au ras du sol et entouré d'une grille destinée à éviter l'éclaboussement des gouttes de pluie, donne des valeurs plus proches de la réalité que tout autre instrument".

De plus, il note que la comparaison entre un pluviomètre et un pluviographe, du même type (Hellmann normalisé, 200cm<sup>2</sup>) installés à quelques mètres, l'un de l'autre, montre une dispersion relativement grande dans les mesures ; les mesures du pluviographe étant généralement inférieures à celles du pluviomètre (observations sur une période d'environ 3 ans).

On voit donc que l'enregistrement des pluies est un problème délicat et que l'erreur sur la hauteur d'eau tombée, en un endroit donné, en une année (module annuel) peut être estimée entre 5% et 10%, pour un pluviomètre qui est l'appareil le plus couramment utilisé.

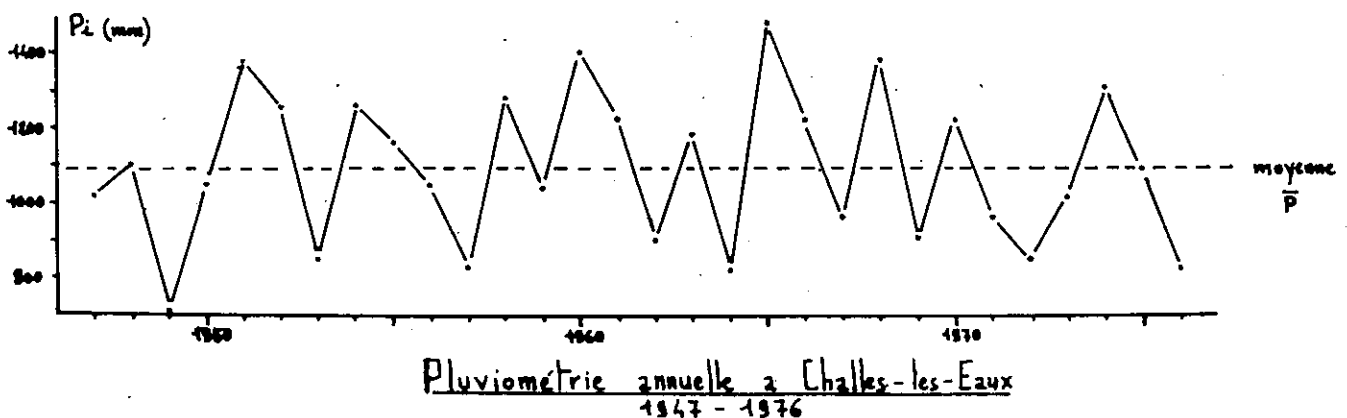
En ce qui concerne les tubes totalisateurs employés pour cette étude, on appliquera un facteur de correction de + 5% pour le tube de petit diamètre et de + 3% pour les deux autres tubes (177cm<sup>2</sup> et 200cm<sup>2</sup>), afin de rendre leurs mesures homogènes par rapport aux pluviomètres de 400cm<sup>2</sup>. En effet, les valeurs données par les tubes sont très vraisemblablement sous-estimées, ne serait-ce que du fait de l'évaporation le long des parois, surtout en été.

#### 5°/- Les données pluviométriques :

##### a- Modules pluviométriques annuels.

##### - Anciens relevés.

Grâce à la Météorologie Nationale, on dispose des hauteurs de précipitations annuelles depuis 1947, pour les stations de Challes-les-Eaux et de Lescheraines, depuis 1936 pour celle d'Aillon-le-Jeune.



| ANNEE                        | PLUVIOMETRIE ANNUELLE |              |           | : INDICE PLUVIOMETRIQUE ANNUEL        |      |
|------------------------------|-----------------------|--------------|-----------|---------------------------------------|------|
|                              | CHALLES               | LESCHERAINES | AILLON    | : $P_i/\bar{P}$ pour CHALLES LES EAUX |      |
|                              | 295m                  | 590m         | 900m      |                                       |      |
| 1947                         | 1019                  | 1221         |           |                                       | 0,93 |
| 48                           | 1097                  | 1353         |           |                                       | 1,01 |
| 49                           | 706                   | 943          |           |                                       | 0,65 |
| 50                           | 1050                  | 1466         |           |                                       | 0,96 |
| 51                           | 1378                  | 1613         |           |                                       | 1,26 |
| 52                           | 1256                  | 1605         | moyenne   |                                       | 1,15 |
| 53                           | 845                   | 1036         | 1936-1965 |                                       | 0,77 |
| 54                           | 1268                  | 1481         | = 1766    |                                       | 1,16 |
| 55                           | 1160                  | 1431         |           |                                       | 1,06 |
| 56                           | 1054                  | 1301         |           |                                       | 0,97 |
| 57                           | 833                   | 1081         |           |                                       | 0,76 |
| 58                           | 1276                  | 1511         |           |                                       | 1,17 |
| 59                           | 1039                  | 1235         |           |                                       | 0,95 |
| 60                           | 1398                  | 1742         | 2234      |                                       | 1,28 |
| 61                           | 1226                  | 1502         | 2049      |                                       | 1,12 |
| 62                           | 896                   | 1097         | 1482      |                                       | 0,82 |
| 63                           | 1179                  | 1509         | 1926      |                                       | 1,08 |
| 64                           | 823                   | 1066         | 1176      |                                       | 0,75 |
| 65                           | 1481                  | 1765         | 2364      |                                       | 1,36 |
| 66                           | 1221                  | 1389         | 1858      |                                       | 1,12 |
| 67                           | 962                   | 1232         | 1495      |                                       | 0,88 |
| 68                           | 1378                  | 1610         | 1889      |                                       | 1,26 |
| 69                           | 905                   | 1293         | 1530      |                                       | 0,83 |
| 70                           | 1220                  | 1609         | 2069      | LES DESERTS                           | 1,12 |
| 71                           | 957                   | 1113         | 1408      | -                                     | 0,88 |
| 72                           | 846                   | 1025         | 1321      | -                                     | 0,78 |
| 73                           | 1014                  | 1137         | 1508      | 1424                                  | 0,93 |
| 74                           | 1307                  | 1440         | 1844      | 1823                                  | 1,20 |
| 75                           | 1095                  | 1237         | 1376      | 1412                                  | 1,00 |
| 76                           | 826                   | 1018         | 1227      | 1132                                  | 0,76 |
| moyenne $\bar{P}$ = 1090,5 : |                       |              |           |                                       |      |
| 1335 : 60-76 = 1692 : - :    |                       |              |           |                                       |      |

Ne disposant pas d'un nombre suffisant de données pour une étude statistique, on se bornera à constater que sur 30 années, la hauteur de précipitations

annuelles a varié entre 706mm et 1481mm pour Challes (indice pluviométrique : 0,65 à 1,36) et entre 943mm et 1765mm pour Lescheraines (indice pluviométrique : 0,71 à 1,32).

- Relevés concernant la période d'étude (voir fig. n°2 et fig. n°3 ).

Les tubes totalisateurs ont été installés pour un an, du 1er août 1975 au 31 juillet 1976. C'est donc cette période qui sera prise en considération pour l'étude hydrologique.

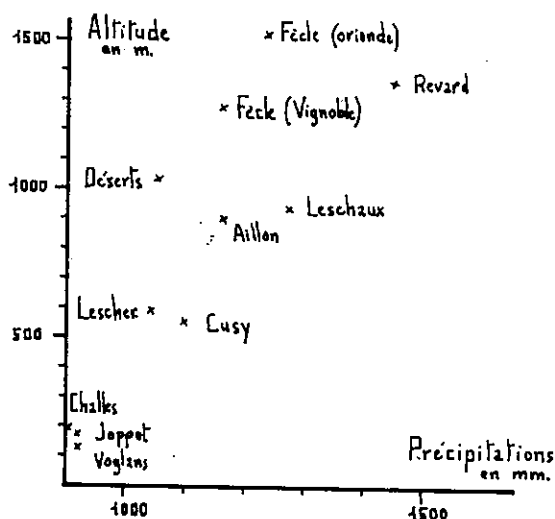
Les valeurs obtenues ont permis le tracé des courbes isohyètes qui montrent, pour le plateau du Mont Revard, une pluviosité maximum dans la zone centrale du plateau, dont l'altitude moyenne est de 1350 mètres.

La distribution des précipitations est un phénomène complexe lié à l'orographie.

On admet généralement que la hauteur pluviométrique varie linéairement avec l'altitude de la surface topographique, pour un versant dont l'exposition aux vents est uniforme. Ceci amène à définir un "gradient pluviométrique".

Ici, pour les onze stations dont les relevés ont été utilisés pour tracer les isohyètes, on constate, sur le graphique ci-dessous, qu'il n'y a guère de relation entre la pluviométrie et l'altitude (grande dispersion des mesures).

On peut seulement remarquer que pour les trois stations échelonnées sur le même versant Est (Les Déserts, La Fèche-vignoble et la Fèche-orionde) la pluviométrie augmente de 40mm pour 100 mètres.



Il s'agit de considérer la situation propre à chaque station pour donner une explication aux écarts pluviométriques.

| Stations                        | Aout    | Sept.   | Oct.    | Nov.  | Déc. | Janv. | Fév.  | Mars  | Avril | Mai  | Juin   | Juillet | Total<br>Août 75 - J <sup>1</sup> 76 |
|---------------------------------|---------|---------|---------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|--------|---------|--------------------------------------|
| Voglsans 237m                   | 94,6    | 240,8   | 65      | 159,8 | 58,6 | 20,7  | 77    | 50,2  | 52,8  | 44,9 | 8,2    | 52,0    | 924,6                                |
| Joppet 272m                     | 85,9    | 211,6   | 74,0    | 154,8 | 57,9 | 22,1  | 75,2  | 54,5  | 91,8  | 23   | 5,5    | 63,7    | 920                                  |
| Challes-les-Eaux 291m           | 110     | 213     | 60,8    | 147,1 | 66,4 | 22    | 69    | 53,7  | 79,4  | 25,3 | 6,8    | 53,6    | 907                                  |
| Cusy 555m                       | 146     | 267     | 73,4    | 193   | 64,5 | 25    | 71,5  | 52    | 78    | 46   | 3,5    | 77,5    | 1097                                 |
| Lescheraines 588m               | 120,5   | 213,5   | 68,3    | 171,7 | 55,5 | 28,7  | 80    | 35,4  | 79,9  | 47,3 | 39     | 103,5   | 1043                                 |
| Ecole 732m                      | 94,3    | 216,8   | 66,3    | 194   | 56,2 | 34,3  | 78,6  | 44,1  | 93,2  | 41,9 | 61,6   | 114,2   | 1095                                 |
| Aillon le Jeune 900m            | 88,8    | 251     | 63,4    | 229,1 | 62,9 | 39,4  | 102,8 | 63,2  | 80,3  | 52,5 | 18,6   | 106,6   | 1157                                 |
| Leschaux 940m                   | 757     | 721     | 62      | 126   | 59   | 126   | 120   | 46,2  | 68,3  | 59,8 | 28,9   | 123,9   | 1272                                 |
|                                 |         |         |         |       |      |       |       | (44)  | (65)  | (57) | (27,5) | (48)    |                                      |
| Les Déserts (Bouvards)<br>1030m | 106,7   | 228,8   | 72,4    | 189,9 | 68   | 39,2  | 108,4 | 56,9  | 80,8  | 31,7 | 16,6   | 48,6    | 1048                                 |
| La Fécle (Vignoble)<br>1275m    | 100,9   | 275     | 76,2    | 191,6 | 75,2 | 34    | 93,7  | 56,6  | 76,2  | 53,6 | 26,8   | 96,8    | 1156                                 |
|                                 | (98)    | (267)   | (74)    | (186) | (73) | (33)  | (91)  | (55)  | (74)  | (52) | (26)   | (94)    |                                      |
| Le Revard (Bois brûlé)<br>1365m | 134,3   | 311,8   | 105     | 289,8 | 276  | 283,5 | 270   | 115,5 | 115,5 | 96,6 | 92,2   | 109,2   | 1445                                 |
|                                 | (127,9) | (296,8) | (100)   |       |      |       |       | (110) |       |      |        | (104)   |                                      |
| La Fécle (Oriande)<br>1525m     | 115,4   | 273,5   | 114,8   | 180,2 | 70   | 43,3  | 97,9  | 156,6 | 156,6 | 51,5 | 25,7   | 106     | 1235                                 |
|                                 | (112)   | (265,5) | (111,5) | (175) | (68) | (42)  | (95)  |       | (452) | (50) | (25)   | (103)   |                                      |

( ) Données pluviométriques  
sans correction

fig.2 PRECIPITATIONS EN MM A<sup>1</sup> 75 - J<sup>1</sup> 76

Ainsi on peut relier la forte valeur obtenue à Cusy (versant Ouest, au vent) à la présence du Semnoz (1700m) et de la Montagne de Bange. L'effet de barrière dû à ces reliefs se traduisent par une augmentation de la pluviosité avant l'obstacle.

Il en est de même pour la station d'Aillon-le-Jeune qui se trouve entourée de tous côtés par des reliefs particulièrement élevés (Mont Margériaz à l'Ouest 1845m, Mont Colombier à l'Est 2043m, Mont de la Buffe au Sud 1660m). D'autre part, on remarque la faiblesse relative des précipitations sur la bordure Ouest du plateau (Mont du Nivolet - Mont Revard) dont l'altitude varie entre 1400 et 1550 mètres. Cela peut venir de l'emplacement du tube à neige de La Féclaz (Orionde) en un endroit assez venté. Mais les mesures de hauteurs de neige effectuées en de nombreux points semblent confirmer que c'est bien sur la partie centrale du plateau et donc à une altitude moindre que les précipitations sont les plus abondantes. La disposition NW-SE du Mont Margériaz pourrait alors expliquer ce phénomène.

- Comparaison de la pluviométrie de l'année d'étude avec celle d'une année moyenne.

En prenant la station de Challes-les-Eaux comme référence, on constate que durant la période d'étude (1er août 1975 - 31 juillet 1976), la pluviométrie est très déficitaire (907mm contre 1090mm pour la moyenne 1947-1976. Indice pluviométrique : 0,83). L'année 1976, elle-même, est encore plus déficitaire (826 mm. Indice pluviométrique : 0,76).

Les courbes des hauteurs de précipitations cumulées, tracées pour trois stations (fig. n°4 ) montrent clairement un "replat" s'étendant de décembre 1975 à août 1976. Comme on verra plus loin que les précipitations sont toujours assez bien réparties dans l'année, le "replat" présenté par les courbes indique une période très déficitaire.

- Comparaison avec les autres massifs subalpins septentrionaux.

Le tableau suivant (p19) met en évidence l'abondance des précipitations intéressant le massif de la Chartreuse.

Les Bauges et les Bornes sont arrosés d'une manière sensiblement égale et à un degré moindre, on trouve la partie Nord du Vercors, puis le Chablais, qui est assez bien abrité par le Jura.

fig.3

CARTE  
PLUVIOMETRIQUE  
MODULE PLUVIOMETRIQUE ANNUEL  
01-08-75\_31-07-76

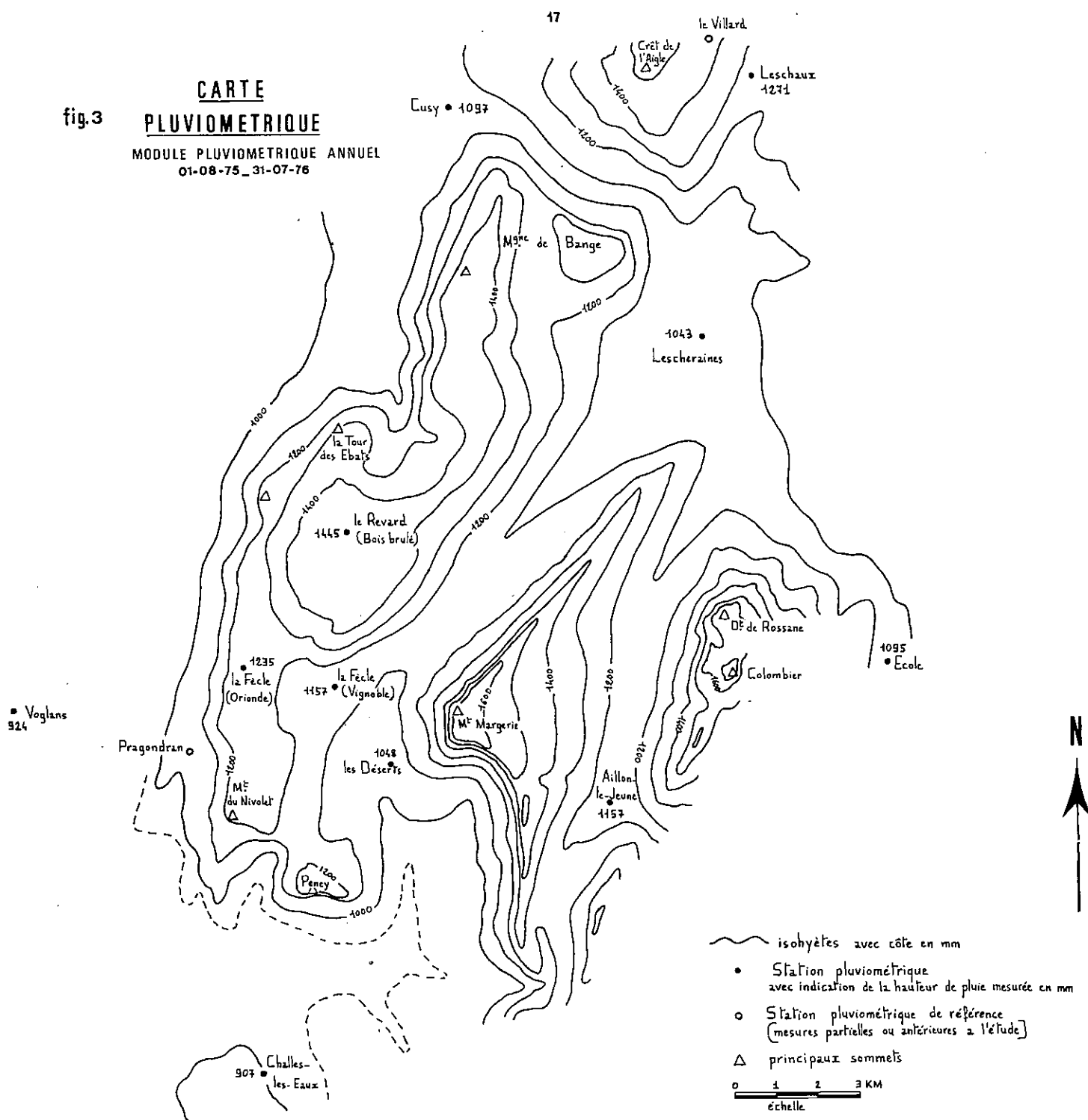
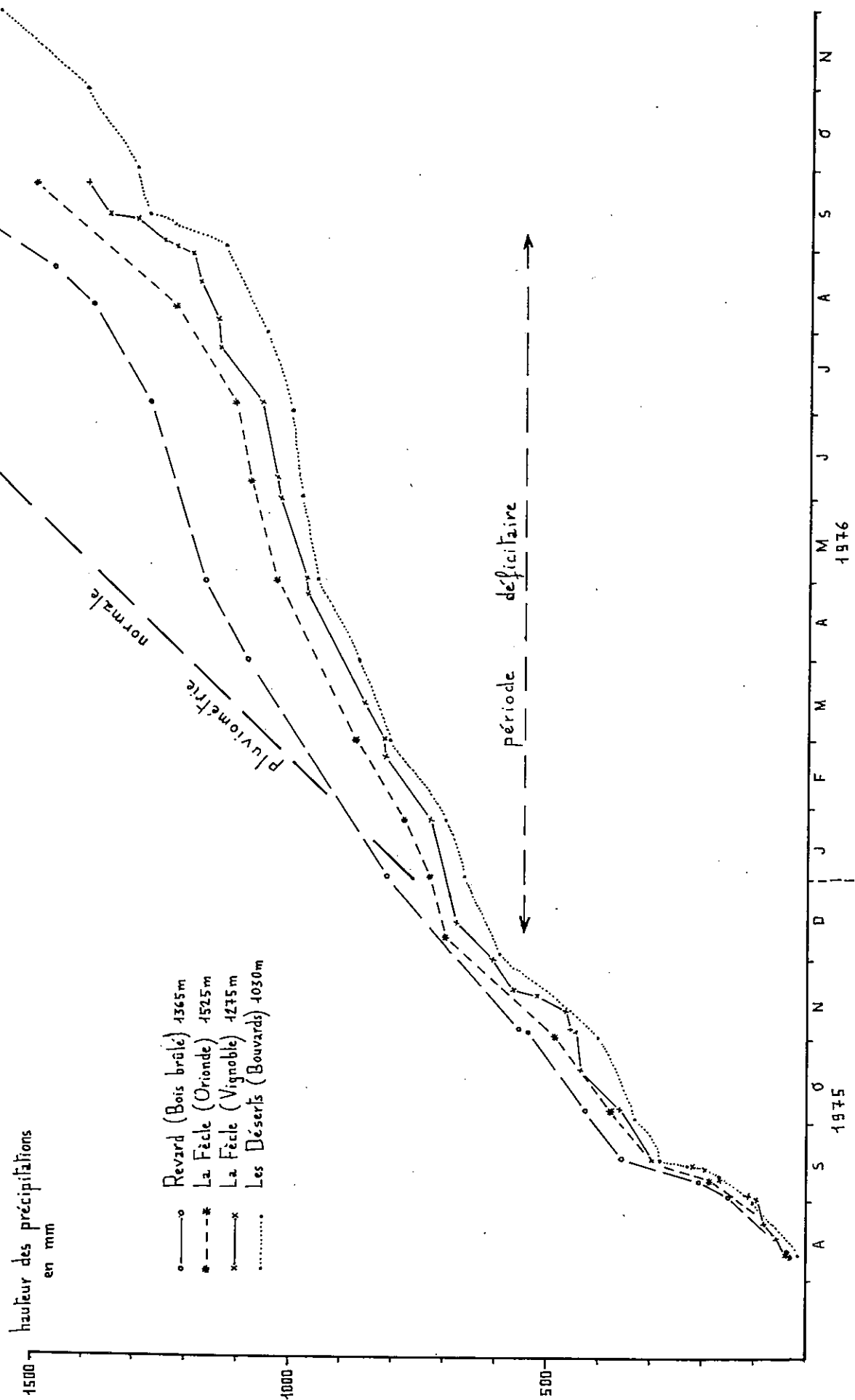


fig.4 PRECIPITATIONS CUMULEES  
PLATEAU DU REVARD



| MASSIF                   | STATIONS                    | PERIODE DE<br>REFERENCE | PRECIPITATIONS | MOYENNE SUR +<br>DE 15 ANS |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------|----------------------------|
| BAUGES                   | Challes 291m                | 1971                    | 957            | 1090 (30 ans)              |
|                          |                             | At1975 - Jt1976         | 907            |                            |
|                          | Lescheraines                | 1971                    | 1113           | 1335 (30 ans)              |
|                          | 590m                        | At1975 - Jt1976         | 1043           |                            |
|                          | Aillon 900m                 | 1971                    | 1408           | 1692 (17 ans)              |
|                          |                             | At1975 - Jt1976         | 1157           |                            |
| CHABLAIS                 | Thonon 410m                 |                         |                | 974 (85 ans)               |
|                          | Les Blaves                  | 1971                    | 899            |                            |
|                          | 600m                        |                         |                |                            |
|                          | Col de Terra-<br>mont 1090m | 1971                    | 1130           |                            |
| BORNES                   | La Clusaz                   |                         |                |                            |
|                          | 1150m                       | At1975 - Jt1976         | 1197           |                            |
|                          | Gd Bornand                  |                         |                |                            |
|                          | 1200m                       | At1975 - Jt1976         | 1297           |                            |
| CHARTREUSE               | St Pierre                   |                         |                |                            |
|                          | d'Entremont                 | At1975 - Jt1976         | 1353           | 1793 (15 ans)              |
|                          | 644m                        |                         |                |                            |
|                          | St Pierre                   |                         |                |                            |
|                          | Chartreuse                  | At1975 - Jt1976         | 1612           | 2008 (15 ans)              |
|                          | 945m                        |                         |                |                            |
| VERCORS<br>(partie Nord) | Pont en Royans              |                         |                |                            |
|                          | 210m                        |                         |                | 1003 (30 ans)              |
|                          | Bournillon                  |                         |                |                            |
|                          | 400m                        |                         |                | 1165 (30 ans)              |
|                          | Villard de                  |                         |                |                            |
|                          | Lans 1050m                  |                         |                | 1236 (30 ans)              |
|                          | Autrans 1050m               |                         |                |                            |
|                          |                             |                         |                | 1425 (30 ans)              |

*b- Modules pluviométriques mensuels (fig. n° 5 ).*

A l'échelle mensuelle on note la sécheresse prolongée des mois de décembre 1975 à août 1976 inclus, par comparaison aux moyennes mensuelles de la période 1947-1976.

Ainsi, durant le mois de décembre 1975, il n'est tombé que 73% des précipitations moyennes pour un mois de décembre. Pour janvier 1976 : 25% , pour

février : 85% et pour mars : 68%. Le total des précipitations du mois d'avril 1976 est tout à fait normal. Puis la pointe de la sécheresse est atteinte en mai et juin, avec des valeurs respectives de 30% et 6% des hauteurs pluviométriques moyennes.

Les mois de juillet et août restent encore assez déficitaires (60% et 70%).

La distribution des précipitations montre généralement une répartition homogène dans l'année. Les mois de novembre, août et juin sont les plus pluvieux, alors que ceux d'octobre, de mars et d'avril montrent les plus faibles valeurs. Celà est très général (moyenne sur 30 ans), car sur une seule année, la répartition peut être bien différente.

Au point de vue saisonnier, les moyennes sur les trente dernières années, pour la station de Challes-les-Eaux, donnent les hauteurs suivantes :

|           |   |       |      |       |
|-----------|---|-------|------|-------|
| Hiver     | : | 248mm | soit | 23%   |
| Printemps | : | 267mm | soit | 24,5% |
| Eté       | : | 300mm | soit | 27,5% |
| Automne   | : | 275mm | soit | 25%   |

On en déduit un indicatif saisonnier E.A.P.H., très peu marqué.

#### c- Fréquence et intensité des précipitations.

La fréquence comme l'intensité des précipitations joue un rôle important dans le régime des cours d'eau ; surtout en pays karstique où les variations de débit sont souvent, à la fois très rapides et très importantes.

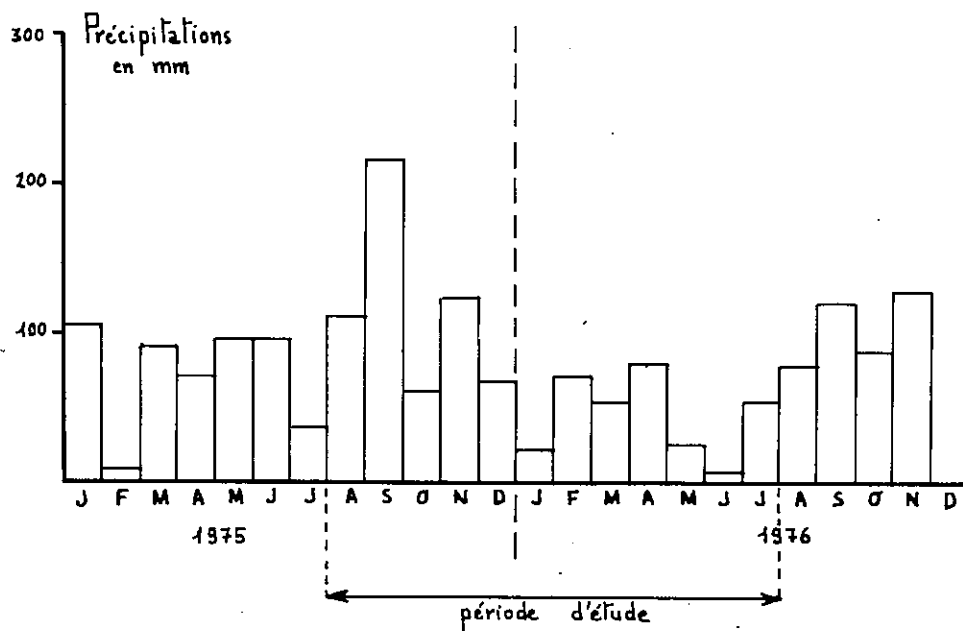
##### - La fréquence :

Pour la période d'étude, on relève 118 jours de précipitations à Challes les-Eaux (295m) et aux Déserts (1030m). Il faut savoir que le nombre de jours de pluie ou de neige varie largement d'un mois à l'autre, comme d'une année à l'autre. D'autre part, il croit en même temps que la hauteur d'eau moyenne. Ainsi la fréquence enregistrée pour cette période est certainement nettement plus faible que la fréquence annuelle moyenne.

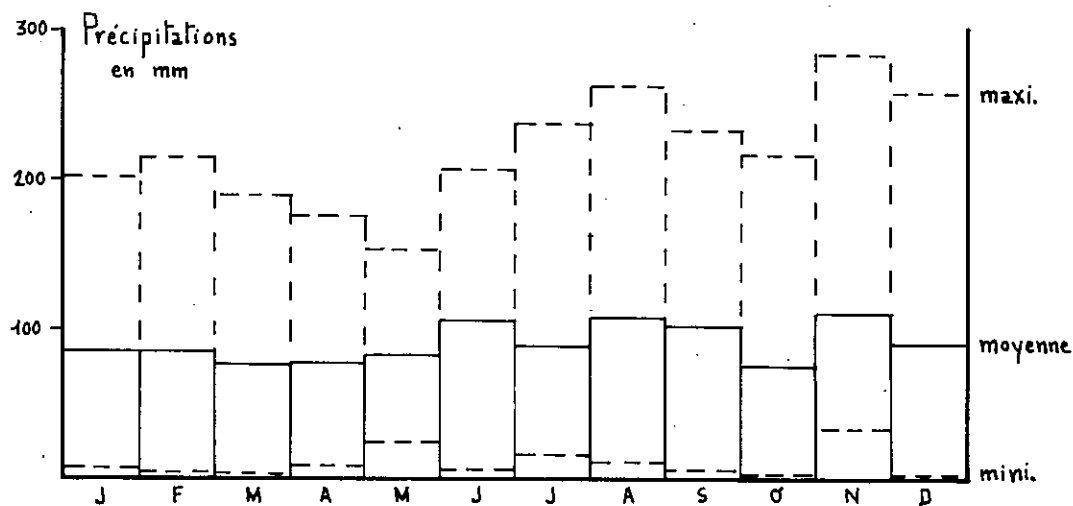
##### - L'intensité :

D'août 1975 à juillet 1976, la hauteur de précipitations journalière la plus forte est de 71,6mm aux Déserts (68,4mm le même jour à Challes-les-Eaux).

fig. 5



Précipitations mensuelles à Challes-les-Eaux  
1975-1976



Précipitations mensuelles à Challes-les-Eaux  
1947-1976

| Précipitations en mm | J           | F           | M           | A           | M           | J           | J           | A           | S           | O           | N           | D           | TOTAL |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| moyenne              | 86          | 85          | 77          | 78          | 83          | 106         | 89          | 109         | 102         | 75          | 110         | 90          | 1091  |
| minimum année        | 7<br>1964   | 4<br>1949   | 4<br>1953   | 10<br>1955  | 25<br>1976  | 7<br>1976   | 16<br>1950  | 12<br>1962  | 6<br>1961   | 1<br>1969   | 35<br>64-62 | 3<br>1971   |       |
| maximum année        | 203<br>1948 | 216<br>1955 | 190<br>1947 | 176<br>1970 | 154<br>1965 | 207<br>1953 | 238<br>1973 | 263<br>1954 | 233<br>1960 | 216<br>1952 | 284<br>1950 | 258<br>1965 |       |

CHALLES-LES-EAUX  
291m  
Période 1947-1976

Précipitations mensuelles moyennes  
Minimum et Maximum absolus avec année de référence.

On note encore trois journées dépassant 40mm (zéro à Challes) et quatorze journées entre 20 et 40mm (12 à Challes).

*d- La couverture nivale :*

L'abondance des précipitations liée à l'altitude du plateau du Mont Revard entraîne la constitution d'un épais manteau neigeux, de novembre à mai, à l'altitude moyenne de 1350 mètres. Son rôle est capital du fait d'un stockage d'une part importante des précipitations et d'une libération généralement assez rapide. D'autre part, la couverture nivale est assez instable au-dessus de 1000 mètres. Les périodes de redoux ne sont pas rares à 1000-1500 mètres d'altitude et la pluie fait parfois place à la neige, même en plein hiver. Néanmoins, ces redoux sont le plus souvent de courte durée et n'entraînent pas d'augmentation très importante des débits par fonte du manteau neigeux pour les exurgences drainant les zones les plus élevées ; sauf à la fin de l'automne où la conjugaison pluie plus fonte de neige entraîne de fortes crues.

Lors de cette étude, les chutes de neige ont été réparties sur 39 jours aux Déserts (1030m), 38 jours à Aillon (900m), 35 jours à Lescheraines (590m) et 12 jours à Challes-les-Eaux (295m).

L'étude de l'épaisseur de la couverture nivale a été effectuée à la station pluviométrique de La Féclaz (vignoble) 1275m et du Revard (Bois brûlé) 1365m. L'épaisseur a été relevée grâce à une sonde, en plusieurs points autour de la station et l'on a considéré la moyenne de ces mesures. La première station se trouve sur une zone herbeuse, largement découverte ; la seconde, dans une clairière, en forêt, à distance suffisante des conifères pour que les mesures ne soient pas influencées par des irrégularités de la couche de neige dues à l'interception par les branchages.

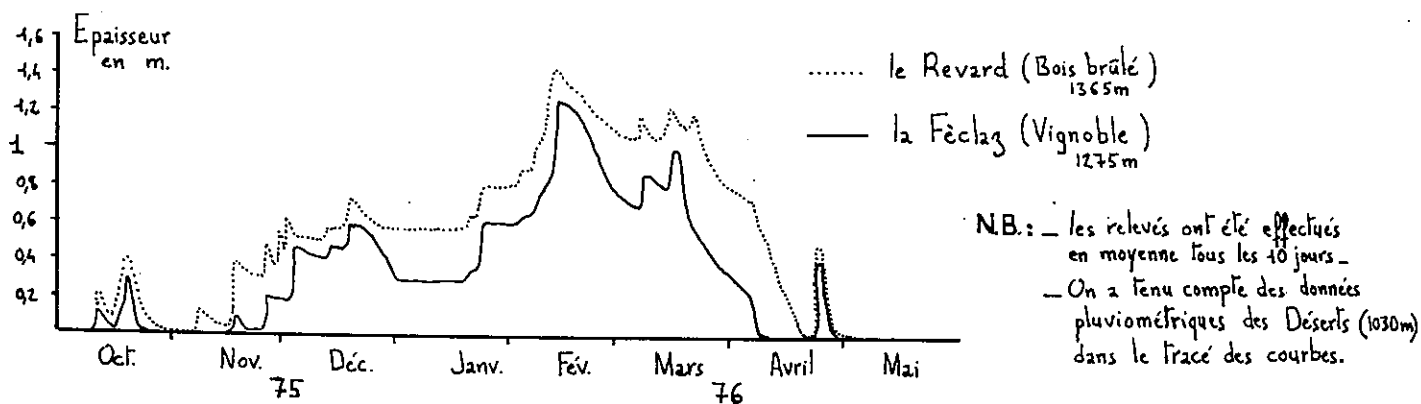


fig.6 Variations d'épaisseur de la couverture nivale

Remarque : Si le manteau neigeux a disparu dès la fin avril au Revard (Bois brûlé), il n'en est pas de même aux alentours de cette station, c'est-à-dire en forêt. Ainsi le 30 avril la couche de neige était encore à peu près uniforme et épaisse de 60 centimètres sous la forêt. Elle a persisté, de manière plus ou moins discontinue jusqu'à la fin mai.

#### IV- LES TEMPERATURES.

##### 1°/- Le réseau d'observation :

Les stations de la Météorologie Nationale situées à la périphérie du secteur étudié sont les suivantes : - Voglans - alt. 237m

- Challes-les-Eaux - alt. 291m

- Lescheraines - alt. 588m.

De plus, on dispose des relevés pour 1975 de la station de la Direction Départementale de l'Agriculture de la Haute-Savoie située au sommet de la Montagne du Semnoz (Crêt de Châtillon - 1650m).

##### 2°/- Les moyennes annuelles et le gradient altimétrique (fig. n°8 ).

Afin de mettre en évidence la relation entre les moyennes annuelles et l'altitude, puis de calculer le gradient altimétrique de température, on a choisi deux autres stations proches de 1000m d'altitude et situées dans les massifs sub-alpins voisins des Bornes et de la Chartreuse. Il s'agit respectivement de la Clusaz (alt. 1150m) et de Saint Pierre de Chartreuse (alt. 945m).

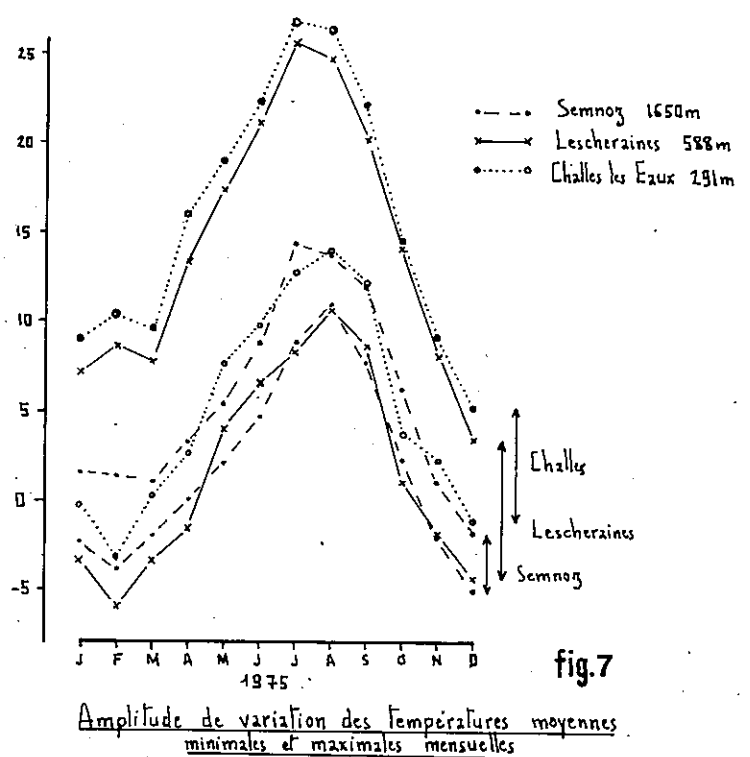
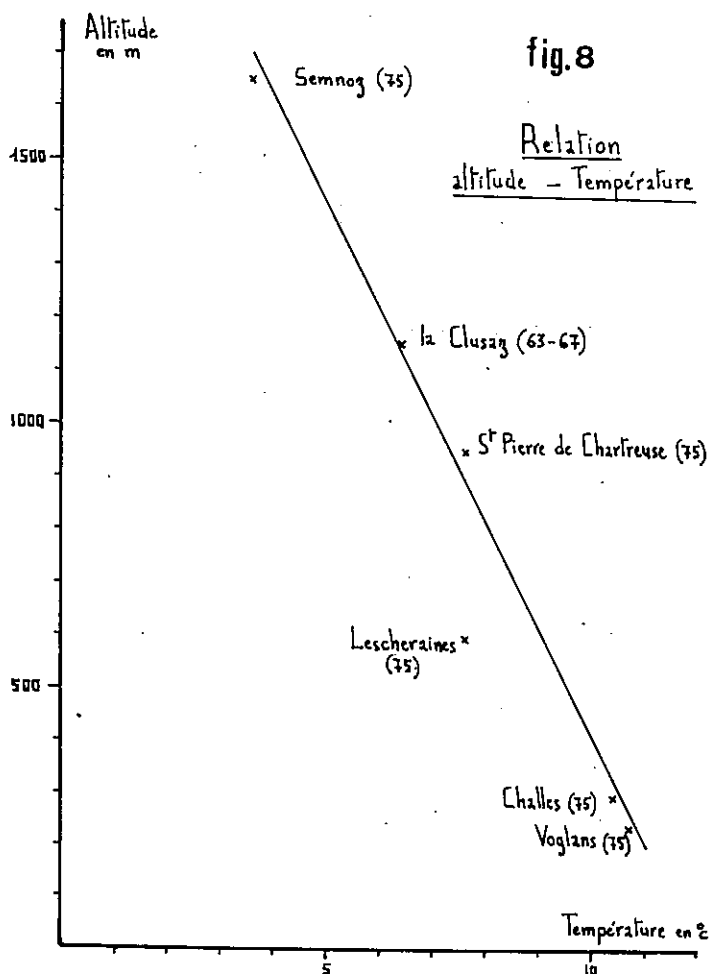
| Stations         | Période : | :      | :      | :                                    | :      | :           | :           | :          | :       |
|------------------|-----------|--------|--------|--------------------------------------|--------|-------------|-------------|------------|---------|
|                  | :1973:    | :1974: | :1975: | A <sup>t</sup> 75-J <sup>t</sup> 76: | 1976   | :1963-1967: | :1961-1975: | :1947-1976 |         |
| Voglans          | 237m:     | -      | :9°15: | 10°7:                                | -      | -           | -           | -          | -       |
| Challes          | 291m:     | 9°75:  | 8°9:   | 10°4:                                | 10°55  | : 10°15 :   | 10°0        | -          | : 10°25 |
| Lescheraines     | 588m:     | 7°0    | :6°2   | :7°6                                 | : 8°1  | : 7°35 :    | -           | -          | -       |
| St Pierre de Ch. | : -       | : -    | :7°6   | : 8°15                               | : 7°95 | : -         | : 7°7       | : -        |         |
|                  | 945m:     | :      | :      | :                                    | :      | :           | :           | :          |         |
| La Clusaz        | 1150m:    | -      | : -    | : -                                  | -      | : -         | : 6°4       | -          | -       |
| Le Semnoz        | 1650m:    | -      | :2°8   | :3°6                                 | -      | : -         | -           | -          | -       |
|                  | :         | :      | :      | :                                    | :      | :           | :           | :          |         |

Températures moyennes annuelles

Sur le graphique températures-altitudes, les moyennes considérées sont celles de 1975, année dont la température moyenne est très voisine de celle calculée sur un grand nombre d'années.

De la droite ainsi obtenue, on en déduit le gradient vertical régional des températures moyennes annuelles qui est de  $0^{\circ},49$  pour 100 mètres. Cette valeur est très proche de celle donnée par G. NICOU (  $0^{\circ},52$  pour 100 mètres ) qui l'a calculée entre Ecole (735m) et les Déserts (1030m) sur une période de 10 ans. De même, R. MICHEL donne  $0^{\circ},525$  pour 100 mètres dans le département de l'Isère. On considèrera donc un gradient de  $0^{\circ},50$  dans la suite de cette étude, avec Challes-les-Eaux comme station de référence.

Remarque : La température annuelle moyenne de la station de Lescheraines est anormalement basse ( $7^{\circ}6$ ) pour son altitude (588m). Cela s'explique, comme on le verra par la suite, par des températures minimales extrêmement basses, dues vraisemblablement à sa position, dans un creux topographique en bordure du Chéran, protégé du Sud et ouvert en direction du Nord, par l'intermédiaire du col de Leschaux.



### 3°/- Les variations mensuelles :

Les figures n° 7 et n° 9 donnent les variations des températures moyennes mensuelles pour des stations d'altitudes variées. Le tableau des moyennes effectuées sur 30 ans (1947-1976) des températures moyennes mensuelles, pour la station de Challes-les-Eaux, montre que la période d'étude (août 1975 - juillet 1976) a été assez normale au point de vue des températures mensuelles.

Généralement un peu plus chaude que l'année moyenne théorique, seuls, octobre 1975, mars 1976 et avril 1976 présentent des températures inférieures (De 1 à 1,5° sur les moyennes mensuelles) aux températures moyennes des 30 dernières années. On remarque que si le mois de juin 1976 a été extrêmement sec, il a aussi été très chaud : sa température moyenne est supérieure de 2°4 à celle d'un mois de juin normal et cela est dû uniquement à des températures maximales très élevées (moyenne des maxima : 28°1 contre 23°8 pour la moyenne normale).

L'amplitude de variation des températures moyennes minimales est beaucoup plus faible en altitude qu'en plaine (voir fig. n° 7 ). Ainsi, elle a oscillé entre 2°8 (août) et 5°4 au Semnoz (1650m) et entre 6°2 (décembre) et 13°9 (juillet) à Challes-les-Eaux (291m) pour les différents mois de 1975.

Pour des moyennes mensuelles sur 30 années (1947-1976), cette amplitude varie entre 7°9 (décembre) et 13°6 (juillet) à Challes. Elle est généralement la plus faible en décembre et la plus forte en juillet, comme le remarque J.P. VACHER pour le bassin de l'Isère. Toutefois, ceci n'est vrai que si les écarts entre les diverses amplitudes sont suffisamment marqués.

Comme on l'a déjà noté pour les températures moyennes annuelles, on voit sur le graphique de la fig. n° 7 que les minima moyens mensuels observés à Lescheraines sont anormalement bas alors que les maxima sont tout à fait normaux pour l'altitude de cette station (588m).

### V- L'HUMIDITE ATMOSPHERIQUE.

Ne disposant pas d'hygromètre sur le secteur étudié, on se référera aux mesures effectuées par G. NICOUD, d'août 1972 à juillet 1973 à Ecole (740m) à l'aide d'un hygromètre à cheveux. La valeur moyenne de l'humidité relative a été de 65,3% avec un maximum de 71% en janvier et un minimum de 63,7% en mars. D'autre part, durant les trois années 1968-1969-1970, le Centre de Recherche Géodynamique de Thonon a enregistré une valeur moyenne analogue de 66,7% sur le bassin versant du lac d'Annecy.

1975

| Station                                  | J                            | F                   | M                  | A                   | M                    | J                     | J                     | A                     | S                     | O                   | N                   | D                    | moy.<br>annuelle | ampli.<br>annuelle |
|------------------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------------|--------------------|
| Voglans 237m                             | m1 0,8<br>m2 8,2<br>M 4,5    | -1,3<br>9,4<br>4,05 | 1,2<br>9,4<br>5,3  | 3,7<br>15,4<br>9,55 | 8,3<br>18,8<br>13,55 | 10,3<br>22,4<br>16,35 | 13,5<br>26,5<br>20    | 14,9<br>25,9<br>20,4  | 12,3<br>21,0<br>16,65 | 4,6<br>14,0<br>9,3  | 3,2<br>9,1<br>6,15  | 0,1<br>5,0<br>2,55   | 10,7             | 17,85              |
| Challes 291m                             | m1 -0,4<br>m2 8,5<br>M 4,0   | -3,2<br>10<br>3,4   | 0,3<br>9,7<br>5,0  | 2,9<br>15,6<br>9,25 | 7,6<br>19,0<br>13,3  | 9,8<br>22,4<br>16,1   | 12,8<br>26,7<br>19,35 | 14,1<br>26,2<br>20,15 | 11,9<br>22,2<br>17,05 | 3,8<br>14,5<br>9,15 | 2,2<br>9,1<br>5,65  | -1,2<br>5,0<br>1,9   | 10,4             | 18,25              |
| Lescheraines 588m                        | m1 -3,4<br>m2 7,2<br>M 1,9   | -6,0<br>8,5<br>1,25 | -3,0<br>7,8<br>2,4 | -1,6<br>13,4<br>6,1 | 4,1<br>17,4<br>10,35 | 6,7<br>21,2<br>13,95  | 8,5<br>25,5<br>17,0   | 10,6<br>24,6<br>17,6  | 8,6<br>21,3<br>14,95  | 0,9<br>14,2<br>7,55 | -1,9<br>7,9<br>3    | -4,4<br>3,5<br>-0,45 | 7,6              | 18,05              |
| S <sup>t</sup> Pierre de Chartreuse 945m | M 3,1                        | 2,5                 | 1,2                | 5,0                 | 9,4                  | 12,1                  | 16,3                  | 16,8                  | 14,6                  | 7,3                 | 3,1                 | 0,0                  | 7,6              | 16,8               |
| Semnoz 1650m                             | m1 -2,3<br>m2 1,4<br>M -0,45 | -3,8<br>1,4<br>-1,2 | -2<br>1<br>-0,5    | 0<br>3,1<br>1,55    | 2,1<br>5,4<br>3,35   | 4,6<br>8,8<br>6,7     | 8,9<br>14,3<br>11,6   | 10,8<br>13,6<br>12,2  | 7,6<br>12,0<br>9,8    | 2,3<br>6,2<br>4,25  | -2,2<br>1,0<br>-0,6 | -5,2<br>-2<br>-3,6   | 3,6              | 15,8               |

les températures soulignées ont été établies par corrélation  
(Données de M. Lepiller)

1976

| Station                                  | J                            | F                  | M                   | A                   | M                    | J                     | J                     | A                     | S                    | O                   | N                  | D                  | moy.<br>annuelle | ampli.<br>annuelle |
|------------------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Challes 291m                             | m1 -3,9<br>m2 6,0<br>M 1,05  | -1,8<br>7,8<br>3,0 | -1,2<br>11,2<br>5,0 | 2,3<br>15,3<br>8,8  | 7,9<br>21,5<br>14,7  | 11,4<br>23,1<br>19,35 | 13,7<br>27,4<br>20,55 | 11,3<br>25,2<br>18,25 | 8,6<br>19,8<br>14,2  | 6,6<br>15,6<br>11,1 | 0,7<br>9,1<br>4,9  | -2,8<br>4,2<br>0,7 | 10,45            | 21,25              |
| Lescheraines 588m                        | m1 -9,3<br>m2 5,0<br>M -2,15 | -6,1<br>6,9<br>0,4 | -5,0<br>9,9<br>2,45 | -2,0<br>14,0<br>6,0 | 2,9<br>20,0<br>11,45 | 6,0<br>26,6<br>16,3   | 9,7<br>26,1<br>17,9   | 6,0<br>23,9<br>14,85  | 4,5<br>19,0<br>11,75 | 2,9<br>15,4<br>9,15 | -3,0<br>7,2<br>2,1 | -7,0<br>3,0<br>-2  | 7,35             | 20,05              |
| S <sup>t</sup> Pierre de Chartreuse 945m | M 0,1                        | 2,3                | 3,2                 | 6,0                 | 11,4                 | 16,2                  | 16,7                  | 15,0                  | 11,7                 | 9,3                 | 2,5                | 1,0                | 7,95             | 16,8               |

| moyenne 1947 - 1976 | J                           | F                  | M                  | A                   | M                   | J                     | J                    | A                     | S                 | O                    | N                 | D                   | moy.<br>annuelle | ampli.<br>annuelle |
|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| Challes 291m        | m1 -3,5<br>m2 5,0<br>M 0,75 | -2,6<br>7,6<br>2,5 | 0,0<br>12,2<br>6,1 | 3,4<br>16,3<br>9,85 | 7,4<br>20,4<br>13,9 | 10,9<br>23,8<br>17,35 | 12,8<br>26,4<br>19,6 | 12,5<br>25,6<br>19,05 | 9,8<br>22,2<br>16 | 5,3<br>16,4<br>10,85 | 1,2<br>9,8<br>5,5 | -2,4<br>5,5<br>1,55 | 10,25            | 20,35              |

m1 moyenne des minima  
m2 moyenne des maxima  
M température moyenne mensuelle

fig.9 TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES

## VI- LA DUREE D'INSOLATION ANNUELLE.

En moyenne, la durée d'insolation annuelle est de 1965 heures à Challes-les-Eaux. Si elle fut de 1846 heures en 1975, elle est certainement nettement plus élevée d'août 1975 à juillet 1976, du fait de la sécheresse.

## VII- L'EVAPOTRANSPIRATION.

Les phénomènes d'évaporation et de transpiration présentent une certaine importance, étant donné le développement considérable de la végétation (arbres et plantes) et la constitution d'un sol sur les aires calcaires et cela malgré la présence de lapiez. Si l'évaporation se produit à partir du sol et de la végétation, la transpiration ne concerne que la végétation, qui continue à évaporer l'eau puisée dans le sol, lorsque la pluie a cessé.

Afin de chiffrer l'importance de ces phénomènes qui dépendent essentiellement de la température, donc de l'altitude, on considèrera la zone centrale du plateau du Mont Revard représentée par la station du Revard (Bois brûlé, alt. 1365m). De nombreuses formules de calcul ont été proposées ; parmi celles-ci on en choisira trois qui donnent une valeur globale pour tous les phénomènes liés à l'évaporation.

### 1°/- Evapotranspiration annuelle selon la formule de Turc :

Elle s'exprime en fonction de la température et des précipitations annuelles :

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

(en mm/an)

P = Précipitations annuelles en mm = 1445mm

T = Température annuelle en °C = 5°3

L = 300 + 25T + 0,05T<sup>3</sup>

E = 423mm/an

### 2°/- Evapotranspiration selon Coutagne :

- La première formule est une relation empirique fonction de la température :

$$D = 210 + 30T$$

D = déficit d'écoulement en mm/an (= évapotranspiration)

T = température moyenne annuelle en °C = 5°3

D = 369mm/an

- La deuxième formule fait intervenir pluviométrie et température :

$$D = P - \lambda P^2 \quad D = \text{déficit en m/an}$$

$$P = \text{précipitations annuelles en m/an} = 1,445 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T} \quad T = \text{température moyenne annuelle en } ^\circ\text{C}$$

$$T = 5^\circ 3$$

Cette formule est valable jusqu'à  $P = \frac{1}{2\lambda}$

Si  $P > \frac{1}{2\lambda}$ , on admet que le déficit est constant et égal à celui correspondant à  $P = \frac{1}{2\lambda}$

$$\text{Comme c'est le cas ici, on obtient : } D = \frac{1}{4\lambda} = 0,20 + 0,035 T$$

$$D = 0,385 \text{ m/an} = 385 \text{ mm/an}$$

### 3°/- Evapotranspiration potentielle selon Serra :

L'évapotranspiration potentielle représente l'évapotranspiration, lorsque l'alimentation en eau n'est pas un facteur limitant. Ainsi elle n'est égale à l'évapotranspiration réelle que si la réserve en eau du sol est suffisante. Dans le cas contraire, le sol se dessèche de telle sorte, qu'à partir d'un certain déficit en eau, l'évapotranspiration diminue pour tendre vers zéro.

Serra a obtenu, en simplifiant les équations de Thornthwaite :

$$e = 1,6 \left( \frac{10 T}{I} \right)^a \quad \text{avec} \quad a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

$e$  = potentiel d'évapotranspiration mensuel en cm.

$$\text{et} \quad I = \int_1^{12} i$$

$T$  = température moyenne mensuelle en  $^\circ\text{C}$ .

$$i = \text{indice mensuel} = 0,09 T^{3/2}$$

$I$  = indice de chaleur

On obtient donc douze valeurs mensuelles de l'évapotranspiration. Appliquée à la station du Semnoz pour les sept mois de 1975 à température moyenne mensuelle positive, cette formule donne les valeurs suivantes : avril : 17,7mm, mai : 33,3mm, juin : 50,3mm, juillet : 74,4mm, août : 77,1mm, septembre : 66mm, octobre : 36,5mm, soit au total 355mm. A cela il faut ajouter le déficit correspondant aux cinq mois d'hiver. Celui-ci est difficilement chiffrable ; il faudrait tenir compte des périodes de redoux, qui ne sont pas rares à ces altitudes et accompagnées généralement d'un fort vent chaud de secteur Sud ou Sud-Ouest. De plus il y a le problème, fort complexe, de l'interception de la neige par la couverture forestière.

J.P. TRIPET (1973) note que la réserve nivale en forêt, (Bassin de la source de l'Areuse - Jura suisse-) exprimée en lame d'eau équivalente est environ deux fois plus faible qu'en terrain découvert, et il ajoute que des observations semblables ont été faites par LEONARD et ESCHNER (1968) qui attribuent cette différence de lame d'eau équivalente à un phénomène d'interception suivie d'évaporation.

#### 4°/- Discussion des formules :

En considérant les résultats obtenus, on note une certaine homogénéité dans l'application des différentes formules. Celle de Serra qui donne certainement la valeur la plus forte concerne l'évapotranspiration potentielle, forcément supérieure à l'évapotranspiration réelle, ou à la limite égale. Elle laisse entrevoir toute l'importance que peut avoir la distribution annuelle des précipitations et leur intensité. (On note par exemple 50mm d'évapotranspiration potentielle en juin 1976 contre seulement 20 à 30mm de précipitations).

Il ne faut pas perdre de vue que les résultats donnés par les formules ne sont que des estimations assez imprécises. L'erreur admise serait de l'ordre de 20%. Effectivement, chaque cas est un cas bien particulier étant donné le nombre et la diversité des paramètres qui régissent cette évapotranspiration et qui sont liés au climat, à la nature des terrains, sols et espèces végétales.

Une autre approche de ces phénomènes est basée sur la connaissance du cycle hydrologique. Grâce aux mesures de précipitations et de débits sur un même bassin versant, il est possible d'obtenir une valeur pour le déficit d'écoulement. Au point de vue régional, on relève les données suivantes (Schoeller) :

| Bassin versant             | Superficie | Période d'observation | Pluviométrie annuelle en mm | Débit moyen annuel en m <sup>3</sup> /s | Déficit d'écoulement annuel en mm et pourcentage par rapport aux précipitations |
|----------------------------|------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Isère                      | 11750      | -                     | 1500                        | 990                                     | 510 (34%)                                                                       |
| Ain                        | 2818       | -                     | 1734                        | 1230                                    | 504 (29%)                                                                       |
| Doubs                      | 7719       | 1883 - 1910           | 1158                        | 631                                     | 527 (45%)                                                                       |
| Saône (St Albin)<br>(Lyon) | 3533       | 1890 - 1910           | 901                         | 420                                     | 481 (53%)                                                                       |
|                            | 8881       | 1885 - 1910           | 926                         | 402                                     | 524 (56%)                                                                       |
| Bourne Vernaison           | 576        | 1908 - 1922           | 1558                        | 1122                                    | 436 (28%)                                                                       |

Le bassin versant de la Bourne-Vernaison (Vercors) et celui de l'Ain sont les plus représentatifs de la zone étudiée, du fait de leur dominante karstique, de leur climat, altitude et végétation.

En définitive, on peut donc estimer le déficit d'écoulement annuel, pour cette étude, à environ 30% de la hauteur pluviométrique annuelle. Cela représenterait ainsi, pour la pluviométrie mesurée à la station du Revard, environ 430mm.

### VIII- LE RUISSELLEMENT ET LES EAUX SOUTERRAINES. (voir fig. n°16 p.65)

En raison des vastes surfaces d'affleurement des niveaux calcaires karstifiés, le réseau hydrographique est très peu développé.

Sur les aires calcaires l'infiltration est immédiate. Elle peut être différée sur les niveaux les plus marneux où s'effectuent de courts ruissellements, disparaissant généralement dans des entonnoirs de dissolution.

Les exutoires sont répartis tout autour du plateau ; néanmoins les exurgences principales se trouvent au Nord et au Sud, à l'intersection des circulations souterraines, respectivement avec la cluse du Chéran et avec celle de Chambéry. Seuls les débits de l'exurgence de la Doria ont pu être suivis de manière suffisamment serrée pour pouvoir effectuer un bilan hydrologique. On consultera celui-ci dans le chapitre consacré à l'étude hydrodynamique des circulations souterraines.

### IX- CONCLUSION.

Le plateau du Mont Revard bénéficie d'un climat humide et relativement froid, du fait du relief. La période d'étude (août 1975 - juillet 1976) a été marquée par un déficit important de la pluviométrie (25 à 30% suivant les stations). Ce déficit annuel résulte uniquement de la faiblesse des précipitations depuis le mois de décembre 1975 jusqu'à la fin de cette étude, avec une pointe de sécheresse exceptionnelle durant les mois de mai et juin 1976.

On peut ainsi estimer que lors d'une année normale, il tombe entre 1600mm et 1800mm de précipitations aux alentours de 1400m d'altitude (altitude moyenne du plateau), avec environ 40% du total sous forme neigeux.

Sur le plan des températures, la période d'étude correspond assez bien à une année moyenne, hormis le mois de juin 1976 particulièrement chaud.

Enfin, l'évapotranspiration calculée par les formules classiques semble sous-estimer la valeur réelle à cause d'une interception, très importante des précipitations par la végétation et par le sol.

CHAPITRE 2

---

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

---

POSSIBILITES HYDROGEOLOGIQUES DES FORMATIONS ET ROLE DE LA  
TECTONIQUE.

-----

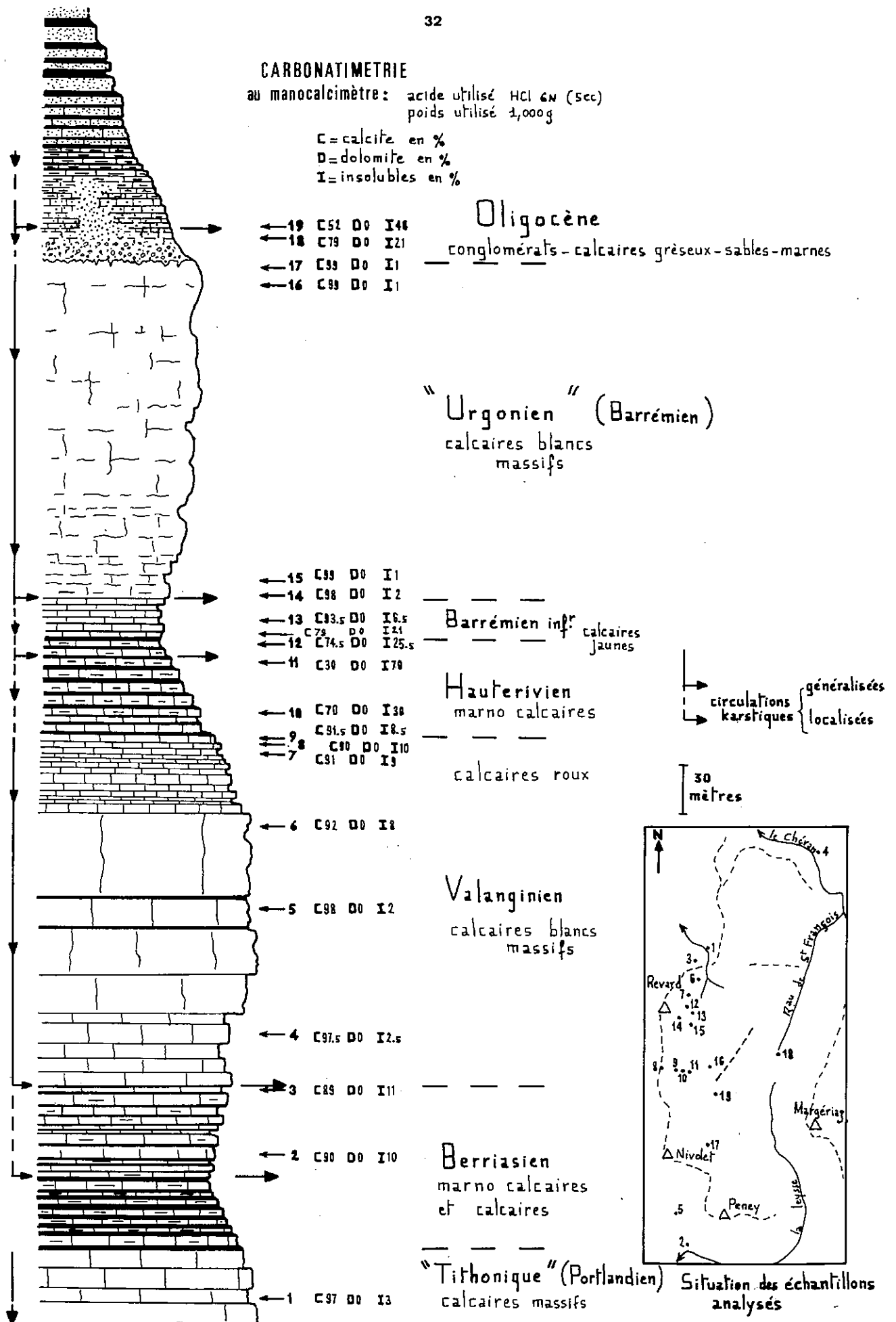


fig.10 STRATIGRAPHIE-LITHOLOGIE-CIRCULATIONS KARSTIQUES

## GEOLOGIE DU PLATEAU DU REVAR

### Possibilités hydrogéologiques des formations et rôle de la tectonique.

-----

Après avoir vu les paramètres hydrologiques, nous allons envisager les rôles hydrogéologiques des formations rencontrées, puis l'effet de la tectonique, qui se combine à la nature des terrains, pour déterminer les ressources en eau de la région.

