



HAL
open science

**Contribution de l'hydrochimie aux études
hydrogéologiques d'une nappe alluviale en exploitation :
la nappe de Jouchy dans la vallée de la Romanche, Isère
(France)**

France Chouteau

► **To cite this version:**

France Chouteau. Contribution de l'hydrochimie aux études hydrogéologiques d'une nappe alluviale en exploitation : la nappe de Jouchy dans la vallée de la Romanche, Isère (France). Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1982. Français. NNT : . tel-00690884

HAL Id: tel-00690884

<https://theses.hal.science/tel-00690884>

Submitted on 24 Apr 2012

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.

THESE PRESENTEE
A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

CHOUTEAU (F.A.)
Ex. n° I

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR ES-SCIENCES NATURELLES



27 SEP. 1982

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.48

CONTRIBUTION de l'HYDROCHIMIE aux ETUDES HYDROGEOLOGIQUES d'une NAPPE ALLUVIALE en EXPLOITATION

la nappe de Jouchy dans la vallée de la Romanche - Isère (France)

par France A. CHOUTEAU

Soutenue le Septembre 1982 devant la commission d'examen

R. MICHEL	Professeur à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble	Président
J. SARROT-REYNAULD	Professeur à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble	Examineur
A. RAMBAUD	Professeur à l'Université de Montpellier I	Examineur
J. ROCHAT	Professeur à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble	Examineur
J. VIAL	Directeur Adjoint de l'Institut Pasteur de Lyon	Examineur
G. KIOULOU	Président du Syndicat Intercommunal des Eaux de la Région Grenobloise	Invité

RESUME

MOTS CLES - ALPES FRANCAISES - VALLEE DE LA ROMANCHE - NAPPE SOUTERRAINE ALLUVIALE - BILANS HYDROGEOLOGIQUES - RELATIONS NAPPE-RIVIERE - HYDROCHIMIE EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE - ENREGISTREMENTS RESISTIVITE - PROTECTION QUALITE EAU.-

Après avoir décrit le cadre géographique et géologique de l'étude, j'ai tout d'abord regroupé les informations utiles à la connaissance de l'unité hydrogéologique que constitue le bassin versant de la Romanche, situé à l'amont de la plaine de Jouchy. J'ai accordé une attention particulière à l'étude du remplissage alluvial quaternaire de la vallée, notamment à l'étude de celui de la plaine de Jouchy, à Saint-Pierre-de-Mésage. Celle-ci, comprise entre deux versants rocheux, est constituée d'une couche d'alluvions gravelo-sableuses de 80 à 100 m d'épaisseur, qui repose sur le socle cristallin et dans laquelle circule une puissante nappe souterraine, actuellement exploitée pour l'alimentation en eau potable de la région grenobloise.

Les résultats des essais de pompages effectués m'ont permis de calculer les caractéristiques de la couche supérieure des alluvions, la plus perméable, située à moins de trente mètres de profondeur et dans laquelle s'effectue la majeure partie des échanges (infiltrations, pompages, etc.). Son coefficient de perméabilité est proche de 10^{-2} m/s et la porosité efficace s'élève à 15 %. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par d'autres méthodes classiques en hydrogéologie.

La piézométrie de la nappe, établie à partir des nombreux relevés journaliers ou hebdomadaires, effectués au cours des années d'exploitation, m'a permis de rassembler de nombreuses informations sur les mouvements hydrodynamiques de la nappe.

Ainsi, les bilans hydrogéologiques calculés, mettent en évidence que les infiltrations, dont le débit varie de 800 à 1 600 l/s suivant les saisons, proviennent essentiellement de la Romanche, les apports directs des précipitations et des eaux de ruissellement sur les versants représentant moins de 10 % des infiltrations totales. La zone d'infiltration préférentielle des eaux en provenance de la Romanche, se situe à l'amont de la plaine ; en hautes eaux, les crues de la rivière sont favorables au décolmatage du lit et des berges ; d'autres zones d'infiltration sont alors créées et participent à la recharge de la nappe. Les hautes eaux de la Romanche, au printemps et en été, sont donc tout à fait favorables à la recharge naturelle de la nappe à une saison où elle est le plus sollicitée par les pompages.