#### I- STRATIGRAPHIE, LITHOLOGIE ET ROLE HYDROGEOLOGIQUE.

Le rebord occidental des Bauges a subi, à des époques variables suivant les points, des vicissitudes de sédimentation, à peu près calquées sur celles du Jura méridional. Cela se traduit du point de vue lithologique par des faciès sub-alpins à influences jurassiennes plus littorales, se manifestant, notamment au Valanginien moyen, par de puissants dépôts calcaires.

Schématiquement, la région étudiée est caractérisée par une succession de puissants escarpements calcaires (Tithonique, Valanginien et Urgonien) séparés par des talus marneux (Berriasien et Hauterivien).

Nous allons considérer plus en détails les faciès rencontrés, et nous en déduirons le rôle susceptible d'être joué par chaque formation, dans l'hydrologie régionale.

Les différentes formations sont examinées, depuis les plus anciennes, jusqu'aux plus récentes.

#### 1°/- Le Kimméridgien supérieur - Portlandien :

##### a- Lithologie.

Il est représenté par un ensemble de bancs calcaires sublithographiques,

décimétriques à métriques, bien lités et de couleur beige.

Cet ensemble forme la "barre tithonique" puissante d'une centaine de mètres. Du fait de sa position stratigraphique, cet étage constitue le soubassement du plateau du Mont Revard. Il ne sera donc rencontré que sur la bordure occidentale du secteur étudié, c'est-à-dire dans la dépression Chambéry - Aix-les-Bains.

#### *b- Rôle hydrogéologique.*

Si la lithologie est favorable à une karstification, la faible étendue des affleurements cantonne le développement des circulations souterraines dans des limites fort modestes.

Ainsi, les réseaux de type karstique affectant ce niveau présentent des exutoires dont le débit varie de quelques litres/seconde à la centaine de litres/seconde.

### 2°/- Le Berriasien :

#### *a- Lithologie.*

Sur les contreforts de la chaîne Nivolet - Revard, il forme un talus très raide, recouvert par les éboulis des calcaires valanginiens. Aussi il est difficile d'observer une coupe complète du Berriasien.

Au Sud du massif étudié (lieu-dit "le Bout du Monde"), on distingue à la base, une série monotone de petits bancs calcaires décimétriques, à pâtime blanchâtre, alternant très régulièrement avec des marnes de même épaisseur. Au-dessus apparaît un ensemble de gros bancs de calcaires gris, d'épaisseur généralement métrique, jointifs ou séparés par de minces lits de marnes feuilletées. Ce Berriasien se termine par des marno-calcaires en strates peu épaisses.

En remontant vers le Nord, sur le talus de la bordure occidentale des Bauges, les couches berriasienne montrent des formations assez particulières. Ce sont les "calcaires grossiers de Montagnole", souvent bicolores, se présentant sous forme de grandes lentilles, passant sur leurs bords à des niveaux plus marneux.

Au Nord du Revard et dans la cluse du Chéran, on ne note plus guère qu'une puissante série de calcaires argileux sombres à interbancs marneux.

L'épaisseur totale du Berriasien est estimée à environ cent cinquante mètres.

b- Rôle hydrogéologique.

- Trois comportements sont à envisager :

b1: Circulations importantes.

L'exsurgence du "Bout du Monde" est située à la base des gros bancs calcaires composant l'ensemble supérieur précédemment décrit. La série des petits bancs calcaires et marnes joue le rôle de niveau imperméable.

b2: Circulations réduites.

A une échelle plus réduite, on observe de petites sources liées à la fracturation et intéressant les niveaux les plus calcaires (Gorge de la Leysse, au Sud).

b3: Rôle de niveau imperméable.

Dans la partie Nord du massif, les exsurgences du Pont de Bange et de la Meune se trouvent à la base des calcaires valanginiens. Le passage valanginien - berriasien est ici assez net. Il se fait par réduction des interbancs marneux du sommet du Berriasien. De plus, les bancs calcaires prennent une teinte plus claire tout en devenant moins argileux.

3°/- Le Valanginien :

a- Lithologie.

Nous sommes ici dans une zone de transition entre les faciès jurassiens et les faciès subalpins. Ainsi le faciès "marbre bâtard" du Jura est largement représenté dans notre région.

On distingue deux ensembles calcaires formant le Valanginien :

- A la base, une puissante falaise de calcaires zoogènes en gros bancs, à grain fin, de couleur claire et d'une centaine de mètres d'épaisseur.

- Au-dessus, une série de petits bancs de calcaires roux, grossiers, spathiques, parfois bicolores, formant un talus raide, avant les pentes douces de l'Hauterivien. Vers le sommet, on note des passées de silex noirs ou roux alignés parallèlement à la stratification.

L'ensemble peut être estimé à environ cent cinquante mètres d'épaisseur.

Il convient de noter que la barre calcaire valanginienne est très semblable à la barre calcaire urgonienne. Toutefois, on remarque quelques interbancs

marneux faisant apparaître des vires dans la falaise valanginienne.

Les calcaires blancs coralligènes qui constituent la majeure partie du Valanginien passent latéralement, en allant vers le Sud ou vers l'Est, à des faciès moins littoraux.

Ainsi, au "Bout du Monde", ces niveaux sont représentés par des calcaires jaunes, assez durs, d'une soixantaine de mètres d'épaisseur surmontés par des assises plus marneuses où alternent généralement des calcaires bleus en gros bancs, roux extérieurement et des lits de marnes feuilletées.

Vers l'Est, sous le Mont Margérian, on ne distingue plus qu'une puissante série monotone de marno-calcaires roux.

#### *b- Les circulations.*

Sur la bordure occidentale du plateau du Mont Revard où affleure le Valanginien, on relève la présence de nombreux indices karstiques : lapiez, dolines, gouffres. L'infiltration des eaux est immédiate. On peut donc s'attendre à des circulations souterraines de type karstique bien développées, donnant lieu à d'importantes exurgences, telles celles de la Meune, du Pont de Bange et du Bout du Monde. Cette dernière, malgré sa situation dans le Berriasien, ne peut être alimentée que par des circulations valanginiennes. L'exurgence du Pont de Bange est la plus importante du massif. Son débit, en crue, peut dépasser 10m<sup>3</sup>/s.

#### 4°/- L'Hauterivien :

##### *a- Lithologie.*

La limite entre le Valanginien et l'Hauterivien est assez floue, le passage se faisant souvent très progressivement.

A la base, l'Hauterivien se présente sous la forme de calcaires marneux et marnes bleutées, avec intercalations de calcaires spathiques bicolores.

Au-dessus, on trouve une série de petits bancs de calcaires marneux bleus, à débit caractéristique, en boules, et séparés par des bancs de même épaisseur de marnes feuilletées. L'ensemble se termine par des bancs plus calcaires, généralement séparés par de minces niveaux marneux.

L'épaisseur de l'Hauterivien est de 70 mètres.

Remarque :- La partie supérieure est très riche en Ostréidés (*Exogyra Couloni*) et en Oursins (*Toxaster Retusus*).

- Les résidus de l'altération par décalcification des marno-calcaires forment une couche d'argile jaune atteignant un mètre d'épaisseur et déterminant l'existence d'immenses alpages parsemés de marécages.

*b- Un rôle hydrogéologique complexe.*

*b1: Les circulations réduites.*

Partout où affleure l'Hauterivien, on note de petites sources à débit d'étiage de l'ordre du l/mn, utilisées par les alpagistes.

Ces circulations sont liées aux petites fractures affectant surtout les niveaux les plus calcaires. L'émergence se produit au contact des couches marneuses sous-jacentes.

Les sources drainant la partie supérieure de l'Hauterivien ont souvent des rapports de débit crue/étiage élevés. Ainsi, elles peuvent tarir ou atteindre plusieurs l/s. Cela est dû au fait que ces circulations concernent des niveaux, somme toute, assez calcaires et qui plus est, surmontés généralement par les petits bancs du Barrémien inférieur. Les phénomènes de dissolution, en élargissant les fractures ont ainsi facilité le drainage, tout en réduisant la capacité d'emmagasinement de ces terrains.

*b2: Les circulations importantes.*

On relève également l'existence de circulations en chenaux de type karstique. Ainsi, l'exurgence de Fontaine Noire se trouve dans l'Hauterivien supérieur, à la limite de niveaux plus marneux sous-jacents, en grande partie cachés par le recouvrement glaciaire (nombreux fossiles du genre *Toxaster* et *Exogyra* Couloni dans la grotte servant d'exutoire au réseau karstique Urgonien de Fontaine Noire - Tome IV de "Grottes de Savoie" du Spéléo Club de Savoie). Mais plus étonnant est la présence de pertes et d'entonnoirs de dissolution affectant les calcaires marneux hauteriviens.

Au "Pas du Rebollion", une perte (883,54 - 80,82 - 1415) se situe dans la série des petits bancs alternant de calcaires marneux et marnes. Cette circulation en interstrates peut atteindre la dizaine de l/s.

Au lieu-dit "Le Molard", la présence d'un vaste et profond entonnoir de dissolution (887,35 - 82,90 - 1325 - 40 mètres de diamètre, 10-15 mètres de profondeur) dans l'Hauterivien supérieur, avec perte de circulation aérienne, témoigne de l'existence de drains importants.

### b3: Le rôle de niveau imperméable.

Les bassins versants karstiques "urgoniens" disposant d'exutoires importants qui leur sont propres (La Doria, Préronge), nous amènent à penser que le rôle d'imperméable lié généralement à l'Hauterivien dans les massifs subalpins (notamment en Chartreuse et Vercors) est également vérifié ici.

### b4: Conclusion.

Le comportement hydrogéologique de l'Hauterivien n'est pas net. Il semble difficile de lui attribuer un rôle unique.

Ainsi, selon les niveaux lithologiques concernés, selon la structure géologique et la pente topographique, cette formation pourra apparaître imperméable, perméable en petit, perméable en grand.

## 5°/- Le Barrémien à faciès urgonien :

Dans les Bauges, comme dans les massifs subalpins septentrionaux, l'Urgonien forme les principaux sommets et joue un rôle majeur dans la morphologie et dans l'hydrogéologie.

### a- Lithologie.

On distingue à la base une série de calcaires jaunes, parfois bicolores, assez grossiers, en bancs décimétriques et pouvant comporter des zones silicifiées (cherts). Son épaisseur est d'une dizaine de mètres. Cette série passe progressivement à des calcaires jaunes, très clairs, graveleux, devenant de plus en plus mals lités. On arrive ainsi aux calcaires urgoniens blancs et massifs à rudistes et orbitolines.

Ce faciès urgonien présente de rapides variations liées à son mode de dépôt pararécifal. Son épaisseur maximale atteint 200 mètres.

### b- Les circulations.

Classiquement l'Urgonien est le domaine de la spéléologie régionale. C'est dire l'ampleur atteinte par le développement des circulations de type karstique.

Ces calcaires forment la majeure partie de la surface du plateau du Mont Revard et recueillent ainsi l'essentiel des précipitations.

La fracturation a permis l'enfoncement des eaux et par là même, l'élar-

gissement des conduits par dissolution. Enfin la structure assez simple de type monoclinale a entraîné le développement de vastes réseaux de drainage bien organisés.

Les principales exurgences sur le secteur étudié sont :

- au Nord, celle de Prérrouge drainant l'Urgonien de la Montagne de Bange et du Bois de Prépoulain.
- au Sud, celle de la Doria drainant une partie de l'Urgonien du plateau du Revard. Leur débit respectif atteint plusieurs m<sup>3</sup>/s en période de crue.

On peut encore citer à l'Est, dominant le plateau du Mont Revard, le monoclinale urgonien du Mont Margériaz aux nombreuses et profondes "tannes", drainé par l'exurgence du Pissieux.

#### 6°/- Le Tertiaire :

##### a- Caractères physiques.

- A l'Eocène, la région étant émergée, on ne trouve que des faciès continentaux, sidérolithiques, sous forme de poches d'argiles rouges et sables grossiers qui emplissent les diaclases de l'Urgonien.

- Puis vient un ensemble fluvio-lacustre composé d'argiles, grès et conglomérats. Au-dessus s'est déposé le Nummulitique marin dans lequel on distingue généralement de bas en haut, un ensemble calcaire, un ensemble marneux et un ensemble gréseux. Ces formations à caractère très littoral comportent de nombreuses variations latérales de faciès. Ainsi, le Nummulitique calcaire comprend les calcaires à Polypiers, les calcaires gréseux à pectens et petites nummulites (ou encore "grès de la Doria") et les grès et sables de Plaimpalais. Son épaisseur est très variable ; elle atteint au maximum une vingtaine de mètres.

- Le Nummulitique marneux d'âge Sannoisien est constitué, de bas en haut par des marnes à foraminifères et des "schistes" à écailles de poissons (Melettes). Progressivement, ces couches deviennent plus gréseuses et font place aux grès des Déserts ou "Nummulitique gréseux" d'âge Stampien. Ceux-ci passent tout aussi progressivement à la "Molasse rouge" aquitanaise, laguno-lacustre, formée d'une alternance de bancs de grès verts ou rouges mal consolidés et de couches d'argiles bariolées.

##### b- Rôle hydrogéologique.

La lithologie du tertiaire, avec ses niveaux peu épais et discontinus ap-

paraît peu propice à la formation d'aquifères importants.

- Les niveaux de sables siliceux donnent de petites sources (de l'ordre du 1/mn) bien filtrées (Butte de Molard Vives). Les niveaux marneux sont imperméables. Quant aux calcaires gréseux fissurés, ils permettent des circulations qui, sans être négligeables, demeurent toutefois assez modestes.

- La principale émergence située dans ces derniers niveaux est la source de l'Empereur qui présente des caractères propres aux émergences de type karstique, c'est-à-dire de grandes variations du débit, se produisant de manière brutale.

Remarque : La molasse rouge est responsable d'importants glissements de terrain (versant occidental du Mont Margériaz).

En effet, les niveaux sablo-gréseux mal consolidés, à forte porosité, facilitent les circulations d'eau, et par la même, le glissement des argiles bariolées sous-jacentes. Il en résulte un écroulement de pans gréseux, qui sont entraînés, par la suite, dans des coulées boueuses.

- Ces glissements prennent une grande ampleur dans la vallée synclinale du Noyer qui, sous un recouvrement de moraines argileuses, est remplie, en majeure partie, de molasse aquitanienne. On y reconnaît des glissements anciens, plus ou moins recouverts par des coulées plus récentes. Souvent ils emportent avec eux la couverture d'éboulis voire des cônes d'éboulis bien conservés (Combe - Buisson).

#### 7°/- Le Quaternaire :

On ne rencontre que très peu de matériel d'origine quaternaire sur le plateau même du Mont Revard. Par contre, il tapisse largement ses bordures. Il s'agit essentiellement d'éboulis localisés à la base des falaises valanginiennes ou urgoniennes et de moraines, recouvrant largement les terrains jusque vers 1000 mètres d'altitude.

Les sources liées à ces terrains sont pour la plupart situées sur le versant occidental du Margériaz où les formations quaternaires sont les mieux représentées. On trouve là des éboulis anciens intriqués avec des moraines à éléments calcaires, d'origine locale. Les sources issues de ces matériaux présentent un débit souvent intéressant qui explique leur utilisation pour l'alimentation en eau des Déserts ou de la Féclaz.

### 8°/- Conclusion :

Les carbonatimétries au manocalcimètre (fig. n°10 p.32) montrent que le Tithonique, Valanginien moyen et Barrémien sont formés essentiellement de calcaires purs, que le Berriasien supérieur et les premiers niveaux du Barrémien comprennent surtout des calcaires argileux (5 à 35% d'argile) ; enfin que l'Hauterivien et le Tertiaire sont constitués de calcaires argileux et marnes (35 à 65% d'argile).

Du point de vue des possibilités hydrogéologiques liées à la lithologie des différentes formations, on retiendra l'existence de quatre niveaux superposés de circulations souterraines de type karstique. Il s'agit de circulations affectant les ensembles calcaires tithonique, valanginien, urgonien et tertiaire.

Etant donné les affleurements très largement prédominant des calcaires valanginiens et urgoniens, sur notre secteur, ce seront les circulations liées à ces terrains qui seront les plus intéressantes.

## II- TECTONIQUE ET ROLE DANS LES CIRCULATIONS KARSTIQUES.

Si la lithologie permet l'existence de circulations souterraines en déterminant l'infiltration ou le ruissellement des eaux, la tectonique facilitera leur développement et orientera leur sens d'écoulement.

### 1°/- Éléments structuraux :

#### a- Structure générale des Bauges.

Dans le massif des Bauges, comme en Chartreuse et contrairement au Vercors, le relief est inversé par rapport à la tectonique : les synclinaux sont souvent perchés et les anticlinaux fortement érodés.

Le style est à la fois plus complexe et plus souple que dans le Jura. Le déversement général des plis à l'Ouest - Nord-Ouest s'est traduit par des plis failles avec d'importants chevauchements. Les flancs inverses sont très laminés. Les disharmonies de plissement sont fréquentes entre les plis des terrains jurassiques et crétacés du fait de la présence d'épais niveaux marneux. Enfin, des failles obliques de décrochement Nord-Est - Sud-Ouest accidentent l'ensemble.

D'une manière plus détaillée, nous allons considérer successivement d'Ouest en Est, les différentes structures rencontrées.

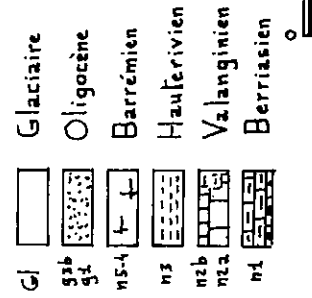
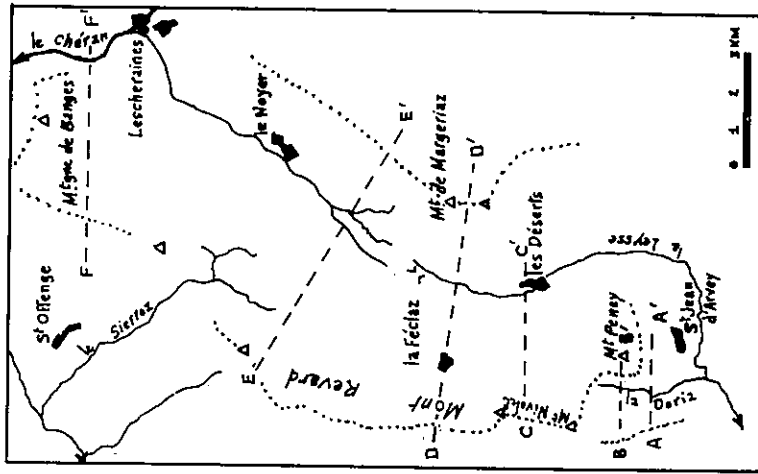
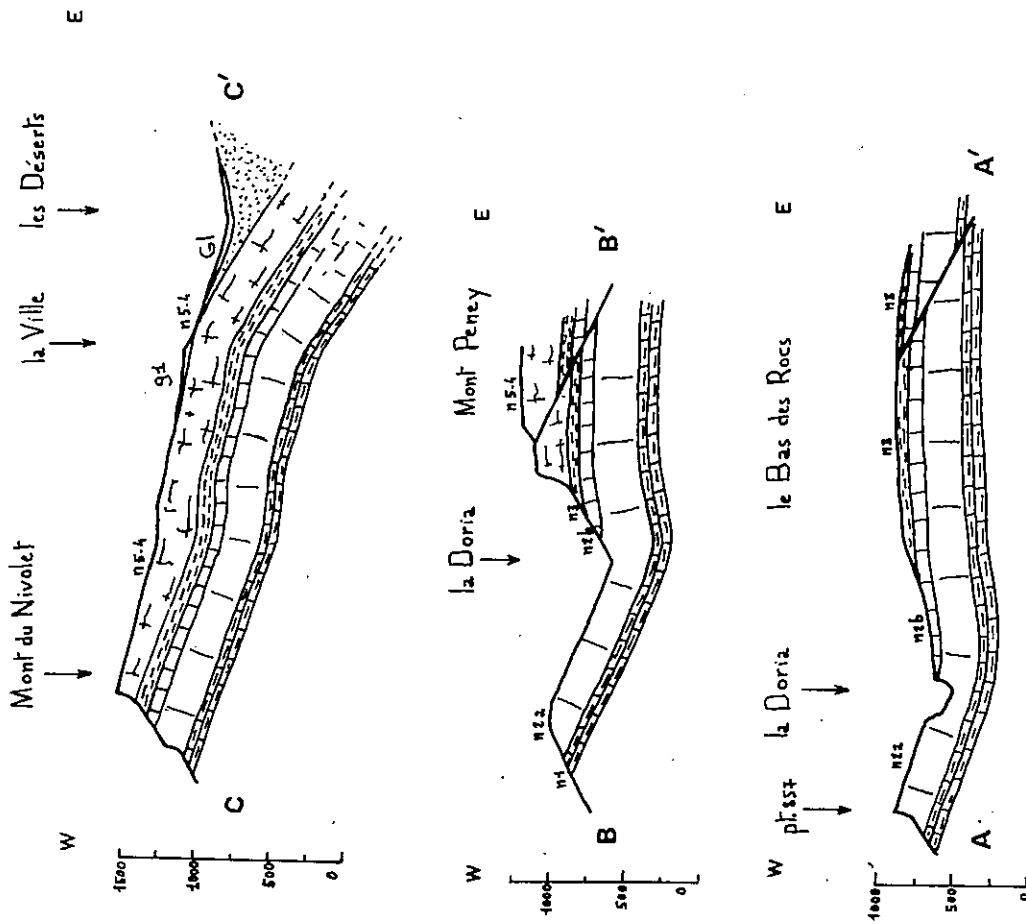
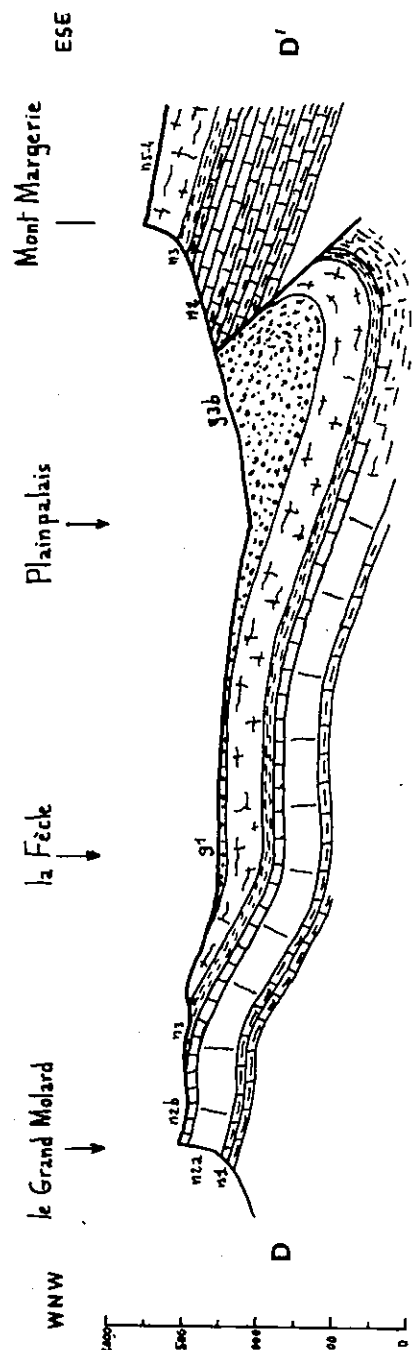
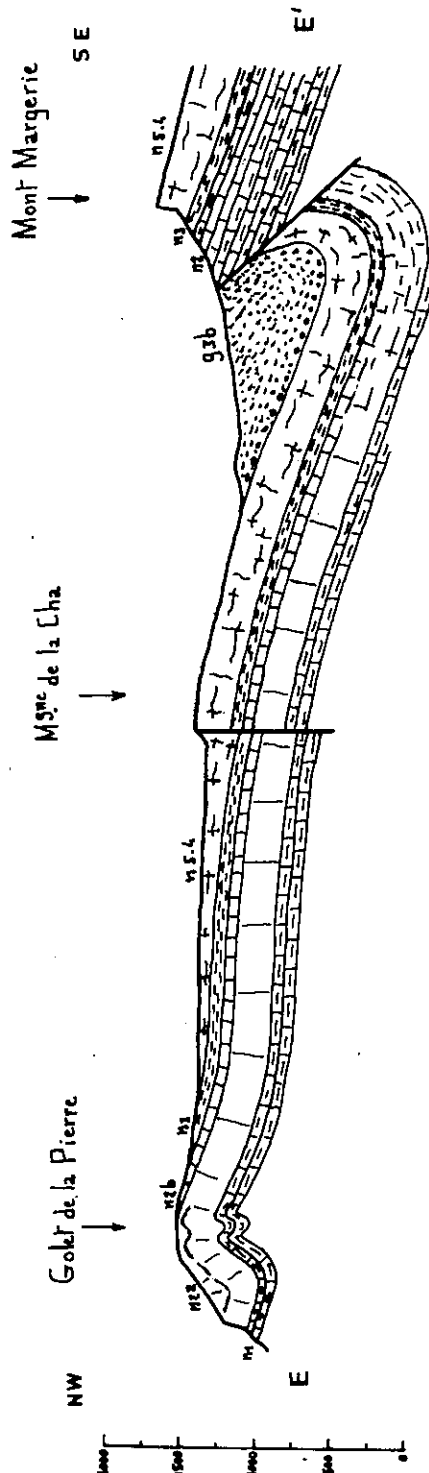
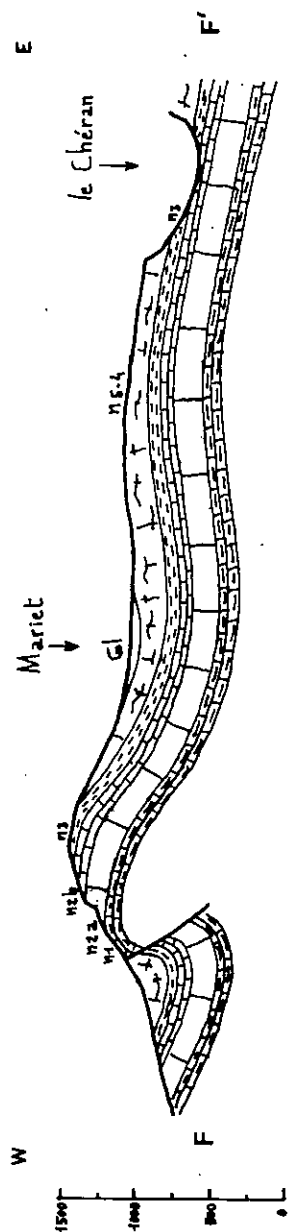


fig.11 COUPES SÉRIÉES  
DU PLATEAU DU MONT REVARO

Montagne de Bange



b : La bordure externe des Bauges.

Le rebord occidental forme le front subalpin, qui peut être considéré comme un anticlinorium déversé vers l'Ouest, sur la plaine molassique. N'observant toutefois nulle part de traces de flanc inverse, il est possible que le contact entre la molasse et la série jurassico-crétacée se fasse par faille subverticale.

- Au Sud du Mont Revard :

L'érosion a très largement échancré cet anticlinorium et l'on ne distingue guère plus que des falaises interrompues par des talus abrupts. Depuis la cluse de Chambéry, les couches s'élèvent rapidement vers le Nivolet, plus lentement du Nivolet au Sire et conservent ensuite à peu près la même altitude jusqu'au Revard.

- Sous le Mont Revard et la Tour des Ebats :

La carapace de l'anticlinorium est formée par les calcaires blancs valanginiens intensément plissés. C'est une cascade de plis plongeant vers le Nord et suffisamment érodés pour apparaître dans la morphologie sous la forme d'un versant raide. Du point de vue hydrogéologique, cette structure constitue un ensemble à part, drainé par l'exsurgence de la Meune.

- Au Nord du Mont Revard :

De nouveau l'érosion a été plus intense. On retrouve ainsi le même type de structure qu'au Sud du Revard, à savoir une falaise sommitale valanginienne prolongeant celle des Ebats et plongeant à l'approche de la cluse du Chéran. A l'aval, on note l'apparition d'un coeur anticlinal dans les calcaires tithoniques.

c : Le monoclinal "Nivolet-Revard-Bange".

Après le front subalpin, on trouve un vaste monoclinal formant le flanc Ouest du synclinal couché, dissymétrique des Déserts.

D'une manière plus détaillée, les crêtes formant l'amorce de ce monoclinal sont généralement constituées par les calcaires valanginiens qui plongent à l'Est, progressivement sous les marnes hauteriviennes, s'enfonçant elles-mêmes sous les calcaires urgoniens. Ces derniers forment l'essentiel du plateau du Mont Revard et sont affectés de quelques légères ondulations, avant de plonger franchement sous le Tertiaire du coeur synclinal qui forme la vallée des Déserts et du Noyer. L'ondulation la plus notable est celle constituant le replat synclinal de la Féclaz, sur lequel s'est avancée la transgression tertiaire.

Ce monoclinal est affecté de quelques grandes failles transverses qui rompent la monotonie de la structure en délimitant de vastes panneaux successivement effondrés vers le Sud. On distingue ainsi du Nord au Sud trois failles subverticales en escalier :

- La faille du col de la Cochette à Montagny, de direction N80°, faisant remonter la montagne de Bange par rapport au Bois de Prépoulain. Son rejet maximum, d'une soixantaine de mètres est atteint au col de la Cochette, où les calcaires roux du Valanginien supérieur arrivent au contact de l'Urgonien. Elle s'amortit progressivement en allant vers l'Est ; son rejet s'annulant pratiquement à la hauteur de Montagny. Les pendages de chaque compartiment étant convergents, cette faille a une valeur synclinale.

- La faille de la Roche de Prépoulain. Cette faille de direction N90° sépare le versant de Saint François de Sales du Bois de Prépoulain, en surélevant ce dernier. Son rejet de soixante dix mètres met en contact l'Hauterivien du compartiment Nord et l'Urgonien du compartiment Sud. A l'Ouest, elle se termine par une flexure dans le Valanginien (Ruisseau des Turrens), tandis qu'à l'Est, les dépôts glaciaires la masque, par leur recouvrement uniforme.

Les pendages de chaque compartiment étant divergents, cette faille prend la valeur d'un anticlinal transverse.

- La faille de la Magne. C'est une faille de direction N100° nettement moins visible dans la morphologie que les deux précédentes du fait d'un rejet plus faible. De plus, un placage de matériel glaciaire ainsi que les éboulis dûs au plan de faille ont largement contribué au nivellement de la rupture de pente. Néanmoins, vue du Nord-Est, on distingue assez bien les deux panneaux urgoniens qu'elle délimite.

Remarque : Comme dans les deux cas précédents, on retrouve des dépôts glaciaires plaqués contre le plan de faille. Ceci peut s'expliquer par le fait que le glacier ayant emprunté la vallée du Noyer en s'écoulant vers le Nord, est venu buter contre ces plans de faille, transverses à la vallée. Ceux-ci ont donc servi de véritables verrous glaciaires derrière lesquels se sont déposés des placages morainiques.

- Un accident de direction N40°, expliquant l'existence de la montagne de la Cha, a permis la conservation d'une longue et étroite bande de Tertiaire, sous la forme de calcaires gréseux et marnes à melettes (longueur : 3 kms, largeur :

une dizaine à une centaine de mètres). Son rejet, d'une quarantaine de mètres a interrompu, à l'Est, la partie centrale, tabulaire du plateau du Revard.

A ses extrémités Nord et Sud, on observe des zones intensément fracturées. Le système de fractures prédominant a une direction N80°.

#### d : Le synclinal des Déserts.

C'est le synclinal le plus occidental des Bauges. Il s'abaisse vers le Sud et vers le Nord à partir de la zone du col de Plaimpalais. Son abaissement axial vers le Nord entraîne sa fusion dans le grand synclinal de Leschaux.

Précédemment, nous avons vu la partie occidentale de ce synclinal. La partie orientale est bien différente ; très réduite, elle s'enfonce sous la série crétacée, chevauchante du Mont Margériaz. Ce dernier surgit brusquement au Sud du Chéran, du coeur du synclinal de Leschaux et s'élève très régulièrement vers le Sud, jusqu'à 1845 mètres d'altitude. On le considère généralement comme un anticlinal à coeur fortement érodé de telle sorte qu'il ne reste qu'un versant monoclinal à carapace urgonienne qui constitue l'amorce d'un deuxième grand synclinal, celui des Aillons. Cette série chevauchante dont le contact se fait du Nord au Sud, successivement sur tous les terrains, de la molasse rouge au Berriasien, a été considérée depuis longtemps comme un pli-faille. Récemment R. GUTIERREZ-COUTINO (1975) l'interprète comme un simple cisaillement, du fait de l'absence de traces du flanc inverse. S'il est bien difficile de trancher, on peut noter que la direction générale de ce contact anormal est N40°, c'est-à-dire la même que celle de la faille de la montagne de la Cha, située un peu plus à l'Ouest.

#### 2°/- Evolution géologique :

La sédimentation a été régulière jusqu'à l'Eocène où s'est produite la première émergence. Si des reliefs ont été démantelés au cours de l'Eocène, comme en témoignent les importants dépôts de conglomérats fluviolacustres à éléments locaux, il n'y a pas eu de véritable plissement. On n'observe effectivement pas de discordance entre les calcaires urgoniens et les premiers dépôts du Nummulitique marin.

C'est à cette époque Eocène qu'a eu lieu la première karstification de l'Urgonien. La phase de plissement du Massif des Bauges à la fin du Miocène a formé des anticlinaux et synclinaux de direction N10° à N20°. Une ondulation axiale a déterminé un "synclinal transverse" de direction N110°, emprunté par le Chéran.

Cette phase a également entraîné la formation des structures chevauchantes décrites précédemment. Postérieurement au plissement, des mouvements tardifs se sont révélés par des accidents cassants verticaux.

### 3°/- La fissuration :

Après avoir décrit les grandes failles qui découpent le secteur étudié en vastes panneaux, il convient d'examiner la fracturation à des échelles plus réduites. Ainsi, une étude par photos aériennes pourra mettre en évidence des fissures à l'échelle décamétrique ou hectométrique, tandis qu'une étude sur le terrain permettra de préciser la microfissuration à l'échelle métrique.

Notons, tout d'abord, que la génèse et l'orientation des plans de fracturation résultent de l'intensité et de la direction des contraintes subies par les calcaires qui forment l'ossature du plateau du Mont Revard.

On distingue, parmi ces plans de fracturation, des plans de cisaillement et des plans de distension. La contrainte maximale se trouve dans l'angle aigu formé par l'intersection des deux plans de cisaillement quelque soit la structure, monoclinale ou plissée. De plus, dans le cas d'un plissement anticlinal ou synclinal apparaissent des plans de distension, les uns parallèlement à la contrainte maximale, les autres perpendiculairement à cette même contrainte.

Dans le cas particulier du plateau du Mont Revard, la mise en oeuvre d'une étude de fissuration se heurte au problème du couvert végétal, essentiellement représenté par une épaisse forêt de conifères, auquel on peut ajouter un démantèlement général des affleurements en amas de blocs, sous l'effet conjugué du gel et d'une dissolution massive.

Néanmoins, que ce soit par photos aériennes ou par relevés sur le terrain, les directions majeures de la fissuration sont les mêmes. Liées au plissement, on note ainsi, sur la zone centrale du plateau du Mont Revard :

- des fissures de direction N0-N20 et N100-N120 qui peuvent être interprétées comme des fissures de distension ;
- des fissures de direction N70-N80 et N150  . Ces dernières sont toutefois nettement moins nombreuses. De telles fissures représenteraient des plans de cisaillement.

Toutes ces fissures sont verticales et souvent largement ouvertes, surtout les fissures de distension. Mais les phénomènes de dissolution liés à l'en-

foncement des eaux ont largement contribué à leur élargissement.

#### 4°/- Rôle de la tectonique dans les circulations souterraines.

##### a- Rôle du plissement.

La structure en plis de grande envergure a laissé les formations plus ou moins horizontales sur de vastes étendues. Une telle disposition est particulièrement favorable à l'établissement de grands réseaux karstiques. L'abaissement d'axe des structures vers le Sud et vers le Nord, de part et d'autre d'une zone centrale tabulaire explique la situation générale des émergences du Bout du Monde et de la Doria, au Sud et de celles de Bange et de Prérrouge, au Nord. Les ondulations synclinales favorisent l'établissement de collecteurs pour les eaux souterraines.

##### b- Rôle de la fracturation.

##### b1: Rôle des grandes failles.

Les grandes cassures affectant la carapace urgonienne du plateau du Mont Revard ont des directions approximativement parallèles ou transverses à l'axe du plissement.

La faille de la montagne de la Cha, parallèle à l'axe du plissement, facilite la pénétration des eaux en profondeur.

Les failles transverses situées dans la partie Nord du massif étudié entraînent du fait de leur rejet et de l'abaissement d'axe des structures un enfouissement graduel des circulations souterraines.

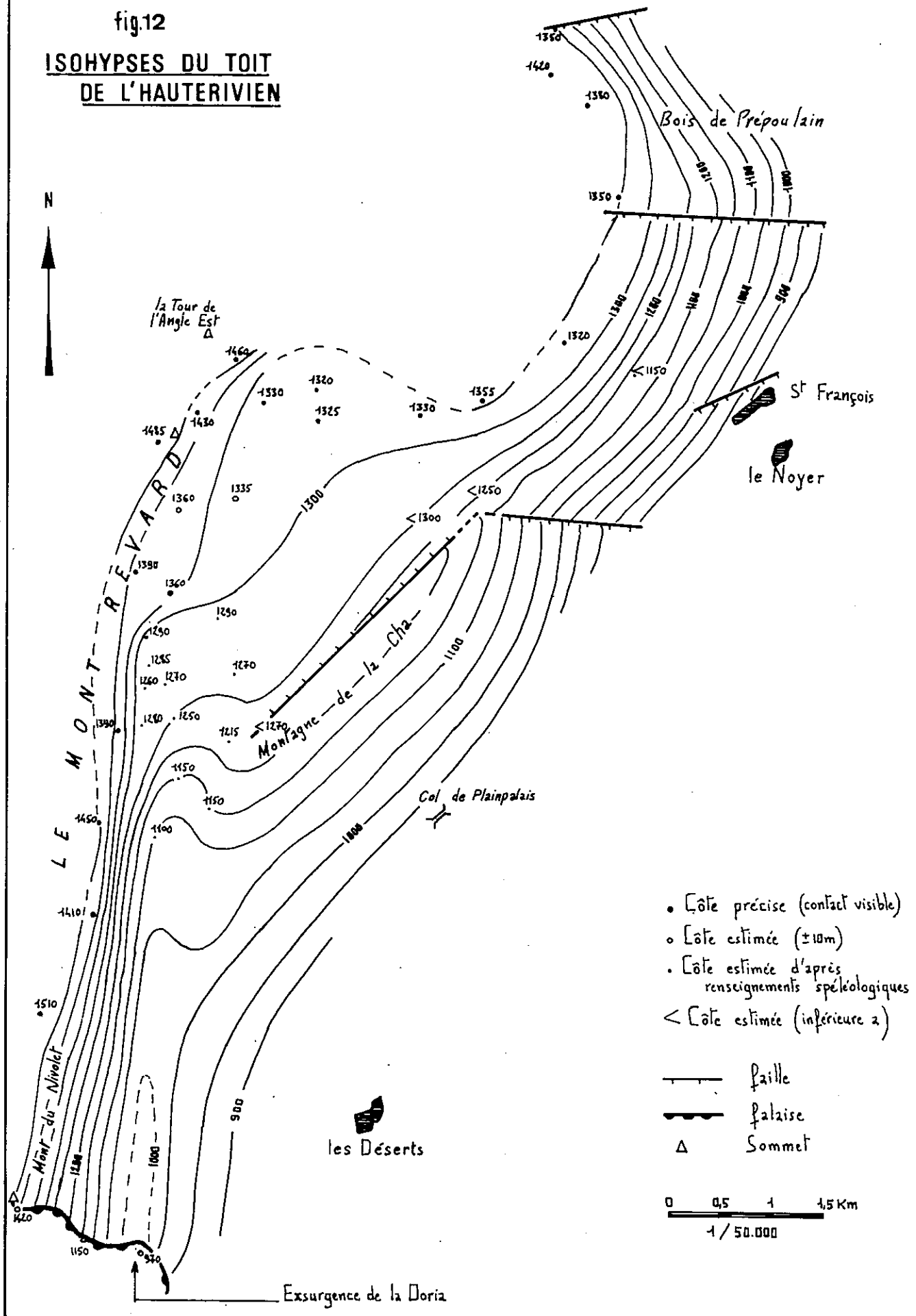
##### b2: Rôle de la fissuration.

A une échelle beaucoup plus réduite, la fissuration crée des plans privilégiés pour les circulations souterraines. Il en résulte une organisation hiérarchisée du réseau de drainage, selon l'importance de l'ouverture et de la longueur des diaclases. Un autre paramètre important est représenté par leur densité.

Sur le plateau du Mont Revard où les formations sont peu inclinées, voire horizontales, la fissuration est verticale, donc plus ou moins perpendiculaire aux joints. L'enfoncement des eaux est facilité et les joints permettent l'établissement de réseaux possédant une dominante horizontale dans leur sens de développement.

fig.12

# ISOHYPSES DU TOIT DE L'HAUTERIVIEN



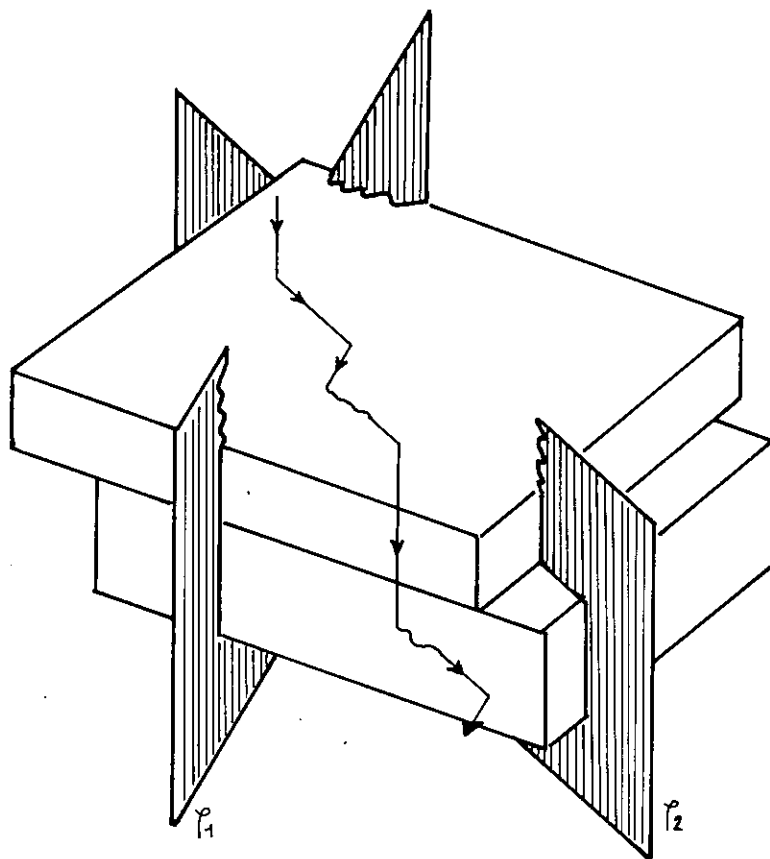


fig. n° 13 : Sens découlement des eaux pour une série peu inclinée et à fissuration verticale.

#### 5°/- Conclusion :

De l'étude lithostratigraphique et tectonique du plateau du Mont Revard, on retiendra essentiellement, d'un point de vue hydrogéologique, la possibilité de développement de grands réseaux karstiques, dans les niveaux calcaires valanginiens et urgoniens. La série marno-calcaire hauterivienne les séparant a un rôle qui reste encore assez énigmatique. Des continuités hydrauliques entre les deux grands ensembles calcaires ne sont pas à exclure.

De tels caractères hydrogéologiques, assez simples, rappellent beaucoup plus ce que l'on observe dans le Jura que dans les autres massifs subalpins septentrionaux, ou même qu'à l'intérieur des Bauges où la lithologie est différente et la tectonique plus intense.

### CHAPITRE 3

#### MISE EN EVIDENCE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES PAR TRACAGES

## MISE EN EVIDENCE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES PAR TRACAGES

La méthode de traçage est l'un des plus anciens moyens d'investigation des aquifères karstiques.

Utilisée le plus souvent pour mettre en évidence des relations entre pertes et exurgences, elle permet également d'apporter des renseignements sur la structure et le fonctionnement hydrodynamique de ce type d'aquifère.

Cela nécessite, non seulement de nombreuses expériences réalisées en divers points du bassin d'alimentation et dans diverses conditions hydrologiques, mais également des moyens d'analyse perfectionnés. Ces derniers doivent permettre d'obtenir une courbe de restitution du traceur en fonction du temps (courbe de distribution des temps de séjour), et si possible, de réaliser un bilan de restitution par intégration dans le temps de la quantité de traceur et du débit à chaque instant.

Disposant de nombreuses courbes de restitution sur un même système karstique, on peut essayer de les interpréter et de comparer leurs formes en tenant compte de l'état hydrodynamique du système au moment des expériences et de ses variations jusqu'à la fin de la restitution du traceur. On imagine de suite l'intérêt des multitraçages, permettant une comparaison beaucoup plus aisée puisque l'état du système et ses variations sont les mêmes pour tous les traçages.

### I- METHODOLOGIE D'UTILISATION DES TRACEURS EN HYDROGEOLOGIE KARSTIQUE.

#### 1°/- Les traceurs :

Un produit utilisé comme traceur doit remplir les conditions suivantes :

- Solubilité dans l'eau ; ou, s'il s'agit d'une suspension, vitesse de sédimentation la plus faible possible ;
- Inexistence sur le bassin versant concerné ;
- Stabilité par conservation de sa masse tout au long de son cheminement à travers le milieu ;

(Absence de réaction d'ordre physique, chimique, photochimique ou biologique) ;

- Détection sélective et dosage à très faible concentration ;
- Absence de toxicité aux concentrations utilisées ;
- Faible coût de même que pour les méthodes d'analyse, afin de rendre possible une réalisation économique de l'expérience de traçage.

On distingue des traceurs fluorescents appartenant à la famille des colorants xanthéniques et des traceurs salins mesurés par voie chimique, radioactive, ou par activation.

En ce qui nous concerne, nous n'avons employé que des traceurs fluorescents (Uranine, Rhodamine B et WT, sulforhodamine G) et salins "chimiques" (dichromate de sodium, chlorure de Lithium) ou activables (iodure de sodium). Ce dernier traceur peut être également mesuré par microdosage catalytique de même sensibilité ( $10^{-9}$  Kg/L) mais de coût beaucoup plus faible.

Le principal avantage des traceurs fluorescents est d'être décelables à des concentrations extrêmement faibles, de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-11}$  (0,05mg/m<sup>3</sup>). De plus ils peuvent être détectés en continu, "in situ".

Etant donné leur très grande sensibilité de détection, ils nécessitent des quantités peu importantes, quelques kilos au maximum, d'où un coût relativement faible.

Il faut également tenir compte de la facilité de se procurer les traceurs, notamment les traceurs fluorescents. S'il n'y a aucun problème de ce côté là pour l'uranine, il n'en est pas de même pour les Rhodamines. Parmi celles-ci, c'est la Rhodamine B, utilisée couramment en imprimerie et papeterie (encres rouges), que l'on peut acquérir le plus aisément. La sulforhodamine G n'est semble-t-il plus fabriqué actuellement en France.

D'autre part les produits fournis ne sont souvent pas très purs. Par exemple, l'amidorhodamine G contient 15-20% de dextrine\*. L'amidorhodamine B (sulforhod. B) disponible chez le même fabricant contient des impuretés responsables d'une fluorescence similaire à l'amidorhodamine G (l'amidorhodamine G extra, ne contient pas ces impuretés, mais n'est actuellement pas disponible).

\* fabricant : Farbwerke Hoechst, All. Féd. ; tiré de Bauer F et al. "Underground Water Tracing."

|                                                                     | URANINE<br>(ou fluorescéine sodi-<br>que)                      | RHODAMINE B                                                      | RHODAMINE WT                                                                     | SULFORHODAMINE G<br>(correspondant à<br>1' amidorhodamine G)                    |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| formule                                                             | C <sub>20</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> Na <sub>2</sub> | C <sub>28</sub> H <sub>31</sub> O <sub>3</sub> N <sub>2</sub> Cl | C <sub>29</sub> H <sub>29</sub> O <sub>5</sub> N <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> Cl | C <sub>25</sub> H <sub>25</sub> O <sub>7</sub> N <sub>2</sub> S <sub>2</sub> Na |
| poids moléculaire                                                   | 376                                                            | 479                                                              | 566,5                                                                            | 631                                                                             |
| forme ionique                                                       | anion                                                          | cation                                                           | anion                                                                            | anion                                                                           |
| forme commerciale                                                   | poudre<br>solution aqueuse                                     | poudre<br>solution acétique                                      | solution sodique                                                                 | poudre                                                                          |
| solubilité dans l'eau                                               | très bonne                                                     | faible (~ 15 g/l)                                                | faible                                                                           | mauvaise                                                                        |
| longueur d'onde d'ab-<br>sorption maximale (nm)                     | 491 (jaune vert)                                               | 554 (orange)                                                     | 554 (orange)                                                                     | 530                                                                             |
| longueur d'onde de fluo-<br>rescence maximale (nm)                  | 514 (vert)                                                     | 576 (rose orangé)                                                | 572 (rose orangé)                                                                | 560 (orange)                                                                    |
| autres traceurs fluor.<br>perturbant les mesures<br>(interférences) | eosine                                                         | sulforhodamine G<br>eosine<br>Rhodamine WT                       | sulforhodamine G<br>eosine<br>Rhodamine B                                        | eosine<br>Rhodamine B<br>Rhodamine WT                                           |
| sensibilité photo-<br>chimique                                      | forte                                                          | peu sensible                                                     | peu sensible                                                                     | modérée                                                                         |
| Oxydation                                                           | sensible                                                       | peu sensible                                                     | peu sensible                                                                     | très faible                                                                     |
| Pertes par rétention<br>dans le milieu sou-<br>terrain              | très faible                                                    | importante                                                       | modérée                                                                          | modérée                                                                         |
| utilisation indus-<br>trielle                                       |                                                                | papeterie, imprimerie:<br>(encre rouge)                          |                                                                                  |                                                                                 |

fig.14 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES TRACEURS FLUORESCENTS UTILISES (colorants xanthéniques)

(d'après Charrière 14, Bauer et al 76)

## 2°/- Les traceurs fluorescents - leur analyse :

### a- La dilution des traceurs.

L'évolution de la concentration de traceur dans l'eau au cours du transit conditionne la réussite de l'expérience.

Depuis l'injection jusqu'à la sortie du traceur, de nombreux facteurs entrent en jeu au cours du transit, pour accroître sa dilution. On peut relever :

- des facteurs mécaniques, par inégale répartition des vitesses ou par apport d'eau ;
- un facteur de diffusion caractéristique du traceur ;
- des facteurs de rétention, particulièrement complexes, liés à des interactions entre le traceur et le milieu dans lequel il se propage, ou liés à des phénomènes de piégeage d'une partie ou de tout un volume de fluide marqué.

### b- Appareillage.

Le principe des appareils de mesure est basé sur le phénomène de fluorescence. Ce dernier est dû à certaines substances qui, soumises à l'action d'un rayonnement lumineux, émettent des radiations lumineuses dont la longueur d'onde, caractéristique de la substance, est différente de la longueur d'onde de la lumière excitatrice.

Toutes les analyses ont été effectuées au spectrofluorimètre. La concentration minimale détectable est de  $10^{-10}$  à  $10^{-11}$ .

L'intérêt de cet appareil par rapport aux fluorimètres est de permettre la sélection de la longueur d'onde d'absorption lumineuse maximale et celle de fluorescence maximale du produit fluorescent recherché.

Il en résulte une sélectivité permettant, dans le cas de très faibles concentrations de traceur et de "bruit de fond" élevés, d'avoir la certitude que le signal de fluorescence est bien dû au traceur utilisé, et n'est pas le fait de substances fluorescentes parasites (matières organiques tels les acides humiques par exemple).

Il permet ainsi d'identifier un traceur par l'obtention d'un spectre de fluorescence caractéristique et de mesurer indépendamment, l'un de l'autre, un couple de traceurs dont les spectres sont suffisamment distincts.

Par exemple, l'uranine et la rhodamine B présentent des longueurs d'onde  $\lambda$  d'excitation (491 et 514nm) et  $\lambda'$  d'émission (514-576nm) qui diffèrent de  $\Delta\lambda = 63\text{nm}$  et  $\Delta\lambda' = 62\text{nm}$ . Il n'y a pas interférence entre leurs spectres respectifs (voir fig. n°15 ).

Des concentrations très différentes (1/50 par exemple) pour un couple de traceurs, dans un même échantillon peuvent fausser l'analyse quantitative. Des étalonnages en conséquence seront alors nécessaires. Ils permettront de vérifier s'il y a ou non interférence. Toutefois, dans la pratique, de telles différences de concentration sont rares.

### 3°/- Choix d'un traceur :

Le seul critère à retenir est un excellent comportement dans le milieu karstique où s'effectue le transit. L'uranine (fluorescéine sodique), traceur fluorescent très employé depuis longtemps répond à ce critère ; de même que l'iodure de sodium (traceur salin "chimique").

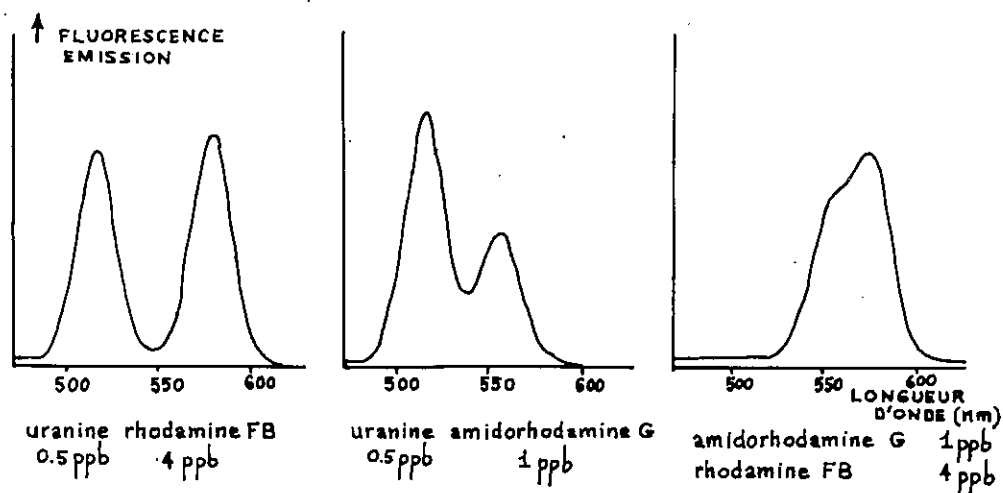


Fig. n°15 : Spectres de fluorescence de couples de traceurs en solution dans l'eau, enregistrés lors de déplacements simultanés des longueurs d'onde d'excitation et d'émission dans un intervalle de 25nm.

(Méthode analytique de H. BEHRENS, 1971, 1973, cité dans F. BAUER et al. : Under-ground Water Tracing).

Remarque : On hésite parfois à utiliser l'uranine du fait de son emploi très largement répandu chez les spéléologues, dans certaines communes ou services publics. Il peut effectivement se produire des confusions, surtout lorsque entrent en jeu des phénomènes de piégeage ou de restitution lente, pouvant entraîner des détections de traceur plusieurs mois après l'injection.

#### 4°/- Choix de plusieurs traceurs pour une utilisation simultanée (Multitraçage).

Dans le cas d'un multitraçage, les traceurs choisis devront non seulement présenter un excellent comportement dans le milieu, mais également être distingués facilement entre eux à l'analyse.

Les traceurs fluorescents et "chimiques" forment deux groupes dont les moyens d'analyse sont tout à fait différents et indépendants. Les traceurs fluorescents utilisés conjointement doivent pouvoir être discriminés et dosés quantitativement lorsqu'ils seront présents dans un même échantillon. Ils devront donc posséder des longueurs d'onde d'absorption maximale lumineuse et de fluorescence maximale, les plus différentes possible les unes des autres.

Le couple de traceurs répondant le mieux à ces critères sont l'uranine et la rhodamine B ou WT, ou même à la rigueur la sulforhodamine G (voir fig. n°14 ). Nous avons pu utiliser simultanément trois traceurs fluorescents grâce aux études réalisées par le Service d'Application des Radioéléments et des Rayonnements (SARR) du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble et par la Faculté de Pharmacie de Grenoble.

Ces études portent sur les méthodes de séparation et de mesure des traceurs fluorescents par chromatographie sur couche mince ou séparation chimique par extraction liquide-liquide. Pour plus de détails sur ces méthodes, on consultera la thèse de R. CHARRIERE : *"Perfectionnements à la mesure de traceurs fluorescents. Applications à l'hydrogéologie"*.

#### 5°/- Facteurs influant sur la fluorescence :

Parmi les facteurs influant sur le phénomène de fluorescence, l'on ne retiendra ici que ceux susceptibles de jouer un rôle dans la pratique d'une étude d'hydrogéologie karstique par l'utilisation des traceurs fluorescents.

a- La température :

L'augmentation de la température provoque une perte de fluorescence notable pour la Rhodamine B et WT. Elle est respectivement de - 2,7% et - 1,6% par degré centigrade. Dans le cas de mesures "in situ" des corrections peuvent s'avérer nécessaires.

b- Les phénomènes photochimiques :

b1: Dégradation photochimique :

De nombreux expérimentateurs ont montré la dégradation photochimique des traceurs fluorescents, et en particulier de l'uranine : - 50% en 3 heures par forte insolation et - 0,25% par heure sous un ciel nuageux. Pour la rhodamine B : 50% en 31 heures par forte insolation et - 0,02% par heure sous un ciel nuageux (observations de Feuerstein et Selleck, citées par R. CHARRIERE).

Cette photodécomposition semble être indépendante de la concentration en traceur ; elle dépendrait essentiellement de la nature du traceur et de l'intensité de l'insolation.

C'est pourquoi il est recommandé d'effectuer les prélèvements le plus près possible des émergences, ce qui n'est pas toujours facile en région montagneuse ; et de les conserver à l'abri de la lumière.

b2: Photo-oxydation par l'oxygène moléculaire :

Feuerstein et Selleck ont montré que l'agitation d'une solution de traceurs fluorescents à l'abri de la lumière, en présence d'air, provoquait une perte de l'intensité de fluorescence.

De même, les travaux de Strich et Rochon, puis ceux du Service d'Application des Radioéléments et des Rayonnements du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble (R. CHARRIERE, 1974) ont confirmé ces derniers résultats. Ainsi, l'agitation dans un erlen en verre, à l'abri de la lumière et à 25°C d'une solution de traceur fluorescent, provoque une oxydation se traduisant par :

- . 60% de perte en 48 heures pour la Rhodamine B ;
- . 50% de perte en 48 heures pour la Rhodamine WT ;
- . 30% de perte en 48 heures pour la Sulforhodamine G.

Par contre, J.C. RERAT (1976) note que l'irradiation polychromatique d'une solution de Rhodamine B à  $1.10^{-6}$ , (lampe à iode de 1000W émettant des radia-

tions de 450 à 600nm) contenue dans un cristalliseur thermostaté par un courant d'eau froide, et placé en chambre noire, n'apporte aucune modification appréciable de la concentration, après 34 heures d'irradiation.

Dans les mêmes conditions, mais en faisant barboter de l'air dans la solution, avec un débit de 1 l/mn provoquant un régime turbulent, les résultats montrent une diminution de la concentration en fonction du temps.

De plus, si la solution est uniquement soumise à un barbotage d'air, sans irradiation, on ne constate aucune variation de la concentration en 24 heures.

L'auteur en conclut que la dégradation de la Rhodamine B n'est donc pas due à une oxydation simple, mais à une réaction d'oxydation photosensibilisée.

Ces expériences sur la photo-oxydation par l'oxygène moléculaire semblent donc contradictoires. Ces résultats opposés pourraient peut être provenir de l'utilisation de solutions de traceur en concentrations très différentes.

#### c- Les agents d'oxydation.

Ils peuvent altérer les produits fluorescents, surtout l'uranine et les Rhodamines B et WT.

Ainsi l'ozone et le chlore utilisés dans le traitement des eaux destinées à la consommation publique sont des agents d'oxydation particulièrement efficaces.

On peut noter aussi que des processus biologiques semblent affecter parfois le comportement des traceurs fluorescents.

#### 6°/- Remarques à propos de la méthode de détection au charbon actif.:

Ce moyen de détection est très utilisé pour la recherche de la fluorescéine et présente l'avantage de simplifier grandement la surveillance des émergences, ce qui est particulièrement appréciable en zone montagneuse.

Cette méthode paraissant intéressante, et disposant d'autre part d'analyses en spectro-fluorimétrie, j'ai essayé de voir si elle était suffisamment fiable et si, éventuellement, il était possible d'obtenir une courbe de restitution du traceur.

Sans entrer dans le détail de la méthode que l'on peut trouver en biblio-

graphie (A. Lallemand et H. Paloc), je me bornerai à signaler que les fluocapteurs étaient composés de 3 à 5 gr. de charbon actif en grains, enserrés dans une toile en nylon à mailles de 2mm. Ils ont été immergés de manière à être à l'abri de la lumière solaire.

Après une immersion d'une durée de quelques jours à un mois, le dépouillement s'est effectué en solution alcoolique de potasse à 8%.

Les résultats ont montré que, plus que la concentration en fluorescéine à l'exurgence, la durée de restitution est primordiale.

Ainsi, si l'apparition de la teinte caractéristique de la fluorescéine a été particulièrement rapide et nette dans le cas d'un fluocapteur immergé durant trois semaines dans une émergence restituant le traceur en plusieurs mois, à des concentrations variant entre  $10^{-9}$  et  $5.10^{-10}$  Kg/L ; il n'en a pas été de même pour une restitution brève (une journée), mais à concentration relativement forte, de l'ordre de  $5.10^{-8}$  -  $10^{-8}$  Kg/L (visible à l'oeil dans le torrent). Le résultat n'a effectivement été que très faiblement positif, et celà, même après plusieurs jours d'immersion dans le solvant.

En conclusion, on s'aperçoit que les résultats donnés par cette méthode varient selon les conditions de restitution. De plus, il est nécessaire de vérifier, avant l'injection, par une immersion prolongée des fluocapteurs, l'absence de fluorescéine dans les systèmes karstiques. C'est ainsi que des fluocapteurs se sont encore révélés positifs cinq mois après l'injection (injection du "creux de Lolette", exurgence du Bout du Monde).

Le charbon actif, tout en étant un excellent fixateur pour la fluorescéine, est susceptible de fixer également toutes sortes de produits véhiculés par les eaux, ce qui peut être particulièrement gênant dans le cas d'eaux polluées (Peut-être est-ce là l'explication de la légère teinte verdâtre présentée au dépouillement, par certains fluocapteurs).

F. BAUER (dans *"Underground Water Tracing"*) signale avoir comparé les résultats donnés par la méthode au charbon actif à ceux donnés par l'analyse de prélèvements en spectrofluorimétrie. Les fluocapteurs ont été immergés durant trois à cinq jours, et le dépouillement a été effectué au spectrofluorimètre, sur les extraits des charbons, après deux jours d'immersion en solution alcoolique de potasse, à l'obscurité.

Il note que la détection au moyen des charbons actifs a été très gênée

par la pollution des eaux, qui a entraîné un bruit de fond particulièrement élevé pour ces extraits. (limite de détection :  $10^{-9}$  Kg/L). Néanmoins, si les concentrations mesurées (dans les extraits) ont été en moyenne 100 à 1000 fois supérieures aux concentrations moyennes des échantillons d'eau de la même période, les tendances dans les variations furent très similaires.

Il note également, qu'après essais, cette méthode au charbon actif, ne donne pas de résultats satisfaisants pour la détection des rhodamines.

## II- EXPLOITATION DES RESULTATS.

### 1°/- Les distributions des temps de séjour :

Durant son transit à travers le milieu, chaque particule de traceur suivra une trajectoire qui lui sera propre. Ainsi, la restitution du traceur présentera un étalement résultant du sort subi par le traceur et notamment de la diversité des trajectoires.

La distribution des temps de séjour est représentée par la courbe "concentration en fonction du temps". Elle permet de déterminer :

- . Le temps de transit des particules de traceur les plus rapides dans le transfert. Cette information est particulièrement intéressante, notamment dans le cas d'un rejet de pollution, pour la détermination d'un périmètre de protection.

- . Le temps modal ou temps de l'abscisse du sommet de la courbe, représentant le temps le plus probable de transit du traceur.

- . Le temps moyen, représenté par le temps au bout duquel la moitié de la masse du traceur aura été restituée. Cette masse étant la masse effectivement restituée et non la masse initiale injectée.

De plus, connaissant la distance apparente de transit, on pourra déterminer :

- la vitesse des particules de traceur les plus rapides ;
- la vitesse modale ou vitesse la plus probable ;
- la vitesse moyenne.

En général, la vitesse donnée pour un traçage représente la vitesse des particules de traceur les plus rapides. C'est la vitesse la plus intéressante, notamment dans le cas d'une simulation de pollution. Mais il ne faut pas perdre de vue que, pour des traçages identiques, répétés dans le temps, les vitesses obtenues peuvent varier considérablement selon les conditions hydrologiques.

## 2°/- Les bilans de restitution :

Ils consistent à calculer la masse de traceur sortie du système. Cette masse est obtenue par la formule :  $M = \int_{t=0}^t Q(t) C(t) dt$

$C(t)$  étant la concentration à chaque instant

$Q(t)$  étant le débit à chaque instant

En comparant  $M$  à  $M_0$ , masse de traceur injectée ; on obtient le taux de restitution du traceur.

Ils nécessitent donc des mesures quantitatives de traceur ainsi que des mesures de débit.

Ces bilans ont été effectués partout où les débits sont contrôlables.

Remarque : Les très faibles concentrations de traceurs jouent souvent un grand rôle dans l'obtention du bilan.

Ainsi, l'emploi de traceurs fluorescents, mesurables à des concentrations extrêmement faibles, sera à recommander.

## III- REALISATIONS EXPERIMENTALES.

Effectuées le plus souvent pour démontrer des continuités hydrauliques souterraines, ces expériences n'affectent presque exclusivement que des points d'infiltration bien particuliers, c'est-à-dire les drains préférentiels de l'aquifère. De plus elles sont généralement effectuées en période de fonte de neige ou de pluies abondantes, facilitant l'injection et favorisant un transit rapide du traceur.

### 1°/- Traçages réalisés antérieurement à cette étude :

Les laboratoires de Physique et d'Hygiène de l'Institut d'Hydrologie (Collège de France) ont procédé à diverses expériences de traçages à la fluorescéine au cours des mois de juillet 1926, mai 1927 et avril 1928.

#### a- Traçage du 27 juillet 1926 (point n° 6 - fig. 16)

Effectuée aux pertes de Damot la Féclaz (883,76 ; 77,43 ; 1340) avec un demi-kilo de fluorescéine, elle se solda par un échec.

Malgré le manque d'informations sur la réalisation de ce traçage, il est probable que cet échec est dû, soit à une dilution trop importante, soit à un temps d'observation trop bref. (surveillance durant seulement huit jours).

*b- Traçage du 8 mai 1927 :*

Cette expérience eut lieu en période de fonte de neige. Dix kilos de fluorescéine furent versés dans un entonnoir absorbant à Rethiède (X. = 883,900 ; Y = 79,340 ; Z = 1385m).

Le colorant ressortait vingt deux heures plus tard à la résurgence de la Doria. Malheureusement un doute subsiste sur la position exacte du point d'injection, du fait de l'absence de perte vers le lieu indiqué, même en période de fonte de neige, ce qui contredit le rapport concernant cette expérience (Besson, Guillerd, Touplain, 1930). Il semble toutefois que celui-ci se trouve en contrebas de la route allant de la Fècle au Revard (N. 513) entre les points cotés 1379 et 1391, donc bien dans l'Urgonien.

*c- Traçage du 20 avril 1928 (point n°2) :*

Cette coloration intéressa un entonnoir recevant le produit de fusion de la neige, situé sous les Hôtels du Revard, à la côte 1450m (sans autre précision sur le lieu exact). Dix kilos de fluorescéine furent versés dans un gouffre s'ouvrant dans l'Hauterivien, mais produit par dissolution des calaires valanginiens sous-jacents. Aucune trace du colorant ne fut décelée.

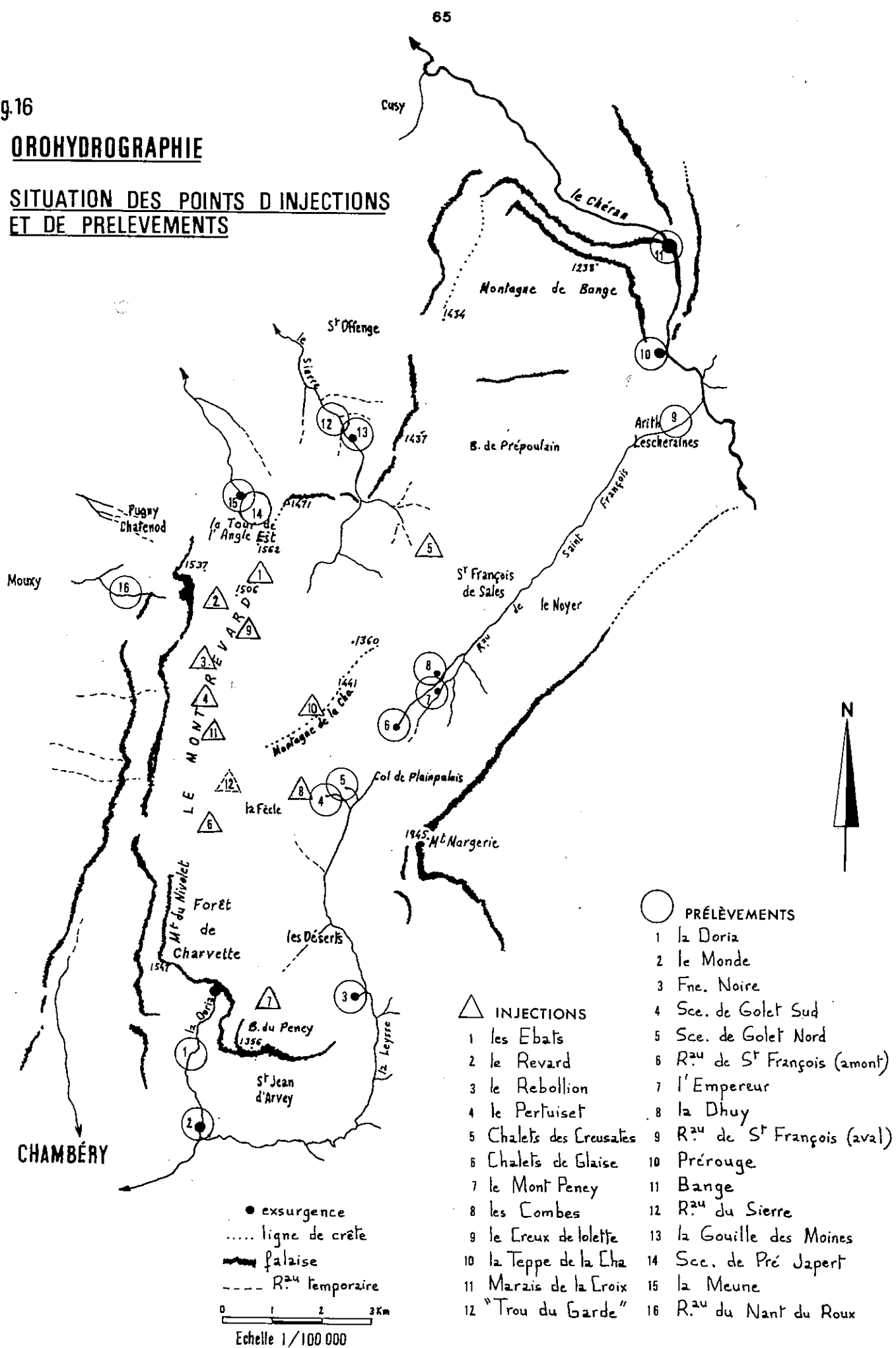
Cet échec est imputable à la fois à un manque de prélèvement à l'exsurgence du "Pont de Bange", et à des prélèvements trop éloignés de l'émergence, en ce qui concerne le "Bout du Monde". Effectués dans la Leysse, ces derniers ont subi une double dilution, d'abord par la Doria, puis par la Leysse, d'où l'obtention de concentrations en colorant extrêmement faibles et vraisemblablement trop faibles pour les moyens de détection employés (Observation de la fluorescéine à l'arc électrique)

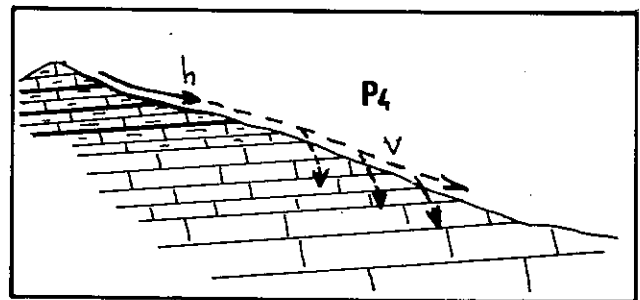
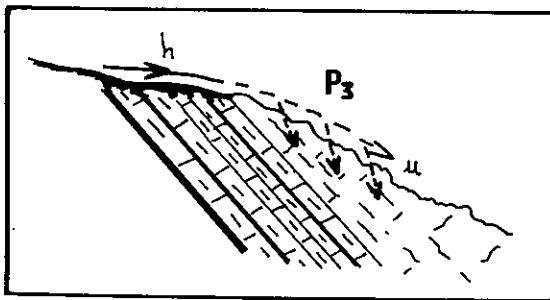
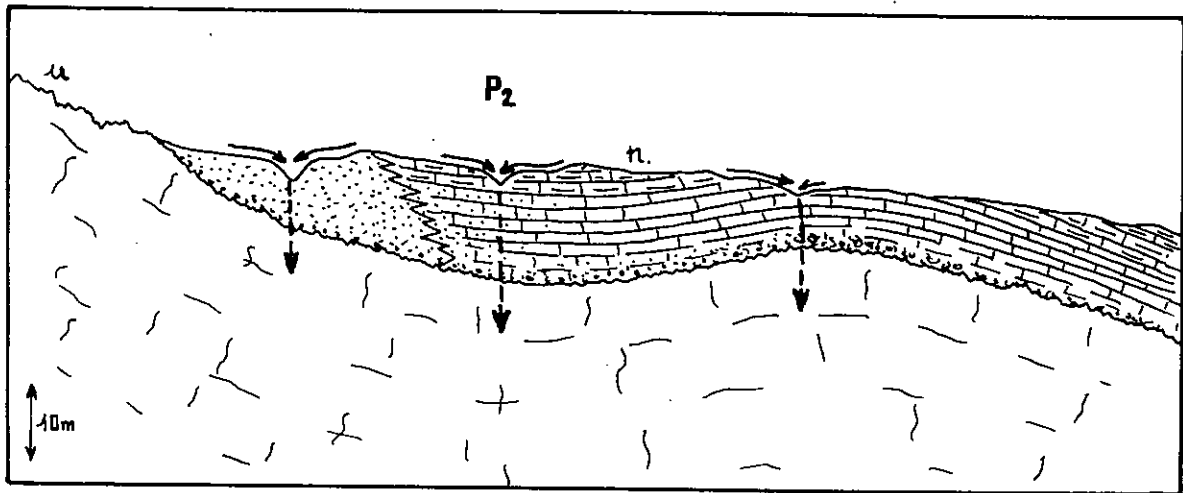
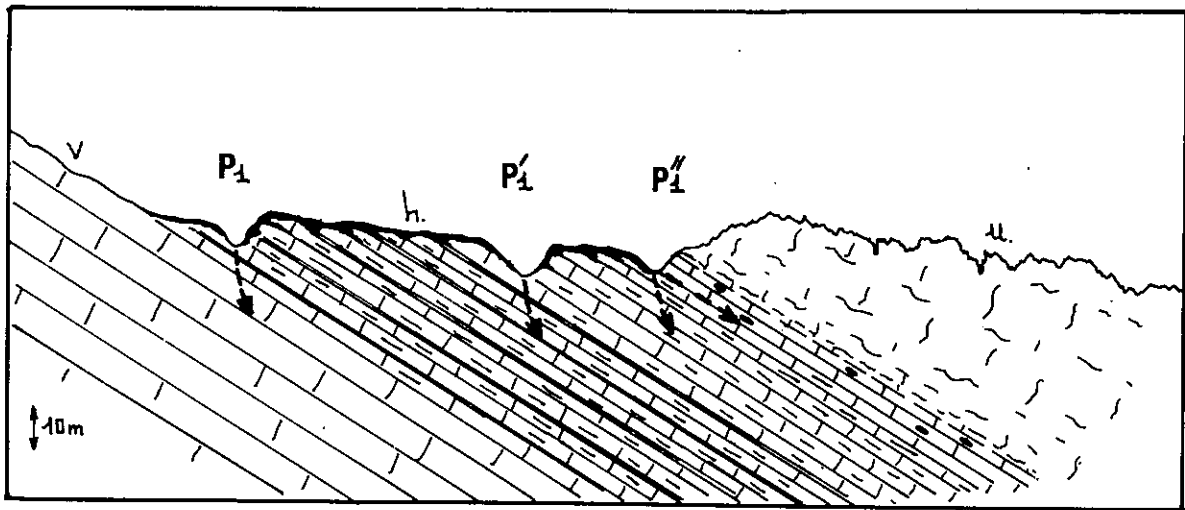
*d- Conclusion :*

Seule la circulation urgonienne du plateau de la Féclaz a été mise en évidence par la coloration du 8 mai 1927.

Aussi, connaissant peu de choses sur les bassins versants karstiques, nous avons entrepris une reconnaissance des pertes de circulations aériennes afin de sélectionner celles susceptibles d'apporter lors de traçages le plus de renseignements sur les circulations souterraines du massif.

fig.16

**OROHYDROGRAPHIE****SITUATION DES POINTS D'INJECTIONS  
ET DE PRELEVEMENTS**



n nummulitique — marneux calcaire

u Barrémien { "Urgonien"  
calcaires jaunes à  
nodules siliceux

h — argile d'altération superficielle  
Hauterivien

v Valanginien

fig17 CONDITIONS GEOLOGIQUES DES PERTES

## 2°/- Conditions géologiques des pertes (fig. n° 17 ).

Sur les aires calcaires, c'est-à-dire la majeure partie du plateau du Mont Revard, l'infiltration est immédiate. Elle peut être différée sur les marno-calcaires hauteriviens où s'effectuent de courts ruissellements ; de même sur le Tertiaire relativement peu épais, plus localisé et d'extension plus limitée. De nombreux entonnoirs d'ablation affectent ces niveaux, et bien souvent, ils constituent le terme de ces circulations aériennes.

Ils sont provoqués par la dissolution des niveaux calcaires, entraînant des affaissements côniques dans les niveaux sus-jacents plus marneux ou sableux, avec entraînement de particules fines (pertes de type  $P_1$ ,  $P_1'$  et  $P_2$ ).

Un autre genre de pertes concerne des ruissellements plus importants. Il s'agit de pertes diffuses pouvant assécher progressivement un cours d'eau (type  $P_3$  et  $P_4$ ). Dans le cas du Sierroz ( $P_4$ ) dont le débit peut atteindre plusieurs centaines de l/s, la saturation des zones de pertes peut être telle qu'une partie du débit échappe à l'aquifère karstique.

## 3°/- Le multitraçage d'octobre 1975 :

Cette expérience réalisée avec la collaboration du Service d'Application des Radioéléments et des Rayonnements du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble a mis en oeuvre, simultanément, six traceurs différents. Ces traçages multiples permettent de déterminer rapidement les circulations souterraines affectant un massif et réduisent ainsi au minimum les opérations de prélèvement très fastidieuses. De plus les injections de traceur étant effectuées dans un laps de temps très court (quelques heures), les conditions hydrodynamiques peuvent être considérées comme similaires pour tous les traçages. Cela permettra donc de comparer les distributions des temps de séjour et d'apporter ainsi des informations précieuses pour la connaissance de l'aquifère karstique.

### a- Localisation des points d'injection (fig. n° 16 ).

Etant donné le peu d'informations par traçages antérieurs et la structure géologique laissant plusieurs possibilités de continuités hydrauliques souterraines, les points d'injection ont été répartis sur l'étendue du plateau, de manière à cerner au mieux les différentes circulations à l'intérieur du massif.

Trois injections (Les Ebats de type  $P_1''$  ; Le Revard de type  $P_1$  et Le

Rebellion de type  $P_4$ ) ont été effectuées dans différents niveaux de l'Hauterivien.

Effectivement, connaissant l'existence de systèmes karstiques urgoniens et valanginiens, il était intéressant de déterminer s'il existait un niveau imperméable pouvant servir à délimiter ces aquifères, par ailleurs.

*b- Les traceurs utilisés :*

On trouvera toutes précisions utiles sur les injections dans le tableau de la figure n° 25 p. 81.

*c- Les prélèvements (fig. n° 16 ).*

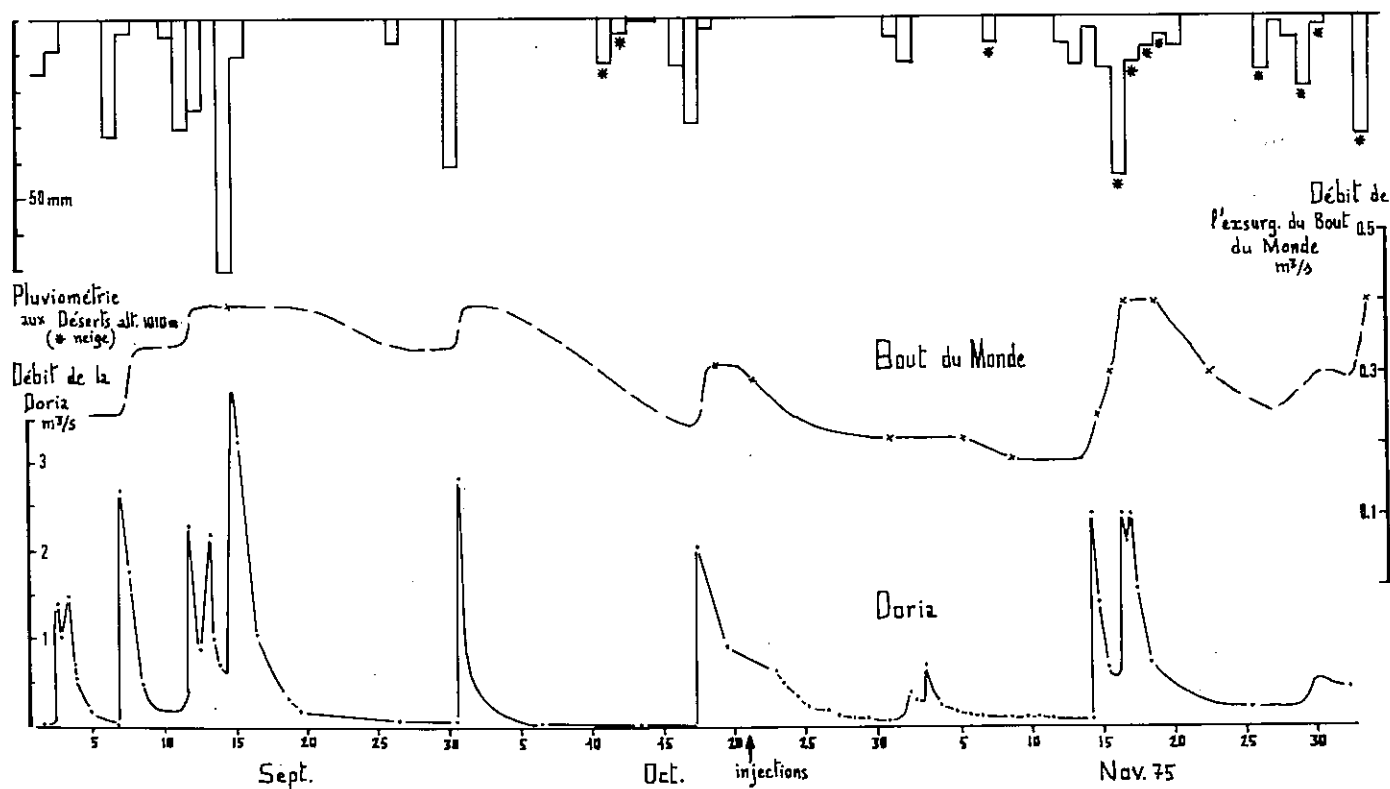
Les opérations de prélèvement ont concerné quinze exurgences, sources ou torrents. Elles ont pu être effectuées grâce au concours des étudiants en géologie de l'Institut Dolomieu.

La fréquence d'échantillonnage adoptée, décroissante avec le temps tient compte des événements d'ordre météorologiques, lorsque le pas de prélèvement devient important (supérieur à une journée).

*d- Conditions hydrologiques et hydrodynamiques.*

- Précédant les injections :

Le graphique ci-dessous montre l'importance des pluies et débits avant les expériences de traçages.



- lors des injections :

Bénéficiant du beau temps, les injections ont pu s'effectuer grâce au ruissellement provoqué par la fonte d'une couche de neige de vingt cms en moyenne, tombée trois jours avant au-dessus de 1200m d'altitude. Par la suite, on ne note pas de précipitations importantes avant le 12 novembre. En conséquence, les débits assez forts au moment des injections, n'ont fait que décroître jusque vers la mi-novembre.

e- Résultats : (fig. n° 18, 19, 25 ).

- Les circulations karstiques :

Cette première étude a montré l'existence de deux ensembles karstiques superposés, et apparemment indépendants.

Malgré la présence d'un karst urgonien qui semble étanche vis-à-vis du karst valanginien sous-jacent, la traversée de l'Hauterivien apparaît clairement grâce à l'injection des Ebats. Effectivement, cette dernière a démontré une continuité hydraulique souterraine entre les niveaux situés à la limite Hauterivien supérieur - Barrémien inférieur et le Berriasien (exurgence du Bout du Monde). En outre il n'y a pas de faille permettant de court-circuiter les niveaux les plus marneux de l'Hauterivien moyen.

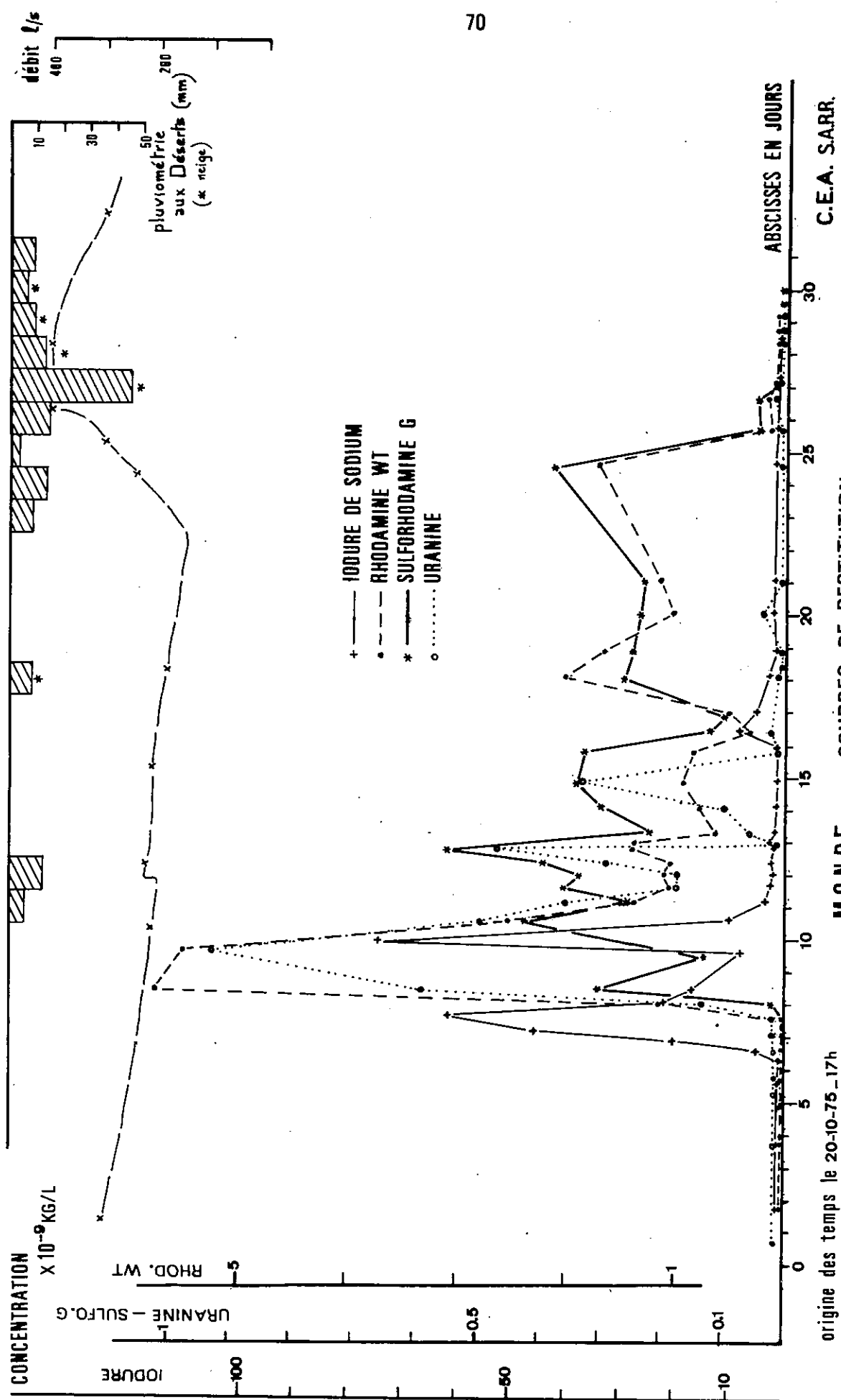
- Ce multitraçage a mis en évidence l'importance de l'aquifère valanginien avec ses deux sens opposés d'écoulement à partir d'une même zone commune qui reste à préciser.

De plus l'injection de 10 kg de chlorure de Lithium (soit 1,64 kg de Li) aux Combes (point n° 8) n'est pas très démonstrative. Le lithium, détecté par spectrophotométrie d'absorption atomique (limite de détection : 0,005 ppm), a été décelé sous forme de traces dans les échantillons de la Doria du 30 octobre, 16h, 31 octobre 16h et 01 novembre 11h. Ces traces sont toutefois trop faibles pour être interprétées.

4°/- Les traçages simples :

Connaissant les directions générales d'écoulement des eaux souterraines, des traçages isolés vont permettre de préciser les bassins versants karstiques et de vérifier certaines hypothèses sur le rôle hydrogéologique des formations litho-stratigraphiques et de la tectonique.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.  
 MAISON DES GEOSCIENCES  
 DOCUMENTATION  
 B.P. 53  
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX  
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58  
 Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr



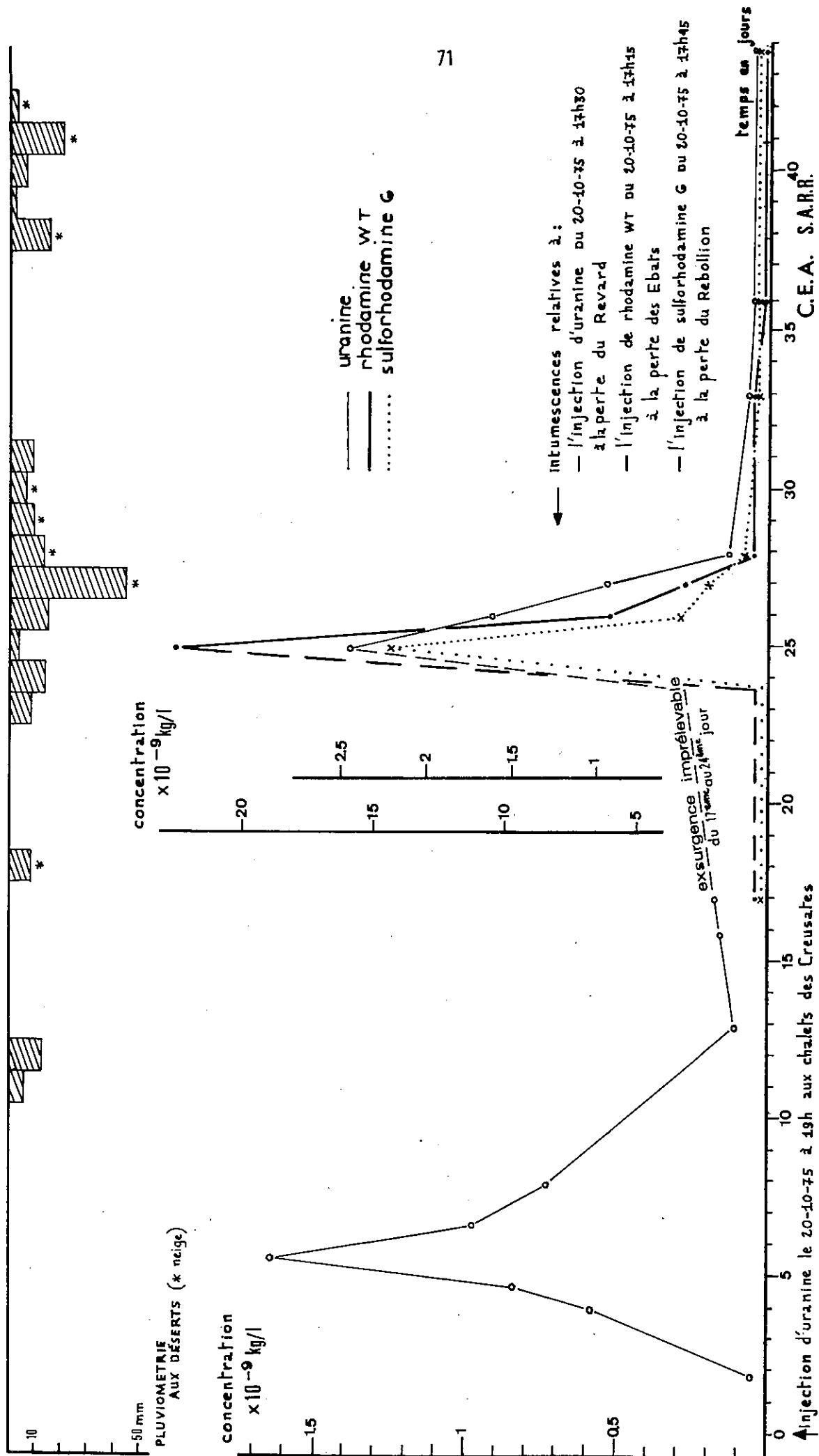


fig.19

a- Le traçage du Mont Peney (point n° 7) :

Cette expérience s'est déroulée sur le Mont Peney qui forme la bordure Sud-Est du secteur étudié.

On a là un massif urgonien apparaissant comme le compartiment supérieur d'une faille inverse qui, tout en le relevant, l'a amené à chevaucher le Tertiaire du synclinal des Déserts.

Ainsi, du point de vue hydrogéologique, il constitue une unité distincte du plateau du Mont Revard et bien délimitée.

Les couches urgoniennes, plongeant vers l'Est, entraînent les eaux vers l'exsurgence de Fontaine Noire, située dans l'Hauterivien supérieur, au contact de niveaux marneux.

Il convenait cependant de vérifier cette hypothèse.

- Réalisation expérimentale.

L'injection a concerné un écoulement superficiel, sur l'ensemble fluvio-lacustre basal du tertiaire (argiles et conglomérats) et se perdant dans un gouffre provoqué par la dissolution des calcaires urgoniens sous-jacents. Morphologiquement, cette perte se trouve à l'amont d'un large sillon développé dans le Tertiaire et dirigé, en s'abaissant, vers l'exsurgence de Fontaine Noire. Plusieurs autres pertes jalonnent, à intervalles réguliers, cet axe déprimé.

L'injection a été effectuée le 01 décembre 1975 dans des conditions hydrodynamiques favorables à un transit rapide du traceur.

La masse d'uranine injectée, particulièrement faible (0,2 kg), a été déterminée en tenant compte d'une distance apparente courte (1,9 kms), d'un débit moyen faible (50 à 100 l/s) et d'un gradient hydraulique très élevé (24,7 %), laissant supposer des réserves peu importantes.

- Résultats (fig. n° 20 ).

La restitution du traceur à l'exsurgence de Fontaine Noire a confirmé l'hypothèse précédente, à savoir drainage du Mont Peney par l'organisation d'un réseau karstique qui lui est propre.

On remarque de fortes concentrations d'uranine à l'émergence et un taux de restitution élevé (~ 75%).

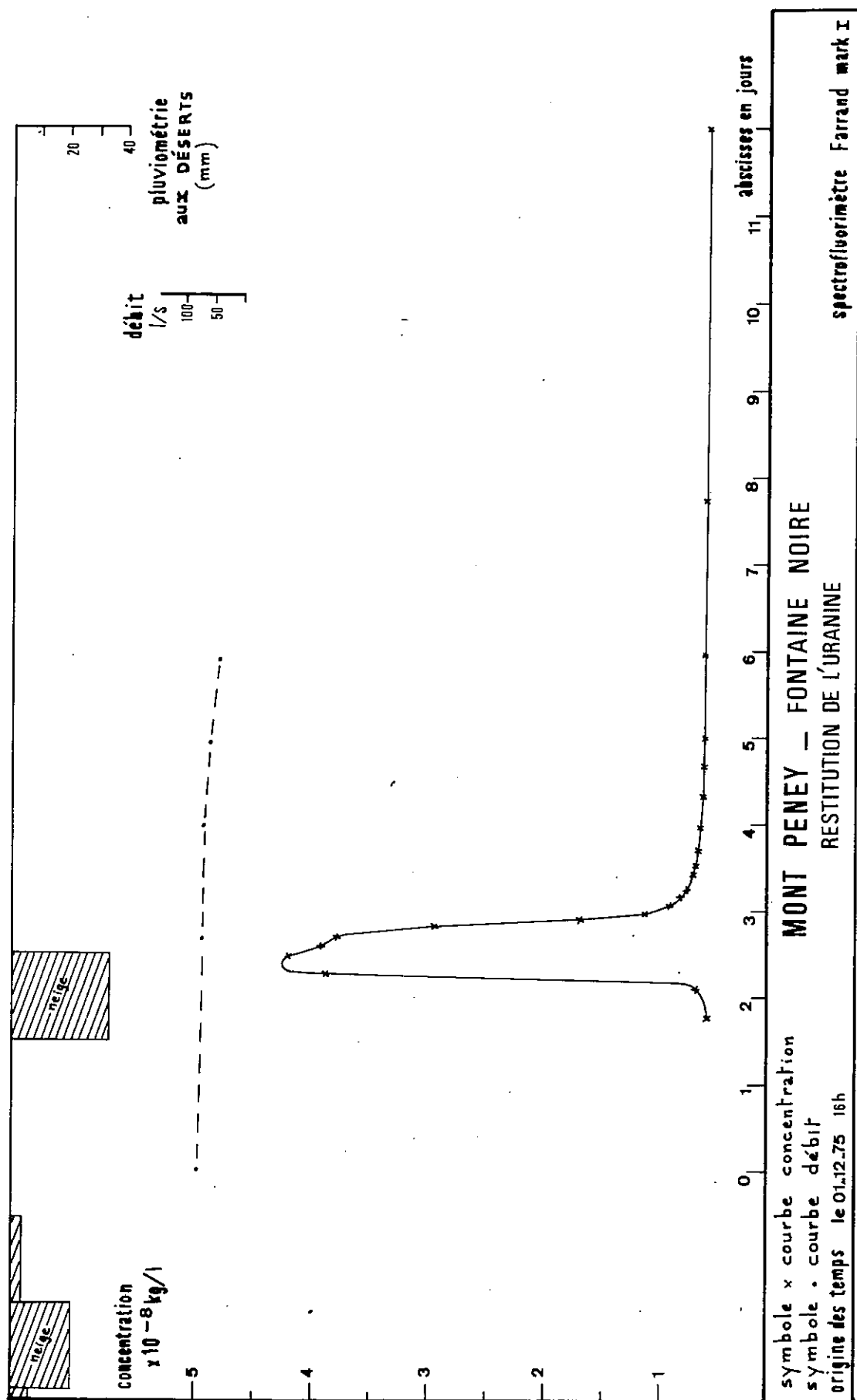


fig.20

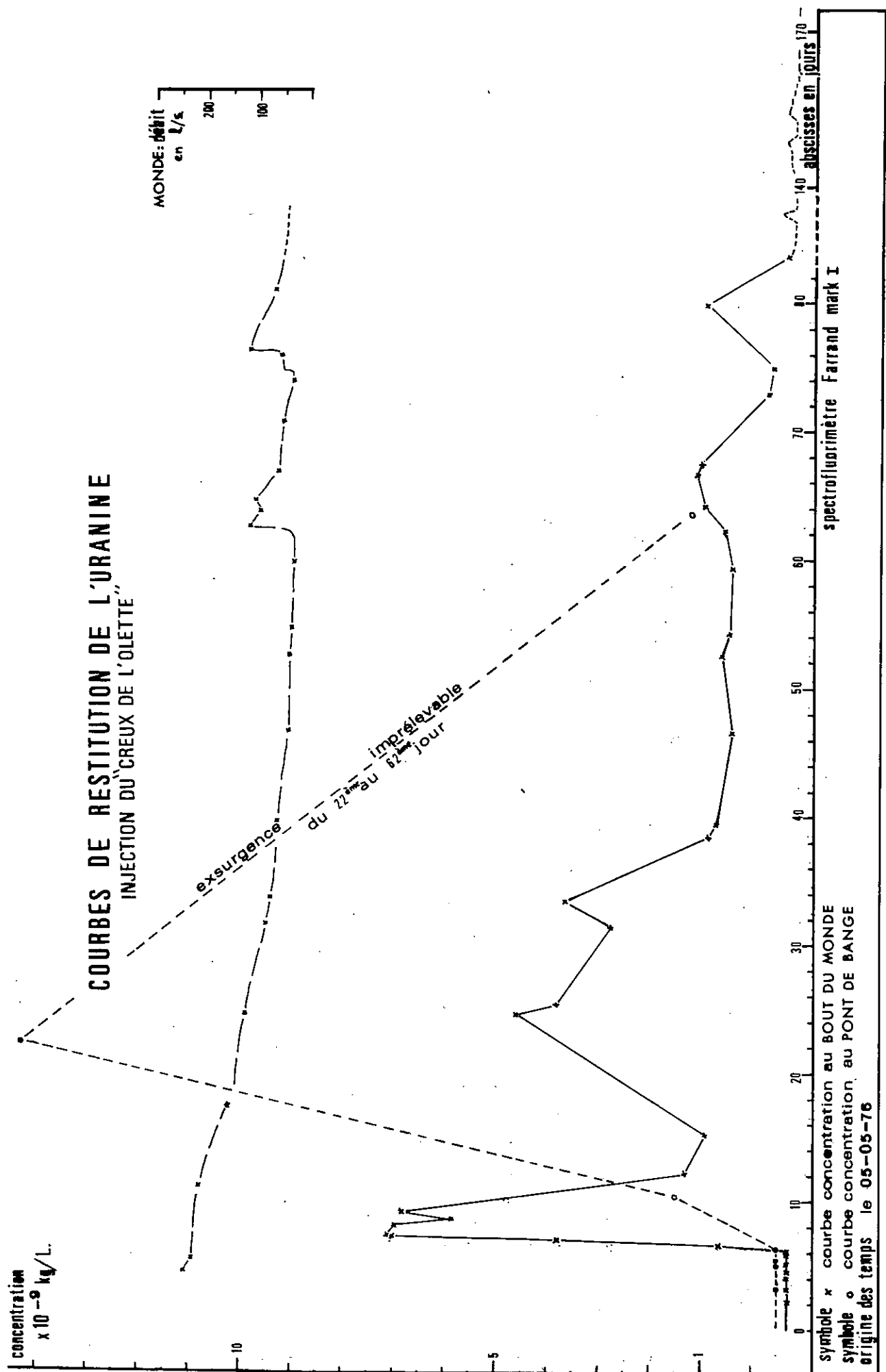


fig. 21

Ceci peut s'expliquer par un écoulement souterrain de type "conduite forcée" interrompu parfois par des réservoirs d'assez faibles volumes.

*b- Le traçage des Combes (point n° 8, 2ème injection) : (fig. n° 25 ).*

Déjà effectuée lors du multitraçage d'octobre 1975 et n'ayant pas donné de résultats concluant, cette injection a été reprise avec un traceur fluorescent.

*- Lieu d'injection.*

Il est situé dans une dépression d'axe Nord-Sud correspondant à la limite de la transgression du Nummulitique calcaire sur l'Urgonien. Les eaux de drainage de cette dépression se perdent dans les calcaires gréseux fissurés nummulitiques, à faible distance de l'Urgonien et sous forme de pertes bien localisées (type P<sub>2</sub> de la fig. n° 17 ).

*- Conditions hydrodynamiques.*

L'injection a été effectuée en période de fonte de neige à l'aide de 1,8 kg de Rhodamine B préalablement dissoute dans 7 litres d'alcool méthylique. Le débit de la perte, de l'ordre de 50 l/s en moyenne, subissait des variations journalières tout en restant toujours très important.

Les précipitations ont été négligeables durant la restitution du traceur. Les seules importantes, celles du 23 avril ont eu lieu sous forme de neige à toutes altitudes.

*- Résultats (fig. n° 23 et n° 25 ).*

Soixante-six heures après l'injection, la Rhodamine B ressortait, visible à l'oeil, à l'exsurgence de la Doria.

Les forts débits liés à l'onde de crue journalière, due à la fonte de neige, expliquent le transit très rapide, malgré le faible gradient hydraulique.

Remarque : L'hydrogramme de la Doria de la fig. n° 23 a été reconstitué d'après les quelques relevés limnimétriques, les températures journalières minimales et maximales et compte-tenu du fait que la crue de fonte de neige est un phénomène quotidien et régulier.

*c- Le traçage du "Creux de l'olette" :*

Cette expérience a été effectuée principalement pour des motifs sanitaires. Ce "creux" qui se présente sous la forme d'un gouffre d'environ 200m de diamè-

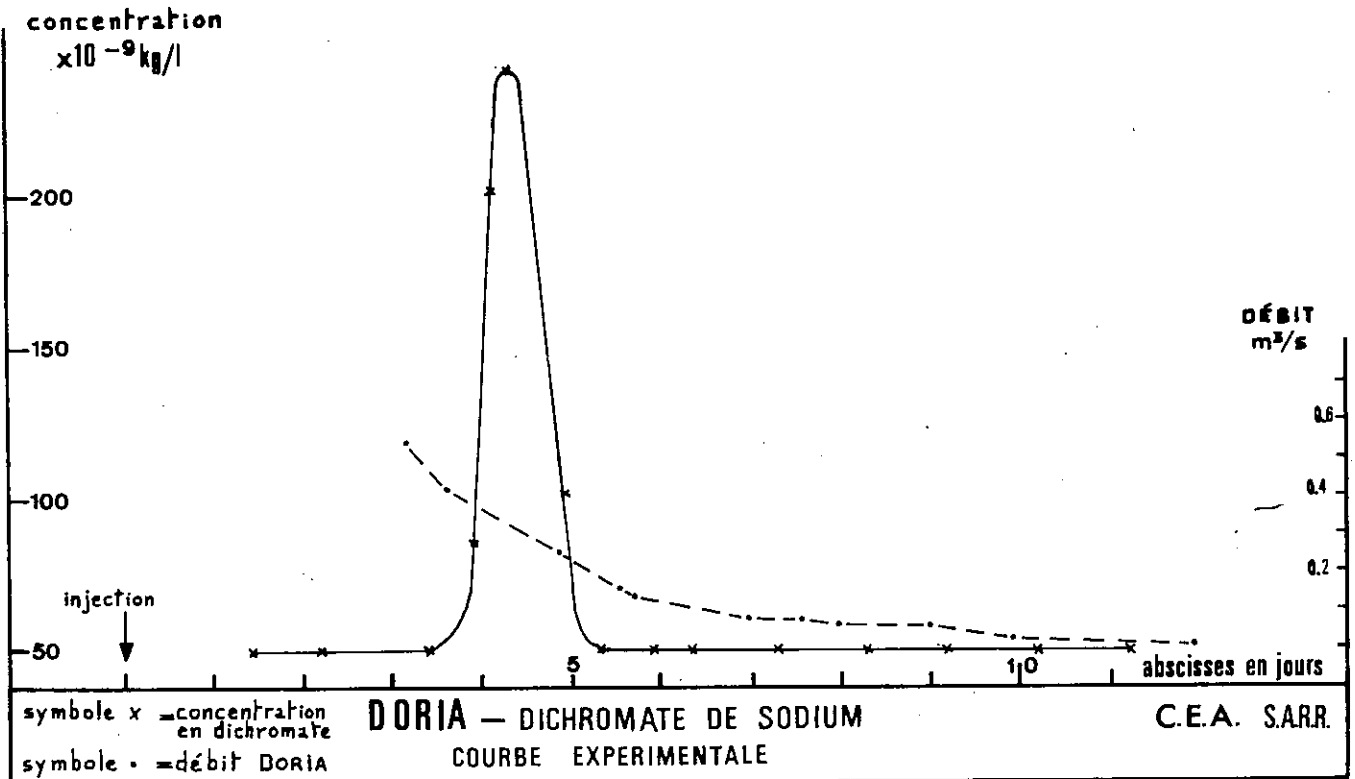


fig.22

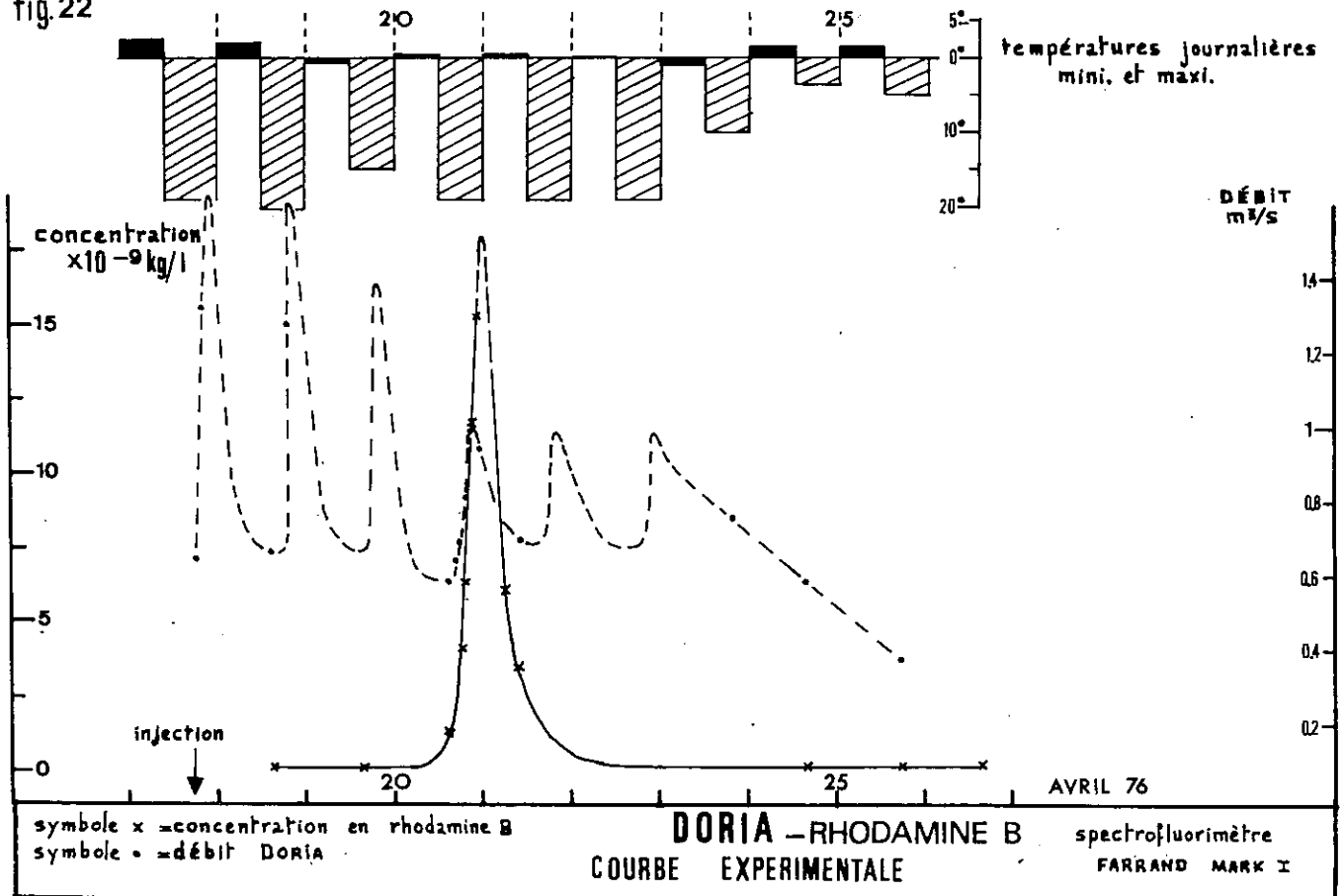


fig.23

tre et de 40m de profondeur sert effectivement de décharge communale. S'ouvrant dans des niveaux assez bas de l'Urgonien, le fond du gouffre, comblé d'éboulis, doit être vraisemblablement très proche de l'Hauterivien. Le pendage des couches est subhorizontal. Ce traçage pouvait donc confirmer la traversée hydrologique de l'Hauterivien et préciser le phénomène de diffluence observé précédemment.

#### - Conditions hydrodynamiques.

Il se trouve actuellement dépourvu de toute circulation d'eau aérienne (Avant l'installation de la décharge, il existait une petite source pérenne au fond). Ainsi, la date de l'essai a été choisie en fonction du débit des exurgences et de l'état de saturation des terrains. La période de fonte des neiges semblait la plus favorable.

Au moment de l'injection, les alentours du "Creux de Lolette" étaient encore recouverts d'une couche de neige, à peu près uniforme d'environ 50 cms ; le creux lui-même apparaissant comme un vaste entonnoir à neige, au fond duquel la couche dépassait 1 mètre.

Le beau temps chaud nous assurait d'une alimentation continue et importante des terrains, facilitant ainsi l'entraînement du traceur.

#### - Réalisation expérimentale.

Vu les conditions d'injection, au fond du creux, sur la neige recouvrant des éboulis et mêlée à des détritiques de toutes sortes, auxquelles il convenait d'ajouter un transit prévisible, à travers les terrains marneux de l'Hauterivien, j'ai choisi d'utiliser l'uranine pour sa très faible fixation par les particules argileuses.

Le traçage eut lieu le 5 mai 1976 de 9h30 à 11h30 avec 7 kg d'uranine, entraînée par l'injection de 18m<sup>3</sup> d'eau.

#### - Résultats.

Ce traçage n'ayant pas concerné, au niveau de l'injection du moins, une perte d'écoulement superficiel, c'est-à-dire un drain préférentiel de l'aquifère, on pouvait donc prévoir un étalement assez long de la courbe de restitution.

Il faut noter que les conditions d'injection de cet essai se rapprochent des conditions d'infiltration générales des bassins versants karstiques. Néanmoins, il est fort possible qu'il existe un drain important à proximité immédiate du fond du creux ; ce qui nous ramènerait aux cas précédents. En effet, la vitesse apparen-

te des particules de traceur les plus rapides est élevée (65m/h) tandis que celle des particules les plus lentes est très faible (2,3m/h). L'hypothèse la plus plausible sur les modalités du transit est donc celle d'une circulation souterraine en chenaux, avec blocage du traceur, et restitution lente et régulière. Ce blocage se produirait à proximité du lieu d'injection, c'est-à-dire plus probablement dans les niveaux marneux de l'Hauterivien.

d- Le traçage de la Teppe de la Cha :

- Situation et but.

Ce point d'injection est situé en plein centre du plateau du Mont Revard, sur la carapace urgonienne. L'injection a pu être effectuée grâce à la présence d'une étroite bande de Tertiaire, représentée ici par des calcaires gréseux plus ou moins marneux et des sables. Ces affleurements permettent le ruissellement lors de la fonte des neiges (perte de type P<sub>2</sub> de la fig. n°17 , page n°66 ). L'intérêt de cet essai est de permettre une délimitation des bassins versants karstiques de l'exsurgence de la Doria et de Bange. Le rôle du pendage et de la fracturation dans les circulations souterraines, notamment celui de la faille de la Cha est difficile à apprécier. Un traçage permettra d'éclaircir le problème.

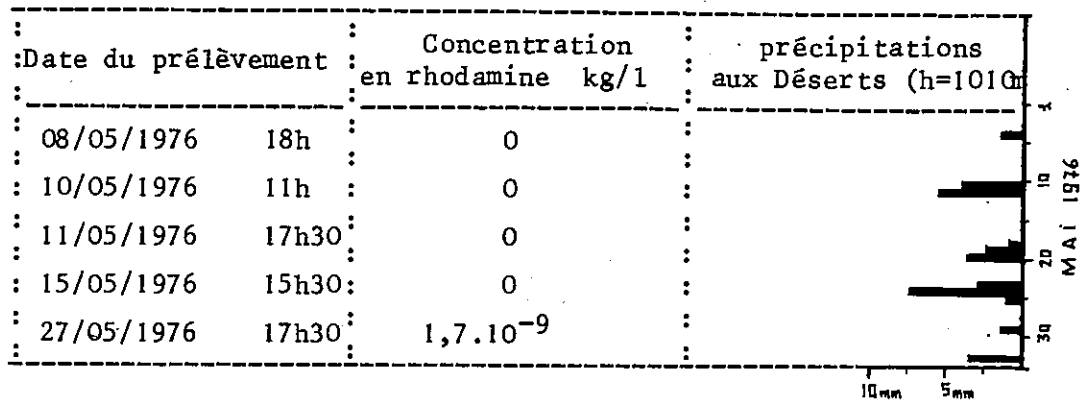
- Réalisation expérimentale.

Bénéficiant de la fin de la fonte des neiges et par conséquent de conditions favorables à un transit rapide, l'injection a été effectuée le 8 mai 1976 à l'aide de 1,9 kg de Rhodamine B dont la discrimination spectrofluorimétrique avec l'uranine est aisée (uranine injectée trois jours auparavant au "Creux de Lolette").

- Résultats.

L'exsurgence de la Doria au débit encore soutenu a fait l'objet de nombreux prélèvements ; journaliers jusqu'au 20 mai puis, vu les faibles débits, tous les deux ou trois jours. Les derniers ont été effectués le 7 juillet, à la suite de pluies importantes. Aucune trace de rhodamine ne fut décelée.

Il n'en a pas été de même pour l'exsurgence de Bange, imprélevable en basses eaux, c'est-à-dire, pour la période concernée par le traçage, du 15 mai au 27 mai et tout le mois de juin.



### Résultats des analyses des prélèvements de Bange.

Remarque : Des prélèvements de contrôle ont été effectués également aux autres exurgences afin de vérifier l'absence de toute trace de rhodamine.

e- Le traçage de la perte des Marais de la Croix (point n° 11)., fig. n° 25 ).

#### - Situation et but.

Les marais de la Croix sont installés sur les niveaux supérieurs très altérés de l'Hauterivien, à la limite de l'Urgonien (Perte de type P<sub>1</sub>" de la fig. n° 17 p. 66 ).

Il est intéressant de savoir si cette perte alimente le karst valangien (exurgence du Bout du Monde) ou urgonien (exurgence de la Doria). Effectivement, vu le pendage des couches, très accusé à cet endroit (35° Est), il est probable que l'Hauterivien joue ici le rôle de niveau imperméable.

De plus, l'existence d'un réseau spéléologique actif, situé à un peu plus d'une centaine de mètres à l'Est et se développant dans les niveaux de base de l'Urgonien peut laisser supposer une relation entre perte et torrent souterrain.

#### - Réalisation expérimentale.

Après de fortes pluies entraînant un débit à la perte, de l'ordre de 10 l/s, 1,3 kg de Rhodamine B ont été injectés le 15-09-1976 à 12h30.

#### - Résultats.

Comme on peut le constater sur la figure ci-dessous, la restitution du traceur à la Doria s'est produite en période de décrue et tarissement contribuant à un étalement de la courbe de restitution par écoulement très lent du volume d'eau marqué par le traceur.

La grande imprécision sur le "pic de restitution" ne permet pas d'effectuer de bilan.

Remarque : 10 jours après l'injection, des spéléologues ont encore pu observer des restes de Rhodamine dans le torrent souterrain de Rethiède, à quelques centaines de mètres de la perte des marais de la Croix. Cela montre que même dans le cas d'un traçage intéressant un drain important de l'aquifère karstique, la vitesse des particules de traceur les plus lentes peut être extrêmement faible, de l'ordre de 2m/h ici. Ces particules, du fait de leur trop grande dilution, ne seront pas détectables à l'exsurgence.

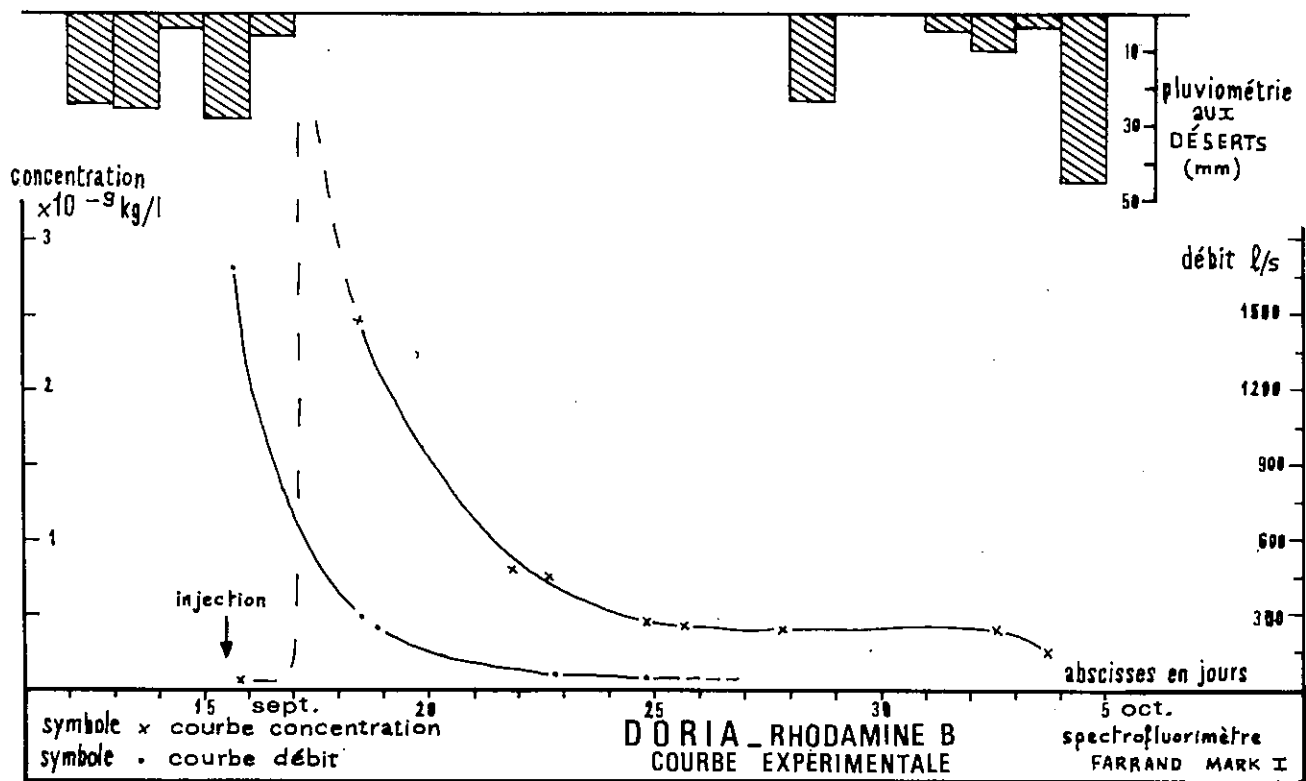


fig. 24

*f- Le traçage du "trou du Garde".*

Le réseau de galeries du "trou du Garde" se développe dans l'Urgonien, au Nord de la Féclaz et draine la partie la plus septentrionale du bassin versant karstique de la Doria.

Intéressant les spéléologues, l'injection a été effectuée par eux, dans le siphon terminal constituant l'aboutissement de cette partie amont du collecteur principal. Elle eut lieu en période d'étiage le 25 septembre 1976 à l'aide de 0,4 kg

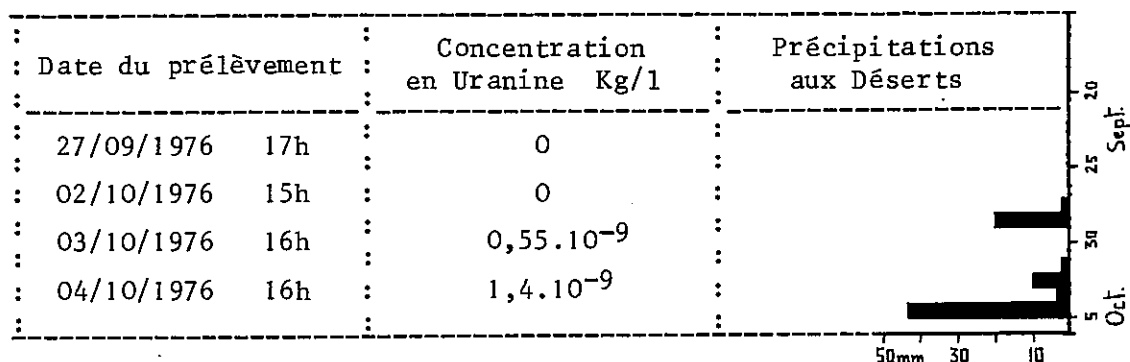
| Injection                                      |                                                    |                               |                                                |             | Sortie                                                      |                          |                |                                         |                     |                      |                     |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Date, heure                                    | lieu coordonnées                                   | Nature du traceur quantité    | Débit l/s                                      | lieu        | Date, heure arrivée                                         | Distance apparente en Km | Dénivelé en m. | vitesse des particules plus rapides m/h | vitesse moyenne m/h | Gradient hydraulique | Taux de restitution |
| 20-10-75 17 <sup>h</sup> 15                    | les Ebais n°1<br>884,40 - 82,45 - 1415             | Rhodamine WT<br>3 Kg          | 6                                              | Monde Bange | 28-10-75 21 <sup>h</sup><br>14-11-75 17 <sup>h</sup>        | 11,15<br>10,7            | 1070<br>870    | 56,9<br>17,8                            | 32<br>17,8          | 0,096<br>0,081       | 24%<br>-            |
| 20-10-75 17 <sup>h</sup> 30                    | Revard n°2<br>883,67 - 81,86 - 1445                | Uranine<br>5 Kg               | 1                                              | Monde Bange | 28-10-75 21 <sup>h</sup><br>14-11-75 17 <sup>h</sup>        | 10,6<br>11,6             | 1095<br>895    | 54<br>19,3                              | 44<br>19,3          | 0,103<br>0,077       | ~1%<br>-            |
| 20-10-75 17 <sup>h</sup> 45                    | Rebellion n°3<br>883,54 - 80,82 - 1415             | Sulforhodamine G<br>2 Kg      | 0,5                                            | Monde Bange | 28-10-75 21 <sup>h</sup><br>14-11-75 17 <sup>h</sup>        | 9,6<br>12,4              | 1070<br>870    | 49,0<br>20,7                            | 26<br>21            | 0,111<br>0,070       | 7%<br>-             |
| 20-10-75 18 <sup>h</sup>                       | Perfuyset n°4<br>883,60 - 79,91 - 1405             | Iodure de sodium<br>20 Kg     | 1                                              | Monde       | 27-10-75 09 <sup>h</sup>                                    | 8,6                      | 1050           | 54                                      | 44                  | 0,122                | 21%                 |
| 20-10-75 18 <sup>h</sup>                       | Chalets des Creusates<br>883,38 - 83,84 - 1310 n°5 | Uranine<br>2,4 Kg             | 0,5                                            | Bange       | 24-10-75 18 <sup>h</sup>                                    | 7,8                      | 760            | 82,1                                    | 52                  | 0,097                | -                   |
| 24-10-75 11 <sup>h</sup> 15                    | Chalets de Glaise<br>883,76 - 77,42-1340. n°6      | Dichromate de sodium<br>15 Kg | 10                                             | Doria       | 24-10-75 10 <sup>h</sup>                                    | 3,15                     | 330            | 44,4                                    | 38                  | 0,105                | 43%                 |
| 24-10-75 11 <sup>h</sup> 30                    | les Combes n°8<br>885,56 - 78,25 - 1245            | Chlorure de lithium<br>10 Kg  | 10                                             | -           | -                                                           | -                        | -              | -                                       | -                   | -                    | -                   |
| 04-12-75 16 <sup>h</sup> 30                    | Mont Peney n°7<br>885,12 - 73,88 - 1190            | Uranine<br>0,2 Kg             | 0,5                                            | Fine Noire  | 03-12-75 18 <sup>h</sup>                                    | 1,9                      | 470            | 38                                      | 31                  | 0,247                | ~75%                |
| 17-04-76 18 <sup>h</sup> 15                    | les Combes n°8<br>885,56 - 78,25 - 1245            | Rhodamine B<br>1,8 Kg         | 50                                             | Doria       | 20-04-76 12 <sup>h</sup>                                    | 4,15                     | 245            | 62,9                                    | 52                  | 0,059                | 36%                 |
| 05-05-76 09 <sup>h</sup> 30-11 <sup>h</sup> 30 | Creux de lolette<br>884,23 - 81,39 - 1370 n°9      | Uranine<br>7 Kg               | volume eau d'entraînement<br>18 m <sup>3</sup> | Monde Bange | 11-05-76 22 <sup>h</sup><br>11-05-76 <15-05-15 <sup>h</sup> | 10,15<br>11,7            | 1030<br>820    | 65,0<br>48 < V < 77                     | 21<br>-             | 0,101<br>0,070       | 23%<br>-            |
| 08-05-76 17 <sup>h</sup> 40                    | Teppe de la Cha<br>885,77 - 79,95 - 1370 n°10      | Rhodamine B<br>1,9 Kg         | 0,05                                           | Bange       | avant 27-05 17 <sup>h</sup> 30                              | 11,6                     | 820            | V > 25,4                                | -                   | 0,07                 | -                   |
| 15-09-76 12 <sup>h</sup> 30                    | Marais de la Croix<br>883,80 - 79,25 - 1390 n°11   | Rhodamine B<br>1,3 Kg         | 10                                             | Doria       | avant 18-09 11 <sup>h</sup>                                 | 5,0                      | 390            | V > 68                                  | -                   | 0,078                | -                   |
| 25-09-76                                       | "Trou du Garde" n°12<br>~ 884,15 - 78,20 - 1410    | Uranine<br>0,4 Kg             | 15                                             | Doria       | avant 03-10 12 <sup>h</sup>                                 | ~4,0                     | ~100           | V > 21                                  | -                   | 0,025                | -                   |

fig.25 TABLEAU DE RESULTATS DES TRACAGES

d'uranine.