C'est au régime nivo-glaciaire de la rivière et grâce aux apports successifs de ses principaux affluents, l'Eau d'Olle et le Vénéon, que ses hautes eaux s'étalent du mois d'avril au mois de septembre. Mais les aménagements hydro-électriques de la vallée réduisent considérablement les débits transitant au droit de la plaine de Jouchy. La mesure des débits, particulièrement intéressante pour la gestion de la nappe souterraine alluviale est rendue difficile par le caractère sinueux de la rivière dans cette portion de son cours. Les débits moyens journaliers ou mensuels sont donc estimés par le calcul. Deux méthodes sont utilisées.

Près de 2 000 eaux, superficielles et souterraines, ont été prélevées dans le bassin versant de la Romanche. Les analyses effectuées permettent d'étudier les caractéristiques physico-chimiques et les variations de la minéralisation totale des eaux, dans le but de préciser leur évolution dans l'espace et dans le temps.

Les eaux souterraines de la nappe de Jouchy constituent un ensemble homogène du point de vue hydrochimique. Ce sont des eaux essentiellement bicarbonatées, sulfatées, calciques et magnésiennes. Bien que leurs caractéristiques essentielles soient comparables à celles de la Romanche, transitant à l'amont de la plaine, les eaux souterraines sont toutes, à un moment donné, plus minéralisées que les eaux de la rivière ; leur minéralisation totale, moyenne ou faible, s'accroît dans le sens de l'écoulement de la nappe et leurs variations saisonnières se manifestent avec d'autant plus de retard et d'atténuation que le point considéré est plus éloigné des zones d'infiltration.

L'interprétation des résultats des analyses physico-chimiques (effectuées depuis 1975) et isotopiques (H, S), s'appuie sur :

- 1) la mise en oeuvre d'expériences faites :
 - . au laboratoire (essais de percolation sur les sables alluvionnaires),
 - . sur le terrain (enregistrements continus des températures et des résistivités des eaux),
- 2) l'application d'une méthode de calcul des équilibres calco-carboniques (méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER) et de sa représentation graphique. La mise en oeuvre de cette méthode a nécessité l'établissement du programme TIESANAL qui a permis de traiter plus de 200 analyses d'eaux.

L'étude des processus hydrochimiques mis en jeu a permis d'attribuer définitivement l'augmentation de la minéralisation totale des eaux au cours du cheminement souterrain :

- 1) au mélange des eaux des apports souterrains avec celles infiltrées en provenance de la Romanche ;
- 2) à l'acquisition des sels minéraux, (notamment du sulfate de calcium) au contact des sables alluvionnaires dans les zones non saturées de la nappe. Elle a permis de mettre en évidence que les variations hydrochimiques sont liées aux mouvements hydrodynamiques de la nappe et par conséquent que les problèmes quantitatifs et qualitatifs qui peuvent se poser, sont intimement liés ; ils doivent donc être traités conjointement, pour le maintien des ressources et la conservation de la qualité des eaux.

Les relations entre la conductivité, enregistrée ou facilement mesurable sur le terrain, et les autres caractéristiques physico-chimiques des eaux, établies à partir des résultats des analyses, permettent de mettre en évidence tout changement quantitatif ou qualitatif intervenant sur la nappe, dans les conditions d'alimentation, d'écoulement et d'exploitation actuelles.

Deux exemples d'application de ces relations sont donnés.