Le débit au point d'injection était de l'ordre de 15 l/s (débit à la Doria = 40 l/s).

Résultats :



5°/- Interprétation :

L'ensemble de ces traçages nous apporte des renseignements sur divers points : - D'abord sur les zones drainées par chaque exsurgence, en précisant le rôle de la lithostratigraphie et de la tectonique dans les circulations souterraines.

- Ensuite sur les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères karstiques.

a- Les circulations souterraines.

On note que le pendage des couches géologiques est prépondérant dans la direction d'écoulement des eaux souterraines. La fracturation n'intervient que d'une manière secondaire.

- Le rôle des failles.

Les trois grandes fractures E-W de la partie Nord du massif entraînent vraisemblablement, du fait de leur rejeu, un enfoncement graduel des circulations souterraines. Ainsi, elles permettraient des continuités hydrauliques entre le karst urgonien et le karst valanginien (fig. n° 26 ).

Si la faille d'Arith, à valeur synclinale s'amortit vers l'Est, et permet ainsi la présence de l'exsurgence urgonienne de Prérrouge, il n'en est pas de même pour la faille de Prépoulain qui a la valeur d'un anticlinal transverse. L'hypothèse précédente explique pourquoi l'on n'observe pas d'exsurgence à son niveau.

La faille de la Montagne de la Cha facilite la pénétration des eaux en profondeur et les canalise en quelque sorte vers le Nord.

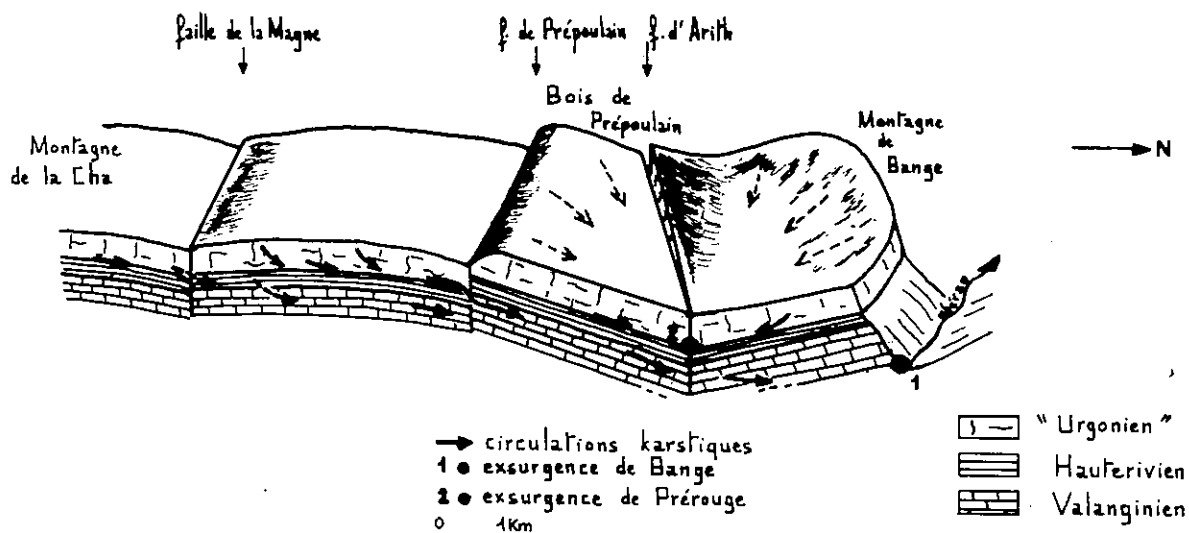


fig.26 SCHÉMA DES CIRCULATIONS KARSTIQUES DANS LA PARTIE NORD DU MASSIF

#### - Le problème de l'Hauterivien.

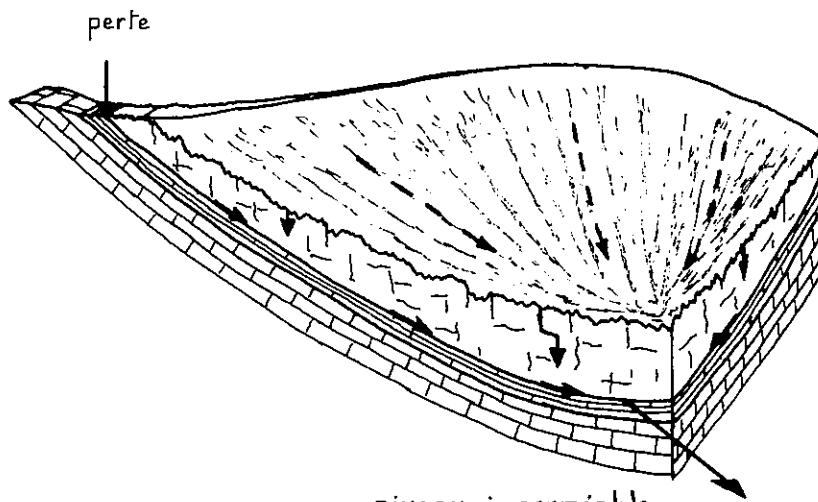
La traversée de l'Hauterivien est effective et ~~contrast~~ avec l'existence des systèmes karstiques urgoniens de la Doria et de Prérrouge. Elle est liée à sa fracturation et à des phénomènes de suffosion affectant les niveaux les plus marneux.

Le pendage des couches géologiques semble jouer, là aussi un rôle déterminant. En effet, on conçoit très bien que, plus le pendage est fort, plus l'eau aura tendance à ruisseler souterrainement, sur les niveaux marneux de l'Hauterivien (cas de la perte des marais de la Croix. fig. n°27), tandis que dans le cas de faible pendage, l'eau aura plutôt tendance à s'infiltrer à travers l'Hauterivien (cas de la perte des Ebats notamment. fig. n°27).

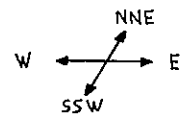
#### - Les diffluences karstiques.

La particularité la plus remarquable concernant ces traçages est l'existence d'une zone de diffluence mise en évidence par quatre expériences dont trois réalisées simultanément. Il faut noter que ces quatre traçages ont été réalisés en période de hautes eaux. Il se peut qu'à l'étiage le comportement des traceurs soit différent.

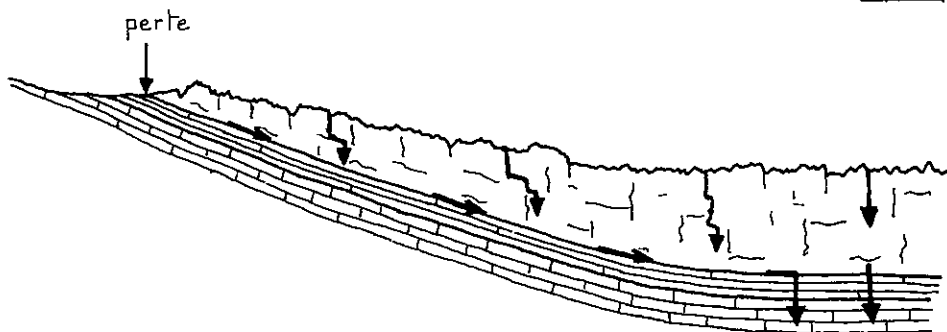
On peut considérer qu'il y a une cause commune à ce phénomène qui a lieu dans le Valanginien, puisqu'il s'agit du niveau concerné par les injections, se trouvant stratigraphiquement le plus bas.



niveau imperméable  
Cas de la perte des marais de la Croix



-  "Urgonien"
-  Hauterivien
-  Valanginien



niveau perméable  
Cas de la perte des Ebats (coupe Ouest-Est)

fig.27 RÔLES DE L'HAUTERIVIEN

Les injections des Ebats (n° 1), du Revard (n° 2) et du Rebollion (n° 3) concernent des écoulements superficiels, puis souterrains, se dirigeant vers l'Est, c'est-à-dire vers une zone où le pendage des couches est subhorizontal. C'est dans cette zone que se trouve d'ailleurs le "Creux de Lolette" (n° 9), lieu d'injection du quatrième traçage. L'injection du Pertuiset n'a pas subi cette influence. Effectivement, situé un peu plus au Sud, le plongement des structures, vers le Sud, commence à se manifester et entraîne les eaux en totalité vers l'exsurgence du Monde. Une telle zone tabulaire est évidemment très favorable à la formation de réservoirs de toutes dimensions.

On remarque que les vitesses apparentes des particules les plus rapides de chaque traceur sont élevées et voisines de celles des traçages du réseau Urgonien de la Doria, effectuées simultanément. Ces diffluences ne seraient donc pas dues à une nappe en fissures dans le valanginien, mais plutôt à une zone de siphons intercommuniquant, ou même à un véritable lac souterrain qui posséderait deux ~~déversoirs~~ réservoirs, un vers le Sud, en direction du "Bout du Monde", l'autre vers le Nord, en direction de "Bange".

Cette hypothèse est à rapprocher des observations spéléologiques du réseau karstique exploré de la Doria, à savoir une zone de siphons dans un coeur synclinal, sous la Féclaz, et plusieurs lacs souterrains à proximité immédiate de l'exsurgence, également dans un léger repli synclinal.

#### - Conclusion.

On distingue ainsi deux principaux niveaux de circulations souterraines : à la base se trouve un ensemble karstique valanginien répartissant les eaux vers le Nord (Bange) et vers le Sud (Monde), à partir d'une même zone, commune aux deux émergences. Au-dessus, l'ensemble karstique urgonien est plus morcellé et il n'existe pas de niveau réellement imperméable entre les deux. La perméabilité de l'Hauterivien dépendra des structures locales.

#### b- Apport des traçages sur l'hydrodynamique karstique.

La comparaison des D.T.S. observées pour deux aquifères karstiques différents ne peut se faire que si l'on a effectué de nombreux traçages répartis dans l'espace et s'ils concernent des états hydrodynamiques semblables. Effectivement, la réponse de l'aquifère pourra être différente selon qu'il s'agit d'une crue, d'une décrue, d'un étiage, ou d'une suite de ces états.

Les distributions des temps de séjour obtenues à l'exsurgence de la Doria

et du Bout du Monde présentent une différence particulièrement nette. Il s'agit d'un étalement beaucoup plus important des courbes pour les traceurs restitués au Bout du Monde (restitution sur une vingtaine de jours lors du multitraçage). Cet étalement est assorti d'une grande dilution hydrodynamique des traceurs avec plusieurs "pics de concentration" pour chaque restitution. Inversement, les traceurs restitués à la Doria présentent une courbe à un seul pic, avec une traine parfois longue, lorsque le débit devient très faible.

Pour l'exsurgence de Bange, les distributions des temps de séjour sont peu précises du fait de l'impossibilité d'effectuer des prélèvements lorsque le débit est peu important. Néanmoins, les courbes obtenues ne présentent qu'un seul pic. Cet étalement dans le temps de la restitution des traceurs au Bout du Monde est à rapprocher du faible coefficient de variabilité des débits (1 à 12 seulement, alors qu'il est de 1 à 200 par exemple pour la Doria) qui implique un effet de régularisation, par le système karstique, des apports atmosphériques.

Pour le système karstique de la Doria, les restitutions de courte durée (guère plus d'une journée) avec de fortes concentrations peuvent s'expliquer par un phénomène de type "piston flow" dans le collecteur. Le volume d'eau affecté par le traceur se déplacerait ainsi dans des chenaux à surface libre ou en charge, respectivement comme dans une rivière aérienne ou une conduite forcée. Le transit se ferait donc sans dilution ou fractionnement important.

A l'exsurgence de Bange, on remarque que les trois traceurs dont les injections ont été effectuées à proximité du Mont Revard (point n° 1, 2, 3), c'est-à-dire à la limite Sud du bassin versant karstique semblent être ressorti simultanément, très rapidement. Il se serait produit un phénomène de rétention temporaire, à proximité de l'exsurgence dû à la faiblesse des débits. Les pluies du 13 et 14 novembre ayant entraîné l'expulsion des traceurs.

L'utilisation de l'uranine, à la fois pour l'injection au Revard (point n°2) et aux chalets des Creusates (point n°5) ne prête pas à confusion, étant donné le comportement identique de la Rhodamine WT (point n°1), et de la Sulforhodamine G (point n°3), qui implique géologiquement, pour l'uranine, une restitution aux mêmes exsurgences, c'est-à-dire celle de Bange et celle du Monde.

Si l'on ne considère pas les restitutions à Bange de ces trois derniers traceurs qui ont subi le phénomène de rétention décrit précédemment, les particules de traceur les plus rapides, pour tous les autres traçages, ont atteint leurs exu-

toires respectifs alors que les systèmes karstiques étaient encore en période d'alimentation importante. Ainsi, la comparaison des vitesses apparentes de ces particules montre une remarquable homogénéité, quelque soit le système karstique, aux alentours de 50 m/h.

C'est un ordre de valeur qui peut être intéressant à retenir, dans le cas de pollution susceptible d'atteindre des émergences captées (Le Monde, par exemple).

#### 6°/- Les bilans de restitution :

Bien qu'assez imprécis à l'exurgence du Bout du Monde (incertitude sur les débits d'environ 20%) leurs très faibles valeurs, 1% pour l'uranine de l'injection du Revard, 7% pour la sulforhodamine G, 23% pour l'uranine de l'injection du "creux de Lolette" et 24% pour la rhodamine WT, montrent l'existence d'un autre exutoire pour le même système karstique. L'impossibilité de contrôler les débits à ce deuxième exutoire (Bange) ne permet donc pas d'effectuer des bilans de restitution complets. Cependant, pour les trois traceurs restitués, semble-t-il, simultanément à Bange, lors du multitraçage, la rhodamine WT a été détectée avec des valeurs de concentration de l'ordre d'une puissance de 10 supérieure à celles de l'uranine et de la sulforhodamine G. Ainsi, la masse de rhodamine WT restituée à cet exutoire est certainement beaucoup plus importante que celle des deux autres traceurs.

Il en est de même pour l'exutoire du Bout du Monde.

Au total, le taux de restitution de la Rhodamine WT est donc bien plus élevé que celui de l'uranine ou de la sulforhodamine G. Cela pourrait être dû à un meilleur comportement de la rhodamine WT, au moins dans le système karstique valanginien.

Dans le système urgonien, le taux de restitution de l'uranine est excellent pour le traçage du Mont Peney qui concerne une circulation souterraine de faible longueur (1,9 km), et à gradient hydraulique élevé. Par contre, le karst urgonien de la Doria n'a restitué que 36% de la rhodamine B de l'injection des Combes et 43% du dichromate de sodium de l'injection des Chalets de Glaise.

En conclusion, les taux de restitution obtenus sont assez faibles. Dans le cas des traceurs chimiques, les limites de détection (environ  $10^{-9}$  kg/l) pourraient expliquer ces faibles taux ; une part importante des traceurs serait restituée à des concentrations inférieures au seuil de détection.

Dans le cas des traceurs fluorescents, étant donné les limites de détection extrêmement basses ( $10^{-10}$  à  $10^{-11}$  kg/l), l'hypothèse précédemment invoquée ne peut guère être envisagée.

Il se produirait des phénomènes de fixation, au cours des transits, par interaction avec le milieu traversé. Le rôle des particules argileuses pourrait être important dans ces phénomènes. Ainsi, le taux d'absorption de la rhodamine B sur les argiles en suspension dans l'eau est important, beaucoup plus que celui d'autres traceurs fluorescents comme l'uranine. D'autre part, lors de l'injection de rhodamine B en solution très concentrée, on constate une fixation par toutes sortes de matériaux. Il est ainsi fort probable que l'on perd une part non négligeable de ce traceur, par fixation, à proximité du lieu d'injection.

Le phénomène d'absorption étant dû au caractère cationique de la rhodamine B, J.C. RERAT préconise, afin de le réduire, de neutraliser la solution avant l'injection. Ensuite, la grande dilution dans les eaux à pH voisin de 7, en général, assurera le maintien de la forme molaire, donc non chargée.

#### 7°/- Essai de comparaison des courbes de restitution obtenues sur des systèmes karstiques des massifs des Bauges, de la Chartreuse et du Vercors.

R. CHARRIERE et B. TALOUR donnent des exemples de courbes de restitution obtenues sur des systèmes karstiques de massifs subalpins, voisins de celui des Bauges. Il s'agit du système karstique de l'exsurgence de la Goule Blanche, dans le Vercors, étudié par R. CHARRIERE et du système karstique de l'exsurgence de Noirfond, en Chartreuse, étudié par B. TALOUR.

Ces massifs possèdent des caractères physiques et hydrogéologiques comparables. Les multitraçages concernant le système de la Goule Blanche (deux injections) et celui de Noirfond (cinq injections) ont été effectués en période de fonte des neiges.

##### a- La forme des courbes. (fig. n°28).

Les courbes obtenues dans les Bauges (à la Doria et à Fontaine Noire), en Chartreuse (à Noirfond) ou dans le Vercors (à la Goule Blanche), en régime d'alimentation importante, sont toutes de type unimodal, assez symétriques. Seules, les courbes obtenues à l'exsurgence du Bout du Monde dans les Bauges, sont de type plurimodales.

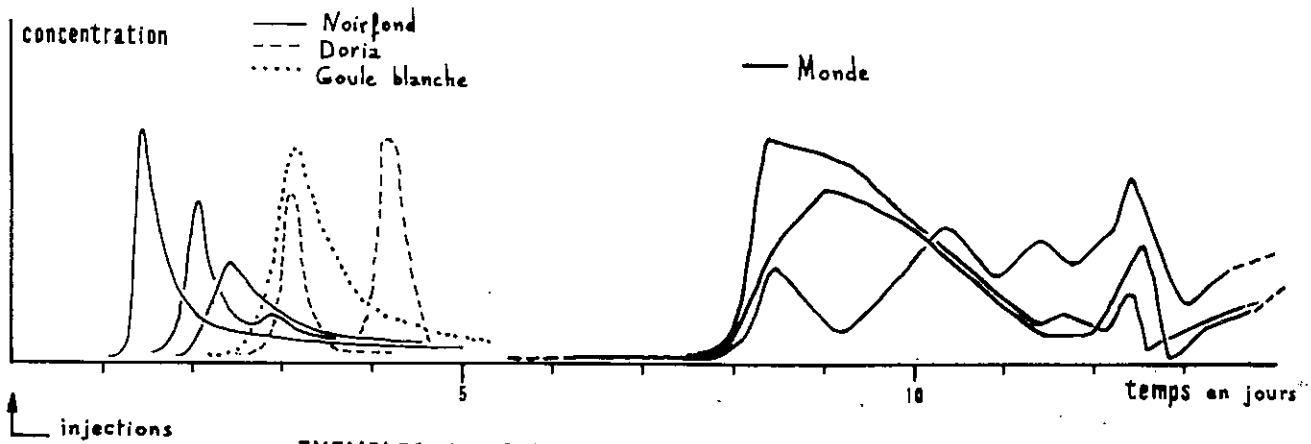


fig.28

EXEMPLES DE COURBES DE RESTITUTION OBTENUES SUR DES  
SYSTEMES KARSTIQUES SUBALPINS (BAUGES-CHARTREUSE-VERCORS)

b- Les vitesses.

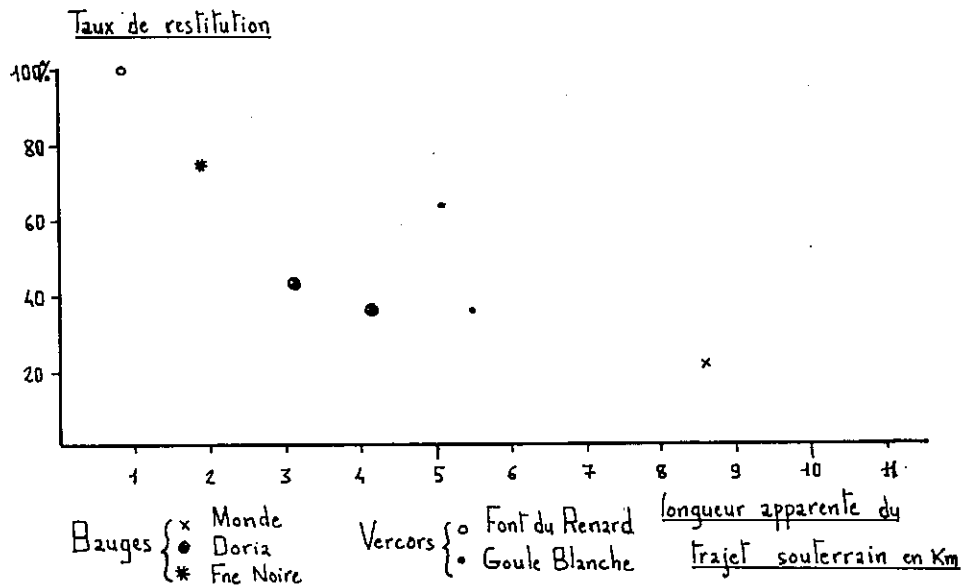
|                                              | B A U G E S |       |             |                              | C H A R T R E U S E          | V E R C O R S |                |
|----------------------------------------------|-------------|-------|-------------|------------------------------|------------------------------|---------------|----------------|
|                                              | Enc Noire   | Bange | Doriz       | Monde                        | Noirfond                     | Goule Blanche | Font du Renard |
| Vitesses des particules les plus rapides m/h | 38          | 82    | 44-63       | 49 ± 65<br>(5 valeurs)       | 90 ± 120<br>(5 valeurs)      | 78 - 91       | 73             |
| Vitesses moyennes m/h                        | 31          | 52    | 38-52       | 21 ± 44<br>(5 valeurs)       | 60 ± 80<br>(5 valeurs)       | 54 - 56       | 55             |
| Gradients hydrauliques                       | 0,247       | 0,097 | 0,105-0,088 | 0,096 ± 0,112<br>(5 valeurs) | 0,187 ± 0,254<br>(5 valeurs) | 0,08          | 0,20           |
| Taux de restitution                          | ~ 75%       | —     | 36%-43%     | 1% ± 24%                     | —                            | 64% 36%       | ~ 100%         |
| Débit moyen lors des expériences m³/s        | 0,07        | —     | 1 - 0,3     | 0,20-0,25                    | —                            | 3,2           | 0,06-0,07      |

Dans le tableau ci-dessus ont été regroupées les valeurs de vitesse obtenues lors d'expériences présentant des conditions favorables à un transit rapide des traceurs. On s'aperçoit que les vitesses des particules de traceur les plus rapides, ainsi que les vitesses moyennes sont du même ordre de grandeur. Les différences les plus marquées concernent, d'une part le karst du Monde qui présente les vitesses moyennes les plus faibles ; d'autre part le karst de Noirfond qui présente les vitesses maximales et moyennes les plus élevées. Pour le Bout du Monde, les vi-

tesses moyennes relativement faibles sont en concordance avec la forme plurimodale des courbes. Pour Noirfond, les vitesses élevées sont liées à la faible superficie ( $3,6 \text{ km}^2$ ) et au fort dénivelé du système karstique, s'étageant de 600 à 2000 mètres d'altitude. Ces caractères se répercutent sur les circulations souterraines par de très forts gradients hydrauliques.

c- Les bilans de restitution.

Le graphique ci-dessous montre l'influence de la longueur apparente du parcours souterrain, sur le pourcentage de traceur récupéré. On peut considérer qu'il n'y a pas de pertes vers d'autres exutoires, non surveillés.



Il montre l'importance primordiale de la longueur du trajet souterrain dans le pourcentage de traceur récupéré. Ainsi, la décroissance du taux de restitution en fonction de l'allongement du parcours souterrain, peut s'expliquer par des phénomènes de dilution. Effectivement, on constate que les valeurs des maximum de concentration en traceur, obtenues lors de chaque traçage, évoluent grossièrement dans le sens inverse de la longueur du trajet souterrain.

d- Conclusion.

Cet essai de comparaison montre des caractères communs aux différents

systèmes karstiques subalpins étudiés. Il s'agit de karsts de montagne à circulation rapide, en chenaux et comportant vraisemblablement de faibles réserves. Nous avons vu qu'un seul système karstique, celui du "Bout du Monde" dans les Bauges se distinguait assez nettement des autres par ses courbes de restitution étalées sur une quinzaine de jours. Cette particularité laisse envisager la possibilité d'une circulation de type fissural plus importante.

#### 8°/- Conclusion générale sur les traçages :

L'ensemble des expériences de traçage a permis, non seulement, de déterminer les différents bassins versants karstiques, mais aussi d'approcher les mécanismes de fonctionnement des circulations souterraines.

Cela a été rendu possible grâce au grand nombre de traçages réalisés, impliquant l'emploi de nombreux traceurs différents et grâce à l'obtention des distributions des temps de séjour pour chaque expérience.

## CHAPITRE . 4

### LES BASSINS VERSANTS KARSTIQUES

## LES BASSINS VERSANTS KARSTIQUES

A la suite des expériences de traçage, on est amené à définir les aires d'alimentation de chaque exsurgence.

Généralement en pays karstique et notamment pour une région tabulaire, les bassins versants topographiques ne correspondent pas aux bassins versants d'alimentation des émergences. L'exemple de la Bourne et de la Vernaïson, dans le Vercors, est un cas très remarquable : leurs superficies de bassin versant apparent sont sensiblement similaires ( $232 \text{ km}^2$  à la station de Bournillon haute chute et  $281 \text{ km}^2$  pour la Vernaïson) ; par contre, leurs débits moyens respectifs sont très dissemblables ( $6,20 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Bournillon et seulement  $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$  à celle de Pont en Royans pour la Vernaïson).

Les différents bassins versants karstiques seront définis par leurs caractères morphométriques.

### I- LES SYSTEMES KARSTIQUES DE L'ENSEMBLE VALANGINIEN.

#### 1°/- Le bassin versant de l'exsurgence de Bange (fig. n°29a).

Il s'agit du bassin versant le plus vaste parmi ceux qui ont été étudiés. Il représente  $34,3 \text{ km}^2$ . On peut estimer que l'erreur sur la superficie est inférieure à 20%.

La répartition des surfaces en fonction de l'altitude est la suivante :

| Tranches d'altitude<br>m | Superficie<br>$\text{Km}^2$ | Pourcentage |
|--------------------------|-----------------------------|-------------|
| 500 - 600                | 0,14                        | 0,41        |
| 600 - 700                | 0,61                        | 1,77        |
| 700 - 800                | 0,83                        | 2,40        |
| 800 - 900                | 1,27                        | 3,71        |
| 900 - 1000               | 1,54                        | 4,47        |
| 1000 - 1100              | 1,31                        | 3,82        |
| 1100 - 1200              | 2,60                        | 7,56        |
| 1200 - 1300              | 5,81                        | 16,92       |
| 1300 - 1400              | 13,01                       | 37,91       |
| 1400 - 1500              | 4,20                        | 12,23       |
| 1500 - 1600              | 1,70                        | 4,96        |
| 1600 - 1700              | 1,30                        | 3,79        |

La courbe hypsométrique présente un long replat entre 1300m et 1450m. Au dessous de 1150m, la chute est brutale.

L'altitude la plus élevée est atteinte au Semnoz (1670m). Celle de l'exsurgence est de 550m.

L'altitude médiane, de 1370m est assez différente de l'altitude moyenne (1275m).

Le bassin versant comprend une partie Nord peu étendue (4,9 km<sup>2</sup>) située sur la montagne du Semnoz et dominant l'émergence. La partie Sud (29,3 km<sup>2</sup>) draine surtout des affleurements urgoniens, vraisemblablement grâce au jeu de la faille de Prépoullain (voir fig. n°26 , p.83 ). Elle s'étend longuement jusque vers la zone centrale du plateau. La partie commune avec le bassin versant de l'exsurgence du Bout du Monde représente 4,1 km<sup>2</sup>. De plus, il faut ajouter que, lors de pluies durables, une partie des eaux échappe au bassin karstique par saturation des zones de pertes, pour alimenter le torrent du Sierroz. Un tel drainage superficiel n'intéresse toutefois qu'environ 6 km<sup>2</sup>.

L'indice de compacité (indice de Gravelius  $K = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$

avec P = périmètre en km

A = superficie en km<sup>2</sup>

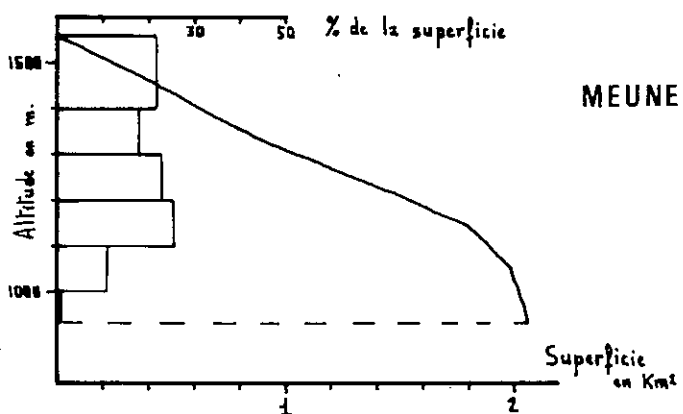
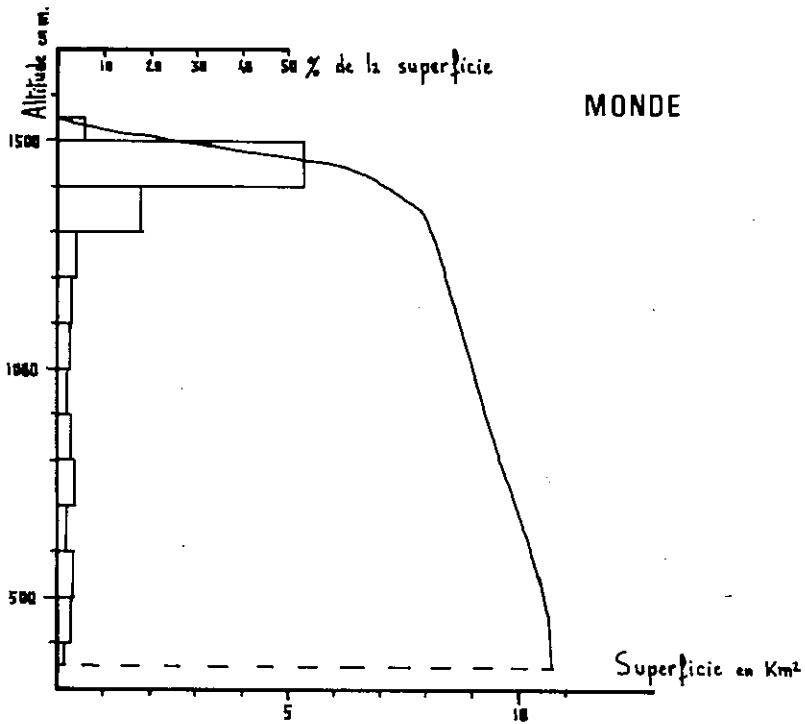
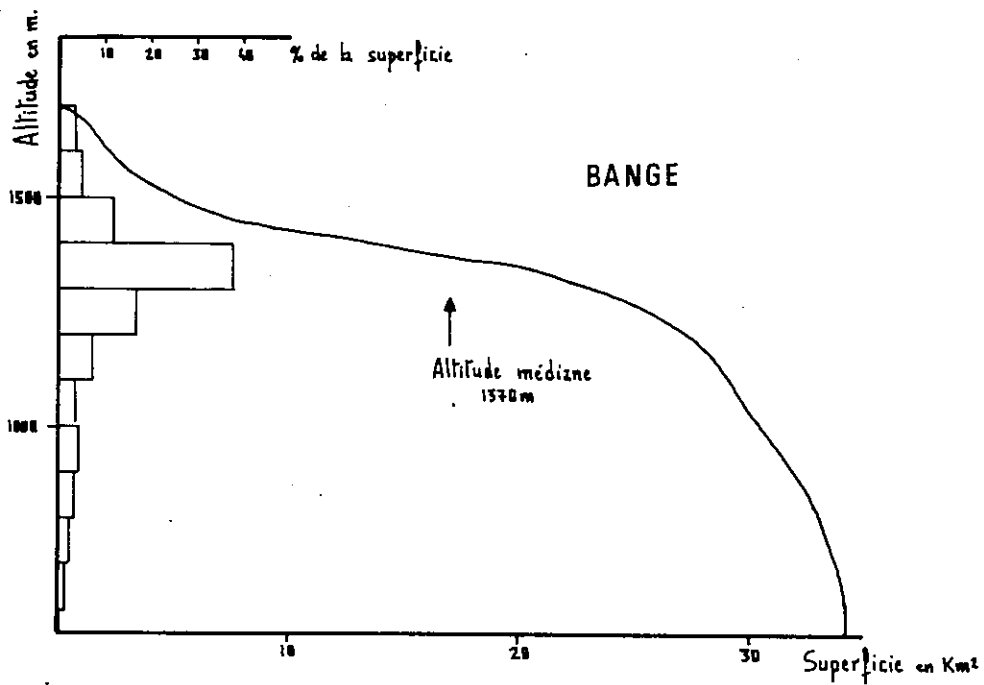
définit la forme du bassin. Il représente le rapport du périmètre du bassin sur le périmètre du cercle de surface équivalente. (K = 1 pour un cercle ; K = 1,12 pour un carré ; K = 1,28 pour un triangle équilatéral ; K = 1,5 pour un rectangle dont la longueur est cinq fois supérieure à la largeur). Dans le cas présent, l'indice étant égal à 2,98, le bassin versant de Bange a donc une forme rectangulaire, très allongée.

Végétation : forêt de conifères et alpages.

## 2°/- Le bassin versant de l'exsurgence du Bout du Monde :

Il représente une superficie de 10,9 km<sup>2</sup> avec une incertitude du même ordre que précédemment, c'est-à-dire 15%. La répartition altimétrique est la suivante :

fig. 29a COURBES HYPSONOMETRIQUES  
ET FREQUENCES ALTIMETRIQUES



| Tranches d'altitude<br>m | Superficie<br>Km <sup>2</sup> | Pourcentage |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|
| 300 - 400                | 0,018                         | 0,16        |
| 400 - 500                | 0,32                          | 2,91        |
| 500 - 600                | 0,36                          | 3,28        |
| 600 - 700                | 0,19                          | 1,78        |
| 700 - 800                | 0,40                          | 3,63        |
| 800 - 900                | 0,30                          | 2,77        |
| 900 - 1000               | 0,23                          | 2,07        |
| 1000 - 1100              | 0,30                          | 2,60        |
| 1100 - 1200              | 0,32                          | 2,90        |
| 1200 - 1300              | 0,44                          | 4,06        |
| 1300 - 1400              | 1,94                          | 17,81       |
| 1400 - 1500              | 5,47                          | 50,35       |
| 1500 - 1550              | 0,62                          | 5,70        |

La courbe hypsométrique est bien différente de la précédente.

En effet, elle montre deux parties bien distinctes : un plateau représentant près de 75% de la surface totale, situé entre 1350m et 1550m d'altitude et un versant exposé plein Sud, descendant régulièrement jusqu'au point d'émergence. Cela se traduit par une altitude médiane de 1460m, nettement supérieure à l'altitude moyenne (1280m). Le point le plus élevé se trouve à 1560m ; l'exsurgence se situant à 350m.

Il faut rappeler que l'extrémité Nord de ce bassin versant, soit une surface de 4,1 km<sup>2</sup> situé sur la partie tabulaire, contribue également à l'alimentation de l'émergence de Bange.

La végétation est représentée par une forêt assez clairsemée sur le plateau ; les alpages favorisent le ruissellement et l'infiltration en des points bien localisés. Sur le versant de Lovette, très ensoleillé et sec, les prairies occupent l'essentiel de la superficie, au-dessus de 1000m.

L'indice de compacité, égal à 2,48 définit un bassin versant de forme rectangulaire.

### 3°/- Le bassin versant de l'exsurgence de la Meune (fig. n°29a).

De superficie beaucoup plus réduite (2,06 km<sup>2</sup>), ce bassin versant présente des limites assez nettes permettant une bonne précision dans sa définition (de l'ordre de 10%).

| Tranches d'altitude<br>m | Superficie<br>Km <sup>2</sup> | Pourcentage |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|
| 940 - 1000               | 0,017                         | 0,82        |
| 1000 - 1100              | 0,23                          | 11,0        |
| 1100 - 1200              | 0,53                          | 25,5        |
| 1200 - 1300              | 0,47                          | 22,9        |
| 1300 - 1400              | 0,37                          | 18,0        |
| 1400 - 1560              | 0,45                          | 21,8        |

La courbe hypsométrique est régulière ; seule la partie la plus basse, au-dessous de 1150m chute brutalement. Ainsi, les altitudes médianes et moyennes sont très proches et ont pour valeur respective 1305m et 1265m.

Il s'agit d'un versant exposé au Nord et s'étageant entre 930m (exsurgence) et 1560m d'altitude. La végétation est très développée (conifères essentiellement). La faiblesse de l'ensoleillement, notamment en hiver, en fait un bassin versant particulièrement froid et humide qui contraste fortement avec le versant Sud, chaud et sec, de la partie inférieure du bassin versant de l'exsurgence du Bout du Monde.

L'indice de compacité est égal à 1,37 (forme ovale).

## II- LES SYSTEMES KARSTIQUES DE L'ENSEMBLE URGONIEN.

1°/- Le bassin versant de l'exsurgence de la Doria. (fig. n°29b).

La superficie de ce bassin versant est de 14,0 km<sup>2</sup>. L'incertitude est estimée à 10%. Répartition altimétrique :

| Tranches d'altitude<br>m | Superficie<br>Km <sup>2</sup> | Pourcentage |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|
| 1100 - 1150              | 0,38                          | 2,7         |
| 1150 - 1200              | 1,0                           | 7,0         |
| 1200 - 1250              | 1,60                          | 11,4        |
| 1250 - 1300              | 2,82                          | 20,1        |
| 1300 - 1350              | 2,80                          | 19,9        |
| 1350 - 1400              | 3,29                          | 23,4        |
| 1400 - 1450              | 1,06                          | 7,5         |
| 1450 - 1500              | 0,68                          | 4,9         |
| 1500 - 1560              | 0,43                          | 3,0         |

La courbe hypsométrique montre une prédominance des altitudes comprises entre 1200m et 1400m. L'exutoire se trouve à 1000m et le point culminant du bassin versant est à 1560m. Les altitudes médianes et moyennes sont similaires et ont

pour valeurs respectives 1340m et 1320m. Cela définit un bassin tabulaire assez élevé.

L'indice de compacité est égal à 1,47 (forme rectangulaire).

Il convient de remarquer que sur la partie Sud-Est du bassin versant, par fortes pluies ou lors de la fonte des neiges, une partie des eaux va directement alimenter la Leysse. On se trouve là sur les premiers niveaux du tertiaire transgressif, représentés par des calcaires plus ou moins gréseux. Ces couches sont généralement assez perméables, mais la pente topographique favorise ici le ruissellement. Les surfaces concernées par ce double phénomène représentent environ 2,2 km<sup>2</sup> soit 15% du bassin versant karstique et sont comprises entre 1100m et 1300m d'altitude.

La végétation est constituée d'étendues forestières (feuillus et conifères), développées sur les calcaires urgoniens et de prairies ou tourbières sur les niveaux tertiaires.

## 2°/- Le bassin versant de l'exsurgence de Préroutte (fig. n° 29 b).

Ce bassin se situe à l'extrémité Nord du secteur étudié où sa délimitation est relativement aisée. Il draine les calcaires urgoniens de la montagne de Bange et du Bois de Prépoulain, recouverts par des dépôts tertiaires ou quaternaires (essentiellement d'origine glaciaire) dans les parties basses. La superficie concernée représente 17,76 km<sup>2</sup> avec une incertitude de 10%. La répartition altimétrique est la suivante :

| Tranches d'altitude<br>m | Superficie<br>Km <sup>2</sup> | Pourcentage |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|
| 570 - 700                | 0,28                          | 1,6         |
| 700 - 800                | 2,29                          | 12,9        |
| 800 - 900                | 1,75                          | 9,9         |
| 900 - 1000               | 2,56                          | 14,4        |
| 1000 - 1100              | 4,72                          | 26,6        |
| 1100 - 1200              | 2,89                          | 16,3        |
| 1200 - 1300              | 1,71                          | 9,7         |
| 1300 - 1420              | 1,55                          | 8,7         |

Altitude émergence = 570m

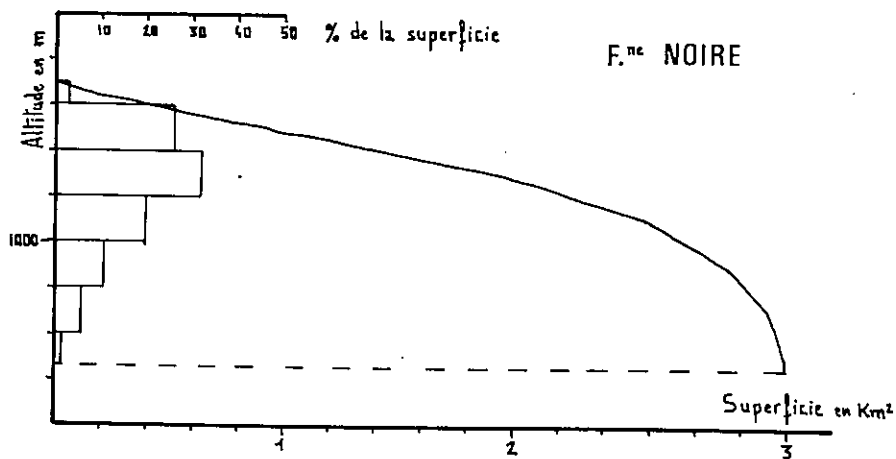
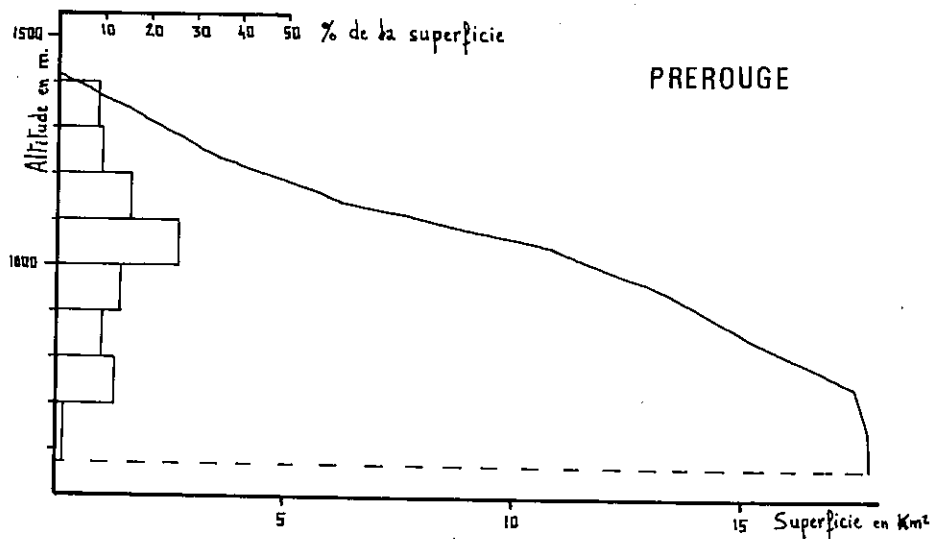
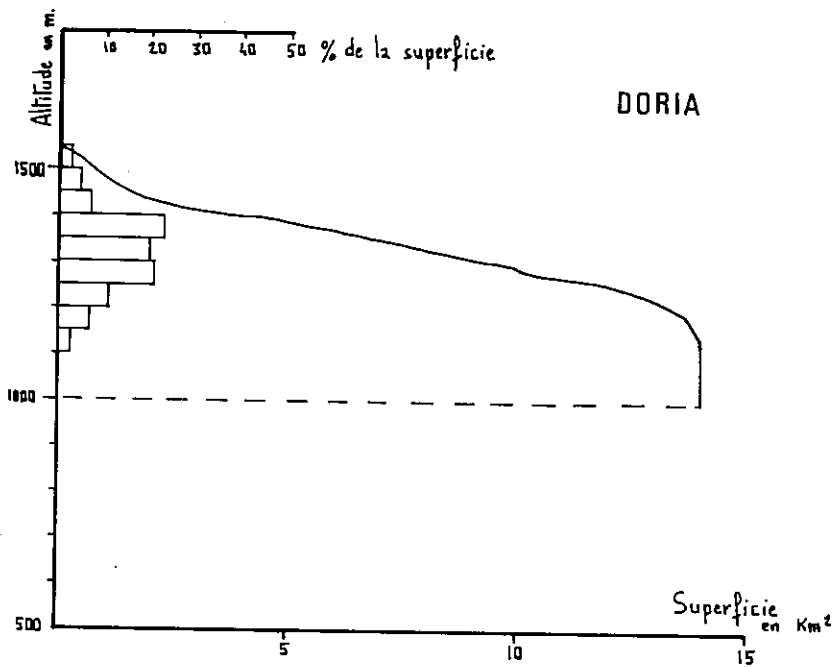
Altitude maximum = 1420m

Altitude médiane = 1090m

Altitude moyenne = 1030m.

fig.29b

COURBES HYPSONOMETRIQUES  
ET FREQUENCES ALTIMETRIQUES



La courbe hypsométrique montre une bonne régularité.

L'indice de compacité égal à 1,17 définit un bassin versant de forme carrée.

Végétation : prairies jusque vers 800m puis feuillus et conifères.

Juste au-dessus de l'émergence, sur la partie la plus basse du bassin, se trouvent les villages d'Arith et de Montagny à l'habitat assez dispersé et à vocation agricole.

### 3°/- Le bassin versant de l'exsurgence de Fontaine Noire (fig. n°29b).

Fontaine Noire est le point d'émergence des eaux tombées sur le Mont Peney dont la surface représente 3,2 Km<sup>2</sup> (incertitude : de l'ordre de 10%). Répartition altimétrique :

| Tranches d'altitude<br>m | Superficie<br>Km <sup>2</sup> | Pourcentage |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|
| 730 - 800                | 0,04                          | 1,3         |
| 800 - 900                | 0,19                          | 6,0         |
| 900 - 1000               | 0,35                          | 10,9        |
| 1000 - 1100              | 0,63                          | 19,7        |
| 1100 - 1200              | 1,03                          | 32,0        |
| 1200 - 1300              | 0,84                          | 26,3        |
| 1300 - 1350              | 0,11                          | 3,4         |

Altitude de l'exsurgence : 730m

Altitude du Mont Peney : 1350m

Altitude moyenne : 1115m

Altitude médiane : 1185m

Indice de compacité = 1,18 (forme carrée).

L'essentiel du bassin apparaît comme un versant à faible dénivelé, orienté au Nord-Est et situé à plus de 1000m d'altitude. En-dessous, la pente topographique s'accroît brutalement jusqu'à l'émergence.

Végétation : Présence de conifères sur les affleurements urgoniens et d'une vaste prairie ponctuée de pertes sur les dépôts tertiaires.

### 4°/- Les bassins versants des exsurgences de la Duy et de Saint François.

Ces deux bassins situés sur le versant Est de la montagne de la Cha sont contigus et peu importants au point de vue superficie.

Répartitions altimétriques respectives :

| Tranches d'altitude<br>m | DUY                           |     | SAINT FRANÇOIS                |     |
|--------------------------|-------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
|                          | Superficie<br>Km <sup>2</sup> | %   | Superficie<br>Km <sup>2</sup> | %   |
| 1030 - 1100              | 0,12                          | 7   | -                             | -   |
| 1100 - 1200              | 0,28                          | 17  | 0,07                          | 8   |
| 1200 - 1300              | 0,41                          | 25  | 0,39                          | 45  |
| 1300 - 1400              | 0,63                          | 38  | 0,22                          | 26  |
| 1400 - 1440              | 0,22                          | 13  | 0,18                          | 21  |
|                          | 1,66                          | 100 | 0,86                          | 100 |

Incertitude sur les superficies totales : 20%

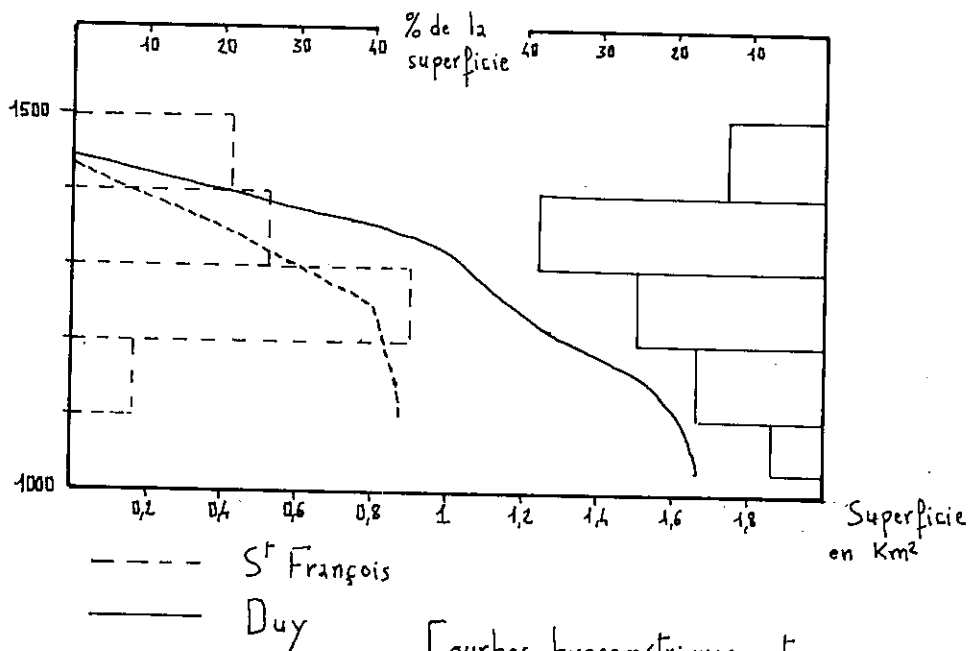


fig.29c

Courbes hypsométriques et  
fréquences altimétriques

|                      | <u>La Duy</u> | <u>Saint François</u> |
|----------------------|---------------|-----------------------|
| Altitude médiane     | : 1350m       | 1340m                 |
| Altitude moyenne     | : 1280m       | 1310m                 |
| Altitude émergence   | : 1030m       | 1100m                 |
| Altitude maximum     | : 1440m       | 1425m                 |
| Indice de compacité: | 1,14          | 1,28                  |
| Végétation           | : forêt mixte |                       |

### III- LE BASSIN VERSANT TITHONIQUE DE L'EXSURGENCE DE LA "GOUILLE DES MOINES".

La délimitation de ce bassin versant est très imprécise du fait de l'importance de la couverture quaternaire (moraines et éboulis) et de la pente topographique très accusée favorisant le ruissellement.

La superficie, très modeste, est estimée à 0,97 km<sup>2</sup> avec une incertitude de l'ordre de 25%.

Répartition altimétrique :

| Tranches d'altitude<br>m | Superficie<br>Km <sup>2</sup> | %  |
|--------------------------|-------------------------------|----|
| 730 - 800                | 0,03                          | 3  |
| 800 - 900                | 0,08                          | 8  |
| 900 - 1000               | 0,23                          | 24 |
| 1000 - 1100              | 0,29                          | 30 |
| 1100 - 1200              | 0,28                          | 29 |
| 1200 - 1250              | 0,06                          | 6  |

Altitude médiane : 1100m  
 Altitude moyenne : 1040m  
 Altitude émergence : 730m  
 Altitude maximum : ~1250m  
 Indice de compacité : 1,35  
 (forme oblongue)

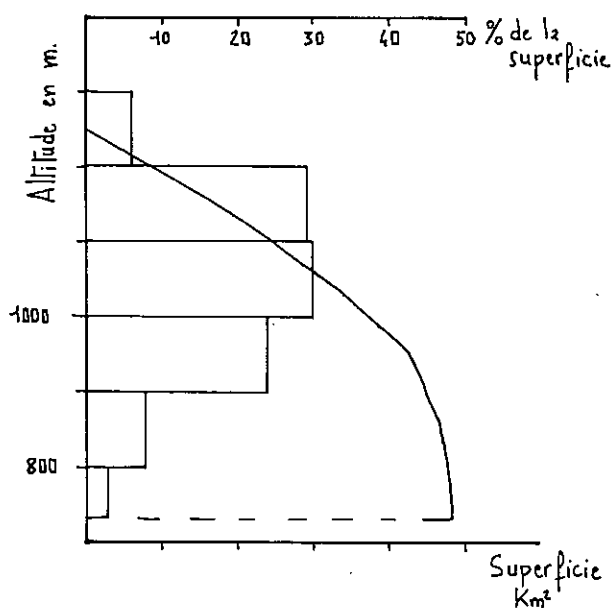


fig.29d Courbe hypsométrique et  
fréquences altimétriques

Ce bassin versant est essentiellement compris entre 900m et 1200m d'altitude. Son exposition à l'Ouest le fait bénéficier d'un fort ensoleillement.

Végétation : feuillus.

#### IV- LE BASSIN VERSANT TERTIAIRE DE LA SOURCE DE L'EMPEREUR.

La source de l'Empereur draine les calcaires gréseux tertiaires qui forment la butte de l'Epine. Mais il ne faut vraisemblablement pas limiter à cette seule butte l'étendue de son bassin versant du fait de l'importance des débits. On y rattachera donc une partie des surfaces occupées par le matériel quaternaire lié à l'écroulement du Mont Margériaz. On verra dans l'étude hydrochimique une justification de cette hypothèse.

La superficie ainsi délimitée représente 0,8 km<sup>2</sup>, mais l'incertitude est très grande (de l'ordre de 50%). L'émergence se trouve à 1000m d'altitude et le point le plus élevé ne dépasserait pas 1200m (altitude moyenne : 1120m). Ce bassin versant exposé au Nord-Est est occupé par des prairies servant de pâturages au bétail.

#### V- CONCLUSION.

On constate que les caractères morphologiques des bassins versants sont assez homogènes. Un seul, celui du Bout du Monde, se distingue nettement en incluant deux zones très différentes. Leur principale caractéristique commune est leur altitude moyenne comprise entre 1000 et 1300m. On pourra donc s'attendre à des similitudes au point de vue des régimes hydrologiques, liées à l'accumulation des précipitations, sous forme solide, durant plusieurs mois, suivie d'une libération rapide d'importants volumes d'eau. On verra par la suite les répercussions de ce phénomène sur les paramètres physico-chimiques des eaux.

CHAPITRE 5

ETUDE HYDROCHIMIQUE

## ETUDE HYDROCHIMIQUE

Elle consistera à déterminer les propriétés physiques des eaux ainsi que les concentrations des différents éléments chimiques en solution. Les renseignements apportés permettent généralement de connaître leurs origines et les terrains dans lesquels elles ont transité. De plus, l'étude de l'évolution des teneurs des différents éléments en fonction du temps facilitera la compréhension du fonctionnement des circulations souterraines. On définira les méthodes d'analyse employées étant donné que les résultats peuvent différer sensiblement selon la méthode utilisée et bien que ce soit essentiellement sa fidélité qui soit intéressante, beaucoup plus que sa précision ; du moins pour cette étude.

### I- LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES : METHODES D'ANALYSE.

#### 1°/- Les prélèvements :

Ils ont été effectués dans des flacons plastiques (polyéthylène ou P.V. C.) complètement remplis et hermétiquement bouchés. La conservation a été faite à basse température. Les mesures ont été réalisées le plus rapidement possible, au moins pour les paramètres à évolution rapide tels la pression de CO<sub>2</sub>, le pH, la résistivité, la teneur en carbonates ou en calcium.

#### 2°/- Les paramètres physiques :

##### a- La température.

Pour des sources superficielles, les variations de température au cours de l'année sont importantes et traduisent l'influence des variations de la température moyenne de l'air. Plus les eaux d'une source sont d'origine profonde, plus les variations de température de la source seront minimes.

Il en est de même généralement pour les débits ; une source d'origine profonde est susceptible de drainer un volume de terrain beaucoup plus important qu'une source superficielle et donc de posséder des réserves intéressantes pour un captage éventuel.

D'autre part, à l'échelle annuelle, on constate que la température moyenne d'une source est voisine de celle de l'air à l'altitude du point d'émergence. D'une manière plus détaillée, il est évident que d'autres facteurs ont une influence et notamment, l'exposition du versant.

Certaines émergences ne présentent pas du tout ces caractères ou alors ceux-ci apparaissent d'une manière plus ou moins atténuée. Il en est ainsi des émergences d'origine karstique dont le fonctionnement met en évidence un mode de circulation des eaux très particulier.

En pratique, la température a été mesurée à l'aide d'un thermomètre à mercure gradué au 1/10<sup>e</sup> de degré centigrade. L'incertitude de mesure est de  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ .

#### *b- Le pH.*

Par définition, le pH est le cologarithme de la concentration en ions  $\text{H}^+$ . Il a été mesuré au laboratoire par la méthode électrométrique. L'appareil utilisé est un pH-mètre Prolabo P<sub>1</sub> avec électrode de verre combinée Tacussel. L'étalonnage est effectué avec une solution tampon à pH = 7,00. Les résultats sont exprimés en unités de pH, à la température de 20°C. La précision de la détermination est de  $\pm 0,05$  unité pH.

#### *c- La résistivité.*

Elle consiste à mesurer la résistance électrique d'une colonne d'eau délimitée par deux électrodes de platine maintenues parallèles. Elle s'exprime en ohm-centimètre. L'appareil utilisé ici est un résistivimètre Philips GM 4249 dont l'élément essentiel est un pont de Wheatstone (courant alternatif) ; le zéro du pont se faisant grâce à un oeil magique. La précision des mesures est fonction de la résistivité mesurée. L'erreur relative est toujours inférieure à 2%. La résistance spécifique d'un liquide variant avec la température ; des corrections seront nécessaires afin d'exprimer les mesures à 18°C.

Comme la résistivité d'une eau dépend de sa minéralisation globale, ce paramètre permettra de la caractériser rapidement.

#### *d- La turbidité.*

Elle est due à la présence de fines particules de matières en suspension dans l'eau (argile, limons, matières organiques).

Elle a été mesurée à l'aide d'un colorimètre (type Hach DC.DR) et s'exprime en unités J.T.U. (Jackson Turbidity Units - Formazin Standard).

Dans le cas présent (émergences karstiques) la turbidité n'a été mesurée que lors des crues. Ses variations sont alors très rapides et importantes.

### 3°/- Les paramètres chimiques :

Je les ai dosés par trois principales méthodes :

- volumétrie (ou titrimétrie) ;
- colorimétrie ;
- spectrophotométrie d'absorption atomique ou d'émission de flamme.

#### a- Les dosages volumétriques.

Ils ont été utilisés pour l'analyse quantitative de la dureté totale (calcium et magnésium), de l'alcalinité et des chlorures.

#### al: La dureté totale ou titre hydrotimétrique total ( $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ ).

Pour les émergences étudiées, on peut considérer que  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  contribuent seuls à la dureté totale.

L'analyse consiste à doser la somme  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$  puis  $\text{Ca}^{++}$  seul.  $\text{Mg}^{++}$  sera obtenu par différence.

Des dosages comparatifs de  $\text{Mg}^{++}$  effectués par spectrophotométrie d'absorption atomique ont montré que l'incertitude de la première méthode était supérieure à 20% pour des teneurs inférieures à 2 mg/l de  $\text{Mg}^{++}$  (pouvant atteindre 50%) et qu'elle devenait acceptable (inférieure à 10%) pour des teneurs de l'ordre de 5 mg/l. On utilisera donc de préférence la spectrophotométrie ; celle-ci devenant absolument nécessaire pour des teneurs très faibles.

Principe du dosage de  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$  : complexation à pH 10 par l'E.D.T.A. (acide éthylènediamine-tétracétique) de  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ , en présence de noir ériochrome T comme indicateur.

Principe du dosage de  $\text{Ca}^{++}$  : En présence de  $\text{Mg}^{++}$ , l'échantillon est titré avec l'E.D.T.A. dans une solution à pH supérieur à 12 (dans de telles conditions,  $\text{Mg}^{++}$  ne peut interférer puisqu'il précipite sous forme d'hydroxyde de magnésium). L'indicateur employé est le murexide.

La précision obtenue sur la dureté totale dépend de la concentration des éléments. L'erreur relative est toujours inférieure à 2%.

### a2: L'alcalinité.

. On distingue : - le titre alcalimétrique (T.A.) qui correspond à la teneur de l'eau en alcalis libres  $\text{OH}^-$  et en carbonates alcalins  $\text{CO}_3^{--}$ .

- le titre alcalimétrique complet (T.A.C.) qui correspond à la teneur de l'eau en ions  $\text{OH}^- + \text{CO}_3^{--} + \text{HCO}_3^-$ .

. Pour des eaux issues de terrains calcaires, c'est l'ion bicarbonate  $\text{HCO}_3^-$  que l'on trouve principalement. Pour des pH inférieurs à 8,3, les concentrations en ions  $\text{OH}^-$  et  $\text{CO}_3^{--}$  sont négligeables ; on constatera d'ailleurs que le dosage du T.A. donne une valeur nulle.

. Le dosage du T.A.C. se fait par acidimétrie en utilisant de l'acide sulfurique 0,02N et de l'hélianthine (méthyl orange) comme indicateur. Le virage de l'orangé au rose étant assez progressif demande un peu d'habitude. On peut également suivre l'évolution du titrage à l'aide d'un pH-mètre ; le point équivalent se situant dans le cas présent à pH 4.50 (le tracé de la courbe pH en fonction du volume d'acide ajouté permet une détermination précise de ce point).

### a3: Les Chlorures.

Etant donné les faibles teneurs de chlorures à doser (généralement de l'ordre de 1 mg/l), j'ai utilisé la méthode de Clarke au nitrate mercurique. Le principe consiste à ajouter des ions  $\text{Hg}^{++}$  formant avec les ions  $\text{Cl}^-$  un complexe soluble et peu dissocié. Un excès d'ions mercuriques fait virer l'indicateur bleu de bromophénol-diphénylcarbazone, en milieu acide ( $\text{HNO}_3$ ), par formation d'un complexe violet.

La précision dépend de la concentration en chlorures. Elle est d'environ 10% pour des teneurs de l'ordre de 5-10 mg/l et de 20% pour 1 mg/l.

### b- Les dosages colorimétriques.

Les éléments suivants ont été dosés en colorimétrie : les sulfates ( $\text{SO}_4^{--}$ ), nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) ; l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), le fer total. Il faut y ajouter la silice soluble ( $\text{SiO}_2$ ).

Tous ces éléments ont une importance très secondaire dans la chimie des eaux des aquifères karstiques étudiés (surtout  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , Fe). On ne développera donc pas les méthodes de dosage employées. On signalera simplement que la méthode utilisée pour les sulfates est la turbidimétrie du sulfate de baryum avec mesure de l'absorption à 420nm. Pour la silice, il s'agit soit de la méthode consistant en une réduction du complexe silico-molybdique par l'acide amino 1 - naph-  
tol 2 - sulfonique 4 en un composé dosable à 810nm, soit de la méthode au molybdate d'ammonium avec tampon monochloracétique (dosage à 390nm).

Appareils utilisés :

- Photomètre à lecture directe Hach DC-DR (précision : 20-30%) ;
- Spectrophotomètre Beckman (précision de l'ordre de 10%).

c- Les dosages par spectrophotométrie d'absorption atomique ou d'émission de flamme.

Ces dosages concernent les éléments suivants :

$\text{Na}^+$ , dosé par émission ;

$\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{++}$  dosés par absorption.

Appareil utilisé : Varian Techtron.

| Elements         | Longueur d'onde en nm | Domaine de dosage ppm | Sensibilité pour 1% d'absorption en ppm | Remarques                                                                                                                 |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Na}^+$    | 588,8                 | { 0 - 1<br>1 - 3      | 0,025                                   | Etalonnage avec des solutions contenant 50 ppm de $\text{Ca}^{++}$ (sauf pour les dosages concernant les précipitations). |
| $\text{K}^+$     | 766,3                 | 0 - 2                 | 0,02                                    |                                                                                                                           |
| $\text{Mg}^{++}$ | 285                   | 0 - 2,5               | 0,01                                    |                                                                                                                           |

## II- LA CHIMIE DES APPORTS ATMOSPHERIQUES.

Les précipitations contiennent de nombreux éléments d'origine océanique ou continentale dont les concentrations varient selon l'environnement du lieu de prélèvement et selon son éloignement par rapport à l'océan. Les teneurs peuvent être très importantes, notamment à proximité de la mer ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  essentiel-

lement) ou d'agglomérations urbaines, par émission de composés gazeux de toutes sortes.

On distingue, selon la finesse des particules des constituants volatiles formant des aérosols et des poussières atmosphériques ramenées au sol sous l'action de leurs poids.

Les prélèvements ont été effectués à la station du Revard (Bois Brûlé) située à 1365m d'altitude. Il s'agit d'échantillons prélevés dans le pluviomètre et représentant les apports totaux d'une ou deux semaines, pour la pluie (le pluviomètre contenait un peu de pétrole afin d'éviter une concentration des éléments par évaporation). La neige a été prélevée peu de temps après une chute.

- Résultats des analyses:

| Date<br>des<br>précipitations | Résistivité<br>à 18°C<br>Ω/cm | pH   | T.H.T.<br>en<br>°F | Concentrations en mg/l |                  |                 |                |                               |                 |                              | Type<br>de<br>précipitations |
|-------------------------------|-------------------------------|------|--------------------|------------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|
|                               |                               |      |                    | Ca <sup>++</sup>       | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> |                              |
| 21-04-75                      |                               |      | 0,25               |                        |                  |                 |                |                               | 0,88            |                              | neige                        |
| 12 au 15-06-75                |                               | 7,0  | 2,6                |                        |                  |                 |                |                               |                 |                              | orages                       |
| 15 au 21-06-75                | 25.400                        |      |                    | 3,2                    | 0,97             |                 |                |                               |                 |                              | orages                       |
| 21 au 24-06-75                | 30.400                        | 6,95 | 1,05               | 1                      |                  | 0,025           |                | 14,0                          | 0,52            |                              | orages                       |
| 27-06-75                      | 20.450                        |      |                    |                        | 0,04             |                 | 0,04           | 27,4                          |                 |                              | orage                        |
| 29-06 au 13-07-75             | 20.700                        |      | 2,75               |                        | 0,165            | 0,12            |                | 26,8                          | 0,40            |                              | orages                       |
| 14-07 au 21-07-75             | 27.600                        |      | 1,80               |                        |                  |                 |                | 20,0                          | 0,64            |                              |                              |
| 25 au 31-08-75                | 20.900                        |      | 2,80               |                        |                  |                 |                | 30,5                          | 0,48            | 2                            |                              |
| 07 au 16-09-75                | 36.200                        |      | 1,50               |                        | 0,025            | 0,035           | 0,10           | 18,0                          | 0,35            |                              |                              |
| Octobre 75                    |                               |      |                    |                        |                  |                 |                |                               | 0,34            |                              |                              |
| 08-12-75                      |                               |      |                    |                        |                  |                 |                |                               | 3,6             |                              | neige                        |
| 13-02-76                      | 82.250                        |      |                    |                        |                  |                 |                |                               | 0,20            |                              | neige                        |
| 13-03-76                      | 67.750                        |      | 0,50               |                        | 0,055            | 0,34            | 0,55           | 4,9                           |                 |                              | neige                        |
| 15-05-76<br>neige ancienne    | 91.000                        |      |                    |                        | 0,03             | 0,465           | 0,80           |                               |                 |                              | neige                        |

Divers auteurs ont publié des résultats d'analyses moyennes des apports atmosphériques dans les Alpes du Nord et dans le Jura suisse :

| Auteur                    | lieu                                                | Date     | concentrations en mg/l |                  |                 |                |                              |                               |                 |                              |                              |                              |                              |
|---------------------------|-----------------------------------------------------|----------|------------------------|------------------|-----------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                           |                                                     |          | Ca <sup>++</sup>       | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> |
| Pontikis et al.<br>(1972) | Chamrousse<br>1650m<br>(neige)                      | —        | 0,75                   | —                | 0,10            | 0,30           |                              |                               | 0,80            |                              |                              |                              |                              |
| Miserez<br>(1973)         | Jura suisse<br>(Neuchâtel)                          | 1972     | 2,95                   | 0,08             | 0,17            | 0,21           |                              |                               | 0,50            | 3,40                         | 0,32                         |                              |                              |
| Haubert<br>(1975)         | Terramont (1090m)<br>Hte Savoie                     | été 1972 | 2,5                    | 0,20             | 0,45            | 0,60           | 2,7                          | 16                            | 0,60            | 4,4                          | 0,18                         | 0,003                        | 0,007                        |
|                           | Stations d'altitude<br>(1250 à 1850m)<br>Hte Savoie | été 1972 | 0,0                    | 0,0              | 0,34            | 0,65           | 0,18                         |                               | 0,70            | 2,9                          | 0,14                         | 0,02                         | 0,005                        |

Toutes ces analyses, effectuées sur des apports atmosphériques en zone montagneuse, montrent une assez bonne homogénéité. On constatera, pour les précipitations du Mont Revard que la minéralisation globale de la neige est très inférieure à celle de la pluie, principalement à cause d'un important déficit en Ca<sup>+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ; par contre les teneurs en Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> sont bien supérieures dans la neige que dans la pluie. On verra, par la suite, que les concentrations en certains éléments contenus dans les eaux peuvent s'expliquer uniquement par les apports atmosphériques.

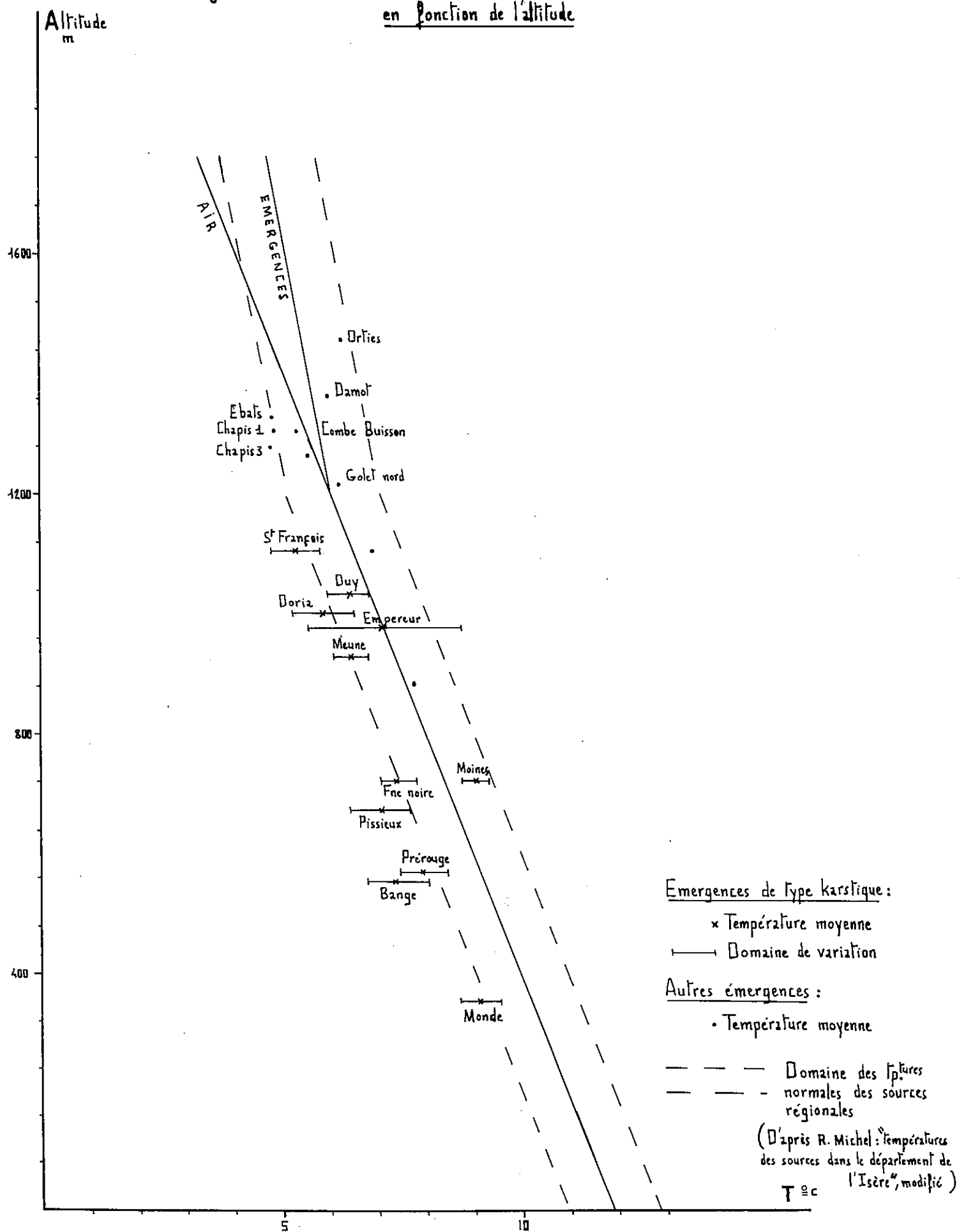
### III- CARACTERES GENERAUX DES EMERGENCES.

#### 1°/- Relation température - altitude (fig. n°30).

R. MICHEL a mis en évidence la concordance entre la température moyenne annuelle de l'air et la température des sources du département de l'Isère. Cette concordance est très bonne jusque vers 1200m. Au-dessus, la température moyenne des sources est plus élevée que celle de l'air ; ceci s'explique par le rôle d'isolant thermique dû à la neige.

Sur la figure n°30, on a représenté la droite définissant la température moyenne annuelle de l'air en fonction de l'altitude pour la région étudiée et l'on a porté les températures moyennes des émergences.

fig.30 Températures moyennes de l'air et des émergences  
en fonction de l'altitude



On distingue ainsi le groupe des émergences de type karstique, dont les températures sont nettement inférieures à celles qu'elles devraient avoir d'après leurs côtes. L'anomalie la plus importante concerne l'exsurgence de Bange qui draine par ailleurs les zones les plus élevées. Il en est de même pour l'exsurgence du Pissieux drainant le Mont Margéraz qui culmine à 1845m d'altitude. Si la température acquise à l'émergence est le résultat de phénomènes complexes liés principalement à la ventilation des réseaux karstiques, la répartition altimétrique des bassins versants est un facteur prépondérant.

Ainsi des températures anormalement basses indiquent une participation à l'alimentation de l'exutoire, de tranches d'altitude très élevée, par rapport à la côte de l'émergence.

## 2°/- Relation titre hydrotimétrique total - altitude (fig. n° 32).

Il existe manifestement une relation entre le T.H.T. et l'altitude moyenne des bassins versants des exsurgences de type karstique, indépendamment de la géologie. La diminution de la minéralisation en fonction de l'altitude pourrait venir de différences dans la végétation. Si une température basse favorise la solubilité du  $\text{CO}_2$ , elle diminue, par contre, la teneur en  $\text{CO}_2$  des sols. Ce serait surtout de celle-ci que dépend l'enrichissement en  $\text{CO}_2$  de l'eau, qui régit les mécanismes chimiques intervenant dans la mise en solution des roches carbonatées.

## 3°/- Relation résistivité - concentration des éléments dissous :

Les eaux issues de terrains calcaires sont essentiellement bicarbonatées calciques. On reliera donc la résistivité à la concentration en calcium et en bicarbonates.

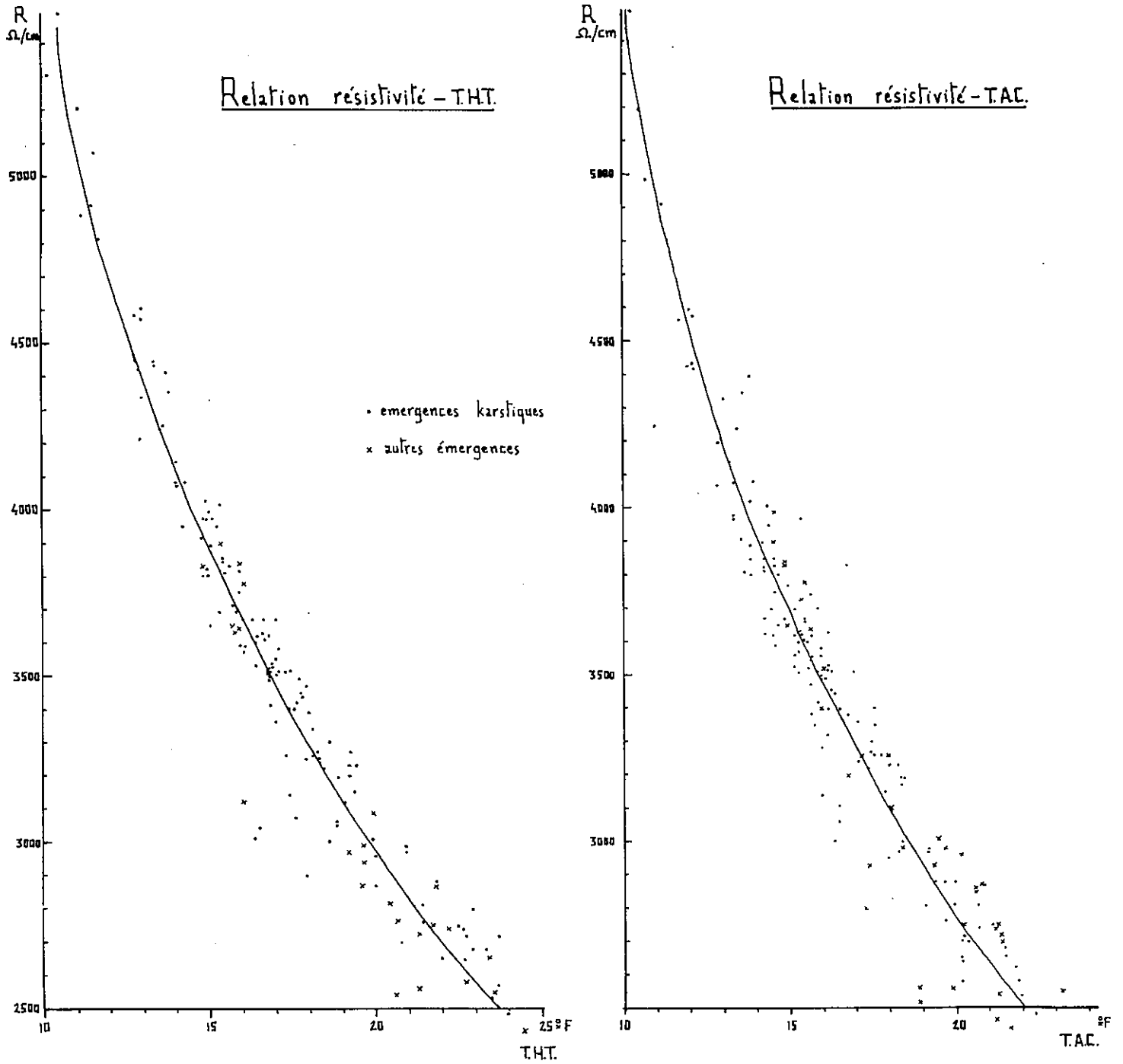
### a- Relation résistivité - titre hydrotimétrique total (T.H.T.) - fig. n° 31

Etant donné les très faibles teneurs en  $\text{Mg}^{++}$  vis-à-vis du  $\text{Ca}^{++}$ , les variations du T.H.T. représenteront en fait les variations de concentration en  $\text{Ca}^{++}$ . La courbe de la figure n° 31 a été obtenue en reportant les résultats d'environ cent cinquante analyses d'émergences d'origines diverses.

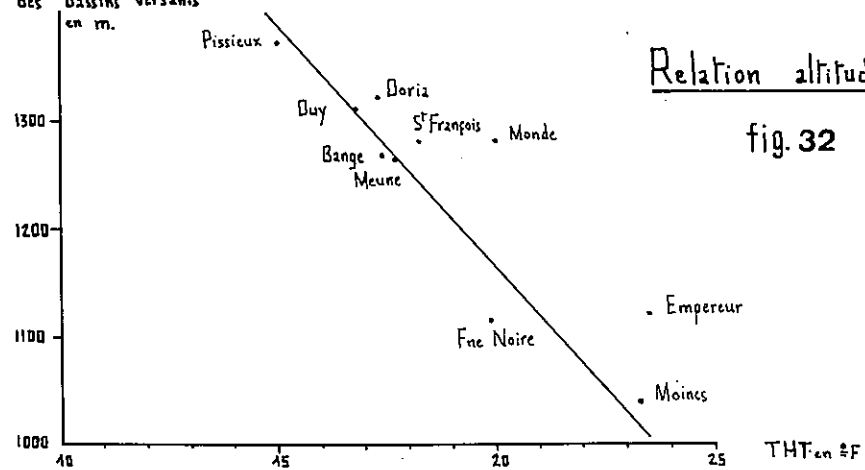
### b- Relation résistivité - titre alcalimétrique complet (T.A.C.).

De même que  $\text{Ca}^{++}$  représente le principal cation dans le type d'eau étu-

fig. 31



Altitude moyenne  
des bassins versants  
en m.



dié,  $\text{HCO}_3^-$  est l'anion équilibrant la balance ionique. La courbe obtenue est très similaire à la précédente.

On peut donc, à partir de mesures de résistivité, déduire la dureté (T. H.T.) et l'alcalinité totale d'échantillons d'eau de même type qu'ici, c'est-à-dire presque exclusivement bicarbonatées calciques.

#### IV- LES EMERGENCES DE TYPE KARSTIQUE.

Celles-ci présentent des variations de débit très rapides et très importantes. On peut donc s'attendre à des variations tout aussi rapides des caractères physico-chimiques. Cela rend nécessaire un échantillonnage particulièrement serré si l'on veut enregistrer toutes les variations qui se produisent lors d'une crue. Personnellement, afin d'estimer les variations à l'échelle annuelle, j'ai choisi de prélever des échantillons assez régulièrement (mensuels au maximum) tout en tenant compte des événements météorologiques. Puis j'ai étudié l'évolution physico-chimique à l'échelle journalière, c'est-à-dire lors de crues. On considèrera, en premier, les émergences liées aux deux principaux ensembles karstiques, urgoniens et valanginiens. Celles qui sont liées au Tithonique ou au Tertiaire ont une importance très secondaire, par leurs débits. De plus, leurs caractères karstiques sont moins nets ; il s'agirait de circulations en larges fissures, plutôt qu'en chenaux de grandes dimensions.

##### 1°/- Les exurgences liées à l'ensemble urgonien :

On en distingue cinq, d'importance très inégale.

Les exurgences de la Doria, au Sud et de Préronge, au Nord, drainent des superficies comparables (respectivement 14,0 Km<sup>2</sup> et 17,8 Km<sup>2</sup>). Les autres n'intéressent que des surfaces de l'ordre du kilomètre carré.

On présentera l'évolution des caractères de la Doria, à l'échelle annuelle ; puis on verra dans quelle mesure les autres émergences en diffèrent.

L'étude à l'échelle journalière peut être consultée dans le chapitre suivant.

##### a- L'exurgence de la Doria.

##### a1: Localisation géographique.

Coordonnées Lambert : X = 884,23 Y = 74,28 Z = 1000m.

Elle constitue la source du torrent de la Doria qui rejoint la rivière de la Laysse à 3 kms à l'Est de Chambéry. La grotte de la Doria aux dimensions impressionnantes, située en falaise, est visible de la périphérie chambérienne et sert de trop-plein lors de fortes crues.

#### a2: Situation géologique.

L'exsurgence pérenne se trouve à la base des gros bancs urgoniens ; elle est donc séparée de l'Hauterivien supérieur marno-calcaire par les calcaires en petits bancs du Barrémien inférieur, d'une dizaine de mètres d'épaisseur.

Le trop-plein se trouve sur un joint de stratification, à une quinzaine de mètres à l'aplomb de l'exsurgence pérenne.

Ces points d'émergence s'expliquent, d'autre part, par la présence d'un léger synclinal d'axe Nord-Sud.

#### a3: Les débits (fig.n°33,34).

Ils n'ont pu être mesurés qu'à l'aide d'une échelle limnimétrique placée au "pont de Lovette", à cause d'un accès difficile à l'exsurgence. L'enregistrement des débits reste cependant très représentatif de ceux de l'exutoire, étant donné la faible superficie (terrains quaternaires) drainée par le torrent de la Doria au niveau du "pont de Lovette". Des jaugeages effectués à proximité de l'exsurgence et de l'échelle limnimétrique, à peu près simultanément, lors de débits stables, ont permis de vérifier le peu d'importance des apports supplémentaires. Il n'y a guère que pour une fonte de neige importante à basse altitude ou pour un orage violent que les apports deviennent notables bien que toujours très faibles. Mais il est alors assez facile d'effectuer les corrections nécessaires.

Dans un torrent tel que celui de la Doria, au lit encombré de blocs rocheux de toutes dimensions, et où les débits peuvent atteindre des valeurs considérables (3 à 5m<sup>3</sup>/s), la section de mesure peut être souvent modifiée et entraîner un détarage important de l'échelle. Cela nécessite donc de fréquents jaugeages afin de confirmer ou de modifier la loi hauteur-débit. Ceux-ci ont été réalisés par la méthode chimique, ou au micromoulinet pour les très faibles débits.

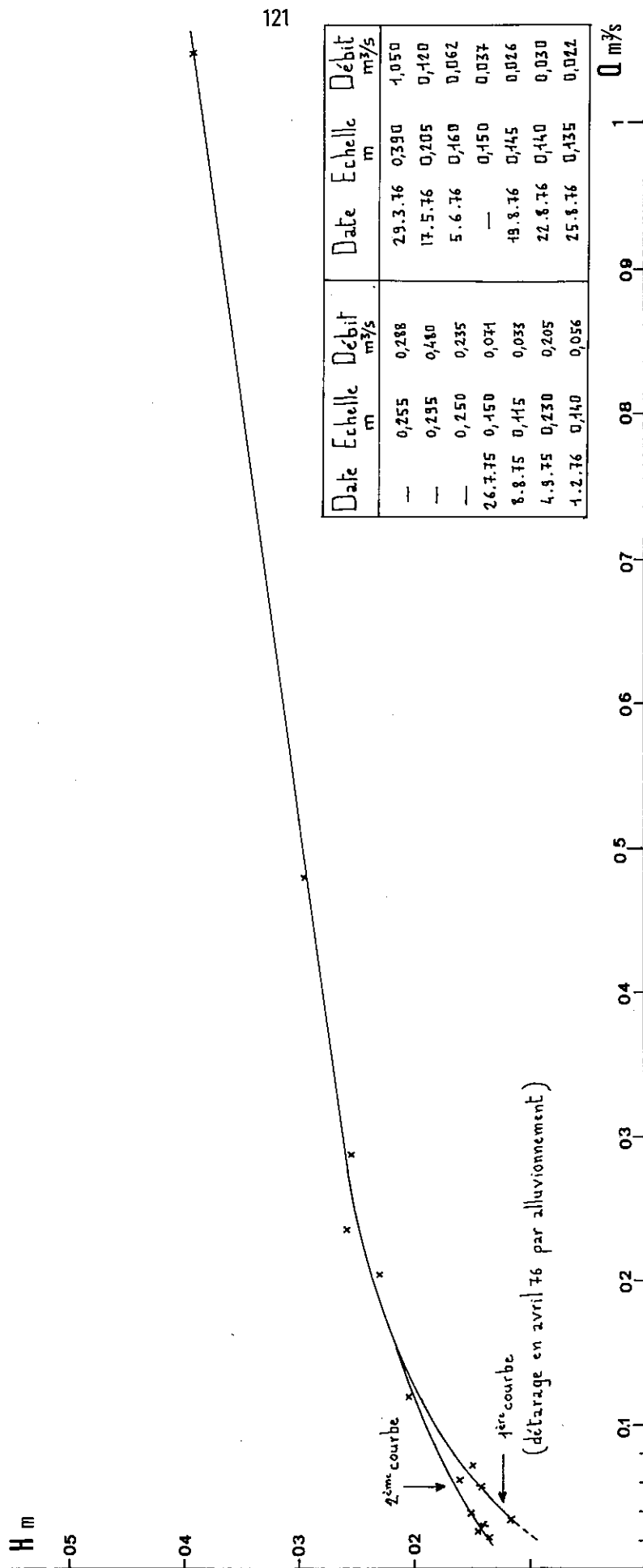
Il faut encore ajouter que j'ai effectué les relevés en tenant compte essentiellement des conditions météorologiques puisque les variations sont très rapides et directement liées aux précipitations ou à la température (fonte de neige). C'est ainsi que plusieurs relevés par jour sont parfois nécessaires ou qu'un seul relevé par semaine peut suffire.

La précision obtenue n'est toutefois pas inférieure à 20%.

# DORIA

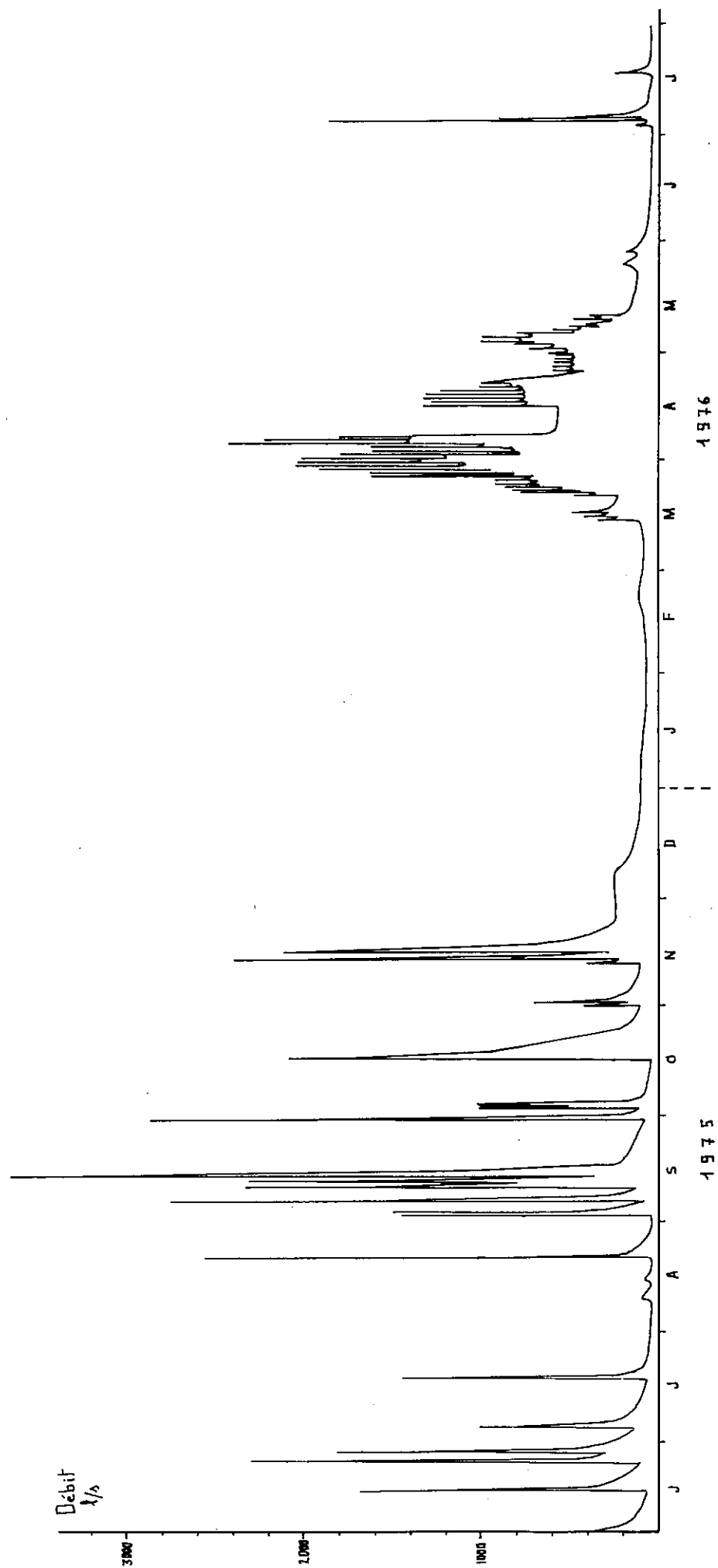
fig.33

COURBE DE TARAGE



| Date    | Echelle<br>m | Débit<br>$m^3/s$ | Date    | Echelle<br>m | Débit<br>$m^3/s$ |
|---------|--------------|------------------|---------|--------------|------------------|
| —       | 0,255        | 0,288            | 29.3.76 | 0,390        | 1,050            |
| —       | 0,295        | 0,480            | 17.5.76 | 0,205        | 0,120            |
| —       | 0,250        | 0,235            | 5.6.76  | 0,160        | 0,062            |
| 26.7.75 | 0,150        | 0,071            | —       | 0,150        | 0,037            |
| 8.8.75  | 0,115        | 0,033            | 19.8.76 | 0,145        | 0,026            |
| 4.9.75  | 0,230        | 0,205            | 22.8.76 | 0,140        | 0,030            |
| 1.2.76  | 0,140        | 0,056            | 25.8.76 | 0,135        | 0,022            |

fig.34 DORIA : HYDROGRAMME Juin 75 - Juillet 76



L'hydrogramme montre des variations particulièrement rapides et importantes. Il se décompose en trois épisodes bien tranchés :

- une longue période de la fin mai à la fin novembre où l'on trouve les variations extrêmes, de 35 l/s à environ 3600 l/s, soit un coefficient de variabilité égal à 100 ;

- une période hivernale de décembre à la fin mars caractérisée par des débits faibles et réguliers ;

- une période de fonte de neige d'avril à la mi-mai caractérisée par un débit moyen très élevé avec de fortes variations journalières dépendant de la température. Ces variations constituent un phénomène régulier dont l'amplitude est liée à la température du jour et des jours précédents. Il s'agit d'une onde de crue provoquée par l'arrivée d'importantes quantités d'eau dans la zone noyée.

En considérant que l'infiltration devient très importante vers 11-12h, le temps de réponse est de 4 heures. Le débit augmente d'abord lentement puis de plus en plus rapidement pour atteindre son maximum vers 18 heures. La stabilisation dure plusieurs heures.

On verra que l'étude d'une crue, due à un orage, montre des variations de débit tout à fait comparables quoique plus brutales pour la montée des eaux, ce qui semble assez logique, puisque le débit d'infiltration augmente alors considérablement en quelques instants.

Pour les débits d'étiage, on peut considérer un étiage d'été dû à l'absence de précipitations durant une longue période et un étiage d'hiver dû à une période de froid intense. Les étiages des étés 1975 et 1976 (32 l/s et 21 l/s) ont été nettement plus marqués que l'étiage de l'hiver 1976 (45 l/s).

Le débit moyen annuel est de  $254 \text{ l/s} \pm 50 \text{ l/s}$  (août 1975 - juillet 1976). Le bassin versant représente  $14,0 \text{ km}^2$ , mais afin de tenir compte de la part des précipitations échappant au karst (sur l'extrémité Est du bassin), on considérera une superficie d'apports de  $13,5 \text{ km}^2$ .

D'août 1975 à juillet 1976, le débit spécifique moyen a été de  $18,8 \text{ l/s/Km}^2$  et le volume écoulé égal à  $8,03.10^6 \text{ m}^3 \pm 1,6.10^6 \text{ m}^3$ .

En prenant 1200mm pour la lame d'eau tombée sur le bassin versant et en enlevant la part théorique prélevée par les phénomènes d'évapotranspiration (soit

30% de la hauteur totale des précipitations), il reste 840mm soit un volume de  $11,34.10^6 \text{ m}^3$  disponible pour l'écoulement. Il faut ajouter que, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, la variation du volume des réserves karstiques est négligeable. L'écart entre le volume écoulé et le volume disponible pour l'écoulement, obtenu à partir de la hauteur pluviométrique est donc assez important, mais peut s'expliquer uniquement par les incertitudes sur les mesures.

Néanmoins et compte tenu du fait que les traçages ont montré qu'il n'existait pas de possibilités de pertes vers d'autres exutoires, je pense que la valeur admise pour l'évapotranspiration pourrait être fortement sous-estimée. En effet l'épaisse forêt de cônifères avec un sous-bois abondant et le sol grenu, peu épais mais se comportant comme une éponge, peuvent retenir une part très importante des précipitations. Ainsi certaines averses atteignant 20mm et survenant sur sol sec, ne se sont pas répercutées d'une manière sensible sur les débits. De nombreux épisodes pluvieux et une pluviométrie déficitaire favorisent le pourcentage des pertes dues à l'évapotranspiration qui aurait donc pu atteindre lors de cette étude 40-45% de la hauteur des précipitations enregistrées.

#### a4: La température.

Sa mesure est ici assez imprécise, du fait de l'inaccessibilité de l'émergence. Je l'ai prise, selon le débit, plus ou moins près du point de chute de l'eau. La précision dépend donc de la différence de température entre l'air et l'eau et du débit.

La courbe de variation de la température au cours de l'année montre l'importance de la fonte des neiges qui se traduit par une baisse brutale de  $0,5^\circ\text{C}$  à  $1^\circ\text{C}$  suivant la rapidité de la fonte et le volume du stock neigeux. La remontée est assez longue et dure environ deux mois. En dehors de cette période, les variations sont très faibles et ont lieu principalement lors des crues.

#### a5: Le pH.

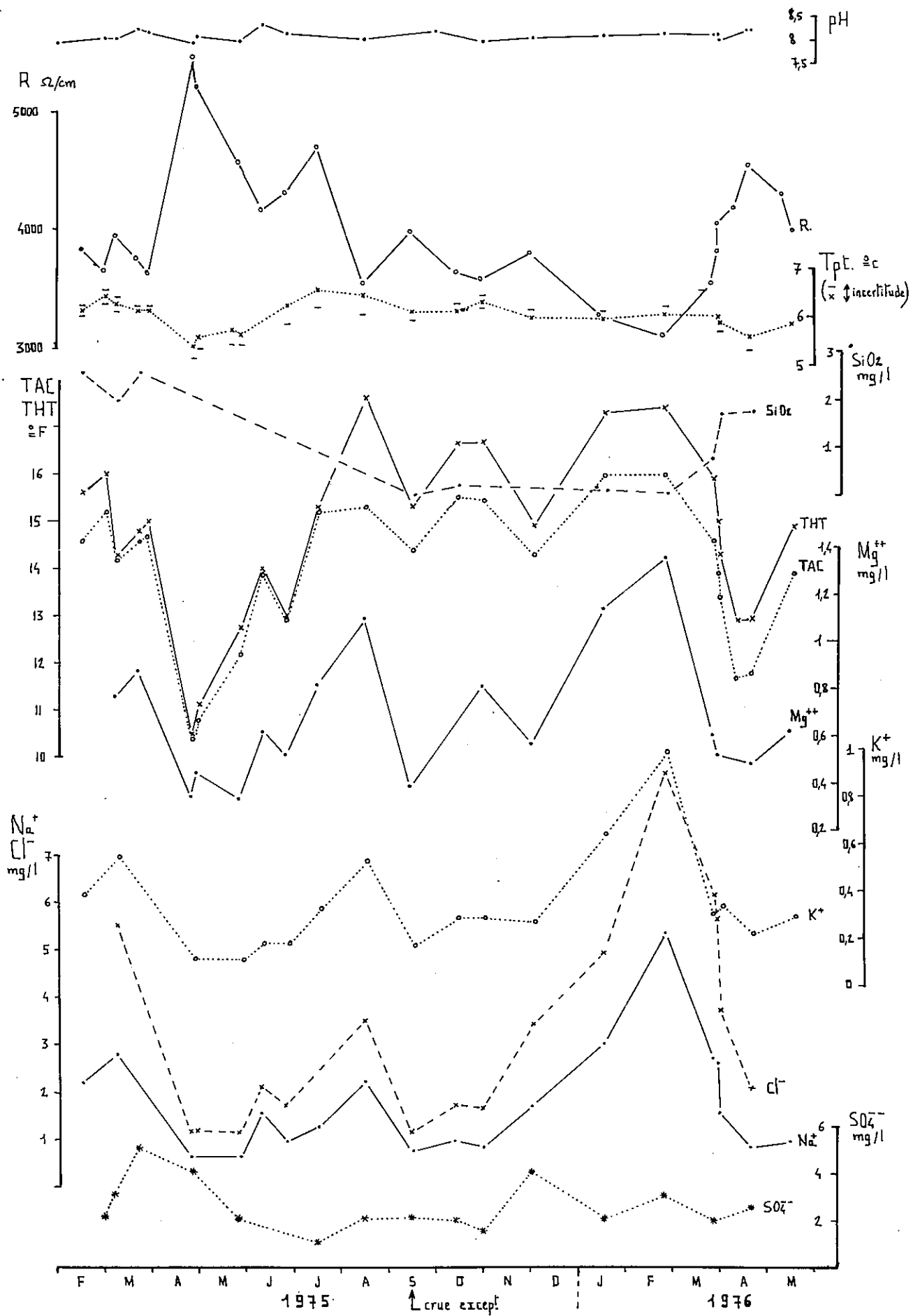
Ses variations sont très faibles au cours de l'année.

Il oscille entre 7,9 et 8,3 avec une valeur moyenne de 8,05.

#### a6: La résistivité.

Son évolution annuelle peut se résumer à une hausse très importante de  $1500 \Omega/\text{cm}$  à  $2000 \Omega/\text{cm}$  dès le début de la fonte des neiges, suivie d'une baisse lente et progressive, interrompue épisodiquement à la faveur de crues et se poursuivant jusqu'à la prochaine fonte. La valeur moyenne annuelle est de  $3800 \Omega/\text{cm}$ .

fig. 35 DORIA : variations des paramètres physico-chimiques



a7: La composition chimique.

On donnera des concentrations moyennes annuelles en mg/l, établies sur une vingtaine d'analyses complètes. (Voir en annexe les résultats d'analyse).

|                      |                    |                   |                  |                                |                                 |                   |                                 |                                |                                |                    |
|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| : Ca <sup>++</sup> : | Mg <sup>++</sup> : | Na <sup>+</sup> : | K <sup>+</sup> : | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : | Cl <sup>-</sup> : | SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> : | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> : | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : | SiO <sub>2</sub> : |
| : 60 :               | 0,8 :              | 2 :               | 0,4 :            | <0,1 :                         | 170 :                           | 3 :               | 2,5 :                           | <0,01 :                        | 3 :                            | 0,6 :              |

Comme on a vu précédemment que le T.H.T. et le T.A.C. pouvaient être déduits de la résistivité, les variations de cette dernière indiqueront également les variations du T.H.T. et du T.A.C., à condition que l'amplitude de variation soit suffisamment importante (200  $\Omega$ /cm au moins).

A l'échelle annuelle, on connaîtra donc les variations du T.H.T. et du T.A.C. grâce aux seules mesures de résistivité.

Les teneurs en Mg<sup>++</sup> sont très faibles et leurs évolutions s'apparentent à celles du Ca<sup>++</sup>.

Les variations des concentrations en Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> suivent également, d'une manière globale, celles de la résistivité, mais l'augmentation des teneurs est plus lente, après la chute due à la fonte des neiges ; puis, dès l'arrivée de l'hiver, elle s'accélère considérablement. Cela peut être relié à la baisse des débits qui se stabilisent alors à un niveau assez bas grâce à l'accumulation des précipitations sous forme solide. Si les phénomènes de dilution semblent essentiels pour ces ions, il faut envisager également un apport dû à la pollution, notamment avec les fondants chimiques déversés sur les routes (à base de NaCl).

Les teneurs en SO<sub>4</sub><sup>--</sup> sont très faibles et les variations observées ne sont guère interprétables étant donné la grande incertitude des dosages pour de telles valeurs. Les teneurs en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont tout aussi faibles et celles en NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et NO<sub>2</sub><sup>-</sup> sont à la limite de détection des méthodes utilisées.

Enfin si l'évolution des teneurs en silice de septembre 1975 à mars 1976 montre une augmentation de celles-ci à la fonte des neiges qui semblerait due à une dissolution de silice par lessivage, les fortes teneurs précédant le début de la fonte, en avril 1975, viennent contredire cette hypothèse.

b- L'exsurgence de Prérrouge.

b1: Situation géographique et géologique.

Coordonnées Lambert : X = 892,43 Y = 87,39 Z = 575m.

Son émergence se trouve en rive gauche du Chéran, à l'intersection des couches urgoniennes avec la cluse occupée par la rivière.

La sortie pérenne est impénétrable et lors des étiages les venues d'eau s'observent dans les alluvions récentes, à quelques mètres du Chéran. Il est fort probable qu'une partie du débit est invisible, rejoignant directement la rivière. Le débit d'étiage est donc inconnu.

La grotte de Prérrouge sert de trop-plein lors de fortes crues.

b2: Les débits.

Pour la raison invoquée précédemment, il n'est possible d'avancer qu'une valeur d'étiage, par défaut (supérieure à environ 15 l/s).

Les débits de crues dépassent facilement 3 m<sup>3</sup>/s. La crue du 15 septembre 1975 a été estimée à près de 5 m<sup>3</sup>/s.

b3: Les paramètres physico-chimiques.

Ceux-ci ont été suivis d'une manière détaillée par M. LEPILLER (thèse en cours). On se limitera donc ici à donner des valeurs moyennes annuelles en remarquant que l'hiver, du fait des caractères morphologiques du bassin versant, d'éventuels redoux pourront se répercuter sur les paramètres physico-chimiques.

Valeurs moyennes annuelles des paramètres physico-chimiques :

|           |                  |          |                  |                  |                 |                |                               |                 |                              |   |
|-----------|------------------|----------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|---|
| :         | :                | :        | :                | :                | :               | :              | :                             | :               | :                            | : |
| : tpt :   | Résist. a 18°C : | pH :     | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | : |
| : en °C : | en Ω/cm :        | :        | :                | :                | en mg/l         | :              | :                             | :               | :                            | : |
| : 7°95 :  | 3470             | : 7,60 : | 59               | 0,9              | 0,56            | 0,4            | 187                           | 0,8             | 2                            | : |
| :         | :                | :        | :                | :                | :               | :              | :                             | :               | :                            | : |

c- L'exsurgence de Fontaine Noire.

c1: Situation géographique et géologique.

Coordonnées Lambert : X = 887,0 Y = 74,22 Z = 720m.

Située au Nord-Est de Saint Jean d'Arvey, elle draine les eaux infiltrées

sur le Mont Peney et collectées grâce à une gouttière synclinale. L'émergence se situe dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur, à la limite de niveaux marneux sous-jacents.

### c2: Les débits.

Les débits oscillent entre 4 l/s et environ 500 l/s avec des variations qui se calquent sur celles de la Doria. L'échelle limnimétrique n'a pu être relevée suffisamment souvent pour pouvoir effectuer un bilan hydrologique, néanmoins le débit moyen annuel peut être évalué aux alentours de 50 l/s.

### c3: Les paramètres physico-chimiques.

Le tableau suivant donne les valeurs moyennes annuelles des caractères physiques et chimiques (résultats d'analyse en annexe).

| : tpt :   | Résist. à 18°C : | pH :    | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> | : |
|-----------|------------------|---------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|---|
| : en °C : | en Ω/cm :        | :       | en mg/l          |                  |                 | :              | :                             | :               | :                             | : |
| : 7°5 :   | 3300             | : 7,8 : | 72               | 1,4              | 0,50            | 0,27           | 205                           | 0,9             | 4                             | : |

Les diagrammes de la figure n° 36 montrent les variations des principaux paramètres. Celles-ci sont très comparables à celles de la Doria.

Seuls les ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> avec des teneurs moyennes quatre fois plus faibles diffèrent sensiblement. Les variations de ces ions à Fontaine Noire se rapprocheraient ainsi des variations naturelles, en raison d'un taux de pollution nettement plus faible que celui de la Doria.

### d- Les exurgences de la Duy et de Saint François.

#### d1 : Situation géographique et géologique.

Coordonnées Lambert : La Duy : X = 888,20 Y = 80,70 Z = 1025m.

St François : X = 887,32 Y = 79,44 Z = 1150m.

Drainant une partie du versant Est de la Montagne de la Cha, elles émergent au Nord du Col de Plaimpalais, des calcaires massifs de l'Urgonien grâce à la présence des calcaires gréseux tertiaires moins perméables.

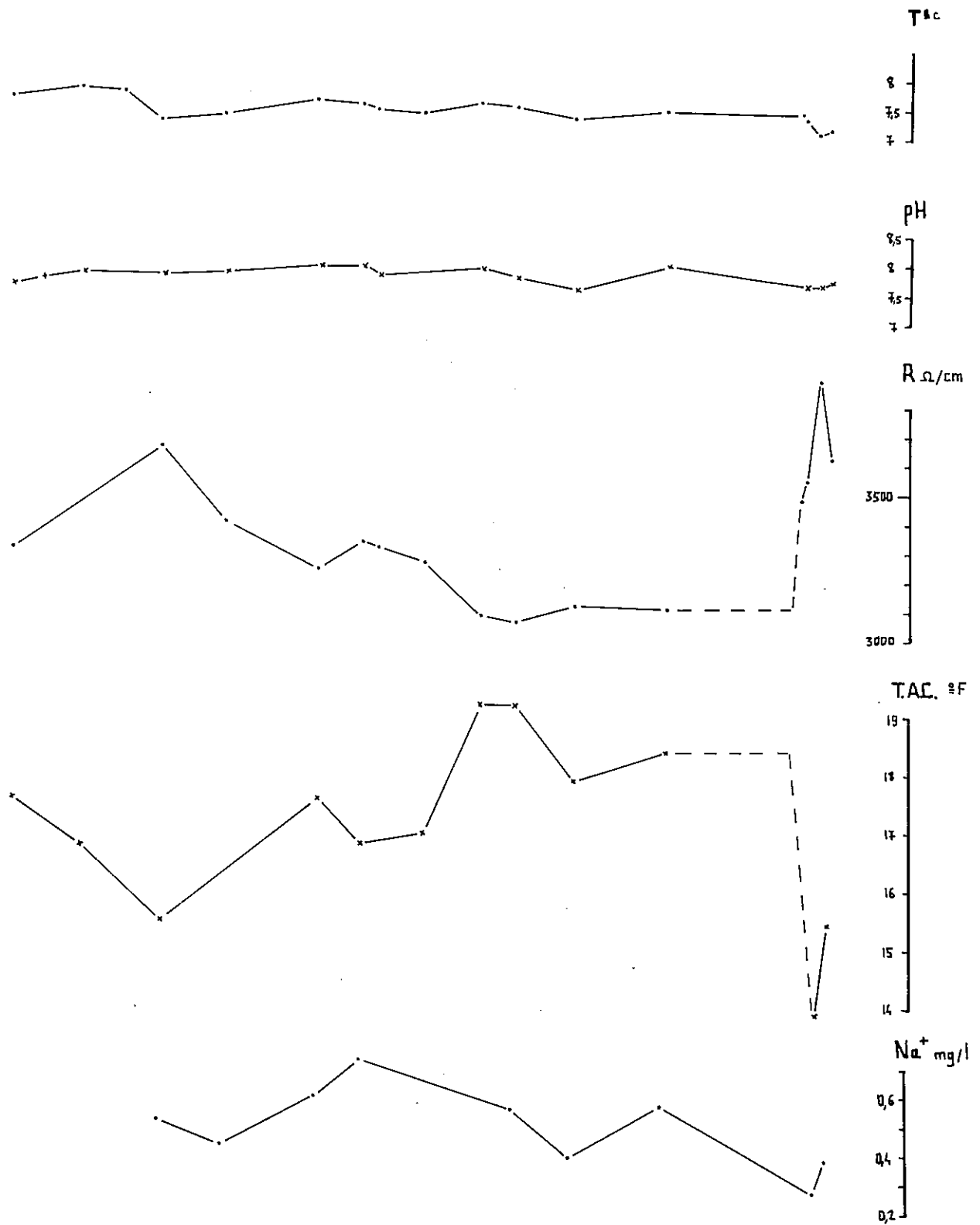
E.ne NOIRE

fig. 36

VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

## DUY

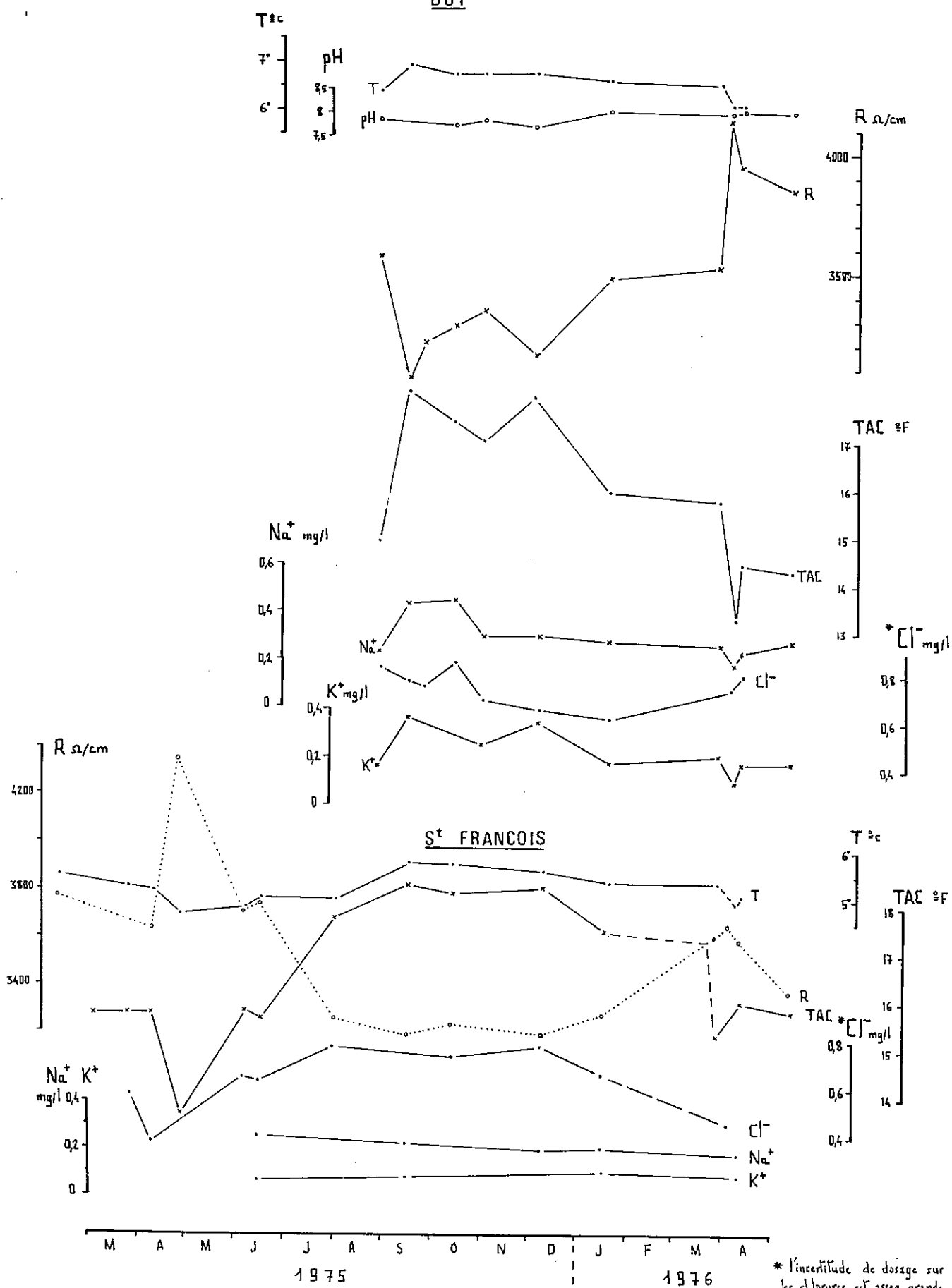


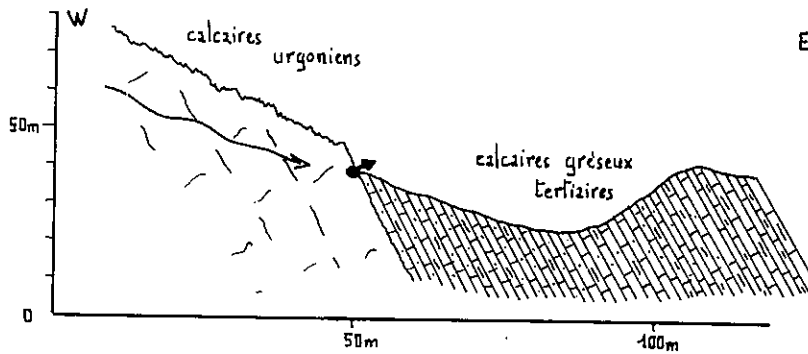
fig.37

VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

\* l'incertitude de dosage sur les chlorures est assez grande pour de telles concentrations (20%)

## EXSURGENCE DE LA DUY

## Schéma hydrogéologique

d2: Les débits.

Ils sont très modestes, variant entre 2 l/s et environ 150 l/s pour la Duy et entre quelques l/mn et 100 l/s pour Saint François. Cette dernière constitue la source du ruisseau de Saint François qui reçoit quelques venues assez diffuses, du karst urgonien avant que viennent s'y ajouter les apports de la Duy.

d3: Les paramètres physico-chimiques. (fig. n°37 ).

Les paramètres physico-chimiques de ces deux exsurgences ne présentent pas de caractères particuliers au point de vue des concentrations et de leurs variations. Les circulations sont certainement moins profondes que dans les deux cas précédents et les bassins versants sont plus sensibles au redoux en hiver du fait de leur exposition.

Valeurs moyennes annuelles des paramètres physico-chimiques :

| Emergence               | T °C | R 18°C<br>Ω/cm | pH   | concentrations   |                 |                 |                |                               |                 |                               |                              | mg/l | SiO <sub>2</sub> |
|-------------------------|------|----------------|------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|------|------------------|
|                         |      |                |      | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |      |                  |
| Duy                     | 6°50 | 3515           | 7,85 | 61               | 0,53            | 0,28            | 0,27           | 197                           | 0,80            | 1                             | —                            | 1,3  |                  |
| S <sup>t</sup> François | 5°30 | 3535           | 7,60 | 67               | 0,29            | 0,20            | 0,08           | 200                           | 0,60            | 1                             | 2,2                          | —    |                  |

L'émergence de Saint François présente l'intérêt de fournir la composition chimique des eaux ayant circulé dans l'Urgonien, en l'absence de toute pollution liée à l'activité humaine. Les concentrations en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Cl}^-$  apparaissent ainsi assez constantes tout au long de l'année, malgré une légère baisse lors de la fonte des neiges.

La comparaison entre les sources de la Duy et de Saint François met en évidence des teneurs moyennes nettement plus élevées en  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{K}^+$  pour la Duy. Si le bassin versant de Saint François est purement karstique, celui de la Duy comporte un placage de matériel glaciaire, d'origine alpine, juste au-dessus de l'émergence, qui pourrait expliquer cette différence.

## 2°/- Les exurgences liées à l'ensemble valanginien :

On en distingue deux importantes ("Bange" et "Le Bout du Monde") et une secondaire ("La Meune").

Au point de vue lithologique, les calcaires valanginiens étant presque aussi purs que les calcaires urgoniens, il ne faudra pas s'attendre à de grandes différences dans la composition chimique des eaux. On peut seulement penser que les bassins versants drainant des zones marneuses (Hauterivien) présenteront des particularités notamment pour les teneurs en ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  qui peuvent provenir des argiles.

### a- L'exurgence de Bange.

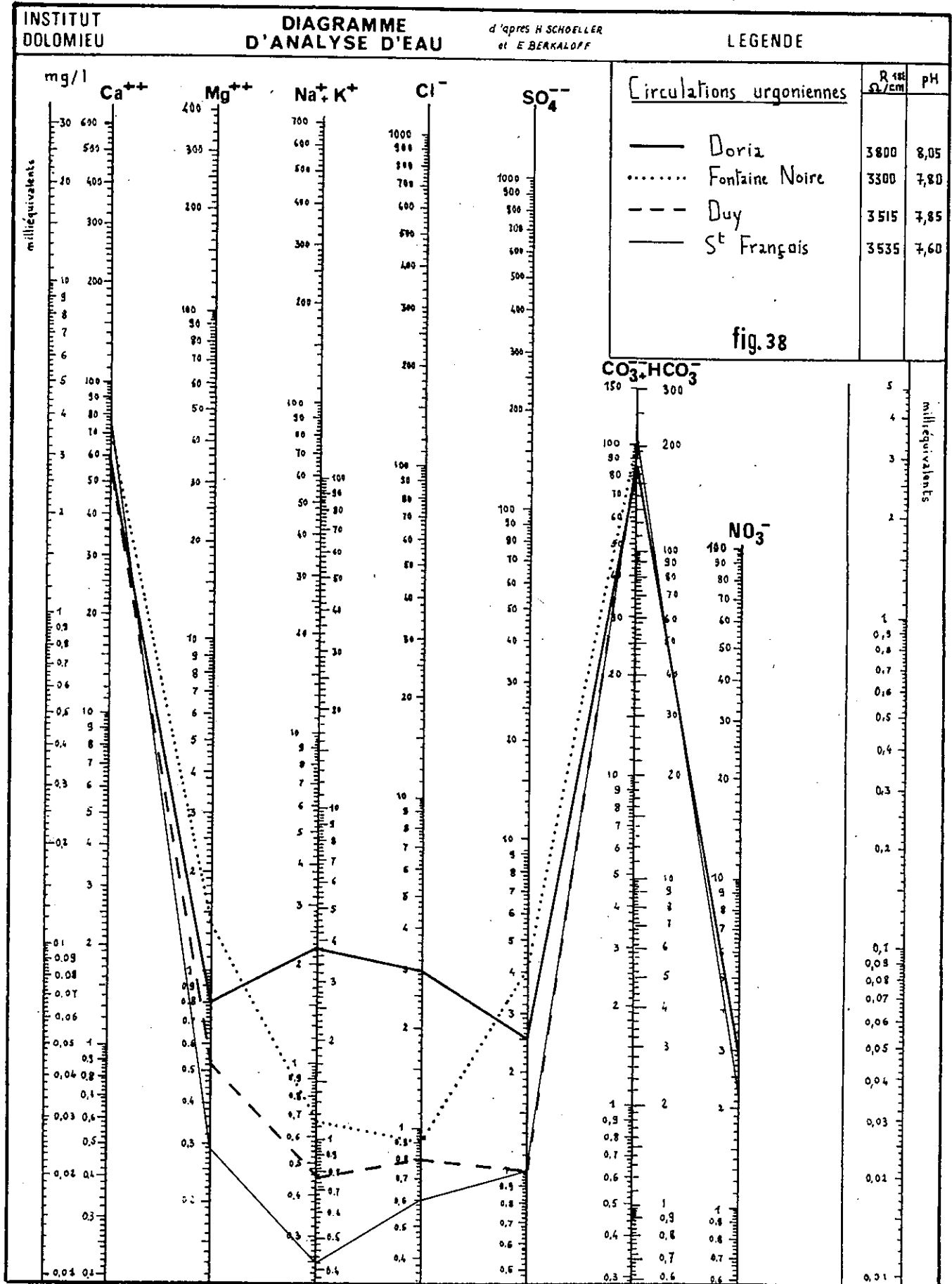
#### al: Situation géographique et géologique :

Coordonnées Lambert du trop-plein au lieu-dit "petit pont de l'Ile" :  
 $X = 892,48$      $Y = 89,57$      $Z = 550\text{m.}$

Il s'agit de la plus importante émergence du massif. Elle se trouve à l'intersection de la Cluse du Chéran avec le Valanginien inférieur, au lieu-dit "Pont de Bange".

Les débits sont incontrôlables : l'émergence pérenne alimente directement le Chéran et les nombreux trop-pleins se mettent en charge successivement, de part et d'autre de la rivière, selon l'importance de la crue. Ainsi tout prélèvement est impossible durant l'hiver ou l'été, parfois pendant de nombreuses semaines.

Un relevé de températures effectué en remontant le Chéran a permis de



mettre en évidence la sortie pérenne, représentée par une vasque dans le rocher, en aval de la digue. Mais l'eau en provenance du karst s'est préalablement mélangée à de l'eau d'infiltration du Chéran.

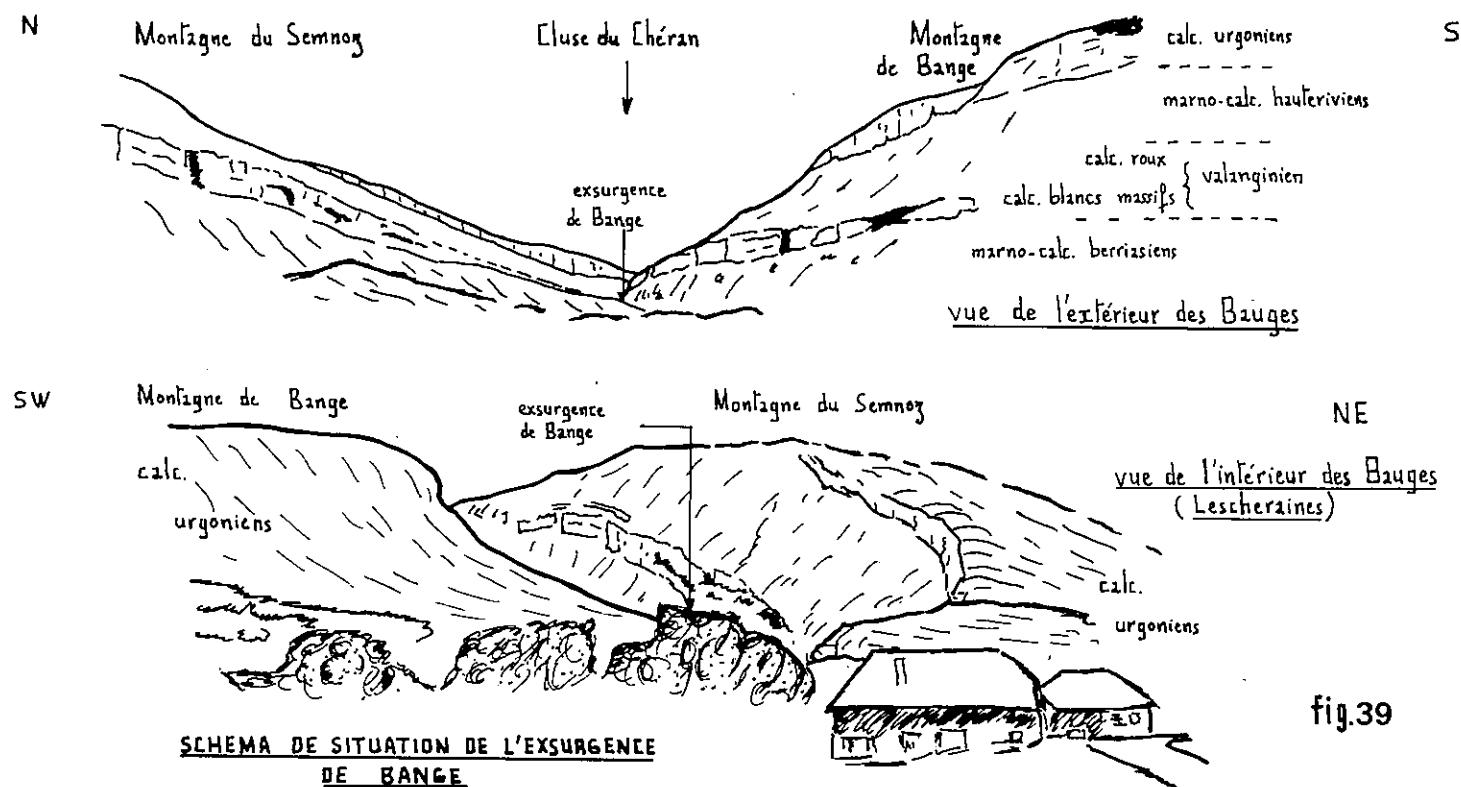


fig.39

#### a2: Les débits.

Les conditions d'émergence ne permettant pas un contrôle du débit, on a estimé la crue maximale à un minimum de  $10\text{m}^3/\text{s}$ .