27 SEP. 1982

UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.43

THESE PRESENTEE
A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR ES-SCIENCES NATURELLES

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

27 SEP. 1982

**CONTRIBUTION de l'HYDROCHIMIE aux
ETUDES HYDROGEOLOGIQUES d'une
NAPPE ALLUVIALE en EXPLOITATION**

**la nappe de Jouchy dans la vallée
de la Romanche - Isère (France)**

d par France A. CHOUTEAU

Soutenue le Septembre 1982 devant la commission d'examen

R. MICHEL	Professeur à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble	Président
J. SARROT-REYNAULD	Professeur à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble	Examineur
A. RAMBAUD	Professeur à l'Université de Montpellier I	Examineur
J. ROCHAT	Professeur à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble	Examineur
J. VIAL	Directeur Adjoint de l'Institut Pasteur de Lyon	Examineur
G. KIOULOU	Président du Syndicat Intercommunal des Eaux de la Région Grenobloise	Invité

10112844

SOMMAIRE

=====

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GÉOSCIENCES
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

PAGES

AVANT-PROPOS

RESUME - ABSTRACT

1 INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE

9 CADRE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE DE L'ETUDE

11 I - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CADRE GEOLOGIQUE DE L'ETUDE

41 II - HYDROGEOLOGIE DE LA NAPPE DE JOUCHY

DEUXIEME PARTIE

107 EXAMEN DES RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

113 I - EXAMEN DES RESULTATS D'ANALYSES DES EAUX SUPERFICIELLES
DU BASSIN DE LA ROMANCHE

155 II - EXAMEN DES RESULTATS D'ANALYSES DES EAUX SOUTERRAINES
DE LA NAPPE DE JOUCHY

185 III - ETUDE DES PROCESSUS HYDROCHIMIQUES MIS EN JEU

251 IV - MESURES ET APPLICATIONS

277 CONCLUSIONS ET PROLONGEMENTS

285 ANNEXES

313 BIBLIOGRAPHIE

324 LISTE DES FIGURES

329 LISTE DES TABLEAUX

332 TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS

==+==+==+==+==

Parvenue au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier le Syndicat Intercommunal des Eaux de la Région Grenobloise, personnalisé par son Président, monsieur Georges KIOULOU, pour tous les moyens mis à ma disposition et la confiance qui m'a été accordée ; que monsieur A. CORTES, Directeur Général des Services Techniques, ainsi que mes camarades de travail, trouvent ici, l'expression de ma reconnaissance pour leur aide et leur sympathie.

J'ai été très sensible à l'intérêt soutenu, que monsieur le Professeur R. MICHEL a porté à ce travail, à ses encouragements ainsi qu'à l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury.

Je remercie monsieur le Professeur J. SARROT-REYNAULD d'avoir bien voulu lire mon manuscrit, ses conseils et ses critiques ont été bénéfiques à la réalisation de ce travail.

Je ne saurais assez remercier monsieur le Professeur A. RAMBAUD, qui, malgré les distances qui l'ont souvent séparé de la région grenobloise, n'a pas ménagé son temps pour orienter mon travail et pour me prodiguer son aide efficace et ses encouragements constructifs.

Monsieur le Professeur J. ROCHAT m'a toujours accueillie avec la compétence et la gentillesse que chacun lui connaît. Qu'il en soit sincèrement remercié.

Je remercie également monsieur le Docteur J. VIAL, Directeur Adjoint de l'Institut Pasteur de Lyon, de me faire l'honneur de faire partie de ce jury.

Avant moi, d'autres hydrogéologues ont contribué à la connaissance de la nappe de Jouchy. Je tiens particulièrement à souligner combien a été fructueuse la collaboration avec monsieur J. DUBUS, Géologue-Conseil, qui a bien voulu me faire profiter de son expérience et de ses connaissances approfondies de la région. Son soutien m'a beaucoup encouragée et ce travail doit beaucoup aux amicales discussions que nous avons eues.

Il m'est particulièrement agréable de remercier mademoiselle M.C. VERDE, qui a assuré avec talent et rapidité, la frappe et la présentation définitive de ce travail.

Enfin, je ne saurais oublier mes amis et les membres de ma famille qui ont dû subir avec patience mes enthousiasmes tout comme mes découragements.

Ce travail est dédié à Marianne, Luc, Hélène et Gérard.