L'exsurgence est prélevable à partir d'un débit de l'ordre de  $500\text{ l/s}$ , grâce à une sortie en rive droite du Chéran, au contact du talus avec les alluvions actuelles (lieu-dit "petit pont de l'Ile").

#### a3: Les paramètres physico-chimiques.

Valeurs moyennes annuelles\*:

|             |                                                       |     |                  |                  |               |              |                  |               |                    |                |
|-------------|-------------------------------------------------------|-----|------------------|------------------|---------------|--------------|------------------|---------------|--------------------|----------------|
| tpt         | Résist. à $18^\circ\text{C}$<br>en $\Omega/\text{cm}$ | pH  | $\text{Ca}^{++}$ | $\text{Mg}^{++}$ | $\text{Na}^+$ | $\text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{--}$ | $\text{SiO}_2$ |
|             |                                                       |     | en $\text{mg/l}$ |                  |               |              |                  |               |                    |                |
| $7^\circ 5$ | 4130                                                  | 7,8 | 55               | 1,6              | 0,69          | 0,24         | 165              | 2,5           | 4,5                | 1,5            |

\* Des analyses effectuées par M. LEPILLER ont été utilisées dans le calcul de ces moyennes.

b- L'exsurgence du Bout du Monde.

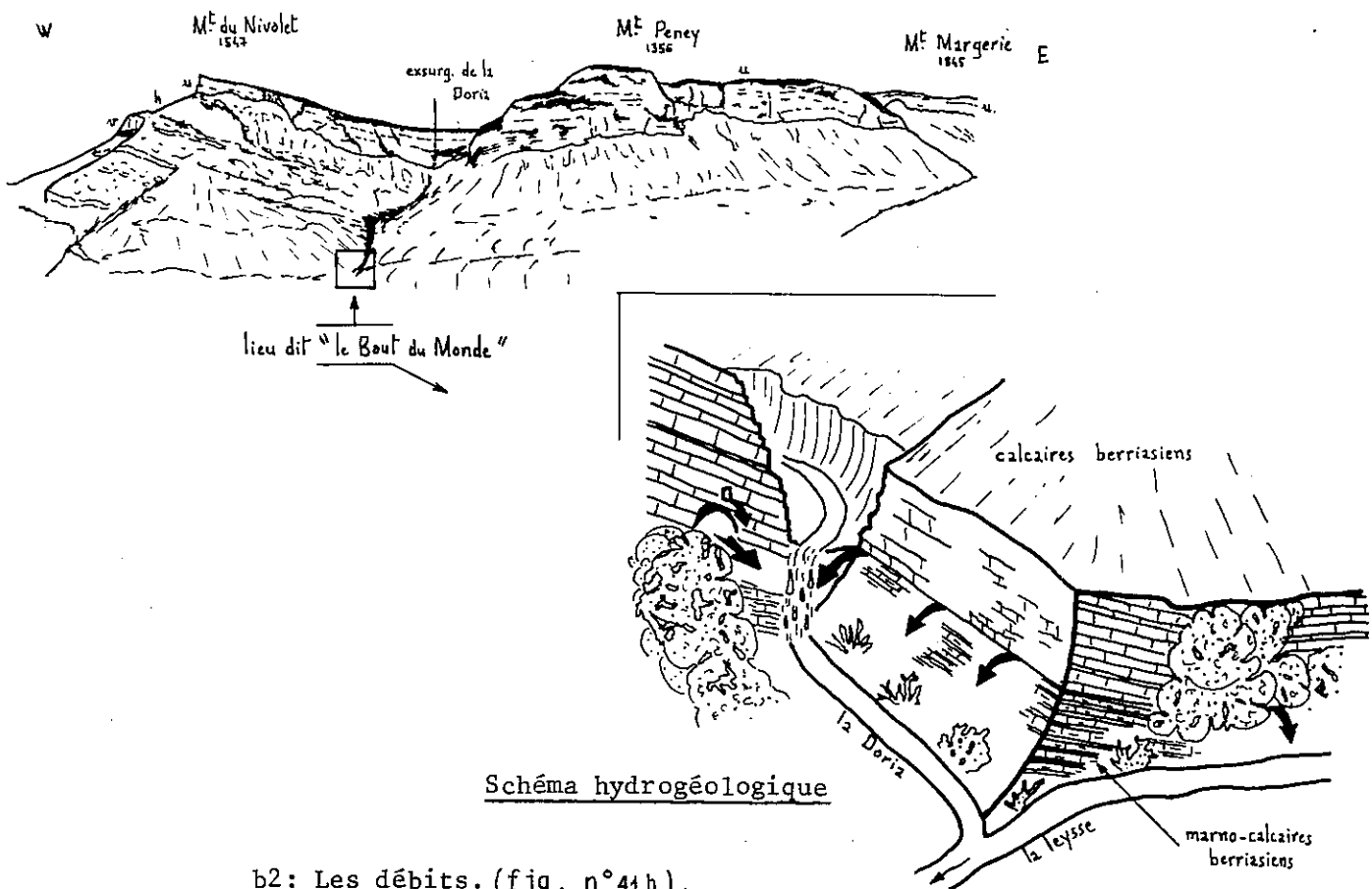
b1: Situation géographique et géologique.

Coordonnées Lambert de l'émergence principale (captage).

X = 884,05 Y = 71,37 Z = 350m.

Située à l'Est de Chambéry au lieu-dit "Le Bout du Monde", elle compte de nombreux points d'émergence dont certains sont captés pour l'alimentation de la commune de Saint Alban Laysse. Ils se jettent tous directement dans la Doria, à proximité immédiate de son confluent avec la Laysse.

Un repli synclinal dissymétrique amène l'eau au point le plus bas de la structure et les marno-calcaires du Berriasien moyen jouent le rôle de niveau imperméable.



b2: Les débits. (fig. n°41b).

Ils sont facilement contrôlables, étant donné que les points d'émergence les plus bas ont un débit faible mais assez constant et que les mises en charge successives des autres permettent une bonne estimation du débit, après tarage.

Celui-ci a été réalisé par des jaugeages différentiels effectués sur

la Doria, d'une part à l'amont des premières venues, d'autre part à l'aval des dernières.

L'hydrogramme met en évidence un effet de régularisation du débit, contrairement aux autres systèmes karstiques. Si les crues sont tout aussi brutales, elles ne dépassent pas 500 l/s et les décrues sont beaucoup plus lentes.

D'autre part même en plein hiver, on observe de forts débits, qui sont dûs aux précipitations sur la partie basse du bassin versant (versant de Lovette) où la neige ne persiste jamais longtemps. La partie haute est responsable des débits très élevés du mois d'avril grâce à la fonte de l'épaisse couche de neige cumulant cinq mois de précipitations.

Le débit d'étiage bénéficie de cette régularisation de telle sorte que le débit minimal enregistré, environ 25 l/s est voisin du débit d'étiage de la Doria qui possède pourtant un bassin versant nettement plus étendu. Cela explique d'ailleurs que plusieurs points d'émergence aient fait l'objet de captages.

Le débit moyen annuel est de  $190 \text{ l/s} \pm 20 \text{ l/s}$  et le débit spécifique est égal à  $17,8 \text{ l/s/km}^2$  (1er août 1975 - 31 juillet 1976). Le volume écoulé :  $6,0.10^6 \text{ m}^3$ .

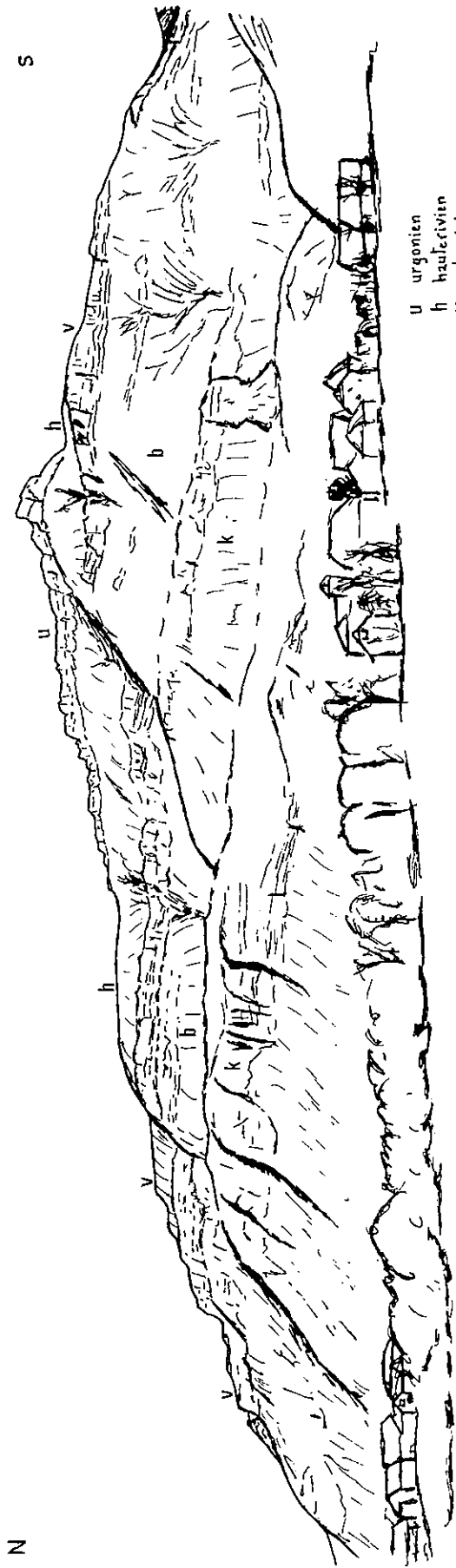
En considérant que les précipitations correspondent à une hauteur d'eau de 1000mm sur le versant de Lovette ( $2,7 \text{ km}^2$ ) et que l'évapotranspiration est de 35% on obtient un volume disponible de  $1,75.10^6 \text{ m}^3$ .

De plus, sur le plateau, le bassin versant propre à l'exutoire du Bout du Monde représente une superficie de  $4,1 \text{ km}^2$ . Cela correspond à un volume disponible de  $3,44.10^6 \text{ m}^3$  (1200mm de précipitations et 30% d'évapotranspiration).

Il est bien difficile de chiffrer la répartition des apports concernant la zone commune aux émergences du Bout du Monde et de Bange, qui représente  $4,1 \text{ km}^2$ . On peut seulement envisager, d'après les bilans de restitution des traceurs que la part alimentant Bange est vraisemblablement nettement plus importante.

Ainsi, en prenant par exemple  $1 \text{ km}^2$  pour l'alimentation du Monde, on obtient un volume de  $0,91.10^6 \text{ m}^3$  (1300mm de précipitations, 30% d'évapotranspiration).

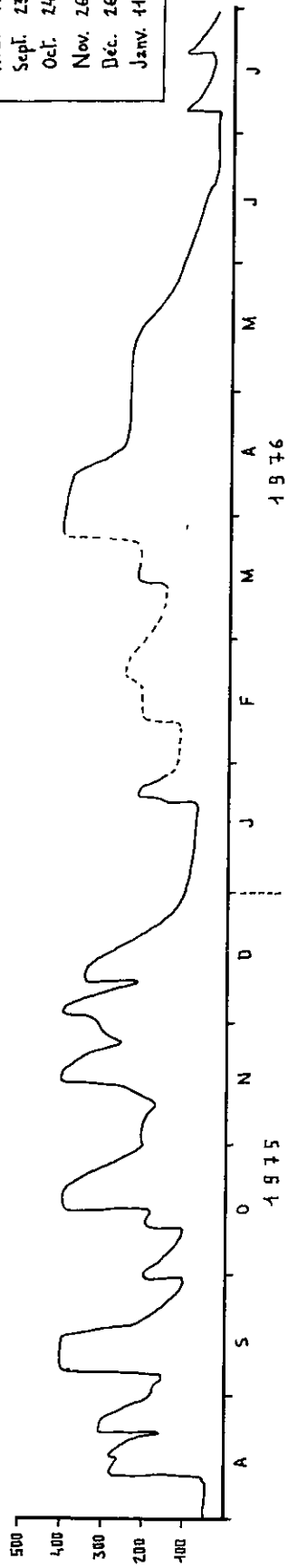
Au total le volume disponible pour l'écoulement est de  $(1,75 + 3,44 + 0,91).10^6 \text{ m}^3$ , soit  $6,1.10^6 \text{ m}^3$ . Si ce résultat est très proche du volume écoulé, il ne faut pas oublier qu'il a été calculé avec de nombreuses et grandes incertitudes.



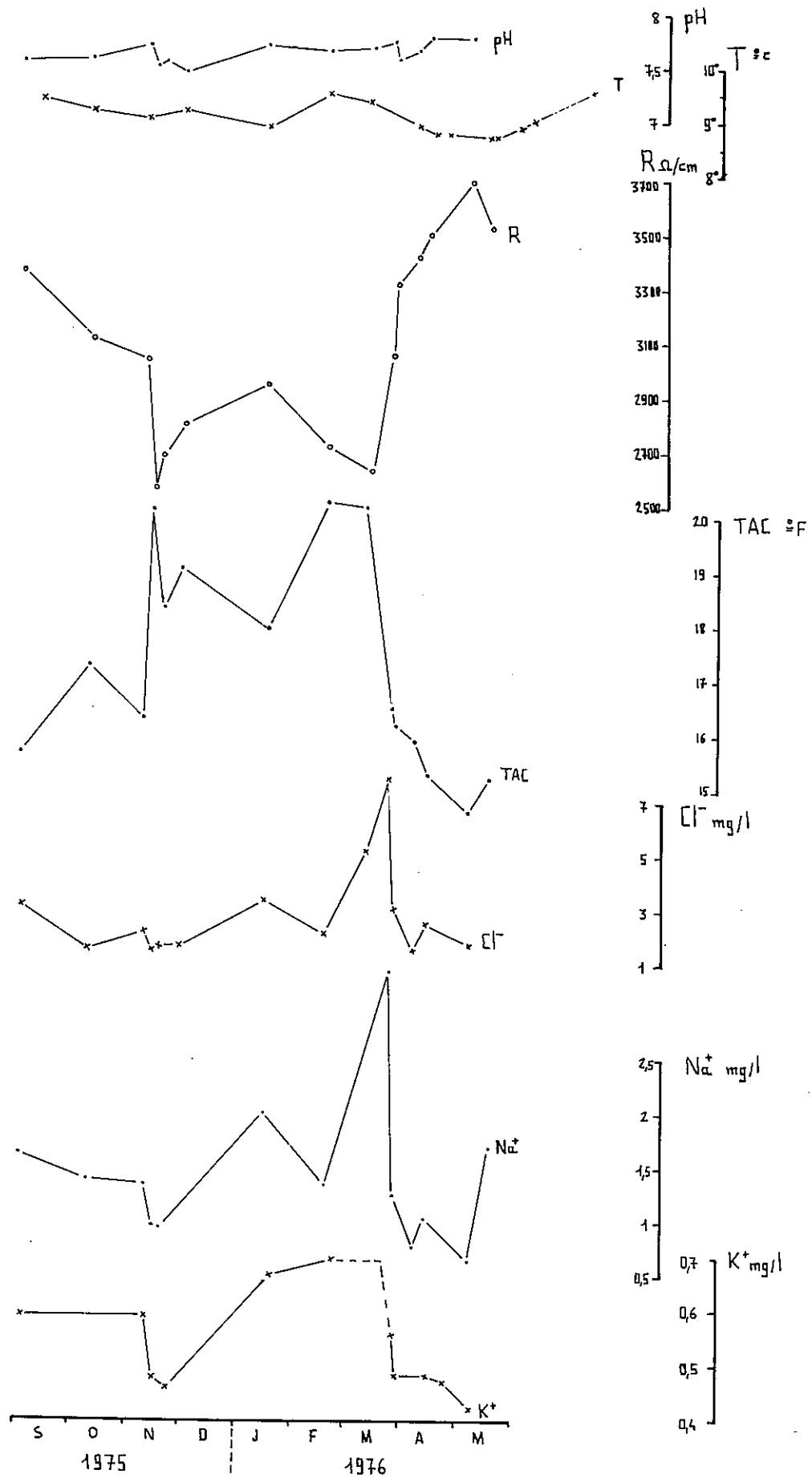
a - Panorama sur la bordure ouest du plateau du Mont Revard

fig. 41

| Débits moyens mensuels en l/s |            |
|-------------------------------|------------|
| Août 190                      | Fév. 190   |
| Sept. 230                     | Mars 210   |
| Oct. 245                      | Avril 300  |
| Nov. 265                      | Mai 190    |
| Déc. 260                      | Juin 65    |
| Janv. 110                     | Juillet 64 |



b - Bout du Monde : hydrogramme du 04 Août 75 au 31 Juillet 76

fig.42 MONDE : variations des paramètres physico-chimiques

b3: Les paramètres physico-chimiques. (fig. n°42 ).

Valeurs moyennes annuelles :

| : tpt   | : Résist. à 18°C | : pH   | : Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SiO <sub>2</sub> |
|---------|------------------|--------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
| : en °C | : en Ω/cm        | :      | :                  | :               | :               | mg/l           | :                             | :               | :                            | :                            | :                |
| : 9°10  | : 3150           | : 7,65 | : 70               | 4,7             | 1,42            | 0,54           | 211                           | 2,8             | 10                           | 8                            | 2,3              |

La température baisse de manière importante mais progressive au moment de la fonte des neiges sur le plateau. Une fois le minimum atteint, celui-ci se maintient durant plus d'un mois.

Le pH subit des variations de faible amplitude, entre 7,50 et 7,80.

La résistivité présente un minimum à la fin novembre car les apports dûs à une fonte de neige sur le versant de Lovette, durant l'hiver, entraînent une baisse de minéralisation. La fonte sur le plateau du Revard, où se trouve l'essentiel du bassin versant, provoque la même hausse de résistivité que pour la Doria, mais avec un décalage d'environ un mois pour la valeur maximale. Il y aurait donc un important mélange avec les réserves karstiques faisant ainsi monter progressivement la résistivité.

Les teneurs en ions Ca<sup>++</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> montrent très exactement les mêmes variations que la résistivité.

Les courbes de variations des ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> présentent les mêmes pics, très brefs au début de la fonte des neiges. Il pourrait s'agir de l'expulsion d'une importante masse de sel dont l'origine est indéterminée.

c- L'écoulement de la Meune.

cl: Situation géographique et géologique.

Coordonnées Lambert : X = 884,08 Y = 84,12 Z = 910m.

Elle se trouve à proximité de la route N 513 montant au Revard, au pied d'une falaise valanginienne et au contact des marno-calcaires berriasiens. La structure géologique du bassin versant conduit les eaux tout naturellement vers ce point bas qui apparaît schématiquement comme l'intersection de deux plans inclinés.

c2: Les débits.

Cette émergence a été captée pour l'alimentation du Montcel et de

Trevignin. Au cours de cette étude le trop-plein a été également capté pour l'alimentation du Revard, par refoulement au sommet de la Tour de l'Angle Est (alt. 1560m). Malheureusement celui-ci a tari durant l'hiver 1974-1975 et durant l'été 1975 ; ce qui n'est pas exceptionnel ! Le bassin versant étant exposé plein Nord bénéficie d'un ensoleillement très faible en hiver, aussi une longue période de beau temps froid peut entraîner un étiage aussi marqué que celui d'été.

Le débit d'étiage est d'environ 4 l/s et les crues peuvent atteindre 500 l/s.

### c3: Les paramètres physico-chimiques.

Le bassin versant est constitué en quasi totalité par les calcaires blancs valanginiens, massifs, très semblables aux calcaires urgoniens, les paramètres physico-chimiques seront donc comparables à ceux des circulations urgoniennes.

Valeurs moyennes annuelles : (12 à 25 analyses selon les éléments).

|         |                  |       |                    |                    |                   |                  |                                 |                   |                                 |                    |                                |   |
|---------|------------------|-------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------------|---|
| :       | :                | :     | :                  | :                  | :                 | :                | :                               | :                 | :                               | :                  | :                              | : |
| : tpt   | : Résist. à 18°C | : pH  | : Ca <sup>++</sup> | : Mg <sup>++</sup> | : Na <sup>+</sup> | : K <sup>+</sup> | : HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | : Cl <sup>-</sup> | : SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> | : SiO <sub>2</sub> | : NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | : |
| : en °c | : en Ω/cm        | :     | :                  | :                  | :                 | : mg/l           | :                               | :                 | :                               | :                  | :                              | : |
| :       | :                | :     | :                  | :                  | :                 | :                | :                               | :                 | :                               | :                  | :                              | : |
| : 6°50: | 3580             | : 7,7 | : 62               | 2,1                | 0,31              | 0,24             | 189                             | 0,97              | 6                               | 2,9                | 4                              | : |
| :       | :                | :     | :                  | :                  | :                 | :                | :                               | :                 | :                               | :                  | :                              | : |

### 3°/- L'émergence tithonique des Moines :

#### a- Situation géographique et géologique.

Coordonnées Lambert : X = 886,17 Y = 85,38 Z = 720m

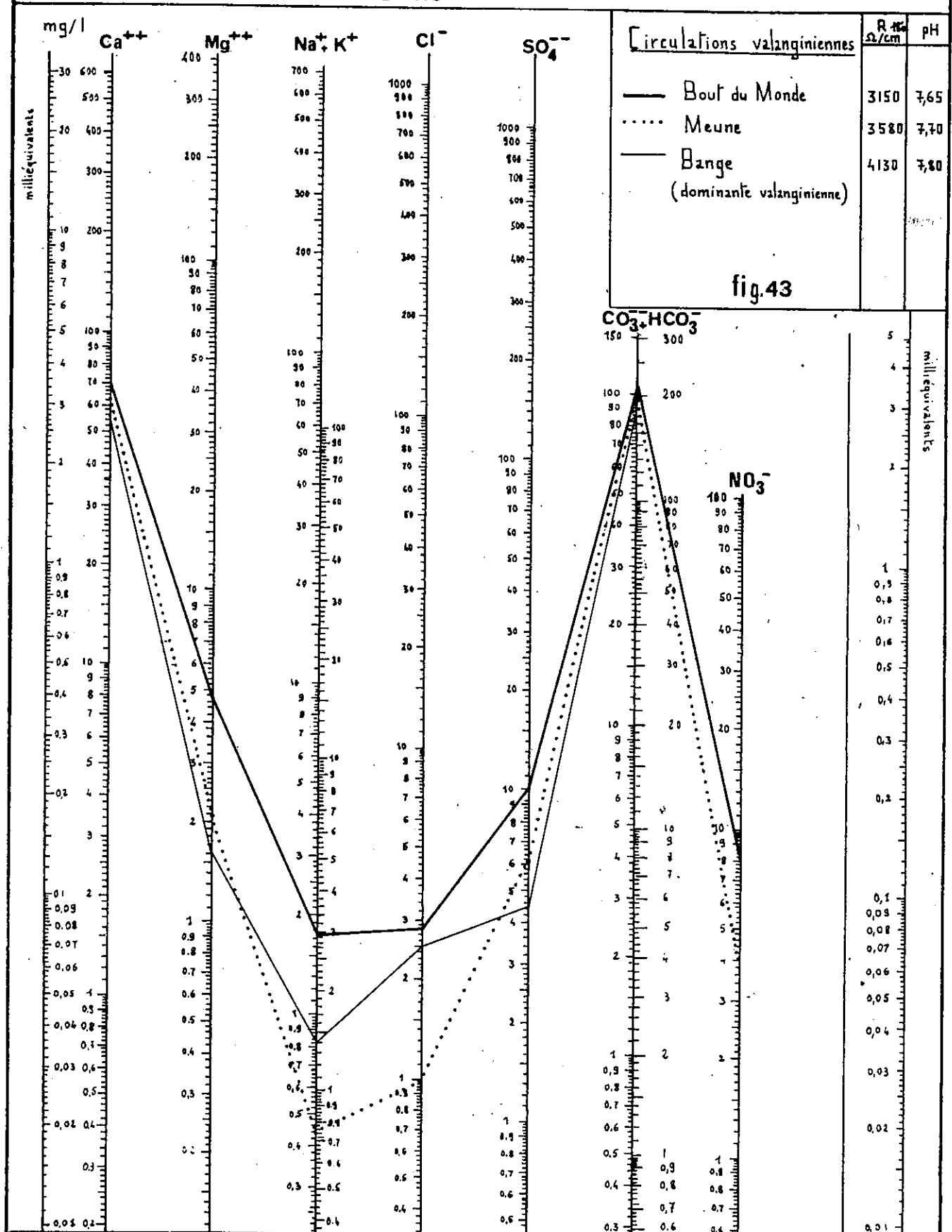
Située en rive droite du Sierroz, l'émergence sort des calcaires tithoniques plissés en anticlinal. Les conditions géologiques précises sont invisibles : l'émergence étant captée par puits, à six mètres de profondeur.

#### b- Les débits.

L'amplitude de variation des débits est du même ordre de grandeur que celle observée à l'exurgence du Bout du Monde. A l'étiage, le débit est voisin de 3 l/s et en crue il ne dépasse guère 50 l/s. Il y a donc une régularisation due vraisemblablement à une circulation dans des fissures de faible largeur.

INSTITUT  
DOLOMIEUDIAGRAMME  
D'ANALYSE D'EAUd'après H. SCHÖLLER  
et E. BERKALOFF

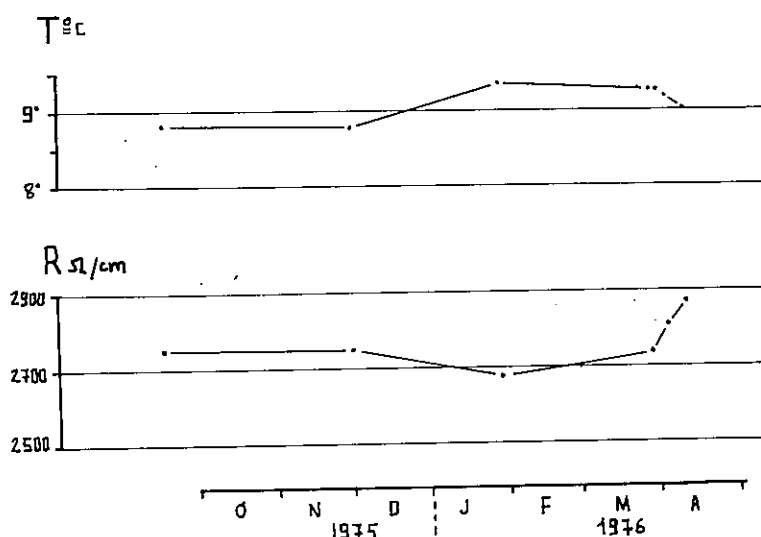
LEGENDE



c- Les paramètres physico-chimiques.

Leur principale caractéristique est une constance dans le temps assez remarquable. La fonte des neiges se répercute tout de même sur la physico-chimie des eaux mais très faiblement, étant donné le volume assez minime du stock neigeux présent sur le bassin versant. Les paramètres subissant les variations les plus sensibles sont la température, la résistivité, les teneurs en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ .

Variations température - résistivité



Valeurs moyennes annuelles :

| tpt                   | Résist. à 18°C        | pH   | $\text{Ca}^{++}$ | $\text{Mg}^+$ | $\text{Na}^+$ | $\text{K}^+$ | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{--}$ | $\text{SiO}_2$ |
|-----------------------|-----------------------|------|------------------|---------------|---------------|--------------|------------------|---------------|--------------------|----------------|
| en $^{\circ}\text{C}$ | en $\Omega/\text{cm}$ |      |                  |               | mg/l          |              |                  |               |                    |                |
| 9°10'                 | 2760                  | 7,57 | 76,8             | 8,3           | 0,49          | 0,28         | 251              | 0,90          | 7                  | 2,5            |

La seule particularité de cette émergence est sa teneur en  $\text{Mg}^+$  variant entre 6 mg/l et 13,7 mg/l avec une moyenne de 8,3 mg/l. Cela peut être dû à des passées dolomitiques (carbonates de calcium et de magnésium) dans les calcaires tithoniques, ou aux minéraux argileux des dépôts morainiques.

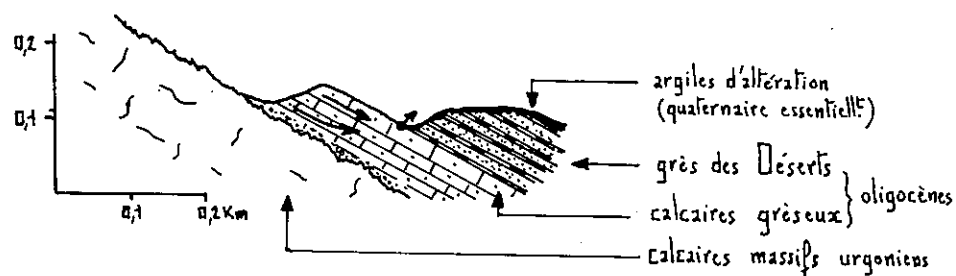
#### 4°/- L'émergence tertiaire de l'Empereur :

##### a- Situation géographique et géologique.

Coordonnées Lambert : X = 888,28 Y = 80,40 Z = 1000m.

Les calcaires gréseux oligocènes donnent également lieu à des circulations de type fissural.

Située en bordure de la route N 512 au Nord du Col de Plainpalais, cette émergence est captée pour l'alimentation de la commune du Noyer.



Situation géologique schématique

##### b- Les débits.

Leurs variations sont celles des exurgences karstiques tels la Duy ou Saint François qui se trouvent à proximité.

Le débit d'étiage est de 1 l/s. Les crues peuvent atteindre environ 80 l/s.

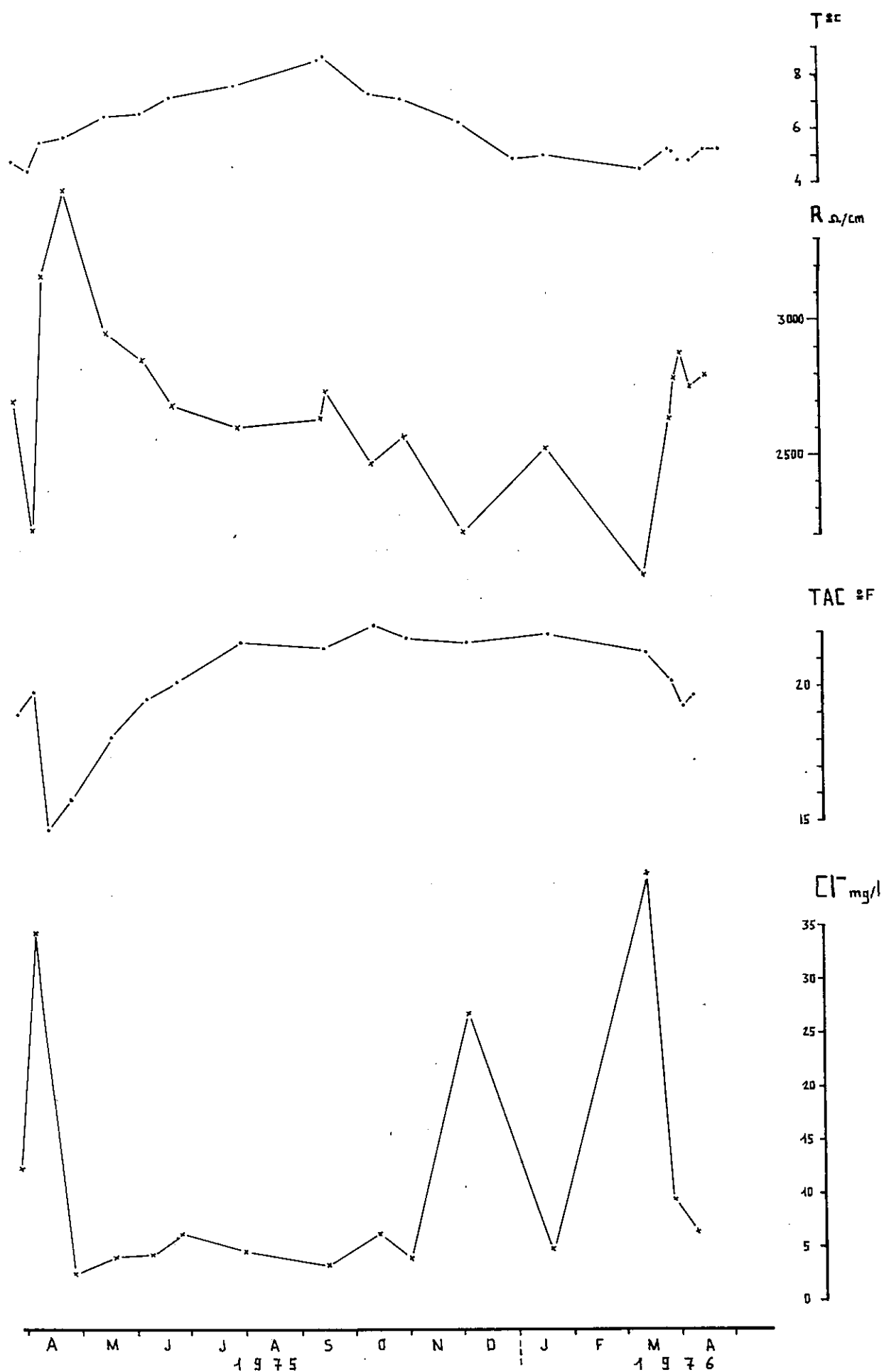
##### c- Les paramètres physico-chimiques. (fig. n° 44 ).

La température de l'émergence suit fidèlement les variations de température de l'air à cette altitude. Les circulations sont donc très superficielles.

La résistivité présente de fortes variations qui ne sont pas ici le reflet des variations des concentrations en  $\text{Ca}^{++}$  et en  $\text{HCO}_3^-$ . En effet, le T.A.C. présente les variations que l'on observe habituellement sur les émergences de cette région bien que la remontée après la fonte des neiges se termine ici très tôt, dès la fin juillet.

Par contre, la courbe de variation des teneurs en chlorures montre des pics tout à fait anormaux, de même que celle des teneurs en sodium. Ces "pics" contribuent donc à abaisser très sensiblement la résistivité.

fig.44

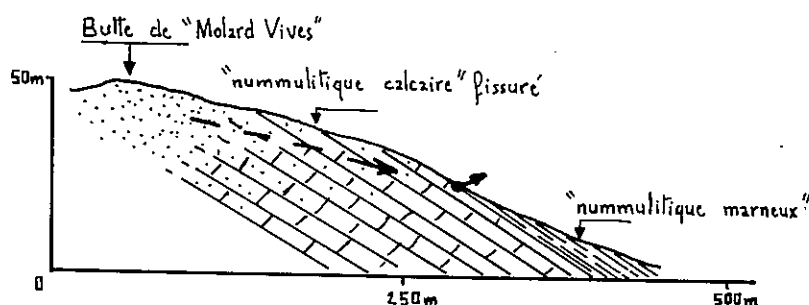
Variations des paramètres physico-chimiques

Quand on sait que la route du Col de Plainpalais passe juste au-dessus du captage et décrit ensuite plusieurs lacets, dans le périmètre d'alimentation de l'émergence, l'explication de telles valeurs est donnée par le salage de la chaussée durant l'hiver.

Le tableau suivant donne les valeurs moyennes des paramètres :

| tpt   | Résist. à 18°C | pH   | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> | SiO <sub>2</sub> |
|-------|----------------|------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|
| en °C | en Ω/cm        |      |                  |                  |                 | mg/l           |                               |                 |                               |                  |
| 6°15  | 2695           | 7,54 | 78,4             | 4,5              | 4,0             | 0,35           | 244                           | 10,4            | 6                             | 2,5              |

En complément, on donnera les analyses moyennes partielles de sources liées à de petites circulations fissurales, analogues aux précédentes.



Situation géologique schématique  
des sources de "Golet"

| Source                                              | Température |                        | pH   | Résist.<br>à 18°C<br>Ω/cm | Concentrations mg/l |                  |                 |                |                               |                               |                 |
|-----------------------------------------------------|-------------|------------------------|------|---------------------------|---------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
|                                                     | moyenne     | amplitude<br>variation |      |                           | Ca <sup>++</sup>    | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> | Cl <sup>-</sup> |
| Golet nord<br>X = 886,40<br>Y = 78,41<br>Z = 1205 m | 5°55        | 5°8                    | 7,50 | 2520                      | 80                  | 0,55             | 10              | 0,33           | 236                           | 4                             | 17              |
| Golet sud<br>X = 886,22<br>Y = 78,24<br>Z = 1210 m  | 5°45        | 6°05                   | 7,50 | 3300                      | 70                  | 0,6              | -               | -              | 216                           | -                             | 1               |

### 5°/- Les circulations liées à l'Hauterivien :

On observe de nombreuses petites sources au contact des niveaux calcaires de l'Hauterivien supérieur et des niveaux marneux sous-jacents.

Ces circulations fissurales prennent parfois naissance dans les calcaires jaunes, en petits bancs, du Barrémien inférieur. Il ne faudra donc pas s'attendre à des caractères très particuliers. Il serait plus intéressant de connaître les caractéristiques des eaux ayant traversé tout l'Hauterivien et susceptibles de modifier le chimisme des circulations valanginiennes. Cela n'est malheureusement pas possible.

.La source de Damot (X=883,56 ; Y=77,52 ; Z=1365m) anciennement captée pour la Fèclaz émerge des niveaux moyens de l'Hauterivien.

.La Fontaine des Orties (X=883,40 ; Y=81,37 ; Z=1455m) est une source d'alpage drainant une butte formée par l'Hauterivien supérieur.

.La source des Ebats (captage. X=884,96 ; Y=82,49 ; Z=1330m) est issue des niveaux hauteriviens les plus élevés et son périmètre d'alimentation englobe également la base du Barrémien inférieur.

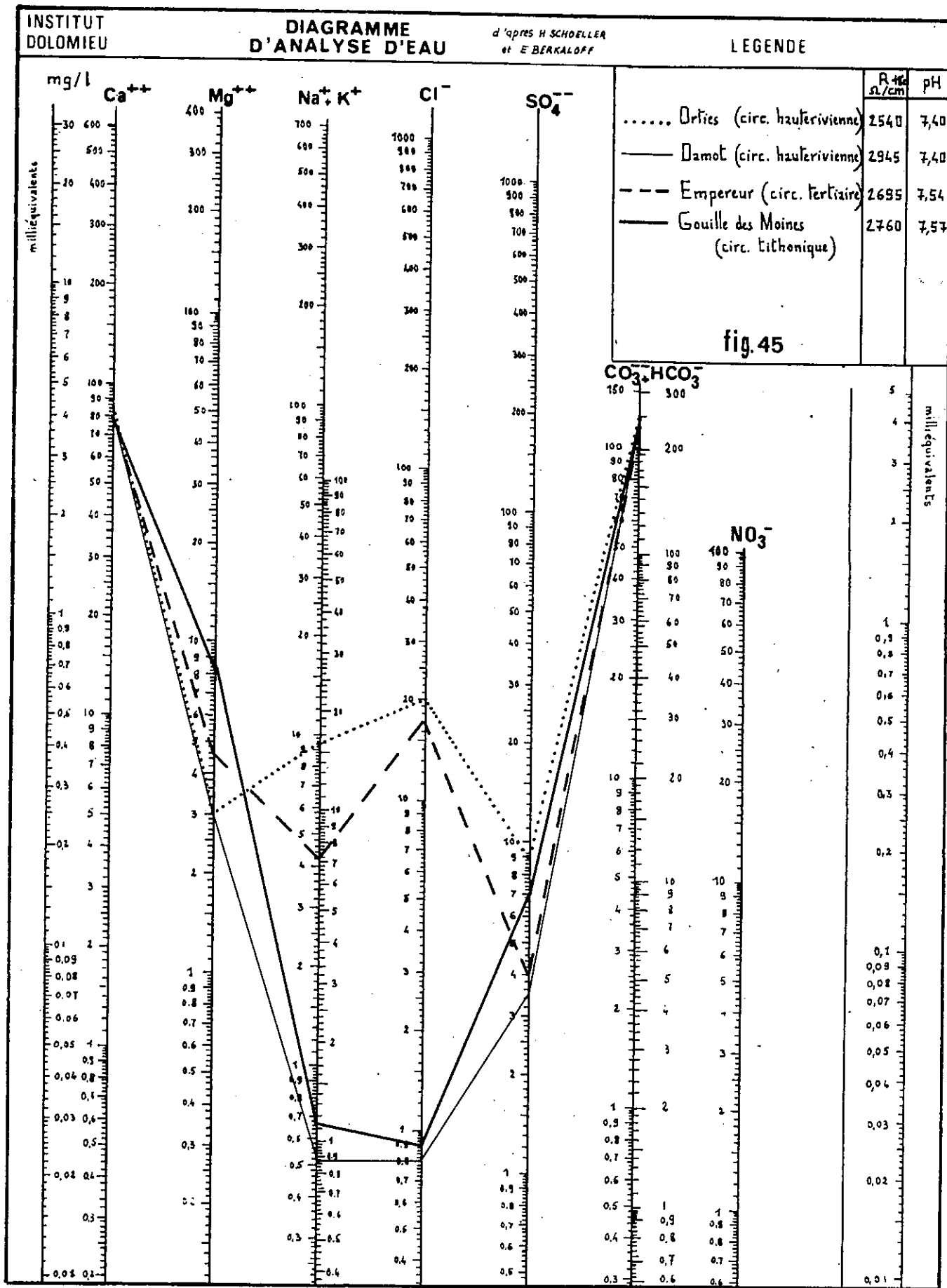
Les paramètres physico-chimiques (moyennes de 5 analyses) :

| Source | Débit<br>moyen<br>estimé<br>l/s | Température |                        | pH  | Résist<br>à 18°C<br>S/cm | Concentrations mg/l |                  |                 |                |                               |                              |                 |
|--------|---------------------------------|-------------|------------------------|-----|--------------------------|---------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|
|        |                                 | moyenne     | amplitude<br>variation |     |                          | Ca <sup>++</sup>    | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> |
| Damot  | 0,3                             | 5°8         | 1°2                    | 7,4 | 2945                     | 79                  | 3                | 0,28            | 0,4            | 238                           | 3,5                          | 0,8             |
| Orties | 0,05                            | 5°9         | 6°5                    | 7,4 | 2540                     | 84                  | 3                | 9 *             | 0,8            | 244                           | 9                            | 20 *            |
| Ebats  | 0,2                             | 4°6         | 0°95                   | 7,6 | 4170                     | 55                  | 0,4              | 0,22            | 0,4            | 168                           | 3,5                          | 0,55            |

\* concentrations anormales dues au salage de la route N 513

\* concentrations anormales dues au salage de la RN 513.

Ceux-ci montrent le caractère très superficiel de la Fontaine des Orties à laquelle peuvent s'identifier la plupart des petites sources issues de l'Haute-



rien. On remarquera la forte teneur en sulfates et la minéralisation globale assez élevée.

#### 6°/- Les sources liées au Quaternaire :

On donnera à titre indicatif les caractères physico-chimiques des eaux circulant dans les formations quaternaires.

Ces sources se trouvent principalement sur le versant Ouest du Mont Margérie et sont généralement captées pour l'alimentation de la commune des Déserts, de Saint François ou du Noyer.

| Source                                                | Type de circulation                                                  | Débit moyen estimé l/s | Température       |      | pH   | Résist. 218°C $\Omega/cm$ | concentrations mg/l |                  |                 |                |                               |                              |                 |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|------|------|---------------------------|---------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|
|                                                       |                                                                      |                        | moyenne amplitude |      |      |                           | Ca <sup>++</sup>    | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> |
| les Chapis 1<br>x = 887,40<br>y = 77,80<br>Z = 1265m  | Eboulis (prédominance d'éléments de calc. urgonien) + glacière local | 1                      | 4°9               | 0°65 | 7,65 | 3665                      | 61                  | 1,9              | 0,4             | 0,38           | 195                           | <1                           | 0,7             |
| les Chapis 2<br>x = 887,43<br>y = 77,83<br>Z = 1265m  |                                                                      | 0,3                    | 4°2               | 3°50 | 7,70 | 2825                      | 72                  | 6,5              | 4               | 0,6            | 254                           | 2                            | 0,7             |
| Combe Buisson<br>x = 888,56<br>y = 78,86<br>Z = 1300m | Eboulis (prédominance d'éléments du Valanginien)                     | 2                      | 4°8               | 1°15 | 7,80 | 3060                      | 52                  | 9,5              | 5               | 0,7            | 199                           | 20                           | 0,8             |

#### V- CONCLUSION.

Les analyses moyennes reportées sur diagrammes de Schoeller-Berkaloff permettent de visualiser les caractéristiques chimiques des diverses émergences.

Les circulations dans l'ensemble karstique urgonien confèrent aux eaux une remarquable homogénéité de composition chimique. Nous avons vu que certaines particularités (Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>) étaient dues à des phénomènes de pollution, d'autres tels les concentrations plus élevées, notamment en Mg<sup>++</sup>, à Fontaine Noire, peuvent être reliées à l'importance relative des dépôts tertiaires sur la superficie du bassin versant.

Ces circulations urgoniennes se différencient nettement de celles affectant le Valanginien par leurs teneurs, toujours relativement faibles, en Mg<sup>++</sup> et SO<sub>4</sub><sup>-</sup>.

Les circulations liées à l'Hauterivien présentent des caractères qui varient selon les niveaux concernés. Ainsi, la source des Ebats a une composition chimique de type Urganien, alors que la Fontaine des Orties montre des teneurs en  $Mg^{++}$  et  $SO_4^{--}$  beaucoup plus élevées. L'ion  $SO_4^{--}$  est à rechercher dans la roche même (pyrites de fer par exemple). La concentration maximale en  $Mg^{++}$  est obtenue à l'émergence tithonique des Moines. L'origine de cet élément est à rechercher soit dans des passées dolomitiques dans les calcaires, bien que l'on n'en ait pas décelé la présence dans les quelques carbonatimétries effectuées, soit dans les minéraux argileux tels la chlorite ou la montmorillonite.

Les teneurs en  $Na^+$ ,  $K^+$  et  $Cl^-$  pourraient s'expliquer uniquement par les apports atmosphériques pour les émergences qui ne sont pas soumises aux pollutions dues à la présence humaine. Les variations des concentrations en  $K^+$  semblent assez complexes.

Enfin les nitrates proviennent des activités biologiques qui produisent d'importantes quantités d'azote organique.

Les variations annuelles des paramètres physico-chimiques mettent en évidence l'importance de la fonte des neiges qui se traduit par une baisse brutale de la minéralisation et de la température, suivie d'une remontée extrêmement lente. Celle-ci se poursuit jusqu'à la prochaine fonte en étant seulement perturbée temporairement par les conséquences résultant de fortes précipitations. Il s'agit donc de véritables cycles annuels.

## CHAPITRE . 6

# APPROCHE DE LA DYNAMIQUE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES

## PAR L'ETUDE DES CRUES

# Les systèmes karstiques de la Doria et du Bout du Monde

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

## APPROCHE DE LA DYNAMIQUE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES PAR L'ETUDE DES CRUES

### -----

### Les systèmes karstiques de la Doria et du Bout du Monde

### -----

On a vu précédemment qu'un seul système karstique, celui du Bout du Monde, se distinguait des autres, principalement par une modulation des débits à l'exutoire.

Les bassins versants karstiques de la Doria et du Monde étant contigus sur le plateau et donc très homogènes en ce qui concerne les apports atmosphériques, il paraissait intéressant d'étudier et de comparer le fonctionnement des circulations souterraines superposées, liées à ces bassins.

On analysera donc les courbes de décrue et tarissement de chaque aquifère et les variations des paramètres physico-chimiques lors des crues.

#### I- ANALYSE DES COURBES DE DECRUE ET TARISSEMENT.

Parmi les nombreuses méthodes proposées, on choisira celle de A. MANGIN qui semble la mieux adaptée aux aquifères karstiques et qui tient compte de l'infiltration.

##### 1°/- Principe :

Il repose sur la distinction de deux ensembles dans le système karstique :

- Une zone non saturée où s'effectue l'infiltration ;
- Une zone noyée.

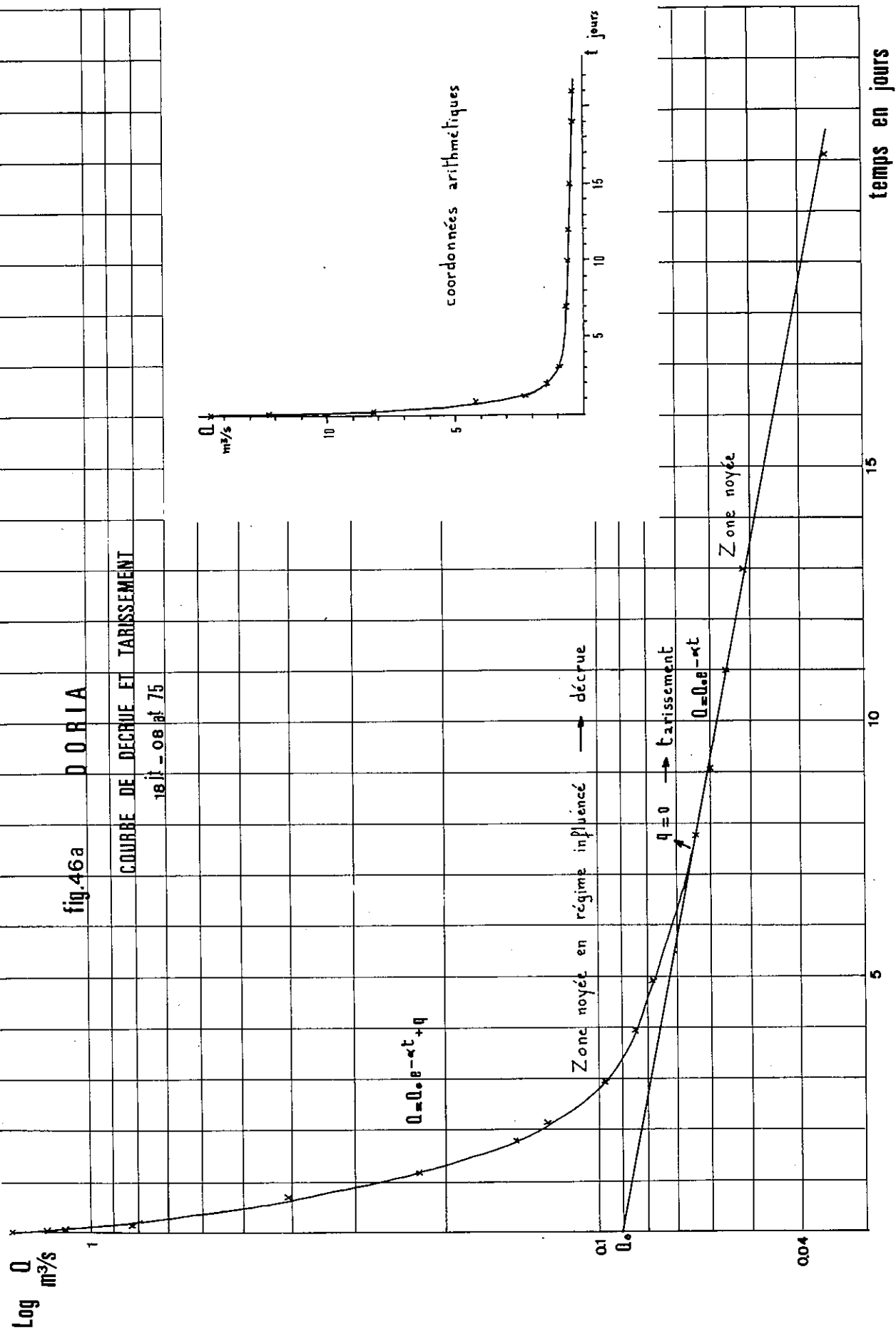
En appelant  $Q$  le débit à l'exutoire et  $q$  le débit global de l'infiltration, qu'elle se fasse par percolation ou par circulation à fort débit, on aura à considérer deux cas :

- $q > Q$  : l'infiltration est supérieure au débit de l'exutoire, la réserve noyée croît et va déterminer une crue.

fig.46a DORIA

COURBE DE DECROU ET TARISSEMENT

18 jlt - 08 at 75



-  $q < Q$  : l'exutoire débite plus que l'infiltration n'apporte ; une décrue apparaît.

Les formules établies à partir de la vidange d'un réservoir paraissent convenir assez bien. L'équation de base sera :  $Qdt = - Sdh$  avec  $S$  = surface du réservoir de débit  $Q$  dépendant d'une charge  $h$ .

Le régime étant influencé par une alimentation de débit  $q$ , l'équation devient :

$$Qdt = - Sdh + qdt$$

En régime laminaire cette équation se transforme ainsi :

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} + q \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} Q_0 = \text{débit initial au temps } t = 0 \\ \alpha = \text{coefficient de tarissement} \end{array}$$

Lorsque  $q$  est négligeable, au moment du tarissement  $Q = Q_0 e^{-\alpha t}$  (formule de Maillet).

En régime turbulent on obtient  $Q = (Q_0 - \beta t) + q$  avec  $\beta$  = coefficient de tarissement.

L'analyse du tarissement (où  $q = 0$ ) permet de déterminer les paramètres  $Q_0$ ,  $\alpha$  ou  $\beta$  et donc de tracer point par point la courbe  $q = f(t)$ .

La formule empirique proposée par A. MANGIN et traduisant le mieux cette courbe est une formule homographique du type  $y = \frac{ax + b}{cx + d}$

Elle s'exprime sous la forme  $q = \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$  où  $q_0$  représente le débit au début de la décrue,  $\eta$  un coefficient de durée ou de vitesse d'infiltration,  $\varepsilon$  un coefficient d'hétérogénéité d'écoulement.

Ces paramètres étant déterminés, les équations des courbes de décrues seraient :

$$\text{en régime laminaire : } Q = Q_0 e^{-\alpha t} + \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$$

$$\text{en régime turbulent : } Q = (Q_0 - \beta t) + \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$$

## 2°/- Application à l'exutoire de la Doria :

### a- Détermination du régime de vidange.

La courbe de décrue et tarissement obtenue du 18 juillet au 8 août 1975 à l'exurgence de la Doria a été reportée en coordonnées arithmétiques et semi-logarithmiques. (fig. n°46a).

En coordonnées arithmétiques, on constate que la partie terminale de la courbe devient une droite. Celle-ci étant quasiment parallèle aux abscisses peut correspondre à la partie asymptotique d'une exponentielle. En coordonnées semi-logarithmiques, cette même partie restant une droite, traduit un régime de vidange laminaire.

b- Analyse de l'infiltration.

Après avoir tracé point par point, soit graphiquement soit par le calcul, la courbe  $q = f(t)$  ; il convient de vérifier la validité de la fonction homographique. Pour cela, on prend un point quelconque  $(t_1, q_1)$  et on aligne  $Y = \frac{t - t_1}{q - q_1}$  et  $t$  (fig. n°46b). Un tel changement de variable permet d'obtenir une droite vérifiant que la courbe représentant l'infiltration est bien une fonction de type homographique.

Détermination des paramètres  $\eta$  et  $\varepsilon$  :

Lorsque  $q = 0$  (pour  $t = 7,5$  j),  $q_0 - \eta t = 0$

d'où  $\eta = \frac{q_0}{t} = 0,18$

$\varepsilon$ , caractérisant l'importance de la concavité de la courbe, est déterminé en prenant une valeur pour  $q$  et la valeur correspondante de  $t$ .  $\varepsilon = 5$ . La fonction relative à l'infiltration est donc de la forme :  $q = \frac{1,33 - 0,18t}{1 + 5t}$

c- Equation de la décrue et du tarissement.

Les paramètres  $Q_0$  et  $\alpha$  de l'expression du tarissement sont déterminés graphiquement (fig. n°46a).

$$Q_0 = 0,09 \text{ m}^3/\text{s} \text{ et } \alpha = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0,4343 (t_2 - t_1)} = 4,3 \cdot 10^{-2}$$

(pente de la droite)

En définitive, l'équation générale de la décrue et du tarissement est de la forme  $Q = 0,09 e^{-0,043t} + \frac{1,33 - 0,18t}{1 + 5t}$

d- Les volumes de la zone noyée et de l'infiltration.

Le volume d'eau en mouvement dans le karst définit le débit au niveau de l'exutoire. Selon A. MANGIN, "le volume dynamique initial est le volume d'eau en mouvement qui, au moment où la décrue s'amorce, va déterminer l'allure du tarissement". Ce volume ( $V_d$ ) peut être calculé par l'intégrale de l'équation du tarissement entre ses deux limites qui sont les limites de l'intervalle de variation possible de  $Q$ , soit  $t = 0$  et  $Q = 0$ . Il comprendra les volumes d'eau situés au-dessus

fig. 46b

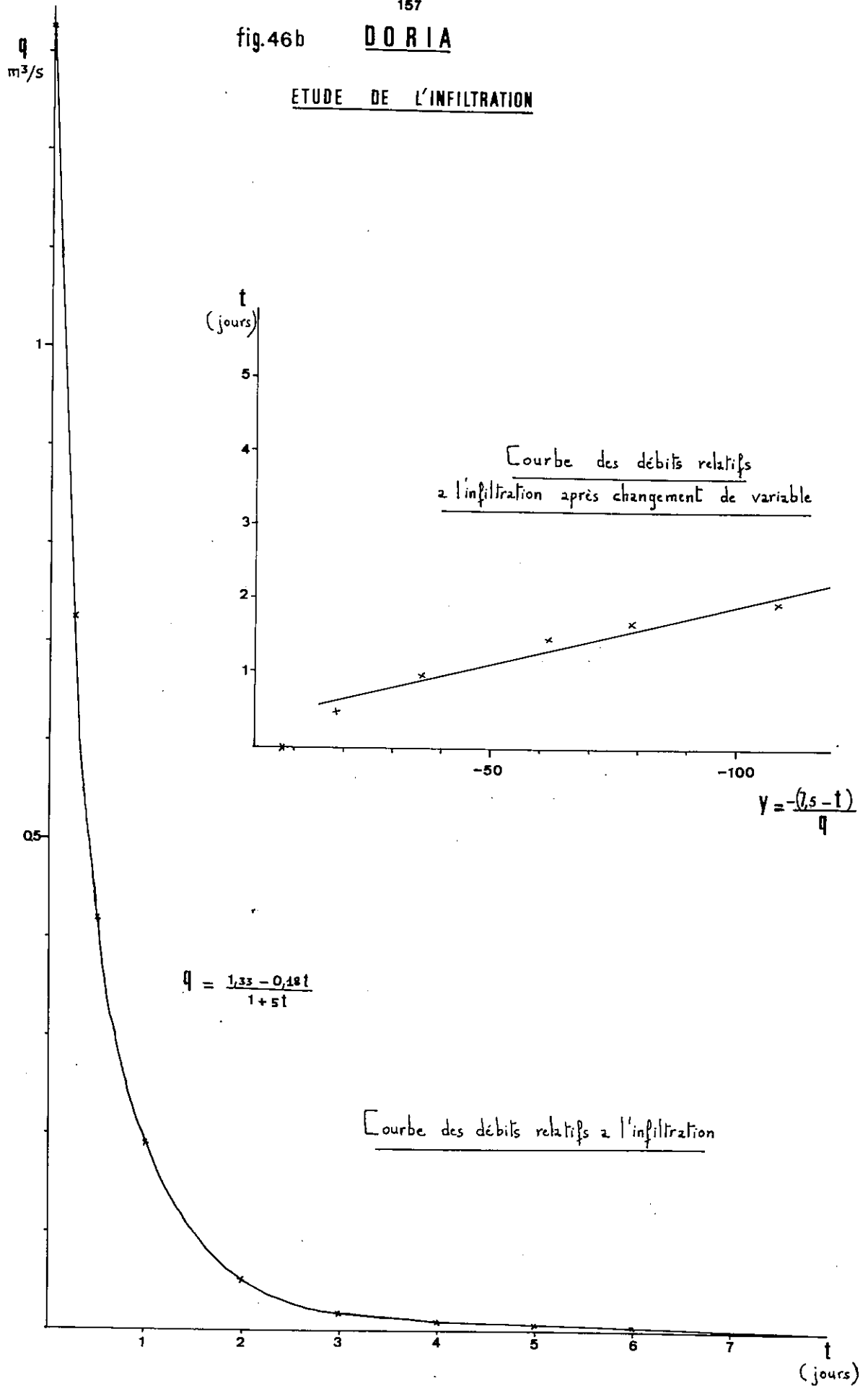
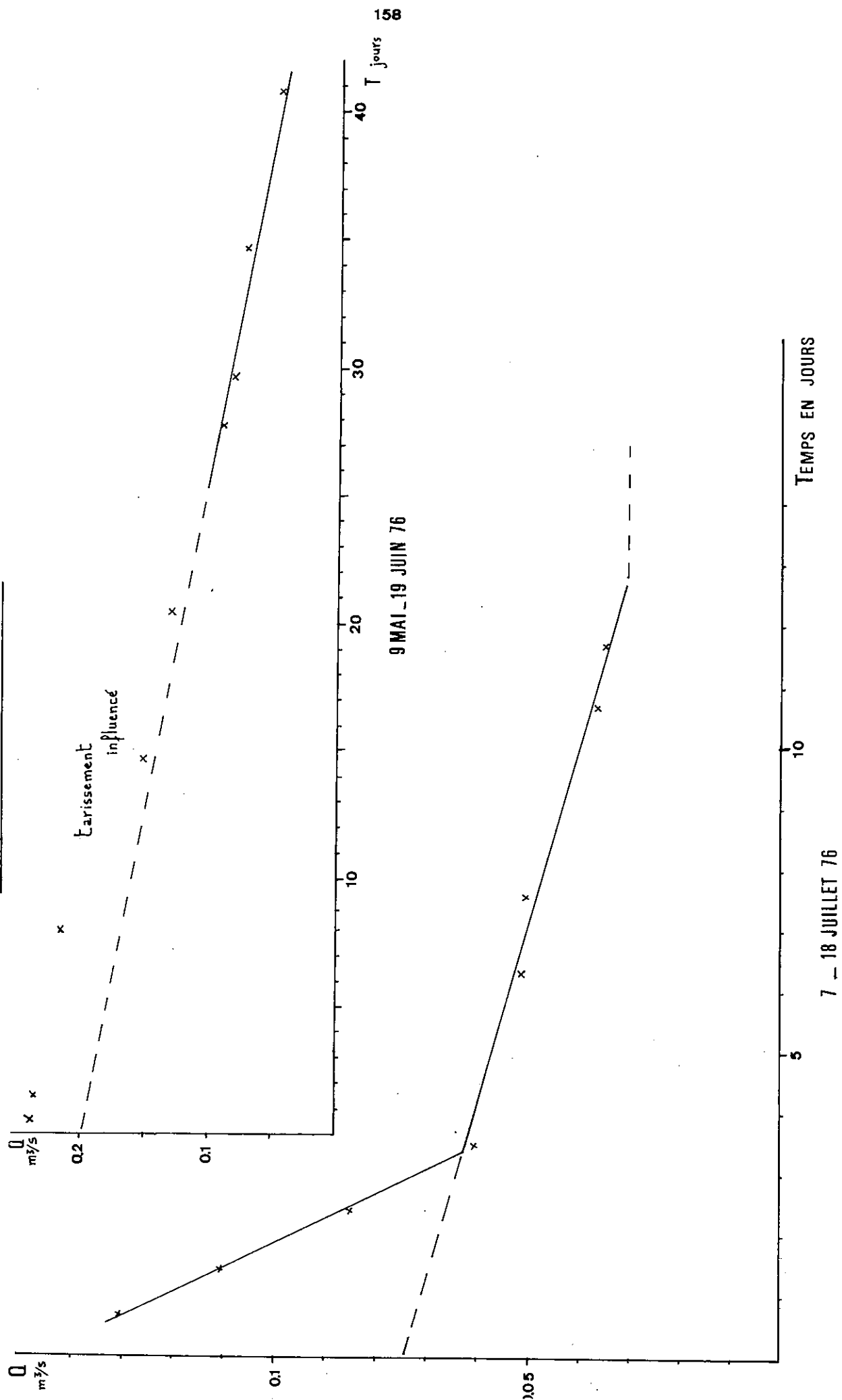
DORIAETUDE DE L'INFILTRATION

fig.47 MONDE  
COURBES DE DECRUE ET TARISSEMENT



du niveau de l'exutoire ( $Vd_1$ ), plus ceux situés en dessous ( $Vd_2$ ) et qui sont en mouvement.

$$Vd = Q_0 \int_{t=0}^t e^{-\alpha t} dt$$

$$\text{De } t = 0 \text{ à } t = \infty \quad Vd = \frac{Q_0}{\alpha} (x 86400) = 180.000m^3$$

Le volume  $Vd_1$  sera calculé en considérant le temps  $t_1$ , obtenu par extrapolation de la courbe de tarissement jusqu'au point d'ordonnée  $Q = 0$ .

$$Vd_1 = \frac{Q_0}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{e^{\alpha t_1}}\right)$$

$$\text{Pour } t_1 = 53 \text{ j} \quad Vd_1 = 162.000m^3$$

$$\text{On en déduit } Vd_2 = Vd - Vd_1 = 18.000m^3$$

Le volume de l'infiltration est égal à  $\int_0^t \frac{q_0 - \eta t}{(1 + \epsilon t)} dt$

$$Vi = \frac{2,30 \eta \left(1 + \frac{\epsilon q_0}{\eta}\right) \log \left(1 + \frac{\epsilon q_0}{\eta}\right) - \epsilon q_0}{\epsilon^2}$$

$$Vi = 0,73 \times 86.400 = 63.000m^3$$

Le même calcul effectué graphiquement en planimétrant la surface délimitée par la courbe  $q = f(t)$  donne une valeur très proche soit  $60.500m^3$ .

### 3°/- Application à l'exutoire du Bout du Monde :

a- Le régime de vidange et l'équation du tarissement. (fig. n°47 ).

Pour la courbe obtenue du 7 au 18 juillet 1976, le faible nombre de mesures rend l'analyse assez délicate. De plus la crue a été d'une ampleur très modeste. Toutefois, il semble que l'on ait deux droites en coordonnées arithmétiques ; ce qui indique un régime turbulent de forme  $Q = (Q_0 - \beta t) + q$ .

L'équation du tarissement serait donc  $Q = 0,074 - 0,0034t$ .

Pour la courbe de décrue et tarissement obtenue du 9 mai au 19 juin 1976, on pourra considérer que la partie terminale correspond à un tarissement. Effectivement, jusque vers la fin mai, la fonte des neiges apporte des quantités d'eau décroissantes non négligeables. Au début juin, le stock neigeux a complètement disparu. L'équation du tarissement serait alors :  $Q = 0,110 - 0,0039t$ .

*b- Les volumes de la zone noyée.*

En régime turbulent, le volume dynamique initial est égal à  $\frac{Q_0^2}{2\beta}$ .

On obtient ainsi dans le premier cas un volume de 69.000m<sup>3</sup> et dans le second cas un volume de 130.000m<sup>3</sup>. Cette dernière valeur n'a rien d'étonnant, car à la fin de la fonte des neiges, les réserves sont vraisemblablement près de leur capacité maximale.

On peut ajouter qu'il s'agit de volumes situés en totalité au-dessus du niveau de l'exutoire.

4°/- Conclusion :

La méthode de Mangin fournit des informations sur le mécanisme d'infiltration, sur la zone noyée et sur leurs importances respectives. Dans les deux aquifères étudiés, la dynamique des écoulements est très différente. Le régime laminaire de la Doria semble être le type de vidange le plus fréquent pour les émergences karstiques citées dans cette étude. Les volumes calculés se rapportant toujours à un instant précis, les comparaisons seront donc particulièrement difficiles. L'idéal serait d'obtenir une pluie d'intensité et de répartition uniforme sur des systèmes karstiques dont l'état des réserves est identique.

On notera la relative faiblesse des réserves dynamiques, liée à ce type de karst de montagne au fort dénivelé et où l'écoulement à surface libre est très important, alors que la zone noyée est très réduite.

II- VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES LORS DES CRUES.

Les paramètres physico-chimiques caractérisant une eau sont susceptibles de variations rapides entraînées par des changements dans les écoulements souterrains. Après avoir vu l'influence de l'arrivée des volumes d'eau importants résultant de la fonte des neiges, on va étudier les conséquences de l'infiltration rapide de volumes plus modestes.

1°/- La Doria : crue du 16 août 1976 :

Il s'agit d'une très petite crue (90 à 290 l/s) qui n'en fut pas moins très spectaculaire par sa rapidité (quelques minutes) et par la turbidité subite de l'eau. Elle résulte d'une précipitation de 9mm sur un sol humide. Les diagrammes de la figure n°48a, permettent de constater une baisse importante de la résis-

# DORIA

fig.48a

CRUE DU 16 AOUT 76

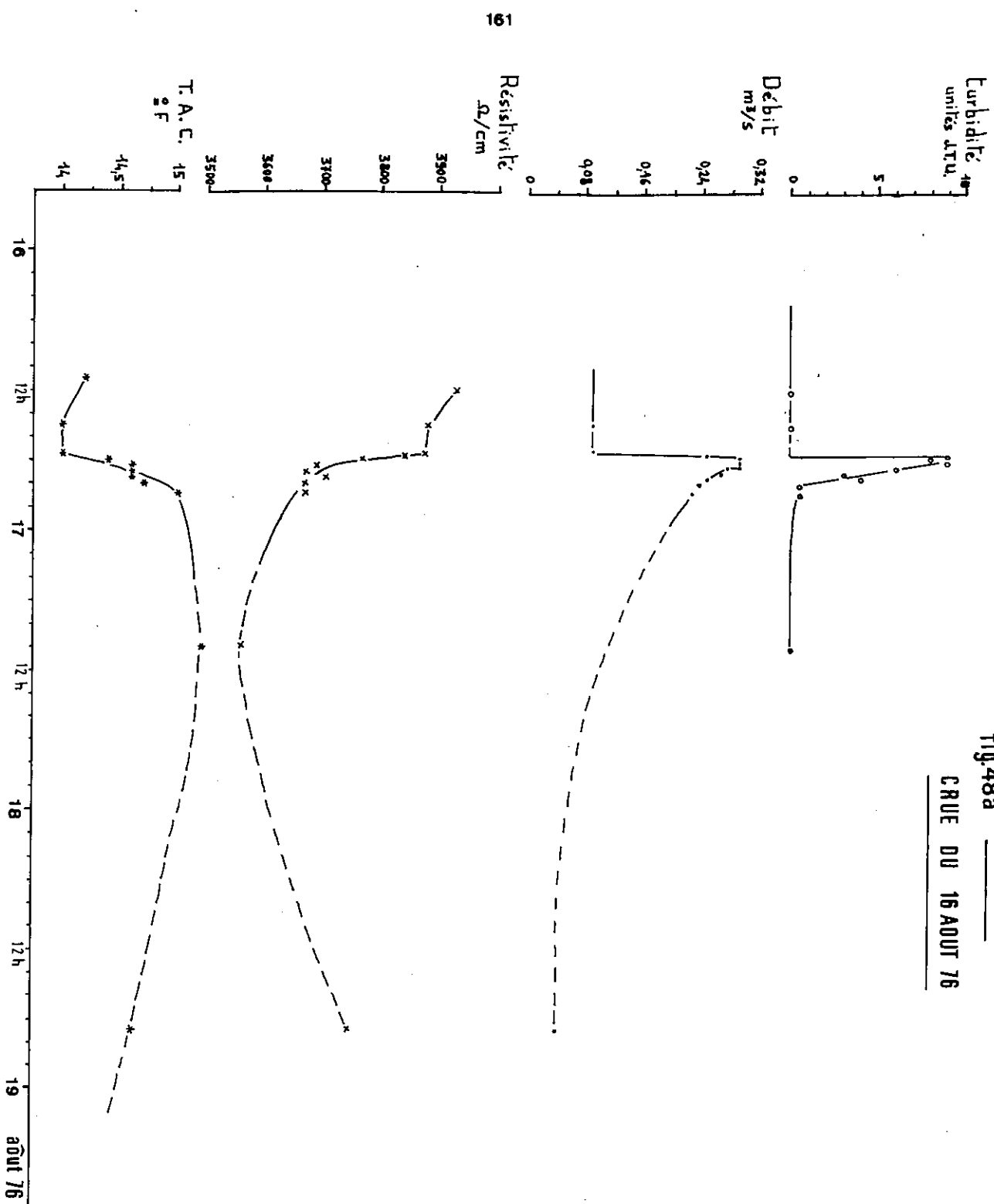
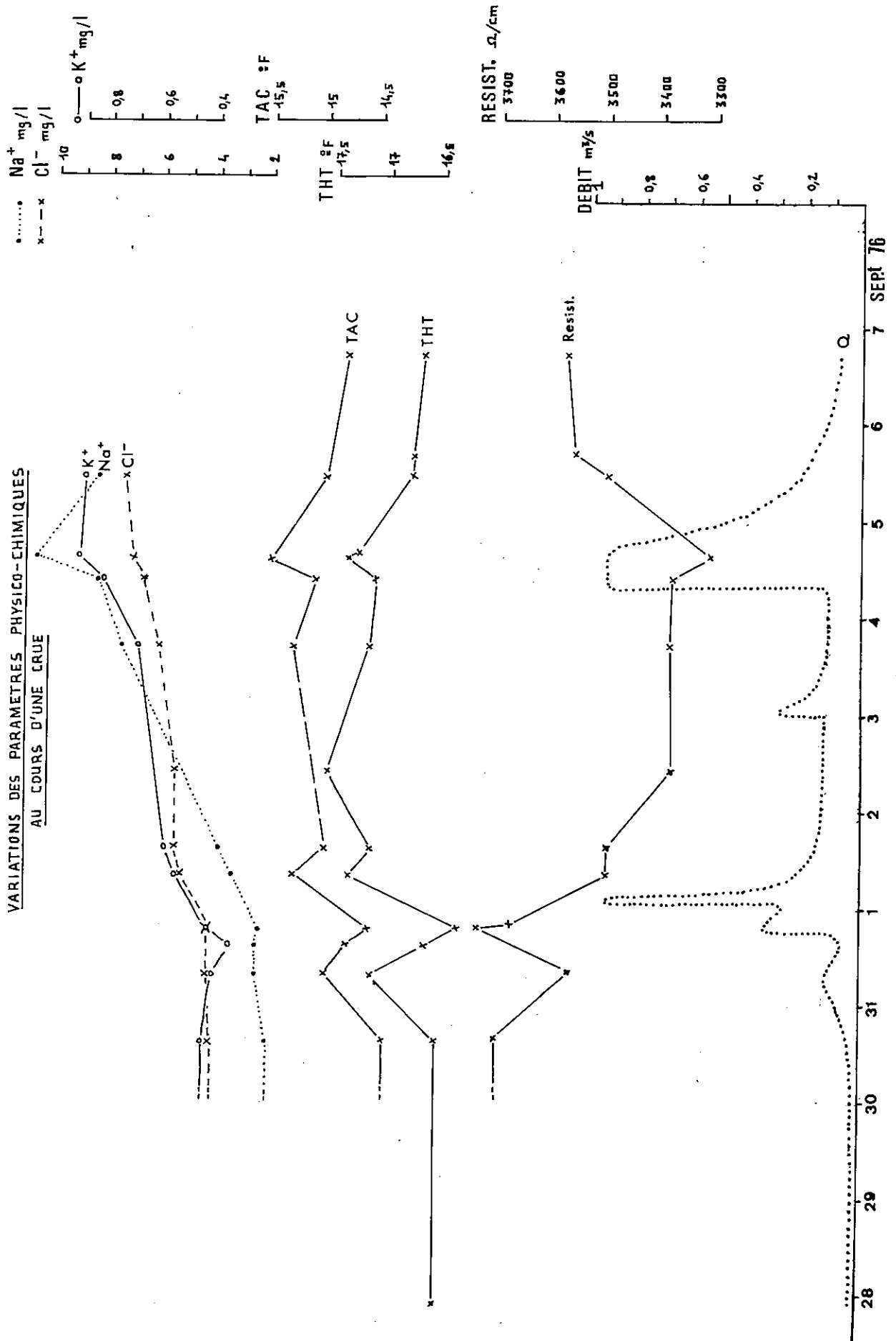


fig.48b DORIA

VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES  
AU COURS D'UNE CRUE



tivité traduisant une hausse du T.A.C. et du T.H.T.

On peut remarquer que si la décrue s'amorce rapidement, une heure après la pointe de la crue, la résistivité baisse avec l'augmentation du débit mais n'atteint son minimum qu'une quinzaine d'heures plus tard.

De plus la remontée de la résistivité est très lente alors que le débit diminue rapidement jusqu'à une valeur inférieure à celle d'avant la crue. La turbidité présente un pic très fugitif en rapport avec la pointe de la crue.

La synthèse de ces observations laisse envisager le mécanisme suivant : l'augmentation de charge provoquée par l'arrivée brutale des eaux d'infiltration dans la zone noyée, a entraîné l'expulsion d'un volume peu important (environ 7500 m<sup>3</sup>), accompagnée d'une mise en suspension de particules argileuses déposées dans des siphons. Il s'agirait de l'expulsion des réserves situées à proximité immédiate de l'émergence et composées d'eaux ayant séjourné longtemps dans le système karstique, donc très minéralisées.

#### 2°/- La Doria : crue du 28 août au 5 septembre 1976.

Sans être très accusés, les deux pics de crue de l'hydrogramme de la figure n°48b traduisent tout de même l'infiltration de masses d'eau importantes. On peut noter qu'à chaque augmentation de débit correspond une baisse de résistivité et une hausse simultanée du THT et du TAC. A la suite de la dernière crue, la plus importante en volume, la hausse de résistivité témoigne de l'arrivée d'eau beaucoup moins chargée qui représente vraisemblablement de l'eau d'infiltration des précipitations précédentes ayant transité rapidement dans l'aquifère.

#### 3°/- Le Bout du Monde : crue du 28 août au 5 septembre 1976.

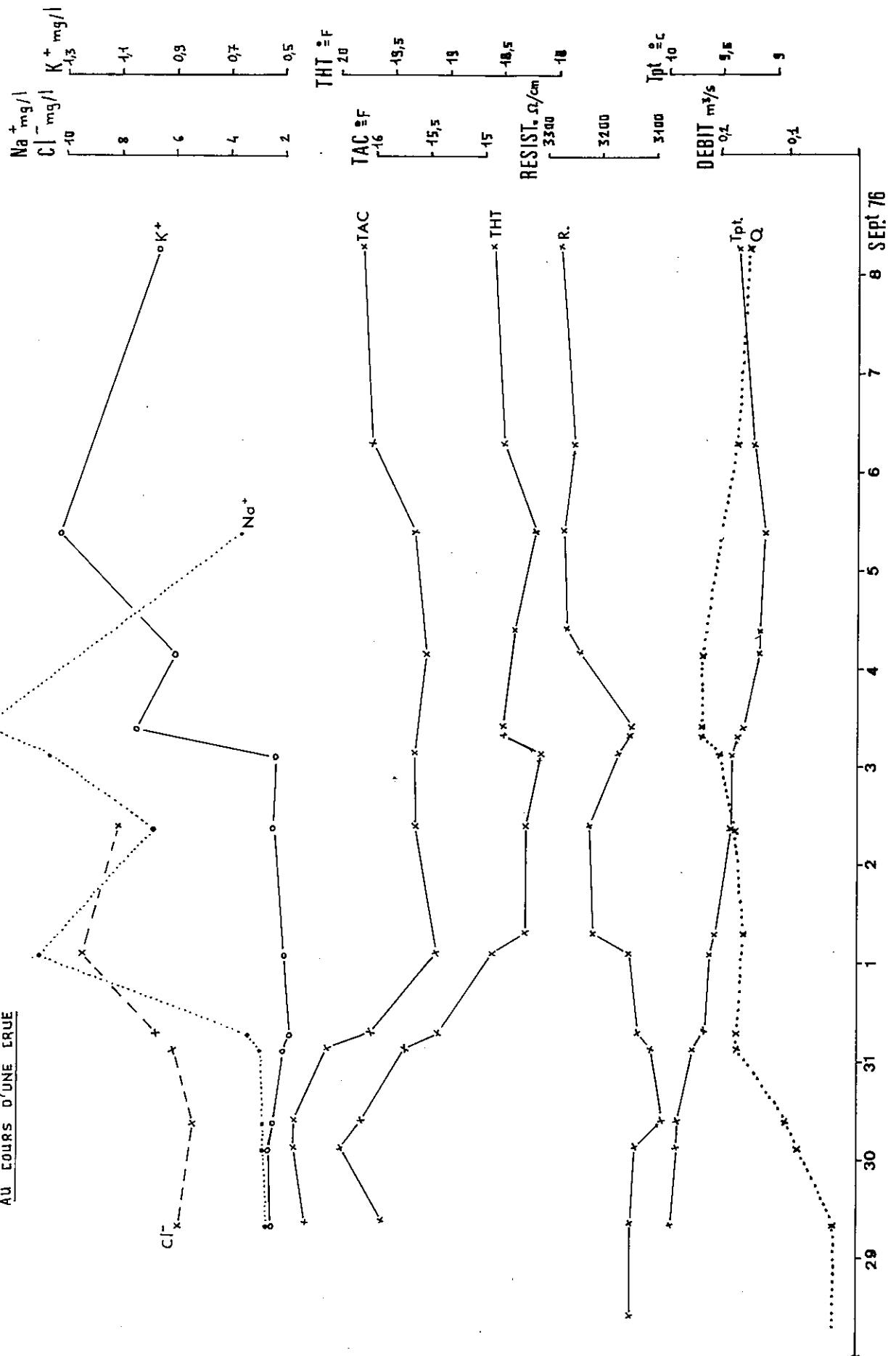
Lors de ce même épisode pluvieux, les paramètres physico-chimiques de l'émergence du Bout du Monde varient de manière très différente.(fig. n°49 ).

Ainsi l'on observe tout d'abord une courte baisse de résistivité, peu marquée, suivie d'une hausse progressive ; le débit augmentant de manière continue. Les variations des teneurs en Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> sont difficilement explicables ; on peut seulement dire qu'une augmentation de débit amène de fortes concentrations comme dans le cas de la Doria. L'origine de ces éléments est à rechercher dans le sol végétal ou dans la pollution.

fig. 49 MONDE

VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

AU COURS D'UNE ERUE



Il semblerait donc qu'ici, l'influence de l'eau d'infiltration rapide, moins chargée se fasse sentir très rapidement à l'émergence, ce qui, compte-tenu de la morphologie du bassin versant, paraît assez logique.

Lors de la décrue, l'accroissement du T.H.T., du T.A.C. et de la température est particulièrement lent et le retour aux conditions qui précédaient la crue prendra ainsi de nombreux jours.

### III- CONCLUSION.

Les systèmes karstiques de la Doria et du Bout du Monde présentent donc des différences fondamentales liées au fonctionnement des circulations souterraines. Si les temps de transit des apports semblent très comparables, les modes de restitution sont différents. Ainsi, pour le réseau de la Doria, on aurait un collecteur principal par lequel transiterait l'essentiel des eaux d'infiltration alors que pour celui du Bout du Monde, on peut imaginer un ensemble de drains intéressant des parties bien distinctes du bassin versant et qui seraient suffisamment indépendants pour pouvoir modifier séparément les paramètres physico-chimiques.

CHAPITRE 7

KARSTIFICATION

ET

ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

# KARSTIFICATION ET ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

On analysera ici le phénomène de karstification, son mécanisme, son histoire et ses répercussions sur l'organisation des circulations souterraines.

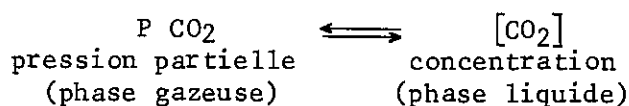
## I- LE PROCESSUS DE KARSTIFICATION : LA CHIMIE DE LA DISSOLUTION DES CALCAIRES.

### 1°/- Les systèmes d'équilibre :

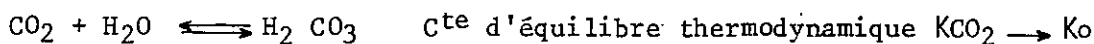
La mise en solution des carbonates dans l'eau contenant du  $\text{CO}_2$  met en jeu des systèmes d'équilibre concernant les trois phases, gazeuse, liquide et solide.

Les phénomènes de dissolution et de précipitation font intervenir les six réactions suivantes :

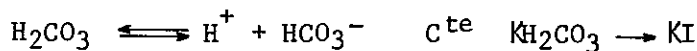
1. A l'interface eau-atmosphère, équilibre invasion-évasion du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère dans l'eau.



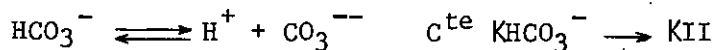
2. Équilibre d'hydratation du  $\text{CO}_2$  dissous



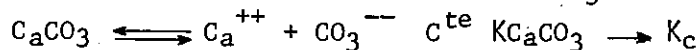
3. Équilibre de dissociation de l'acide carbonique



4. Équilibre de dissociation du bicarbonate



5. Équilibre de dissociation du  $\text{CaCO}_3$  dans l'eau contenant du  $\text{CO}_2$

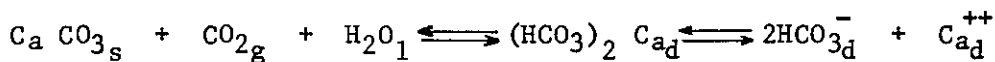


6. Équilibre de dissociation de l'eau



Univ. J. Fourier - O.S.U.G.  
MAISON DES GEOSCIENCES  
DOCUMENTATION  
B.P. 53  
F. 38041 GRENOBLE CEDEX  
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58  
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

La somme des équilibres (2), (3), (4), (5) représente l'équation classique :



s = solide g = gazeuse l = liquide d = dissous

Les équations 1 à 6 montrent que l'équilibre des solutions dépend des trois variables  $CO_2$ ,  $Ca^{++}$  et  $H^+$ . Si elles ne se trouvent pas en concentrations déterminées à une température donnée, l'eau est soit agressive, soit incrustante.

## 2°/- L'indice de saturation :

### a- Principe de calcul.

L'indice de saturation d'une eau, vis-à-vis de la calcite, se définit ainsi :  $IS = \lg \frac{Q}{K}$  où Q est le produit d'activité des ions, K est la constante d'équilibre.

Pour la calcite :  $Q_c = (CO_3^{2-}) (Ca^{2+})$

$$K_c = 10^{-8,5}$$

$$IS_c = \lg (CO_3^{2-}) + \lg (Ca^{2+}) - \lg K_c$$

Pour  $IS_c = 0$  l'eau est saturée.

$IS_c < 0$  l'eau est sous-saturée (agressive).

$IS_c > 0$  l'eau est sur-saturée (incrustante).

Après transformation :  $IS_c = \lg K_{II} + \lg a HCO_3^- + pH + \lg_a Ca^{2+} - \lg K_c$

avec a = activité de l'ion.

$a = m\gamma$  m étant la concentration molaire et  $\gamma$  le coefficient d'activité.

On calculera donc la force ionique  $I = \frac{1}{2} \sum (m_i Z_i^2)$

avec  $m_i$  = concentration de l'ion i en mole/l

$Z_i$  = charge de l'ion i.

Puis les coefficients d'activité  $\gamma_i$  qui s'expriment ainsi :

$$\lg \gamma_i = - \frac{A \cdot Z_i^2 \cdot I^{1/2}}{1 + a_i \cdot B \cdot I^{1/2}}$$

A et B sont des coefficients, fonction de la température

$$A(t) = 0,000920 t + 0,4850$$

$$B(t) = 0,000162 t + 0,3241$$

$a_i$  est le rayon d'influence de l'ion (voir tableau de valeurs en annexe). De plus, on devra tenir compte dans le calcul de la correction due à la température et de celle due à la force ionique de l'eau étudiée.

On trouvera en annexe les paramètres permettant de calculer les constantes d'équilibre, en fonction de la température.

Remarque : Pour les eaux étudiées, on ne considèrera le plus souvent que les ions  $Ca^{++}$  et  $HCO_3^-$ , dans le calcul de la force ionique I, étant donné les faibles concentrations molaires des autres éléments.

*b- Mesure de la pression de  $CO_2$  ( $CO_2$  dissous) fig. n°50.*

L'anhydride carbonique joue un rôle primordial dans les phénomènes de karstifications, par l'intermédiaire des équilibres  $CO_2 - H_2O - CaCO_3$ .

La mesure de la pression de  $CO_2$  dans les eaux des exurgences a été effectuée à l'aide d'une électrode Radiometer type E 5036, branchée sur un pH-mètre Prolabo P1. L'électrode a été étalonnée au moyen de solutions saturées par le mélange gazeux : air synthétique (80% de  $N_2$  et 20% de  $O_2$ ) +  $CO_2$  en concentration connue.

La pression partielle de  $CO_2$  est calculée par la formule :

$$P_{CO_2} = \frac{\% CO_2 (P_{atm}(mm) - P_{H_2O})}{100 \quad 760}$$

avec  $P_{atm}$  = pression barométrique du jour (en mm Hg)

$P_{H_2O}$  = pression de vapeur d'eau (en mm Hg)

soit 9mm à 10°C

13mm à 15°C

18mm à 20°C

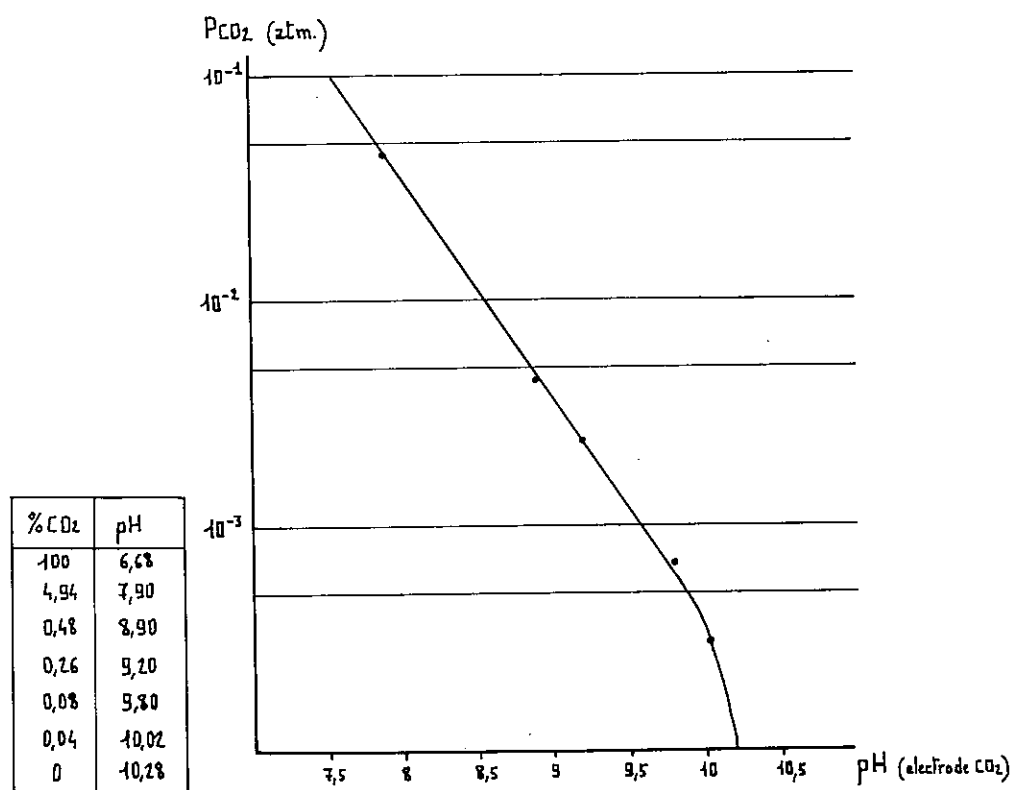
Les mesures ont été effectuées soit immédiatement, après réchauffement de l'eau aux alentours de 20°C, afin de faciliter la stabilisation de l'électrode, soit après conservation au réfrigérateur durant 24h au maximum.

*c- Résultats (fig. n°50).*

Comme on peut le constater, le calcul de l'indice de saturation donne, presque toujours, des valeurs positives.

fig. 50 Résultats calculs indices de saturation  
PCO<sub>2</sub>

| Prélèvement             | Indice de saturation | PCO <sub>2</sub> mesurée<br>atm. | PCO <sub>2</sub> calculée<br>atm. |
|-------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Doria 26-4-75           | 0                    | 1 10 <sup>-3</sup>               | 4,2 10 <sup>-3</sup>              |
| 25-6-75                 | 0,32                 | 1,2 10 <sup>-3</sup>             | 8,9 10 <sup>-4</sup>              |
| 15-8-75                 | 0,4                  | 4,2 10 <sup>-3</sup>             | 1,58 10 <sup>-3</sup>             |
| 1-11-75                 | 0,7                  | 2,2 10 <sup>-3</sup>             | 2,6 10 <sup>-3</sup>              |
| 22-2-76                 | 0,59                 | 2,5 10 <sup>-3</sup>             | 1,07 10 <sup>-3</sup>             |
| 20-4-76                 | 0,44                 | 1,6 10 <sup>-3</sup>             | 0,69 10 <sup>-3</sup>             |
| B <sup>E</sup> Monde    |                      |                                  |                                   |
| 14-10-75                | 0,06                 | 5,6 10 <sup>-3</sup>             | 3,7 10 <sup>-3</sup>              |
| 3-12-75                 | 0,08                 | 2,75 10 <sup>-3</sup>            | 6,15 10 <sup>-3</sup>             |
| 18-4-76                 | 0,22                 | 4,2 10 <sup>-3</sup>             | 2,3 10 <sup>-3</sup>              |
| F <sup>m</sup> Noire    |                      |                                  |                                   |
| 5-4-76                  | 0,05                 | 5,4 10 <sup>-3</sup>             | 2,7 10 <sup>-3</sup>              |
| Bange                   |                      |                                  |                                   |
| 15-11-75                | 0,05                 |                                  |                                   |
| 11-4-76                 | 0,04                 | 3,2 10 <sup>-3</sup>             | 1,74 10 <sup>-3</sup>             |
| Empereur                |                      |                                  |                                   |
| 1-11-75                 | 0,12                 | 8,80 10 <sup>-3</sup>            | 7,7 10 <sup>-3</sup>              |
| Pissieux<br>(Margériaz) | -0,09                | 1 10 <sup>-3</sup>               | 1 10 <sup>-3</sup>                |



Etalonnage electrode PCO<sub>2</sub>  
(effectué au centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel)

L'erreur admise étant égale à  $\pm 0,1$ , toutes nos eaux sont, soit saturées, soit légèrement sursaturées. Il n'est donc pas étonnant d'observer des dépôts de tufs aux émergences (à celle du Bout du Monde notamment). Les valeurs approchées de pression de  $\text{CO}_2$  (par le calcul) sont très comparables à celles mesurées par l'électrode.

- "La pression partielle de l'anhydride carbonique induit et contrôle l'ensemble des transformations dont les systèmes  $\text{CO}_2$  -  $\text{H}_2\text{O}$  - carbonates sont le siège" (MISEREZ, 1973).

Le pourcentage du  $\text{CO}_2$  dans l'air est de 0,03% (en volume), ce qui correspond à une pression partielle de  $3 \cdot 10^{-4}$  atm. L'activité biochimique des végétaux, en dégageant du gaz carbonique, confère à l'eau d'infiltration une agressivité qui explique l'importance des phénomènes de dissolution dans la zone karstique superficielle. C'est ainsi que dans les sols, la pression partielle du  $\text{CO}_2$  est 10 à 100 fois plus élevée que dans l'atmosphère. Par la suite, dans son trajet souterrain, l'eau peut subir des influences diverses, capables de modifier les équilibres thermodynamiques et de provoquer le passage entre les états de saturation, sur-saturation ou sous-saturation.

## II- L'EVOLUTION DE LA KARSTIFICATION.

La sédimentation a été continue durant le Jurassique et le Crétacé. Ce n'est qu'à l'Eocène qu'est intervenue la première émergence de cette région, le phénomène de karstification a alors pu s'amorcer.

### 1°/- La karstification éocène :

Les témoins de la karstification éocène se présentent sous la forme de fissures ou de poches affectant l'Urgonien et remplies par des sables siliceux, grès et argiles rouges ou vertes. Il s'agit de dépôts continentaux ayant subi une altération sous un climat hydrolysant de type tropical humide, puis un façonnement d'abord éolien, ensuite fluviatile (S. KAZO, 1975). Ceux-ci sont comparables aux dépôts sidérolithiques du Vercors. Ensuite se sont déposées les couches fluvio-lacustres de l'Eocène supérieur - Oligocène inférieur, composées d'argiles, conglomérats, grès ou sables (épaisseur maximale, environ 20m); le climat étant tou-

jours de type tropical humide. Le matériel est généralement d'origine locale, les conglomérats comportent essentiellement des galets urgoniens auxquels s'ajoutent des silex et galets de calcaires sénoniens. L'érosion a donc été intense puisqu'elle a atteint l'Urgonien, mais il ne semble pas que le karst éocène ait été par la suite réutilisé par les circulations souterraines, en dehors de fissures, remplies de sables, qui ont pu faciliter l'infiltration ultérieure des eaux.

## 2°/- La karstification plio-quaternaire :

A l'Oligocène et au Miocène le niveau de la mer a oscillé dans notre région ; les dépôts sont toujours très littoraux.

Au Pliocène se situe l'émersion définitive et le début des processus de karstification qui ont donné les formes karstiques observables actuellement. Des phases de creusement et de remblaiement se sont succédées durant les glaciations quaternaires. L'ablation annuelle en terrain calcaire est proche de 0,1mm pour le bassin de l'Areuse dans le Jura neuchâtelois (BURGER, 1959) et varierait entre 0,12mm et 0,24mm dans le Vercors (CORBEL, 1956-1959). Ainsi en admettant une valeur de 0,1mm/an, on obtiendrait, dans les conditions actuelles, une dissolution totale égale à une épaisseur de 180m de calcaire, uniquement durant le Quaternaire (1,8 M d'années). Ce calcul, très théorique n'a pour but, que de montrer l'intensité des dissolutions à l'échelle géologique et donc la rapidité des phénomènes de karstification.

## III- SCHEMA D'UN SYSTEME KARSTIQUE : LE KARST URGONNIEN DE LA DORIA.

Le Karst urgonien de la Doria, le mieux connu au point de vue spéléologique est un karst en fin d'évolution. On y trouve de nombreuses galeries fossiles, de vastes salles à proximité de la surface, parfois transformées en gouffre par effondrement du toit ("Creux de Lolette") et deux anciens exutoires aux dimensions impressionnantes dont l'un est remblayé par des matériaux détritiques (Grotte Carret), alors que l'autre est encore emprunté par les eaux lors de fortes crues.

### 1°/- Le réseau spéléologique

Celui-ci est particulièrement bien développé puisque la longueur cumulée des galeries explorées dans la partie amont du bassin versant, c'est-à-dire au Nord de la Féclaz, représente environ 18 Km (Spéléo-club de Savoie, 1976). La concor-

dance entre la fracturation et les directions de galeries est assez bonne. Au niveau de l'exutoire, l'exploration est rapidement gênée par les siphons de la zone noyée.

### 2°/- La zone d'infiltration (fig. n° 51) :

On distingue généralement une zone superficielle ou zone d'absorption dans laquelle s'effectue l'essentiel de la minéralisation de l'eau. Au-dessous se trouve une zone de transfert vertical correspondant à la zone des puits en spéléologie et à une prédominance des écoulements à surface libre, analogues à des torrents de surface.

### 3°/- La zone noyée :

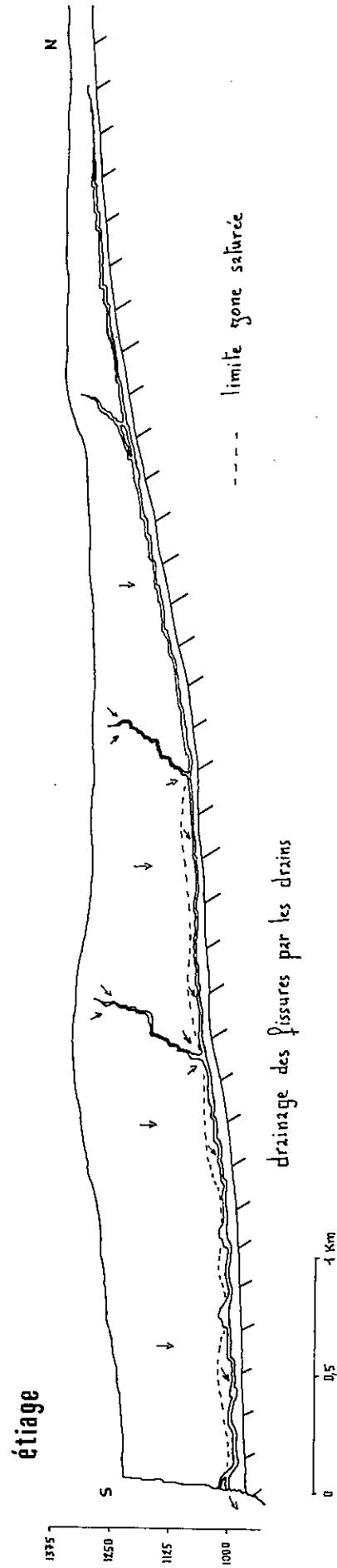
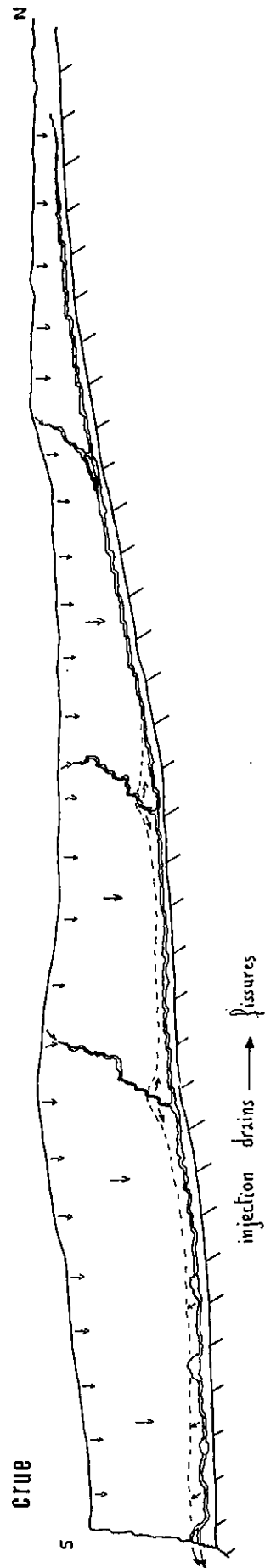
Celle-ci comporte à sa partie supérieure une zone alternativement noyée dénoyée suivant les conditions hydrologiques. Dans cette zone noyée, les principaux drains sont en relation avec des systèmes de fissures qui peuvent soit les alimenter, soit emmagasiner de l'eau par injection lors de mises en charge importantes. C'est donc à leurs niveaux que se situe une grande partie des réserves karstiques.

Enfin, dans le cas présent, on note à proximité de l'exutoire d'importants dépôts de sables siliceux fins, entraînés par les eaux d'infiltration à partir de la couverture tertiaire. De tels dépôts se retrouvent certainement dans toute la zone noyée, mêlés à des matériaux argileux.

## IV- CONCLUSION.

Si la karstification a débuté à l'Eocène, elle s'est poursuivie jusqu'à l'époque actuelle de manière plus ou moins intense, avec des arrêts et des colmatages lors des épisodes glaciaires. La phase de plissement à la fin du Miocène a vraisemblablement entraîné le creusement de nouveaux réseaux selon des directions différentes de celles des réseaux anciens. L'érosion de l'Urgonien a été très importante et a entraîné une réduction progressive des circulations souterraines qui lui sont liées ; le Valanginien sous-jacent a en quelque sorte pris le relai de l'Urgonien dans le transfert des apports atmosphériques.

fig. 51 SCHEMA DU REGIME DES CIRCULATIONS KARSTIQUES



coupe interprétative du système karstique de la Doria  
( passant par le collecteur principal )

CHAPITRE 8

LES RESSOURCES EN EAU

DU PLATEAU DU MONT REVARD

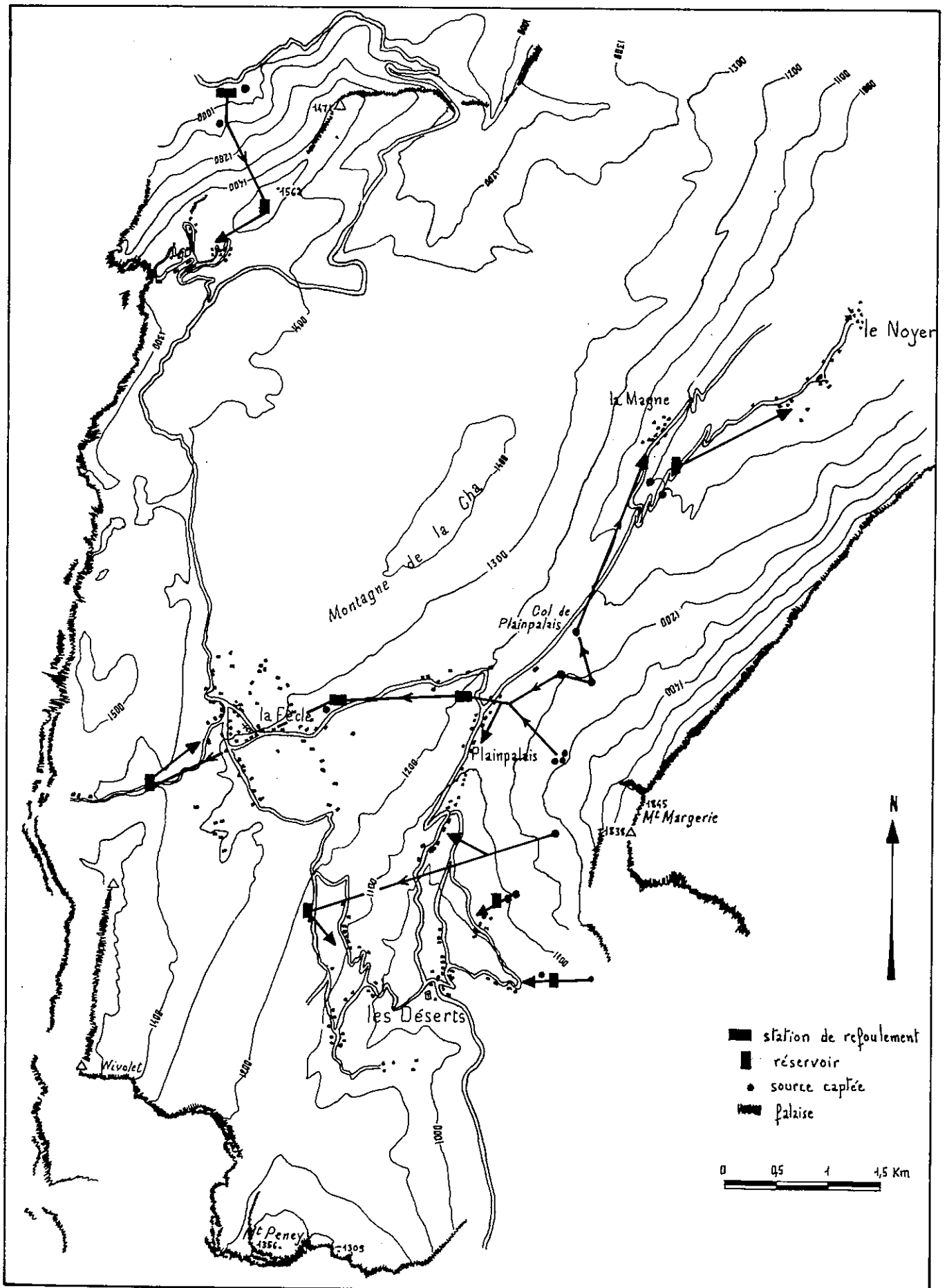


fig.52

ALIMENTATION EN EAU DU PLATEAU DU MONT REVARD  
SITUATION ACTUELLE

## LES RESSOURCES EN EAU DU PLATEAU DU MONT REVARD

-----

En complément à cette étude hydrogéologique, on étudiera ici les possibilités d'alimentation en eau du plateau, notamment pour la station de la Féclaz qui ne dispose que de quelques petites sources situées sur le versant Ouest du Mont Margeriaz.

Actuellement toutes les sources possédant un débit d'étiage intéressant ayant été captées, on s'est intéressé aux circulations souterraines qui affectent le massif.

Les reconnaissances du Spéléo Club de Savoie ont permis de mettre en évidence des ressources possibles dans le karst urgonien de la Doria.

### I- ALIMENTATION EN EAU DE LA FECLAZ. SITUATION ACTUELLE (fig. n°52 ).

La station de la Féclaz, située dans un repli synclinal rempli de matériel d'âge Tertiaire, peu épais, présente un habitat très dispersé. Le manque d'eau se fait sentir en hiver ou en été, lors des étiages qui correspondent aux périodes de fréquentation maximale de la station. Celle-ci regrouperait alors approximativement deux mille personnes. Le débit d'étiage cumulé des sources alimentant la station est d'environ 2 l/s. On remarquera qu'un peu plus au Nord, la station du Revard possède les mêmes problèmes.

### II- LES POLLUTIONS.

Au point de vue assainissement, la situation n'était jusqu'à présent guère brillante. Que ce soit pour la Féclaz ou le Revard, la totalité des eaux usées rejoignent encore plus ou moins directement les circulations souterraines. A cela il faut ajouter le problème des ordures ménagères qui était résolu grâce à la présence de gouffres naturels à proximité des habitations.

La détermination des bassins versants karstiques et l'inventaire des

points de pollution permettent d'estimer l'importance de la contamination des eaux issues du massif. De plus les traçages réalisés, simulent, d'une certaine manière, un rejet instantané de matière polluante. Les temps de transit des particules les plus rapides sont généralement de quelques jours lors de périodes humides. On rappellera que le traceur injecté au "Creux de Lolette", transformé en décharge publique, n'a mis que six jours pour atteindre l'émergence du Bout du Monde, alors que l'on estime à 30-40 jours le temps nécessaire pour que la plupart des bactéries qui pénètrent dans une nappe souterraine soient détruites, encore que leurs résistances varient beaucoup selon les espèces.

Si la pollution chimique en nitrites, nitrates, phosphates ou ammoniacale semble très faible en raison d'une importante dilution, on note toutefois la présence de détergents, au moins dans les eaux de l'exurgence de la Doria.

### III- EXPLOITATION DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES.

On peut envisager deux points de pompage dans le principal drain du réseau karstique de la Doria ; soit à la Féclaz ; soit à l'aval, à proximité de l'exurgence.

Pour le projet amont, d'après les relevés des spéléologues, le pompage aurait lieu dans une zone de siphons alimentés par un important torrent souterrain à une profondeur d'environ 220 mètres de la surface topographique. Au point de vue géologique, ce drain se trouve dans l'axe du repli synclinal de la Féclaz et semble drainer toute la partie Nord du bassin versant de la Doria. Les jaugeages effectués au micro-moulinet donnent des valeurs de débit qui s'accorderaient assez bien avec cette hypothèse. La valeur minimale mesurée a été de 10 l/s et correspond à un étiage peu marqué.

Etant donnée la superficie drainée par ce collecteur souterrain, qui représenterait 2,6 km<sup>2</sup>, on peut estimer d'après les étiages mesurés à toutes les émergences karstiques du massif, durant cette étude, que le débit minimal absolu serait voisin de 5 l/s.

Il faut ajouter qu'au niveau où se situent les siphons, les eaux ne sont vraisemblablement pas à l'abri de toute pollution émanant des habitations de la Féclaz ; de plus outre la pollution due à la présence de la RN 513 , quelques pertes dont celles des Marais de la Croix sont en liaison directe avec le torrent souterrain (voir chapitre traçages).

## Analyses chimiques :

| Prélèvement                                         | Date     | Débit<br>estime l/s | T <sup>°</sup> C | R <sub>int</sub><br>Ω/cm | pH   | concentrations en mg/l |                  |                 |                |                               |                 |                              |                              |                              |                  |
|-----------------------------------------------------|----------|---------------------|------------------|--------------------------|------|------------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
|                                                     |          |                     |                  |                          |      | Ca <sup>++</sup>       | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | SiO <sub>2</sub> |
| Torrent souler.<br>amont Féclaz<br>(affluent Ouest) | 23-02-75 | —                   | —                | 3110                     | 8,17 | 64,0                   | 0,97             | —               | —              | 201,3                         | —               | 3                            | 4                            | 0,016                        | 2,78             |
| Torrent souler.<br>amont Féclaz<br>(affluent Ouest) | 09-03-75 | 10                  | 4,80             | 4050                     | 7,90 | 50,6                   | 0,97             | 5,25            | 0,38           | 153,7                         | 14,5            | 4                            | 3,5                          | < 10 <sup>-2</sup>           | 2,57             |
| Torrent souler.<br>amont Féclaz<br>(affluent Est)   | 09-03-75 | 100                 | —                | 4415                     | 7,75 | 51,6                   | 1,95             | 1,60            | 0,31           | 169,6                         | 4,76            | 4                            | 3,5                          | 0,01                         | 2,0              |
| Doria                                               | 08-03-75 | 500                 | 6,25             | 3950                     | 7,97 | 54,2                   | 1,58             | —               | —              | 174,5                         | 5,48            | 3                            | 3,5                          | 0,007                        | 2,0              |

A l'aval de la Féclaz, il serait possible de pomper dans les vastes et profonds siphons situés à proximité de l'émergence et reconnus par les spéléologues. Par rapport au projet précédent, les avantages consistent en un débit plus élevé associé à des réserves plus importantes et à une plus grande facilité de repérage grâce, semble-t-il, aux plus grandes dimensions des siphons. Les inconvénients résident dans un taux de pollution plus élevé et dans l'acheminement de l'eau jusqu'à la station à travers un terrain particulièrement difficile (calcaires massifs urgoniens).

En définitive, la principale difficulté commune aux deux projets est la profondeur des points de captage (environ 200m) et leur repérage depuis la surface ; d'autre part, la qualité des eaux nécessiterait un traitement et il serait indispensable d'établir un réseau d'assainissement sur le plateau de la Féclaz.

## CONCLUSIONS GENERALES

-----

La partie occidentale des Bauges est une région essentiellement karstique, présentant des formes de dissolution caractéristiques.

Le principal but de notre étude était de déterminer l'agencement des circulations souterraines et d'étudier les modalités de transit des eaux dans les différents ensembles karstiques.

Les reliefs se situent dans la gamme des altitudes moyennes et sont formés notamment, par deux épais niveaux de calcaires très purs, séparés par des calcaires argileux et marnes de faible épaisseur. La structure tectonique est assez souple.

Tout cela rappellerait plus le Jura que les massifs subalpins voisins des Bornes ou de la Chartreuse.

Les bassins versants karstiques présentent des superficies assez modestes allant du  $\text{km}^2$  à une trentaine de  $\text{km}^2$ , mais ils sont bien alimentés par des précipitations abondantes et régulières liées à un climat humide et relativement froid. L'interception des précipitations par la végétation et l'emmagasinement dû au sol, suivis d'évapotranspiration, paraissent diminuer très sensiblement la part attribuée à l'infiltration.

Des traçages particulièrement nombreux ont été rendus nécessaires par les problèmes d'ordre lithologique ou tectonique.

La méthode utilisée, comprenant tout d'abord un multitraçage, puis des expériences ponctuelles complémentaires, nous a permis, en un temps relativement court, de délimiter avec une bonne précision les différents systèmes karstiques. L'obtention de nombreuses courbes de restitution a été nécessaire pour une interprétation hydrodynamique.

Les directions générales d'écoulement des eaux suivent le plongement des

structures ; les quelques grandes failles, en facilitant l'enfoncement des eaux, permettent également leurs transferts du karst urgonien au karst valanginien sous-jacent.

Si, dans les massifs subalpins voisins on confère généralement à l'Hauterivien un rôle de mur imperméable, il n'en est pas de même ici. Il convient de prendre toujours en considération les conditions structurales locales pour évaluer son rôle hydrogéologique.

L'étude hydrochimique a permis de montrer l'importance du phénomène de fonte des neiges, dans le cycle annuel de variation des paramètres physico-chimiques. L'interprétation des apports chimiques est assez délicate du fait de la faiblesse des teneurs en ions, autres que  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$ , et des diverses sources d'apports.

L'indice de saturation des eaux aux émergences a été calculé tout au long d'une année. Celles-ci restent, semble-t-il, toujours dans le domaine de la saturation ou d'une légère sur-saturation.

Les variations des paramètres hydrochimiques combinées aux interprétations des restitutions de traceurs permettent une bonne compréhension des mécanismes hydrodynamiques liés au transit de l'eau dans les différents aquifères.

Ces karsts de la partie occidentale des Bauges présentent des caractères communs aux karsts de Chartreuse étudiés par B. TALOUR (1976). Il s'agit de karsts évolués aux dénivelés importants, où l'écoulement libre prédomine et possédant des réserves assez faibles.

On a mis en évidence une opposition remarquable entre les comportements hydrodynamiques de deux karsts superposés qui se développent strictement dans l'Urgonien pour l'un (Doria); dans le Valanginien pour l'autre, mais tout en drainant parfois les niveaux hauteriviens sus-jacents. La distinction essentielle est une modulation des apports atmosphériques par ce dernier système ; cette modulation pourrait résulter d'un piégeage momentané d'une partie des eaux dans les fissures de l'Hauterivien.

Les perturbations apportées au milieu naturel par la présence humaine ne doivent pas être négligées. Si le taux de pollution général, au point de vue chimi-

que, semble encore assez faible, il serait souhaitable que l'on prenne les mesures nécessaires à la protection de ces karsts très vulnérables, car le pouvoir d'auto-épuration des eaux souterraines karstiques est très faible, particulièrement lors des crues.

Nous espérons que l'étude réalisée sur le massif du Revard, en dehors de son intérêt sur le plan de la connaissance de la géologie, de l'hydrogéologie régionale et de son utilité pour la résolution des problèmes pratiques d'alimentation en eau potable contribuera à une meilleure connaissance des phénomènes d'infiltration et de circulation dans les massifs calcaires. Il s'agit là, en effet, de l'un des problèmes les plus complexes de l'hydrogéologie tant il est vrai que dans ce domaine les situations rencontrées varient de façon considérable d'un point à l'autre et d'un instant à l'autre.

# ANNEXES

## PRINCIPAUX RESULTATS D'ANALYSES :

Doria

| Date     | T <sub>°C</sub> | R <sub>Ω</sub> /cm<br>à 18°C | pH   | THT <sub>°F</sub> | TAC <sub>°F</sub> | Mg <sup>++</sup><br>mg/l | Na <sup>+</sup><br>mg/l | K <sup>+</sup><br>mg/l | Cl <sup>-</sup><br>mg/l | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup><br>mg/l | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/l | SiO <sub>2</sub><br>mg/l | Débit<br>l/s |
|----------|-----------------|------------------------------|------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------|
| 16-2-75  | 6,40            | 3830                         | 7,90 | 15,6              | 14,6              |                          | 2,16                    | 0,39                   |                         |                                      |                                      | 2,6                      | 140          |
| 1-3-75   | 6,40            | 3570                         | 8,02 | 16,0              | 15,2              |                          |                         |                        |                         | 2                                    | 5,7                                  |                          |              |
| 8-3-75   | 6,25            | 3960                         | 7,97 | 14,2              | 14,3              | 0,74                     | 2,77                    | 0,56                   | 5,5                     | 3                                    | 3,5                                  | 2,0                      | ~500         |
| 22-3-75  | 6,10            | 3750                         | 8,20 | 14,8              | 14,6              | 0,85                     |                         |                        |                         | 5                                    | 4                                    | 2,6                      | ~100         |
| 29-3-75  | 6,10            | 3650                         | 8,13 | 15,0              | 14,7              |                          |                         |                        |                         |                                      |                                      |                          | 195          |
| 26-4-75  | 5,35            | 5560                         | 7,92 | 10,5              | 10,4              | 0,32                     | 0,64                    | 0,13                   | 1,15                    | 4                                    |                                      |                          | 2900         |
| 29-4-75  | 5,55            | 5200                         | 8,05 | 11,15             | 10,8              | 0,42                     |                         |                        | 1,2                     |                                      |                                      |                          | 3000         |
| 27-5-75  | 5,60            | 4580                         | 7,95 | 12,75             | 12,2              | 0,51                     | 0,63                    | 0,12                   | 1,15                    | 2                                    |                                      |                          | 525          |
| 10-6-75  | -               | 4080                         | 8,28 | 14,0              | 14,0              | 0,59                     | 1,50                    | 0,19                   | 2,10                    |                                      |                                      |                          | 130          |
| 25-6-75  | 6,20            | 4335                         | 8,10 | 12,85             | 13,1              | 0,49                     | 0,96                    | 0,19                   | 1,70                    |                                      |                                      |                          | 760          |
| 16-7-75  | 6,55            | 3690                         | -    | 15,3              | 15,2              | 0,69                     | 1,24                    | 0,34                   |                         | 1                                    |                                      |                          | 75           |
| 15-8-75  | 6,40            | 3570                         | 7,98 | 17,3              | 15,3              | 1,08                     | 2,20                    | 0,54                   | 3,50                    | 2                                    |                                      |                          | 42           |
| 15-9-75  | 6,10            | 4015                         | -    | 15,3              | 15,1              | 0,37                     | 0,74                    | 0,18                   | 1,25                    | 2                                    |                                      | ~0                       | 3300         |
| 13-10-75 | 6,10            | 3670                         | 8,17 | 16,65             | 15,5              |                          | 0,93                    | 0,29                   | 1,70                    | 2                                    | 8                                    | 0,4                      | 50           |
| 1-11-75  | 6,30            | 3610                         | 8,02 | 16,65             | 15,15             | 0,79                     | 0,78                    | 0,28                   | 1,65                    | 1,5                                  | 8                                    |                          | 370          |
| 2-12-75  | 5,95            | 3825                         | 8,07 | 14,90             | 14,30             | 0,56                     | 1,66                    | 0,28                   | 3,40                    | 4                                    | 7,5                                  | 0,15                     | 470          |
| 17-1-76  | 5,95            | 3280                         | 8,12 | 17,30             | 16,0              | 1,13                     | 2,99                    | 0,65                   | 4,9                     | 2                                    | 12                                   | 0,09                     | 85           |
| 22-2-76  | 6,05            | 3140                         | 8,15 | 17,40             | 16,0              | 1,35                     | 5,32                    | 0,97                   | 8,70                    | 3                                    | 19                                   | ~0                       | 165          |
| 27-3-76  | -               | 3585                         | 8,12 | 15,90             | 14,6              | 0,59                     | 2,62                    | 0,30                   | 6,10                    | 2                                    |                                      | 0,75                     | 700          |
| 30-3-76  | 6,0             | 3795                         | 8,12 | 14,95             | 13,90             |                          | 2,54                    |                        | 5,60                    |                                      |                                      |                          | 880          |
| 1-4-76   | 5,90            | 4085                         | 8,00 | 14,30             | 13,40             | 0,52                     | 1,53                    | 0,36                   | 3,65                    |                                      | 1,7                                  | 1,7                      | 1800         |
| 11-4-76  | -               | 4205                         | -    | 12,90             | 11,70             |                          |                         |                        |                         |                                      |                                      |                          | 525          |
| 20-4-76  | 5,60            | 4570                         | 8,22 | 12,95             | 11,80             | 0,47                     | 0,76                    | 0,22                   | 2,0                     | 2,5                                  | 1,1                                  | 1,75                     | 590          |
| 17-5-76  |                 | 4025                         |      | 14,90             | 13,90             | 0,62                     | 0,90                    | 0,30                   |                         |                                      |                                      |                          | 165          |

F<sup>ne</sup> Noire

|          |      |      |      |       |       |      |      |      |      |   |  |  |      |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|---|--|--|------|
| 17-2-75  | 7,70 | 3290 | 7,70 | 17,6  | 17,6  | 1,83 |      |      |      |   |  |  | 21   |
| 23-3-75  | 7,85 | 3360 | 7,90 | 16,8  | 16,8  | 1,80 |      |      | 0,95 |   |  |  | 28   |
| 3-5-75   | 7,30 | 3670 | 7,87 | 15,5  | 16,5  | 1,53 | 0,52 |      | 0,50 |   |  |  | 20   |
| 5-6-75   | 7,40 | 3410 | 7,90 | 16,55 | 16,55 | 0,97 | 0,43 | 0,30 | 0,80 | 3 |  |  |      |
| 23-7-75  | 7,65 | 3250 | 8,00 | 17,6  | 17,6  | 1,88 | 0,60 | 0,34 | 1,0  | 4 |  |  | 10   |
| 15-8-75  | 7,60 | 3340 | 8,00 | 16,8  | 16,8  | 2,19 | 0,73 | 0,23 | 1,05 |   |  |  |      |
| 16-9-75  | 7,45 | 3270 | -    | 17,0  | 17,0  | 0,66 |      |      | 0,90 |   |  |  | ~100 |
| 14-10-75 | 7,60 | 2965 | 7,97 | 19,2  | 19,2  | 1,90 |      |      | 0,95 | 6 |  |  | 20   |
| 2-11-75  | 7,55 | 2970 | 7,80 | 19,2  | 19,2  | 1,66 | 0,56 | 0,35 | 0,90 | 4 |  |  | 30   |
| 2-12-75  | 7,35 | 3120 | 7,62 | 17,9  | 17,9  | 0,83 | 0,39 | 0,25 | 0,95 | 6 |  |  | 80   |
| 19-1-76  | 7,50 | 3010 | 8,03 | 18,4  | 18,4  |      | 0,57 | 0,30 | 0,85 | 4 |  |  | 15   |
| 28-3-76  | 7,45 | 3485 |      |       |       |      |      |      |      |   |  |  | 125  |
| 30-3-76  | 7,35 | 3550 | 7,70 |       |       |      |      |      |      |   |  |  | ~300 |
| 5-4-76   | 7,10 | 3895 | 7,70 | 14,85 | 13,9  | 0,62 | 0,27 | 0,18 | 0,80 | 2 |  |  | 125  |
| 11-4-76  | 7,15 | 3625 | 7,78 | 16,6  | 15,45 | 0,93 | 0,38 | 0,23 | 0,85 |   |  |  | 65   |

| Date        | T <sup>°</sup> C | R $\Omega$ /cm.<br>25 <sup>°</sup> C | pH   | THT $\%$ | TAC $\%$ | Mg <sup>++</sup><br>mg/l | Na <sup>+</sup><br>mg/l | K <sup>+</sup><br>mg/l | Cl <sup>-</sup><br>mg/l | SO <sub>4</sub> <sup>-</sup><br>mg/l | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/l | SiO <sub>2</sub><br>mg/l | Débit<br>l/s |
|-------------|------------------|--------------------------------------|------|----------|----------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------|
| St François |                  |                                      |      |          |          |                          |                         |                        |                         |                                      |                                      |                          |              |
| 23-3-75     | 5,40             | 3600                                 | 7,82 | 15,5     | 15,8     | 0,27                     |                         |                        | 0,60                    |                                      | 1,8                                  |                          | 2,5          |
| 8-4-75      | 5,30             | 3640                                 |      | 15,4     | 15,8     | 0,27                     |                         |                        | 0,60                    | 3                                    | 2,6                                  |                          | 1,5          |
| 26-4-75     | 4,80             | 4350                                 | 7,50 | 13,8     | 13,7     | 0,20                     |                         |                        | 0,40                    |                                      |                                      |                          | 17           |
| 5-6-75      | 4,95             | 3715                                 | 7,70 | 15,7     | 15,85    | 0,28                     |                         |                        | 0,65                    |                                      |                                      |                          | 4            |
| 15-6-75     | 5,15             | 3745                                 | 7,65 | 15,9     | 15,7     | 0,29                     | 0,25                    | 0,06                   | 0,60                    | 1,5                                  |                                      |                          | 2            |
| 1-8-75      | 5,10             | 3260                                 |      |          | 17,8     | 0,42                     |                         |                        | 0,80                    |                                      |                                      |                          | 0,7          |
| 16-9-75     | 5,85             | 3195                                 |      | 19,9     | 18,5     | 0,29                     | 0,22                    | 0,08                   |                         | 1                                    |                                      |                          | 80-100       |
| 13-10-75    | 5,80             | 3230                                 | 7,53 | 19,2     | 18,3     | 0,33                     |                         |                        | 0,75                    |                                      |                                      |                          | 0,5          |
| 9-12-75     | 5,65             | 3190                                 | 7,47 | 18,9     | 18,8     | 0,30                     | 0,19                    |                        | 0,80                    | 1                                    |                                      |                          | 3,5          |
| 19-1-76     | 5,40             | 3270                                 | 7,85 | 18,25    | 17,5     | 0,32                     | 0,20                    | 0,10                   | 0,65                    |                                      |                                      |                          | 1,5          |
| 28-3-76     | 5,35             | 3600                                 |      | 16,4     | 15,3     |                          |                         |                        |                         |                                      |                                      |                          | 50           |
| 4-4-76      | -                | 3620                                 |      | 16,45    | 15,7     |                          |                         |                        | 0,45                    |                                      |                                      |                          | 80           |
| 11-4-76     | 5,10             | 3580                                 | 7,60 | 17,1     | 16,0     | 0,27                     | 0,17                    | 0,08                   |                         | 1                                    |                                      |                          | 10           |
| 11-5-76     | -                | 3355                                 | 7,68 | 17,0     | 15,8     |                          |                         |                        |                         |                                      |                                      |                          |              |

## Duy

|          |      |      |      |       |       |      |      |      |      |    |  |      |     |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|----|--|------|-----|
| 25-8-75  | 6,35 | 3590 | 7,85 | 15,8  | 15,0  | 0,43 | 0,23 | 0,16 | 0,85 |    |  |      | 18  |
| 16-9-75  | 6,90 | 3080 |      |       | 18,1  |      | 0,43 | 0,36 | 0,80 |    |  |      | 75  |
| 26-9-75  |      | 3230 |      | 19,4  | 18,05 | 0,54 |      |      | 0,75 |    |  |      |     |
| 13-10-75 | 6,70 | 3300 | 7,68 | 18,6  | 17,5  | 0,58 | 0,44 | 0,59 | 0,85 | <1 |  |      | 25  |
| 1-11-75  | 6,70 | 3360 | 7,80 | 18,3  | 17,1  | 0,60 | 0,29 | 0,25 | 0,70 |    |  |      |     |
| 3-12-75  | 6,70 | 3165 | 7,65 | 19,2  | 18,0  | 0,61 | 0,29 | 0,34 | 0,65 | 2  |  | 1,6  | 5,5 |
| 19-1-76  | 6,55 | 3490 | 7,97 | 16,8  | 16,0  | 0,68 | 0,26 | 0,18 | 0,60 | <1 |  |      | 7   |
| 28-3-76  | 6,45 | 3530 |      | 16,9  | 15,8  | 0,57 | 0,24 | 0,20 |      | <1 |  |      | 35  |
| 4-4-76   | 6,00 | 4140 | 7,88 | 14,0  | 13,3  |      | 0,17 | 0,09 | 0,75 | 4  |  | 0,95 | ~50 |
| 11-4-76  | 6,00 | 3950 | 7,95 | 15,25 | 14,45 | 0,39 | 0,22 | 0,16 | 0,80 | <1 |  | 1,3  | 20  |
| 11-5-76  |      | 3850 | 7,88 | 15,45 | 14,3  | 0,42 | 0,26 | 0,17 |      | <1 |  |      |     |

## Bout du Monde

|          |      |      |      |       |       |     |      |      |      |    |    |      | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> |
|----------|------|------|------|-------|-------|-----|------|------|------|----|----|------|------------------------------|
| 6-9-75   | 9,45 | 3385 | 7,57 | 17,9  | 15,7  | 4,5 | 1,67 | 0,59 | 3,20 | 9  |    | 0,5  |                              |
| 14-10-75 | 9,25 | 3100 | 7,60 | 19,35 | 17,9  | 6,0 | 1,46 |      | 1,60 | 12 | 9  |      |                              |
| 14-11-75 | 9,10 | 3055 | 7,72 | 18,9  | 16,35 | 5,4 | 1,40 | 0,59 | 2,20 |    | 10 |      |                              |
| 18-11-75 | 9,50 | 2580 | 7,53 | 22,9  | 20,2  | 5,1 | 0,95 | 0,48 | 1,60 |    |    |      |                              |
| 22-11-75 | 9,35 | 2700 | 7,58 | 21,55 | 18,4  | 5,0 | 0,91 | 0,46 | 1,60 | 10 |    | 3,75 |                              |
| 3-12-75  | 9,25 | 2810 | 7,48 | 21,15 | 19,1  | 4,7 |      |      | 1,70 |    |    |      |                              |
| 19-1-76  | 8,95 | 2960 | 7,73 | 20,05 | 18,0  | 5,2 | 2,06 | 0,67 | 3,40 | 13 | 9  |      |                              |
| 22-2-76  | 9,55 | 2720 | 7,68 | 22,7  | 20,3  | 6,0 | 1,30 | 0,70 | 2,15 | 13 | 11 | 3,75 | < 0,5                        |
| 14-3-76  | 9,40 | 2645 | 7,70 | 22,65 | 20,2  | 5,8 |      |      | 5,20 |    | 11 |      |                              |
| 30-3-76  |      | 3065 | 7,75 | 18,8  | 16,5  | 4,4 | 3,32 | 0,56 | 7,90 | 10 |    | 1,0  |                              |
| 1-4-76   |      | 3325 | 7,60 | 18,1  | 16,2  | 4,1 | 1,24 | 0,48 | 3,0  | 9  |    |      | < 0,1                        |
| 11-4-76  | 8,95 | 3420 | 7,68 | 17,6  | 15,9  | 3,5 | 0,77 | 0,48 | 1,55 | 9  | 6  |      |                              |
| 18-4-76  | 8,80 | 3510 | 7,80 | 17,3  | 15,3  | 3,8 | 1,10 | 0,47 | 2,50 | 8  | 6  | 3,7  |                              |
| 9-5-76   | 8,75 | 3620 | 7,78 | 16,65 | 14,6  | 3,8 | 0,65 | 0,42 | 1,70 | 8  | 6  | ~0   |                              |
| 20-5-76  | 8,75 | 3525 |      | 16,9  | 15,2  | 4,9 | 1,70 |      |      | 9  |    | 3,25 | 0,2                          |
| 30-8-76  | 9,90 | 3180 |      | 20,0  | 16,7  |     | 8,0  | 0,56 | 8,5  |    |    |      |                              |
| 3-9-76   | 9,40 | 3170 |      | 18,15 | 15,6  |     | 10,6 | 0,53 | 5,2  |    |    |      |                              |
| 5-9-76   | 9,10 | 3270 |      | 18,20 | 15,6  |     | 3,6  | 1,32 |      |    |    |      |                              |

| Date     | T <sup>°</sup> C | R <sub>α</sub> /cm<br>218° | pH   | THT <sup>±</sup> F | TAL <sup>±</sup> F | Mg <sup>++</sup><br>mg/l | Na <sup>+</sup><br>mg/l | K <sup>+</sup><br>mg/l | Cl <sup>-</sup><br>mg/l | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>mg/l | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/l | SiO <sub>2</sub><br>mg/l | Débit<br>l/s |
|----------|------------------|----------------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------|
| Meune    |                  |                            |      |                    |                    |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          |              |
| 17-2-75  | 6,8              | 3505                       | 7,50 | 17,05              | 15,7               | 5,2                      |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          | 31           |
| 24-3-75  | 6,8              |                            | 7,65 | 16,4               | 16,5               | 2,8                      | 0,46                    | 0,27                   |                         | 7                                     | 3                                    |                          | 16           |
| 14-4-75  | 6,85             | 3560                       | 7,60 | 16,3               | 16,1               | 3,9                      |                         |                        | 0,9                     |                                       |                                      |                          | 6            |
| 21-4-75  |                  |                            |      | 13,7               | 13,3               | 1,3                      | 1,0                     | 0,16                   |                         |                                       |                                      |                          |              |
| 27-4-75  | 6,15             | 3900                       | 7,65 | 15,0               | 14,25              | 1,4                      |                         |                        | 0,6                     |                                       |                                      |                          | 85           |
| 20-5-75  | 6,20             | 3970                       | 7,67 | 14,85              | 13,4               | 2,5                      |                         |                        | 0,65                    |                                       |                                      |                          | 25           |
| 28-5-75  | 6,35             | 3810                       | 7,65 | 15,45              | 14,7               | 2,2                      | 0,37                    | 0,20                   | 0,8                     |                                       |                                      |                          | 20           |
| 2-6-75   | 6,10             |                            |      | 16,5               | 15,2               |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          | 150          |
| 9-6-75   | 6,4              | 3530                       | 7,82 | 16,4               | 16,2               | 2,3                      | 0,36                    | 0,39                   | 0,75                    | 9                                     |                                      | 3,9                      | 18           |
| 15-6-75  | 6,5              | 3515                       | 7,72 | 16,35              | 15,9               |                          | 0,38                    | 0,21                   | 0,85                    |                                       |                                      |                          | 16           |
| 16-7-75  | 6,55             | 3550                       |      | 16,5               | 16,0               | 2,8                      |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          | 10           |
| 1-8-75   |                  | 3550                       |      |                    | 15,7               | 2,8                      | 0,38                    | 0,22                   | 0,9                     |                                       |                                      |                          |              |
| 28-8-75  | 6,40             | 3670                       | 7,57 | 17,0               | 14,9               | 2,4                      |                         |                        | 1,25                    | 5                                     |                                      |                          | 6            |
| 16-9-75  | 6,15             |                            |      | 18,5               | 16,8               | 1,2                      |                         |                        | 0,85                    |                                       |                                      |                          | 160          |
| 30-9-75  |                  | 3470                       |      | 17,9               | 15,7               |                          |                         |                        | 0,8                     |                                       |                                      |                          |              |
| 4-10-75  | 6,15             | 3515                       | 7,78 | 17,4               | 16,2               | 1,8                      | 0,37                    | 0,20                   |                         | 5                                     |                                      |                          | 18           |
| 13-10-75 | 6,55             | 3450                       | 7,68 | 17,8               | 16,3               | 3,0                      |                         |                        | 0,75                    |                                       |                                      |                          | 16           |
| 1-11-75  | 6,45             | 3615                       | 7,72 | 16,8               | 15,2               | 2,2                      |                         |                        | 0,8                     |                                       | 8                                    |                          |              |
| 29-11-75 | 6,25             | 3515                       | 7,52 | 17,1               | 16,6               |                          |                         |                        | 1,2                     |                                       |                                      |                          | 130          |
| 13-1-76  |                  | 3260                       |      |                    |                    |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          |              |
| 26-1-76  | 6,20             | 3490                       | 8,08 | 17,7               | 16,1               | 2,2                      |                         |                        | 1,0                     |                                       |                                      |                          | 7            |
| 28-2-76  | 6,60             | 3240                       |      | 18,3               | 17,1               | 2,0                      | 0,31                    | 0,24                   | 1,15                    | 7                                     |                                      | 3,0                      | 17           |
| 28-3-76  | 6,60             | 3445                       |      | 17,75              | 16,4               | 2,3                      |                         |                        | 1,0                     |                                       |                                      |                          | 17           |
| 30-3-76  | 6,55             | 3405                       | 7,78 |                    |                    |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          |              |
| 4-4-76   | 6,15             | 3700                       | 7,97 | 15,8               | 14,5               | 1,3                      |                         |                        | 0,9                     |                                       |                                      |                          | 70           |
| 11-4-76  | 6,20             | 3550                       | 7,73 | 17,0               | 15,7               | 1,7                      | 0,28                    | 0,24                   | 1,3                     | 5                                     |                                      |                          | 17           |
| 10-5-76  |                  | 3970                       | 7,78 | 14,9               | 13,4               | 1,2                      | 0,25                    | 0,22                   | 1,5                     | 4                                     | 1,5                                  | 1,85                     |              |
| 27-5-76  |                  | 3820                       |      | 15,9               | 14,3               | 2,2                      |                         |                        | 1,45                    |                                       |                                      |                          |              |

## Bange

|           |      |      |      |       |       |     |      |      |      |     |   |      | Estimation du<br>débit des sorties<br>temporaires |
|-----------|------|------|------|-------|-------|-----|------|------|------|-----|---|------|---------------------------------------------------|
| 25-5-75 * | 7,25 | 4820 | 7,72 | 12,3  | 11,85 | 1,4 | 0,46 | 0,16 |      |     |   | 2,25 | l/s                                               |
| 1-6-75 *  | 7,25 | 4600 | 7,88 | 12,8  | 12,4  | 1,4 | 0,51 | 0,12 |      |     |   | 1,6  |                                                   |
| 11-6-75 * | 7,60 | 4160 | 7,77 | 13,75 | 13,5  | 2,8 | 0,71 | 0,21 |      |     |   | 2,6  |                                                   |
| 16-9-75 * | 7,55 | 3870 |      | 16,2  | 14,75 | 1,0 | 0,59 | 0,22 |      |     |   |      |                                                   |
| 25-11-75  | 7,45 | 3595 | 7,63 | 16,1  | 15,6  | 1,5 | 0,56 | 0,32 | 1,1  | 4,5 |   |      |                                                   |
| 28-2-76   | 8,10 | 3395 |      | 17,4  | 16,2  | 2,5 | 0,78 | 0,35 |      | 7,5 |   |      | 30                                                |
| 28-3-76   | 7,90 | 3670 | 7,80 | 16,0  | 14,3  | 1,8 | 0,87 | 0,33 | 4,5  | 5   |   | 1,3  | 200                                               |
| 30-3-76   | 7,70 | 3625 | 7,80 |       | 14,3  |     |      |      |      |     |   |      | 700                                               |
| 11-4-76   | 7,05 | 4430 | 7,82 | 13,35 | 12,05 | 1,2 |      |      | 2,1  | 5   |   | 2,05 | 1800                                              |
| 18-4-76   | 7,05 | 4420 | 7,90 | 13,35 | 12,2  | 1,1 | 0,71 | 0,26 | 2,15 | 2,5 |   | ~0   | 1400                                              |
| 1-5-76    |      | 4130 |      |       |       |     |      |      |      |     |   |      | 1200                                              |
| 8-5-76    | 7,05 | 4250 |      | 13,6  | 11,1  | 1,1 | 1,0  | 0,22 | 2,75 | 3,5 | 1 | ~0   | 1000                                              |
| 27-5-76   |      | 4130 |      |       |       |     |      |      |      |     |   |      |                                                   |

\* Données de M. Lepiller

| Date     | T <sup>°</sup> C | R <sub>2</sub> /cm<br>218° | pH   | THT <sup>°</sup> F | TAC <sup>°</sup> F | Mg <sup>++</sup><br>mg/l | Na <sup>+</sup><br>mg/l | K <sup>+</sup><br>mg/l | Cl <sup>-</sup><br>mg/l | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>mg/l | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/l | SiO <sub>2</sub><br>mg/l | Débit<br>l/s |
|----------|------------------|----------------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------|
| Empereur |                  |                            |      |                    |                    |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          |              |
| 31-3-75  | 4,95             | 2725                       | 7,65 | 19,65              | 19,15              | 4,8                      |                         |                        | 13,0                    |                                       |                                      |                          | 20           |
| 7-4-75   | 4,6              | 2260                       |      | 21,3               | 19,5               | 5,0                      |                         |                        | ~35                     |                                       |                                      |                          | <5           |
| 14-4-75  | 5,65             | 3180                       | 7,45 | 15,75              | 14,9               | 2,1                      |                         |                        | 17,6                    |                                       |                                      |                          |              |
| 26-4-75  | 5,85             | 3500                       | 7,67 | 16,8               | 16,0               | 4,0                      | 1,74                    | 0,36                   | 2,85                    |                                       |                                      |                          | 17           |
| 20-5-75  | 6,60             | 2970                       | 7,50 | 19,05              | 18,3               | 3,8                      |                         |                        | 4,5                     |                                       |                                      |                          | <5           |
| 9-6-75   | 6,70             | 2865                       | 7,72 | 20,05              | 19,7               | 6,0                      | 3,25                    | 0,31                   | 4,7                     | 10                                    |                                      | 3,9                      | <5           |
| 25-6-75  | 7,30             | 2695                       | 7,45 | 20,8               | 20,35              |                          |                         |                        | 6,7                     |                                       |                                      |                          | 25           |
| 1-8-75   | 7,70             | 2620                       |      |                    | 21,8               |                          |                         |                        | 5,1                     |                                       |                                      |                          |              |
| 15-9-75  | 8,60             | 2655                       |      | 23,4               | 21,5               | 3,4                      |                         |                        | 3,7                     |                                       |                                      |                          | 60-80        |
| 18-9-75  | 8,75             | 2750                       |      |                    |                    |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          | 20           |
| 13-10-75 | 7,40             | 2485                       | 7,32 | 24,0               | 22,4               | 6,0                      |                         |                        | 6,7                     | 5                                     |                                      |                          | 5            |
| 1-11-75  | 7,20             | 2575                       | 7,43 | 23,7               | 21,9               | 6,0                      |                         |                        | 4,3                     |                                       |                                      |                          |              |
| 3-12-75  | 6,3              | 2220                       | 7,45 | 23,7               | 21,7               | 3,6                      | 13                      | 0,6                    | 27,0                    |                                       | 9                                    |                          | 25           |
| 19-1-76  | 5,1              | 2535                       |      | 23,5               | 22,0               | 5,5                      |                         |                        | 4,9                     | 6                                     |                                      | 3,8                      | <5           |
| 14-3-76  | 4,6              | 2060                       |      | 24,0               | 21,3               | 5,7                      | 20,2                    | 0,54                   | 39,7                    |                                       |                                      |                          | <5           |
| 28-3-76  | 5,35             | 2645                       |      | 22,0               | 20,2               | 3,0                      | 3,8                     | 0,39                   | 9,5                     | 3                                     |                                      |                          | ~60          |
| 30-3-76  | 5,30             | 2790                       | 7,42 |                    |                    |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          | ~70          |
| 4-4-76   | 4,95             | 2880                       |      |                    | 19,3               |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          | ~50          |
| 11-4-76  | 4,9              | 2760                       |      | 21,4               | 19,7               | 4,3                      | 2,88                    | 0,48                   | 6,6                     | 6                                     |                                      | 0,55                     | 20           |
| 18-4-76  | 5,3              | 2805                       |      |                    |                    |                          |                         |                        |                         |                                       |                                      |                          |              |

## Gouille des Moines

|         |      |      |      |      |      |               |      |      |      |     |  |     |    |
|---------|------|------|------|------|------|---------------|------|------|------|-----|--|-----|----|
| 18-9-75 | 8,80 | 2750 |      | 22,9 | 20,7 | 6,3           | 0,50 | 0,30 | 0,85 |     |  |     | 15 |
| 3-12-75 | 8,80 | 2750 | 7,42 | 22,5 | 20,8 | 6,4<br>(6,95) | 0,48 | 0,26 | 0,80 | 6   |  | 2,8 | 35 |
| 26-1-76 | 9,35 | 2680 | 7,70 | 23,3 | 21,5 | 12<br>(13,75) |      |      | 0,80 |     |  |     | 8  |
| 28-3-76 | 9,25 | 2740 |      | 22,6 | 20,7 | 8,4           | 0,54 | 0,28 | 0,90 | 6,5 |  | 3,1 | 10 |
| 4-4-76  | 9,15 | 2810 | 7,65 | 21,4 | 20,0 | 6,0           | 0,50 | 0,26 | 0,95 | 7,5 |  | 1,6 | 25 |
| 11-4-76 | 9,0  | 2875 | 7,52 | 21,8 | 20,0 | 7,7<br>(8,55) | 0,45 | 0,28 | 1,05 | 7   |  |     | 15 |

( ) dosage  
par absorption.

1 degré français = 0,2 milliequivalent

| ions                          | pds. mol. | facteur de conversion<br>mg/l en me/l |
|-------------------------------|-----------|---------------------------------------|
| Ca <sup>++</sup>              | 40,08     | 0,0499 (inverse : 20,04)              |
| Mg <sup>++</sup>              | 24,32     | 0,0412                                |
| Na <sup>+</sup>               | 22,99     | 0,0435                                |
| K <sup>+</sup>                | 39,10     | 0,0256                                |
| Cl <sup>-</sup>               | 35,46     | 0,0282                                |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 61,01     | 0,0164                                |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 62,01     | 0,0161                                |

| Calcul des constantes de dissociation de 0 à 250°C |         |          |          |
|----------------------------------------------------|---------|----------|----------|
| $Lg K = a + b/T + cT$ (T en °K)                    |         |          |          |
|                                                    | a       | b        | c        |
| K <sub>0</sub>                                     | -13,417 | 2299,6   | 0,01422  |
| K <sub>I</sub>                                     | 14,8435 | -3404,71 | -0,03279 |
| K <sub>II</sub>                                    | 6,498   | -2902,39 | -0,02379 |
| K <sub>c</sub>                                     | 13,543  | -3000    | -0,0401  |

| rayon d'influence des ions     |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Ca <sup>++</sup> 6             | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 4,25 |
| Mg <sup>++</sup> 8             | K <sup>+</sup> 3                   |
| Na <sup>+</sup> 4,25           | Cl <sup>-</sup> 3                  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 3 | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 4,25 |

## BIBLIOGRAPHIE

-----

- ALESSANDRELLO S., AMIOT M., DELANCE J.H. (1970) - Restitution de colorant par vagues successives (Rivière souterraine de Bèze - Côte d'Or). *Spelunca - mémoires* n° 7, p. 49-59.
- AMIOT A. (1974) - Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. Les analyses chimiques en hydrogéologie karstique. *Ann. Spéleo.*, 29, 4, p. 461-483.
- AMIOT A., BAKALOWICZ M. (1974) - Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. Premiers résultats obtenus sur le système karstique du Baget durant le cycle hydrologique 1973. *Ann. Spéleo.*, 29, 4, p. 484-493.
- AUBERT D. (1967) - Estimation de la dissolution superficielle dans le Jura. *Bull. Soc. vaud. Sc. Nat.*, 69, 8, p. 365-376.
- AUBERT D. (1969) - Phénomènes et formes du Karst jurassien. *Eclogae Géol. Helv.* 62, 2, p. 325-399.
- BARBIER J.L. (1972) - Etude hydrogéologique de la haute vallée de la Vernaïson et de ses bordures. *Thèse 3ème cycle, Grenoble.*
- BARBIER R. (1960) - Le rôle des paléokarsts dans la formation des réseaux karstiques actuels et leurs répercussions sur l'hydrogéologie de ces régions. *C.R. Somm. Soc. Géol. Fr.*, 7 mars 1960, n° 5.
- BAUER F. et al. (1976) - Underground Water Tracing. Investigations in Solvenia 1972-1975. Yugoslav Committee for international Hydrological program. Third international symposium of underground water tracing. *Ljubljana Bled 1976. Yugoslavia (Published by Institute for Karst Research - Yugoslavia).*
- BEHRENS H. (1971) - Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen. *Geol. Bavarica*, 64, München, 120-131.
- BEHRENS H. (1973) - Eine verbesserte Nachweismethode für Fluoreszenzindikatoren und ihre Anwendung zur Feststellung von Fliesswegen im Grundwasser. *Z. Deutsch. Geol. Ges.*, 124, Hannover, 535-544.
- BELLON F. (1943) - La vallée des Déserts près de Chambéry. *D.E.S. Géol. Grenoble (non publié).*
- BENEDETTI-CROUZET E. (1972) - Etude géodynamique du lac d'Annecy et de son bassin versant. *Thèse 3ème cycle, C.R.G. Thonon. Univ. Paris VI.*
- BESSON, GUILLERD, TOUPLAIN (1930) - (sous la direction de Bordas et d'Arsonval). Etude des sources thermales d'Aix-les-Bains. *Pub. des Ann. de l'Inst. d'Hydrologie et de Climatologie. Collège de France.*

- BOUVARD M. (1971) - Hydrologie. *Institut Polytechnique, E.N.S. Hydraulique. Grenoble.*
- BURGER A. (1973) - Protection des eaux dans le canton de Neuchâtel. Problèmes particuliers du Jura. *Assoc. suisse des prof. de l'épuration des eaux. Rapport n° 115, Ass. des 23 et 24 mars 1973. Neuchâtel. 8 p.*
- BURGER A. (1974) - L'utilisation des eaux karstiques, leur comportement à l'égard de la pollution et leur protection. *Semaine d'étude Agric. et Environnt. 2-6 sept. 1974, Centre de Rech. agro., Gembloux (Belgique).*
- BURGER A. (1974) - Chimisme des roches et de l'eau karstiques. *Centre Hydrogéol. Univ. Neuchâtel.*
- CASTANY G. (1967) - Traité pratique des eaux souterraines. *Ed. Dunod, Paris.*
- CHARLOT G. (1961) - Les méthodes de la chimie analytique : analyse quantitative minérale. *Masson et Cie, Paris.*
- CHARRIERE R. (1974) - Perfectionnements à la mesure de traceurs fluorescents. Applications à l'hydrogéologie. *Thèse, Grenoble.*
- COLLOQUE sur l'hydrogéologie karstique du massif du Vercors, 1968. *T. Lab. Géol. Grenoble, mémoires n° 8, t. I-II.*
- DROGUE C. (1971) - Réflexions sur les possibilités offertes par les traceurs, pour la mesure de la vitesse d'écoulement dans les roches calcaires fissurées. *Bull. B.R.G.M., 2ème série, III, 4, p. 21-31.*
- DOUDOUX B. (1969) - La cluse du Chéran (massif des Bauges, Savoie). *Ann. du C.E.S. Chambéry, 7, p. 9-22.*
- DOUDOUX B. (1969) - Rapport sur les conditions de protection d'une source utilisée pour l'alimentation en eau potable de la commune de Saint Alban Laysse. (Savoie). *Inédit.*
- DOUDOUX B., NICOUD G. (1975) - Conditions de déversement d'effluent de station d'épuration, Plateau du Revard (Savoie). *Rapport inédit.*
- DREYFUSS M. (1974) - Traçages et hydraulique au sein des massifs calcaires. *Ann. Sc. Univ. Besançon, 3, 22, p. 21-31.*
- FEUERSTEIN D.L., SELLECK R.E. (1963) - Fluorescent tracers for dispersion measurements. *Journal of the Sanit. Eng. Div., Amer. Soc. Civil Eng. 89, SA 4, 1-21.*
- FORD T.D., CULLINGFORD C.H.D. (1976) - The Science of Speleology. *Academic Press. London, 600 pp.*
- GEZE B. (1965) - Les conditions hydrogéologiques des roches calcaires. *Chrn. d'hydrogéol. B.R.G.M., 7, p. 9-39.*
- GIDON P. (1948) - Observations sur la tectonique et la stratigraphie du Nivolet. *C.R. Soc. Géol. Fr., Paris, 7 juin 1948.*

- GIDON P. (1950) - La bordure orientale de la vallée de Chambéry. *T. Lab. Géol. Grenoble*, t. 28, p. 57-78.
- GIDON P. (1950) - Rapport géologique sur les possibilités d'alimentation en eau potable des hameaux les plus élevés (La Féclaz) de la commune des Déserts (Savoie). *Inédit*.
- GIDON P. (1956) - La vallée synclinale des Déserts et ses bordures anticlinales. *Bull. Carte Géol.* 250, B, t. 54, p. 5-12.
- GIDON P. (1958) - Hydrogéologie du bassin d'Aix. *T. Lab. Géol. Grenoble*, t. 35, p. 33-38.
- GIDON P. (1963) - Géologie chambérienne. *Ann. C.E.S. Chambéry*, n° hors série.
- GIGNOUX M., MORET L. (1930) - Note sur les conditions de l'expérience à la fluorescéine faite en 1927 dans le plateau du Revard, au creux de Rethiède. In *"Etude des sources thermales d'Aix"*. (voir Besson et al.).
- GUTIERREZ-COUTINO R. (1975) - Contribution à l'étude géologique du Sud-Ouest du massif des Bauges (Savoie). *Thèse 3ème cycle, Paris VI*.
- HAUBERT M. (1975) - Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne : La Dranse de Bellevaux (Brevon) - Hte Savoie. *Thèse 3ème cycle C.R.G. Thonon. Univ. Paris VI*.
- KARST HYDROLOGY AND WATER RESOURCES - 1976. Proceedings of the U.S. Yugoslavian, Symposium, Dubrovnik, June 2-7-1975. *Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 80522, USA*.
- KAZO S. (1975) - Sédimentologie du Tertiaire du massif des Bauges (Alpes de Savoie). *Thèse 3ème cycle Grenoble*.
- KIRALY L. (1968) - Eléments structuraux et alignement de phénomènes karstiques (région du gouffre du Petit-Pré de Saint Livres, Jura vaudois). *Bull. Soc. Neuchâtel, Sc. nat.* 91, 127-146.
- KIRALY L., SIMEONI G.P. (1971) - Structure géologique et orientation des cavités karstiques : La grotte de "Chez le Brandt" (Jura neuchâtelois). *Bull. Soc. Neuchâtel, Sc. nat.* 94, 91-97.
- LALLEMAND A., PALOC H. (1964) - Possibilités offertes par la méthode de détection au charbon actif pour les expériences de coloration à la fluorescéine. *Spe-lunca, mémoires n° 4*, p. 27-40.
- LEONARD R.E., ESCHNER A.R. (1968) - Albedo of intercepted snow. *Water Resources Research*, 4, 5, p. 931-935.
- LEPILLER M. (1975) - Données nouvelles concernant les émergences thermales ou sulfureuses de la région d'Annecy (Hte Savoie). Comparaison avec les eaux thermales de la région d'Aix-les-Bains (Savoie). *C.R. du 100ème Congrès nat. des soc. savantes, Paris, fasc. I*, 101-112.
- LEPILLER M. (1976) - Résultats de mesures de précipitations sur le massif du Semnoz. *Bull. Clim. Mens. de la Hte Savoie, janvier 1976*.

- MANGIN A. (1970) - Méthode d'analyse des courbes de décrue et tarissement dans les aquifères karstiques. *C.R.Ac. Sc.*, 270, 9 mars 1970, p. 1295-1297.
- MANGIN A. (1970) - Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir des courbes de décrue et de tarissement. *Ann. Spéléol.* 25, 3, p. 581-610.
- MANGIN A. (1974-1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Ann. Spéléol.* 1974, 29, 3, p. 283-332 et 29,3, p. 495-601.  
1975, 30, 1, p. 21-124.
- MANGIN A., MOLINARI J., PALOC H. (1976) - Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires. *La Houille Blanche*, n° 3/4, p. 261-267.
- MARTINI J. (1968) - Note sur la migration du géosynclinal subalpin savoyard à la fin de l'Eocène et au début de l'Oligocène. *C.R. Séances Soc. Phys. Hist. Nat. Genève*, 3, 2, p. 78-89.
- MARTINI J. (1970) - Contribution à l'étude de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène subalpin de la Savoie. *Arch. Sc. Genève*, 23, 1, p. 197-276.
- METEOROLOGIE NATIONALE - relevés pluviométriques et thermométriques. 1974, 1975, 1976.
- MICHEL R. (1960) - Contribution à l'étude de la température des sources dans le département de l'Isère. *T. Lab. Géol. Grenoble*, 36.
- MISEREZ J.J. (1969) - Utilisation d'une électrode spéciale pour la mesure de  $P_{CO_2}$  dans les eaux et l'atmosphère. Application des phénomènes karstiques du Jura suisse. *Stalactite* n° 2, p. 31-46.
- MISEREZ J.J. (1970) - Corrélations Na/K dans les eaux karstiques du Jura. *Ann. Spéléol.*, 25, 4, p. 741-763.
- MISEREZ J.J. (1975) - Variations chimiques de sources karstiques et bilan de l'altération. Exemples de l'Areuse et de la Noiraigue, Jura neuchâtelois. *Ann. Spéléol.*, 30, 2, p. 241-254.
- MOLINARI J. (1976) - Interactions avec le milieu et développements récents dans l'emploi des traceurs artificiels. *La Houille Blanche*, n° 3/4, p. 197-204.
- MUGNIER C. (1965) - Les karstifications antepliocènes et plioquaternaire dans les Bauges, la Chartreuse septentrionale et les chaînons jurassiens voisins. (Savoie, Hte Savoie, Isère). *D.E.S. Géol. Grenoble (inédit)*. *Ann. Spéléol.* 20, 1 et 2.
- NICOUD G. (1973) - Hydrogéologie de la Haute vallée du Chéran, massif des Bauges (Savoie). *Thèse 3ème cycle, Grenoble*.
- OLIVE P. (1976) - Le système  $CO_2/H_2O/CaCO_3$ . *Mémento pratique. Publ. du centre de Rech. Géodyn. Thonon-les-Bains*.
- PALOC H. (1964) - Normes de représentation adoptées par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières pour la réalisation à titre expérimental d'une carte hydrogéologique en zone karstique. *Spelunca mémoires* n° 4, p. 41-43.

- PASQUIER C. (1975) - Les aquifères karstiques du plateau d'Ornans (Doubs). Le système de Bléfond - Pont les Moulins. Premiers résultats. *Ann. Spéléo.*, 30, 3, p. 387-400.
- PERRIER R. (1960) - Monts Margériaz et Colombier, vallées du Noyer et des Aillons. D.E.S., *Géol. Grenoble*, T. Lab. *Géol. Grenoble*, t. 36, p. 59-74.
- PONTIKIS C., BRUN C., REBOTTIER C., RIGAUD A., ZEPHORIS M. (1972) - Contribution à l'étude physico-chimique du manteau neigeux. *La Météorologie*, V, 22, p. 55-67.
- PONTILLE H., CABROL B. (1974) - Le massif du Mont Revard-Féclaz-Peney. *Spelunca* n° 2, p. 45-49.
- RERAT J.C. (1976) - La Rhodamine B. propriétés physico-chimiques. Etude de leurs incidences sur son utilisation comme traceur en hydrologie et sur son épuratation dans les effluents. *Thèse Pharmacie, Grenoble*.
- RODIER J. (1966) - L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau. *Dunod, Paris*.
- ROQUES H. (1963) - Sur la répartition du CO<sub>2</sub> dans les karsts. *Ann. Spéléo.*, 18-2, p. 141-184.
- ROQUES H. (1964) - Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique - eau - carbonate. *Ann. Spéléo.*, 19, 2, p. 258-484.
- SCHOELLER (1962) - Les eaux souterraines. *Masson Ed.*, 642 p.
- SPELEO-CLUB DE SAVOIE - Grottes de Savoie. Tome 4, 1974, *MJC Chambéry*.
- TALOUR B. (1976) - Hydrogéologie karstique du massif du Grand Som (Chartreuse, Isère) *Thèse 3ème cycle, Grenoble*.
- THEROND R. (1973) - Recherches sur l'étanchéité des lacs de barrage en pays karstique. *Collection du centre de rech. et d'essais de Chatou-Eyrolles, Paris*.
- TRIPET J.P. (1973) - Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois). Matériaux pour la géologie de la Suisse. *Hydrologie* n° 21, *Thèse doctorat, Univ. Neuchâtel*.
- VACHER J.P. (1971) - Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de l'Isère. *Thèse 3ème cycle, Bordeaux*.

# LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                                          |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1 - Cadre géographique .....                                                                                                                                                                             | 2     |
| 2 - Tableau des précipitations .....                                                                                                                                                                     | 15    |
| 3 - Carte pluviométrique .....                                                                                                                                                                           | 17    |
| 4 - Précipitations cumulées .....                                                                                                                                                                        | 18    |
| 5 - Précipitations mensuelles à Challes-les-Eaux (depuis 1947) .....                                                                                                                                     | 21    |
| 6 - Variations d'épaisseur de la couverture nivale .....                                                                                                                                                 | 22    |
| 7 - Amplitude de variation des températures moyennes mini et maxi mensuelles .....                                                                                                                       | 24    |
| 8 - Relation altitude-température .....                                                                                                                                                                  | 24    |
| 9 - Températures moyennes mensuelles .....                                                                                                                                                               | 26    |
| 10 - Stratigraphie - Lithologie - Circulations karstiques .....                                                                                                                                          | 32    |
| 11 - Coupes sériées du plateau du Mont-Revard .....                                                                                                                                                      | 42.43 |
| 12 - Isohypses du toit de l'Hauterivien .....                                                                                                                                                            | 49    |
| 13 - Sens d'écoulement des eaux pour une série peu inclinée et à fissuration verticale .....                                                                                                             | 50    |
| 14 - Caractéristiques physico-chimiques des traceurs fluorescents utilisés ...                                                                                                                           | 55    |
| 15 - Spectres de fluorescence de couples de traceurs en solution dans l'eau enregistrés lors de déplacement simultanés des longueurs d'onde d'excitation et d'émission dans un intervalle de 25 nm ..... | 57    |
| 16 - Orohydrographie-Situation des points d'injections et de prélèvements ...                                                                                                                            | 65    |
| 17 - Conditions géologiques des pertes .....                                                                                                                                                             | 66    |
| 18 - Monde: courbes de restitution (multitraçage).....                                                                                                                                                   | 70    |
| 19 - Bange: restitution des traceurs (multitraçage).....                                                                                                                                                 | 71    |
| 20 - Mont-Peney - Fontaine Noire: restitution de l'uranine .....                                                                                                                                         | 73    |
| 21 - Injection du creux de l'Olette: courbes de restitution de l'uranine ...                                                                                                                             | 74    |
| 22 - Doria: dichromate de sodium - courbe expérimentale .....                                                                                                                                            | 76    |
| 23 - Doria: Rhodamine B - Courbe expérimentale (traçage des Combes).....                                                                                                                                 | 76    |
| 24 - Doria: Rhodamine B - Courbe expérimentale (traçage perte des marais de la Croix) .....                                                                                                              | 80    |
| 25 - Tableau de résultats des traçages .....                                                                                                                                                             | 81    |
| 26 - Schéma des circulations karstiques dans la partie nord du massif.....                                                                                                                               | 83    |
| 27 - Roles de l'Hauterivien .....                                                                                                                                                                        | 84    |
| 28 - Exemples de courbes de restitution obtenues sur des systèmes karstiques subalpins (Bauges-Chartreuse-Vercors).....                                                                                  | 89    |
| 29 - Courbes hypsométriques et fréquences altimétriques                                                                                                                                                  |       |
| a) bassins versants de Bange, du Bout-du-Monde, de la Meune .....                                                                                                                                        | 97    |
| b) bassins versants de la Doria, de Prérrouge, de Fne Noire .....                                                                                                                                        | 101   |
| c) bassins versants de la Duy et de St-François .....                                                                                                                                                    | 103   |
| d) bassin versant de la Gouille des Moines .....                                                                                                                                                         | 104   |
| 30 - Températures moyennes de l'air et des émergences en fonction de l'altitude .....                                                                                                                    | 116   |
| 31 - Relation résistivité - THT et résistivité - TAC .....                                                                                                                                               | 118   |
| 32 - Relation altitude - THT .....                                                                                                                                                                       | 118   |
| 33 - Doria: courbe de tarage .....                                                                                                                                                                       | 121   |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 34 - Doria: hydrogramme (Juin 1975-Juillet 1976) .....                                                                              | 122 |
| 35 - Doria: variations des paramètres physico-chimiques .....                                                                       | 125 |
| 36 - Fontaine-Noire: variations des paramètres physico-chimiques .....                                                              | 129 |
| 37 - Duy; St François: variations des paramètres physico-chimiques .....                                                            | 130 |
| 38 - Diagramme d'analyse d'eau - circulations urgoniennes .....                                                                     | 133 |
| 39 - Schéma de situation de l'exsurgence de Bange.....                                                                              | 134 |
| 40 - Schéma hydrogéologique de l'exsurgence du Bout-du Monde .....                                                                  | 135 |
| 41 - a) Panorama sur la bordure ouest du plateau du Mont-Revard                                                                     |     |
| b) Bout-du-Monde" - Hydrogramme (Aout 1975-Juillet 1976) .....                                                                      | 137 |
| 42 - "Bout-du-Monde" - variations des paramètres physico-chimiques.....                                                             | 138 |
| 43 - Diagramme d'analyse d'eau - circulations valanginiennes .....                                                                  | 141 |
| 44 - "Empereur": variations des paramètres physico-chimiques .....                                                                  | 144 |
| 45 - Diagramme d'analyse d'eau - circulations hauteriviennes, tertiaire,<br>tithonique .....                                        | 147 |
| 46 - a) Doria: courbe de décrue et tarissement .....                                                                                | 154 |
| b) étude de l'infiltration .....                                                                                                    | 157 |
| 47 - "Bout-du-Monde": courbes de décrue et de tarissement .....                                                                     | 158 |
| 48 - "Doria": variations des paramètres physico-chimiques                                                                           |     |
| a) au cours de la crue du 16 août 1976 .....                                                                                        | 161 |
| b) au cours de la crue du 28 août 1976 au 5 septembre 1976 .....                                                                    | 162 |
| 49 - "Bout-du-Monde" - variations des paramètres physico-chimiques au cours<br>de la crue du 28 août 1976 au 5 septembre 1976 ..... | 164 |
| 50 - Tableau de résultats des calculs d'indice de saturation .....                                                                  | 172 |
| 51 - Schéma d'un système karstique; le karst urgonien de la Doria .....                                                             | 176 |
| 52 - Alimentation en eau du plateau du Mont-Revard-Situation actuelle .....                                                         | 178 |

---

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Avant-propos                                                                                                        |    |
| Sommaire                                                                                                            | 1  |
| Introduction                                                                                                        | 3  |
| CHAPITRE I - HYDROLOGIE                                                                                             | 7  |
| I - Le climat - Généralités                                                                                         | 9  |
| 1- Les massifs subalpins septentrionaux                                                                             | 9  |
| 2- Le massif des Bauges                                                                                             | 9  |
| II - Les vents                                                                                                      | 9  |
| III - Les précipitations                                                                                            | 10 |
| 1- Le réseau pluviométrique existant (Météo nat.)                                                                   | 10 |
| 2- Le matériel complémentaire mis en place                                                                          | 10 |
| 3- Tableau des postes pluviométriques ayant servi à l'étude                                                         | 11 |
| 4- Homogénéité des hauteurs de précipitations enregistrées par différents appareils                                 | 11 |
| 5- Les données pluviométriques                                                                                      | 12 |
| a) modules pluviométriques annuels                                                                                  | 12 |
| b) modules pluviométriques mensuels                                                                                 | 19 |
| c) fréquence et intensité des précipitations                                                                        | 20 |
| d) la couverture nivale                                                                                             | 22 |
| IV - Les Températures                                                                                               | 23 |
| 1- Le réseau d'observation                                                                                          | 23 |
| 2- Les moyennes annuelles et le gradient altimétrique                                                               | 23 |
| 3- Les variations mensuelles                                                                                        | 25 |
| V - L'humidité atmosphérique                                                                                        | 25 |
| VI - La durée d'insolation annuelle                                                                                 | 27 |
| VII - L'évapotranspiration                                                                                          | 27 |
| 1- Evapotranspiration annuelle selon la formule de Turc                                                             | 27 |
| 2- Evapotranspiration selon Coutagne                                                                                | 27 |
| 3- Evapotranspiration potentielle selon Serra                                                                       | 28 |
| 4- Discussion des formules                                                                                          | 29 |
| VIII - Le ruissellement et les eaux souterraines                                                                    | 30 |
| IX - Conclusion                                                                                                     | 30 |
| CHAPITRE II - GEOLOGIE DU PLATEAU DU REVARD - POSSIBILITES HYDROGEOLOGIQUES DES FORMATIONS ET ROLE DE LA TECTONIQUE | 31 |
| I - Stratigraphie, lithologie et rôle hydrogéologique                                                               | 33 |
| 1- Le Kimméridgien supérieur - Portlandien                                                                          | 33 |
| a) Lithologie                                                                                                       | 33 |
| b) Rôle hydrogéologique                                                                                             | 34 |
| 2- Le Berriasien                                                                                                    | 34 |
| a) Lithologie                                                                                                       | 34 |
| b) Rôle hydrogéologique                                                                                             | 35 |
| 3- Le Valanginien                                                                                                   | 35 |
| a) Lithologie                                                                                                       | 35 |
| b) Les circulations                                                                                                 | 36 |
| 4- L'Hauterivien                                                                                                    | 36 |
| a) Lithologie                                                                                                       | 36 |
| b) Un rôle hydrogéologique complexe                                                                                 | 37 |
| 5- Le Barrémien à faciès urgonien                                                                                   | 38 |
| a) Lithologie                                                                                                       | 38 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| b) Les circulations .....                                                                   | 38 |
| 6- Le Tertiaire .....                                                                       | 39 |
| a) Caractères physiques .....                                                               | 39 |
| b) Rôle hydrogéologique .....                                                               | 39 |
| 7- Le Quaternaire .....                                                                     | 40 |
| 8- Conclusion .....                                                                         | 41 |
| <u>II - Tectonique et rôle dans les circulations karstiques</u> .....                       | 41 |
| 1- Eléments structuraux .....                                                               | 41 |
| a) Structure générale des Bauges .....                                                      | 41 |
| b) La bordure externe des Bauges .....                                                      | 44 |
| c) Le monoclinale "Nivolet-Revard-Bange" .....                                              | 44 |
| d) Le synclinal des Déserts .....                                                           | 45 |
| 2- Evolution géologique .....                                                               | 45 |
| 3- La fissuration .....                                                                     | 47 |
| 4- Rôle de la tectonique dans les circulations souterraines .....                           | 48 |
| a) Rôle du plissement .....                                                                 | 48 |
| b) Rôle de la fracturation .....                                                            | 48 |
| 5- Conclusion .....                                                                         | 50 |
| <br><u>CHAPITRE III - MISE EN EVIDENCE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES PAR TRACAGES</u> ..... | 51 |
| <u>I - Méthodologie d'utilisation des traceurs en hydrogéologie karstique</u> ....          | 53 |
| 1- Les traceurs .....                                                                       | 53 |
| 2- Les traceurs fluorescents - Leur analyse .....                                           | 56 |
| a) La dilution des traceurs .....                                                           | 56 |
| b) Appareillage .....                                                                       | 56 |
| 3- Choix d'un traceur .....                                                                 | 57 |
| 4- Choix de plusieurs traceurs pour une utilisation simultanée<br>(Multitraçage) .....      | 58 |
| 5- Facteurs influant sur la fluorescence .....                                              | 58 |
| a) La température .....                                                                     | 59 |
| b) Les phénomènes photochimiques .....                                                      | 59 |
| c) Les agents d'oxydation .....                                                             | 60 |
| 6- Remarques à propos de la méthode de détection au charbon actif .....                     | 60 |
| <u>II - Exploitation des résultats</u> .....                                                | 62 |
| 1- Les distributions des temps de séjour .....                                              | 62 |
| 2- Les bilans de restitution .....                                                          | 63 |
| <u>III - Réalisations expérimentales</u> .....                                              | 63 |
| 1- Traçages réalisés antérieurement à cette étude .....                                     | 63 |
| a) Traçage du 27 juillet 1926 (point n°6) .....                                             | 63 |
| b) Traçage du 8 mai 1927 .....                                                              | 64 |
| c) Traçage du 20 avril 1928 .....                                                           | 64 |
| d) Conclusion .....                                                                         | 64 |
| 2- Conditions géologiques des pertes .....                                                  | 64 |
| 3- Le multitraçage d'Octobre 1975 .....                                                     | 67 |
| a) Localisation des points d'injection .....                                                | 67 |
| b) Les traceurs utilisés .....                                                              | 68 |
| c) Les prélèvements .....                                                                   | 68 |
| d) Conditions hydrologiques et hydrodynamiques .....                                        | 68 |
| e) Résultats .....                                                                          | 68 |
| 4- Les traçages simples .....                                                               | 69 |
| a) Le traçage du Mont Peney (point n°7) .....                                               | 72 |
| b) Le traçage des Combes (point n°8, 2e injection) .....                                    | 75 |

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| c) Le traçage du "Creux de Lolette" .....                                                                                                                  | 75  |
| d) Le traçage de la Teppe de la Cha .....                                                                                                                  | 78  |
| e) Le traçage de la perte des Marais de la Croix (point n°11) .....                                                                                        | 79  |
| f) Le traçage du "Trou du Garde" .....                                                                                                                     | 80  |
| 5- Interprétation .....                                                                                                                                    |     |
| a) Les circulations souterraines .....                                                                                                                     | 82  |
| b) Apport des traçages sur l'hydrodynamique karstique .....                                                                                                | 85  |
| 6- Les bilans de restitution .....                                                                                                                         | 87  |
| 7- Essai de comparaison des courbes de restitution obtenues sur des<br>systèmes karstiques des massifs des Bauges, de la Chartreuse et du<br>Vercors ..... | 88  |
| a) La forme des courbes .....                                                                                                                              | 88  |
| b) Les vitesses .....                                                                                                                                      | 89  |
| c) Les bilans de restitution .....                                                                                                                         | 90  |
| d) Conclusion .....                                                                                                                                        | 90  |
| 8- Conclusion générale sur les traçages .....                                                                                                              | 91  |
| <br><u>CHAPITRE IV - LES BASSINS VERSANTS KARSTIQUES</u> .....                                                                                             | 93  |
| <u>I - Les systèmes karstiques de l'ensemble valanginien</u> .....                                                                                         | 95  |
| 1- Le bassin versant de l'exsurgence de Bange .....                                                                                                        | 95  |
| 2- " " " " " " du Bout du Monde .....                                                                                                                      | 96  |
| 3- " " " " " " de la Meune .....                                                                                                                           | 98  |
| <u>II - Les systèmes karstiques de l'ensemble urgonien</u> .....                                                                                           | 99  |
| 1- Le bassin versant de l'exsurgence de la Doria .....                                                                                                     | 99  |
| 2- " " " " " " de Prérout .....                                                                                                                            | 100 |
| 3- " " " " " " de Fontaine Noire .....                                                                                                                     | 102 |
| 4- Les bassins versants des exsurgences de la Duy et de St François .....                                                                                  | 102 |
| <u>III - Le bassin versant tithonique de l'exsurgence de la "Gouille des Moines"</u><br>.....                                                              | 104 |
| <u>IV - Le bassin versant tertiaire de la source de l'Empereur</u> .....                                                                                   | 105 |
| <u>V - Conclusion</u> .....                                                                                                                                | 105 |
| <br><u>CHAPITRE V - ETUDE HYDROCHIMIQUE</u> .....                                                                                                          | 107 |
| <u>I - Les paramètres physico-chimiques: méthodes d'analyse</u> .....                                                                                      | 109 |
| 1- Les prélèvements .....                                                                                                                                  | 109 |
| 2- Les paramètres physiques .....                                                                                                                          | 109 |
| a) La température .....                                                                                                                                    | 109 |
| b) Le pH .....                                                                                                                                             | 109 |
| c) La résistivité .....                                                                                                                                    | 110 |
| d) La turbidité .....                                                                                                                                      | 110 |
| 3- Les paramètres chimiques .....                                                                                                                          | 111 |
| a) Les dosages volumétriques .....                                                                                                                         | 111 |
| b) Les dosages colorimétriques .....                                                                                                                       | 112 |
| c) Les dosages par spectrophotométrie d'absorption atomique ou<br>d'émission de flamme .....                                                               | 113 |
| <u>II - La chimie des apports atmosphériques</u> .....                                                                                                     | 113 |
| <u>III - Caractères généraux des émergences</u> .....                                                                                                      | 115 |
| 1- Relation température-altitude .....                                                                                                                     | 115 |
| 2- Relation titre hydrotimétrique total-altitude .....                                                                                                     | 117 |
| 3- Relation résistivité-concentration des éléments dissous .....                                                                                           | 117 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| a) Relation résistivité-titre hydrotimétrique total (T.H.T.).....  | 117 |
| b) Relation résistivité-titre alcalimétrique complet (T.A.C.)..... | 117 |
| <u>IV - Les émergences de type karstique</u> .....                 | 119 |
| 1- Les exurgences liées à l'ensemble urgonien .....                | 119 |
| a) l'exurgence de la Doria .....                                   | 119 |
| b) l'exurgence de Prérout .....                                    | 127 |
| c) l'exurgence de Fontaine Noire .....                             | 127 |
| d) les exurgences de la Dui et de Saint-François .....             | 128 |
| 2- les exurgences liées à l'ensemble valanginien .....             | 132 |
| a) l'exurgence de Bange .....                                      | 132 |
| b) l'exurgence du Bout du Monde .....                              | 135 |
| c) l'exurgence de la Meune .....                                   | 139 |
| 3- L'émergence tithonique des Moines .....                         | 140 |
| 4- L'émergence tertiaire de l'Empereur.....                        | 143 |
| 5- Les circulations liées à l'Hauterivien .....                    | 146 |
| 6- Les sources liées au Quaternaire .....                          | 148 |
| <u>V - Conclusion</u> .....                                        | 148 |

CHAPITRE VI - APPROCHE DE LA DYNAMIQUE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES PAR  
L'ETUDE DES CRUES - LES SYSTEMES KARSTIQUES DE LA DORIA ET DU BOUT DU  
MONDE .....

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| I - Analyse des courbes de décrue et tarissement .....                       | 153 |
| 1- Principe .....                                                            | 153 |
| 2- Application à l'exutoire de la Doria .....                                | 155 |
| a) Détermination du régime de vidange .....                                  | 155 |
| b) Analyse de l'infiltration .....                                           | 156 |
| c) Equation de la décrue et du tarissement .....                             | 156 |
| d) Les volumes de la zone noyée et de l'infiltration .....                   | 156 |
| 3- Application à l'exutoire du Bout du Monde .....                           | 159 |
| a) Le régime de vidange et l'équation du tarissement .....                   | 159 |
| b) Les volumes de la zone noyée .....                                        | 160 |
| 4- Conclusion .....                                                          | 160 |
| <u>II - Variations des paramètres physico-chimiques lors des crues</u> ..... | 160 |
| 1- La Doria: crue du 16 août 1976 .....                                      | 160 |
| 2- La Doria: crue du 28 août au 5 septembre 1976 .....                       | 163 |
| 3- Le Bout du Monde: crue du 28 août au 5 septembre 1976 .....               | 163 |
| <u>III - Conclusion</u> .....                                                | 165 |

CHAPITRE VII - KARSTIFICATION ET ECOULEMENTS SOUTERRAINS .....

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| I - Le processus de karstification: la chimie de la dissolution des<br>calcaires ..... | 169 |
| 1- Les systèmes d'équilibre .....                                                      | 169 |
| 2- L'indice de saturation .....                                                        | 170 |
| a) Principe de calcul .....                                                            | 170 |
| b) Mesure de la pression de CO <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> dissous) .....            | 171 |
| c) Résultats .....                                                                     | 171 |
| <u>II- L'évolution de la karstification</u> .....                                      | 173 |
| 1- La karstification éocène .....                                                      | 173 |
| 2- La karstification plio-quaternaire .....                                            | 174 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>III - Schéma d'un système karstique: le karst urgonien de la Doria</u> ..... | 174 |
| 1- Le réseau spéléologique .....                                                | 174 |
| 2- La zone d'infiltration .....                                                 | 175 |
| 3- La zone noyée .....                                                          | 175 |
| <u>IV - Conclusion</u> .....                                                    | 175 |
| <u>CHAPITRE VIII - LES RESSOURCES EN EAU DU PLATEAU DU MONT REVARD</u> .....    | 177 |
| <u>I - Alimentation en eau de la Féclaz - Situation actuelle</u> .....          | 179 |
| <u>II - Les pollutions</u> .....                                                | 179 |
| <u>III - Exploitation des circulations souterraines</u> .....                   | 180 |
| <u>CONCLUSIONS GENERALES</u> .....                                              | 183 |
| <u>ANNEXES</u> .....                                                            | 187 |
| <u>BIBLIOGRAPHIE</u> .....                                                      | 191 |
| <u>LISTE DES FIGURES</u> .....                                                  | 197 |
| <u>TABLE DES MATIERES</u> .....                                                 | 199 |

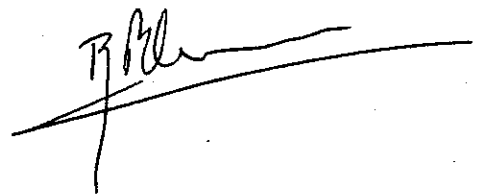
---

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le

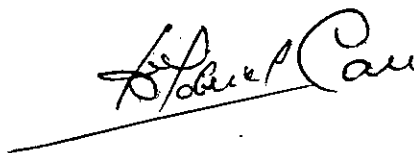
Le Président de la thèse



VU, et permis d'imprimer,

Grenoble, le 28 octobre 1977

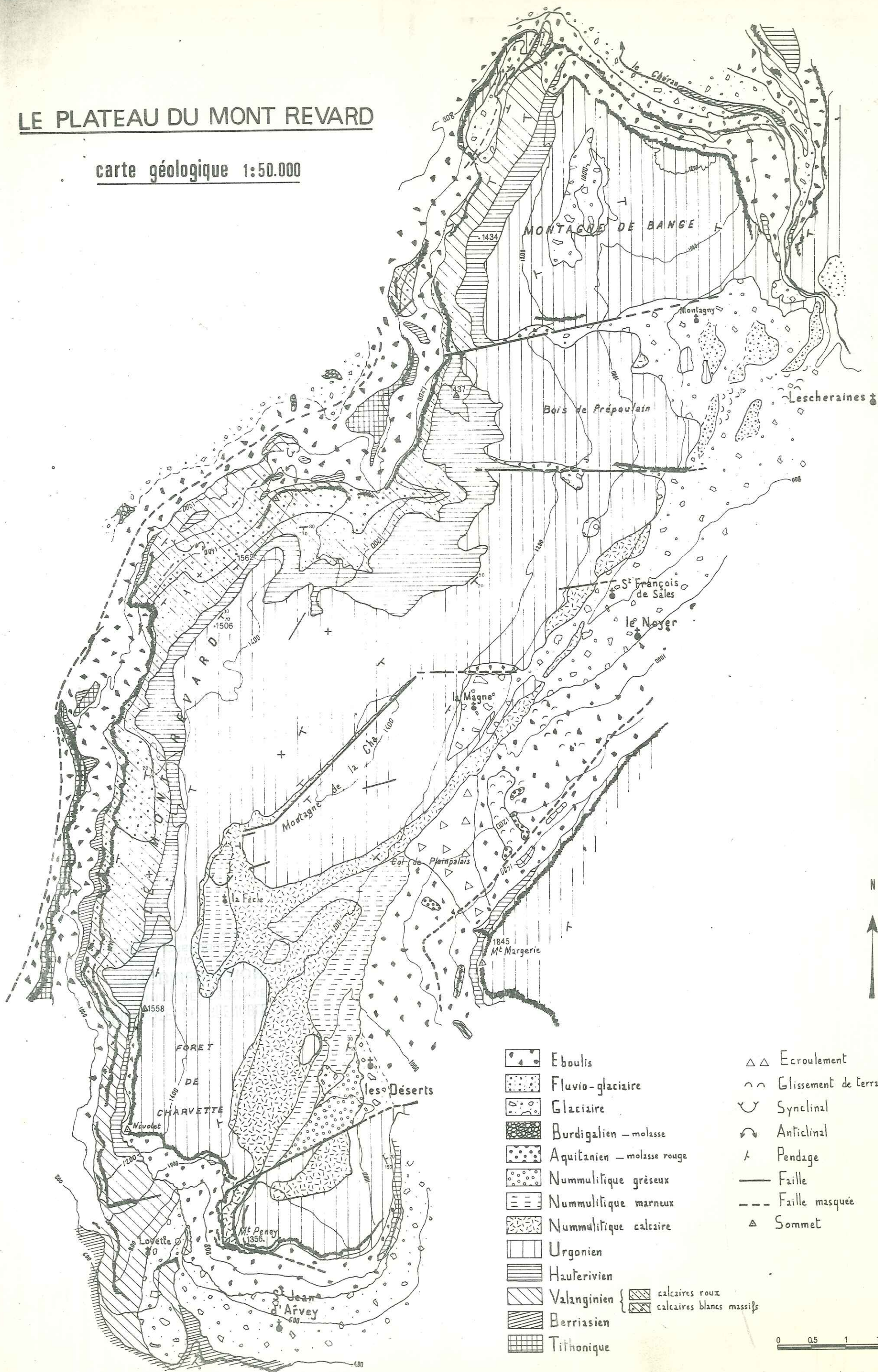
Le Président de l'Université  
Scientifique et Médicale



Dr G. CAU

# LE PLATEAU DU MONT REVAR

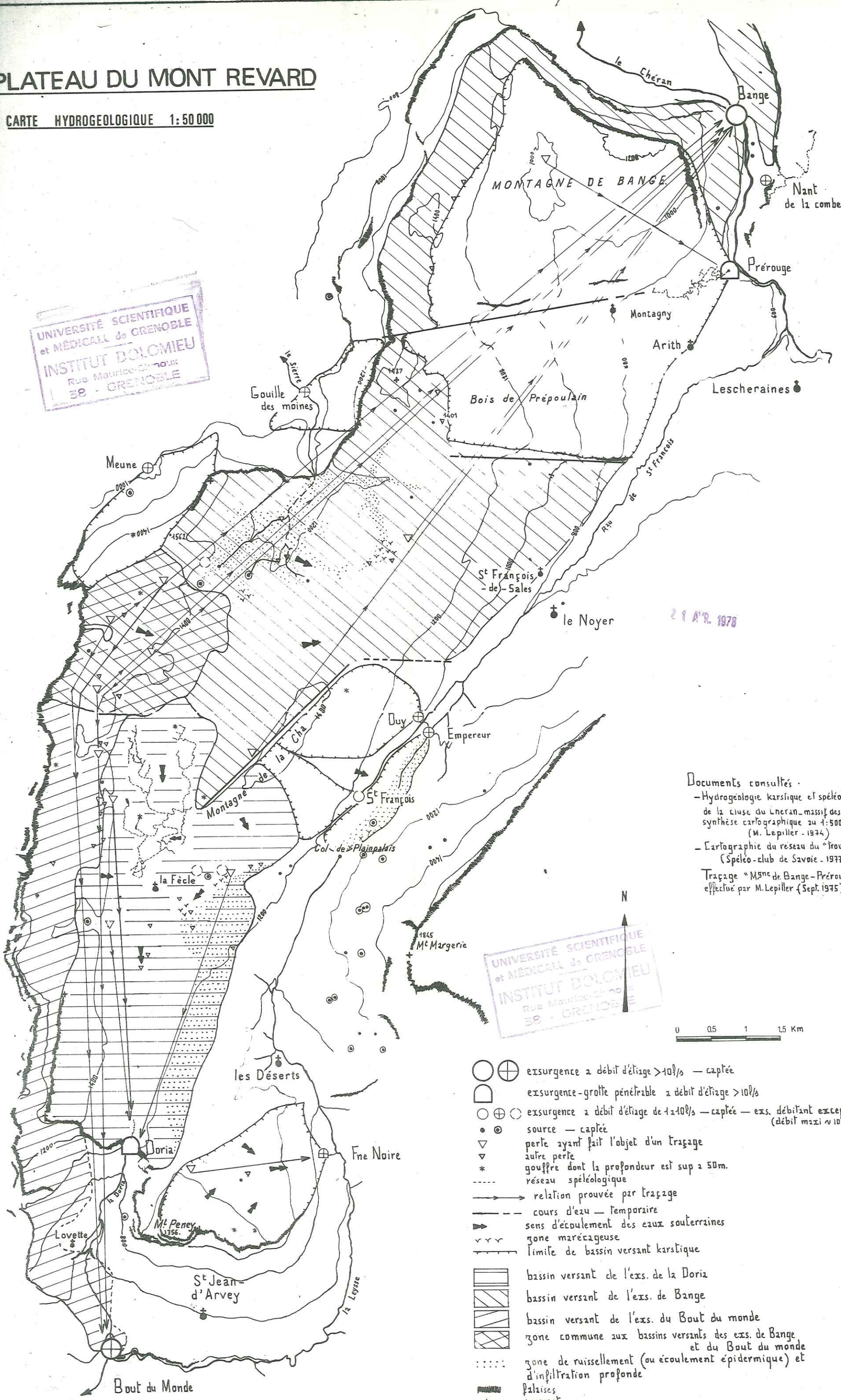
carte géologique 1:50.000



# LE PLATEAU DU MONT REVARD

CARTE HYDROGEOLOGIQUE 1:50 000

UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE  
et MÉDICALE de GRENOBLE  
INSTITUT DOLOMIEU  
Rue Maurice-Gronov  
38 - GRENOBLE



21 A.R. 1978

Documents consultés :  
- Hydrogéologie karstique et spéléologie  
de la cluse du Lheran-massif des Bauges  
synthèse cartographique au 1:5000  
(M. Lepiller - 1974)  
- Cartographie du réseau du "frou du Gard"  
(Spéleo-club de Savoie - 1977)  
Tracage "Mgne de Bange-Prérrouge"  
effectuée par M. Lepiller (Sept. 1975)

UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE  
et MÉDICALE de GRENOBLE  
INSTITUT DOLOMIEU  
Rue Maurice-Gronov  
38 - GRENOBLE

- ⊕ exsurgence à débit d'étiage > 10 l/s — captée
- exsurgence-grotte pénétrable à débit d'étiage > 10 l/s
- ⊕ exsurgence à débit d'étiage de 1 à 10 l/s — captée — exs. débitant exceptionnel (débit maxi ~ 100 l/s)
- source — captée
- ▽ perte ayant fait l'objet d'un tracage
- ▽ autre perte
- \* gouffre dont la profondeur est sup à 50 m.
- réseau spéléologique
- relation prouvée par tracage
- cours d'eau — temporaire
- sens d'écoulement des eaux souterraines
- zone marécageuse
- limite de bassin versant karstique
- ▨ bassin versant de l'exs. de la Doria
- ▨ bassin versant de l'exs. de Bange
- ▨ bassin versant de l'exs. du Bout du monde
- ▨ zone commune aux bassins versants des exs. de Bange et du Bout du monde
- ..... zone de ruissellement (ou écoulement épidermique) et d'infiltration profonde
- ⊕ palaises
- ⊕ sommet