RESUME

MOTS CLES - ALPES FRANCAISES - VALLEE DE LA ROMANCHE - NAPPE SOUTERRAINE ALLUVIALE - BILANS HYDROGÉOLOGIQUES - RELATIONS NAPPE-RIVIERE - HYDROCHIMIE EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE - ENREGISTREMENTS RESISTIVITE - PROTECTION QUALITE EAU.-

Après avoir décrit le cadre géographique et géologique de l'étude, j'ai tout d'abord regroupé les informations utiles à la connaissance de l'unité hydro-géologique que constitue le bassin versant de la Romanche, situé à l'amont de la plaine de Jouchy. J'ai accordé une attention particulière à l'étude du remplissage alluvial quaternaire de la vallée, notamment à l'étude de celui de la plaine de Jouchy, à Saint-Pierre-de-Mésage. Celle-ci, comprise entre deux verrous rocheux, est constituée d'une couche d'alluvions gravelo-sableuses de 80 à 100 m d'épaisseur, qui repose sur le socle cristallin et dans laquelle circule une puissante nappe souterraine, actuellement exploitée pour l'alimentation en eau potable de la région grenobloise.

Les résultats des essais de pompages effectués m'ont permis de calculer les caractéristiques de la couche supérieure des alluvions, la plus perméable, située à moins de trente mètres de profondeur et dans laquelle s'effectue la majeure partie des échanges (infiltrations, pompages, etc.). Son coefficient de perméabilité est proche de 10^{-2} m/s et la porosité efficace s'élève à 15 %. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par d'autres méthodes classiques en hydrogéologie.

La piézométrie de la nappe, établie à partir des nombreux relevés journaliers ou hebdomadaires, effectués au cours des années d'exploitation, m'a permis de rassembler de nombreuses informations sur les mouvements hydrodynamiques de la nappe.

Ainsi, les bilans hydrogéologiques calculés, mettent en évidence que les infiltrations, dont le débit varie de 800 à 1 600 l/s suivant les saisons, proviennent essentiellement de la Romanche, les apports directs des précipitations et des eaux de ruissellement sur les versants représentant moins de 10 % des infiltrations totales. La zone d'infiltration préférentielle des eaux en provenance de la Romanche, se situe à l'amont de la plaine ; en hautes eaux, les crues de la rivière sont favorables au décolmatage du lit et des berges ; d'autres zones d'infiltration sont alors créées et participent à la recharge de la nappe. Les hautes eaux de la Romanche, au printemps et en été, sont donc tout à fait favorables à la recharge naturelle de la nappe à une saison où elle est le plus sollicitée par les pompages.

C'est au régime nivo-glaciaire de la rivière et grâce aux apports successifs de ses principaux affluents, l'Eau d'Olle et le Vénéon, que ses hautes eaux s'étalent du mois d'avril au mois de septembre. Mais les aménagements hydro-électriques de la vallée réduisent considérablement les débits transitant au droit de la plaine de Jouchy. La mesure des débits, particulièrement intéressante pour la gestion de la nappe souterraine alluviale est rendue difficile par le caractère sinueux de la rivière dans cette portion de son cours. Les débits moyens journaliers ou mensuels sont donc estimés par le calcul. Deux méthodes sont utilisées.

Près de 2 000 eaux, superficielles et souterraines, ont été prélevées dans le bassin versant de la Romanche. Les analyses effectuées permettent d'étudier les caractéristiques physico-chimiques et les variations de la minéralisation totale des eaux, dans le but de préciser leur évolution dans l'espace et dans le temps.

Les eaux souterraines de la nappe de Jouchy constituent un ensemble homogène du point de vue hydrochimique. Ce sont des eaux essentiellement bicarbonatées, sulfatées, calciques et magnésiennes. Bien que leurs caractéristiques essentielles soient comparables à celles de la Romanche, transitant à l'amont de la plaine, les eaux souterraines sont toutes, à un moment donné, plus minéralisées que les eaux de la rivière ; leur minéralisation totale, moyenne ou faible, s'accroît dans le sens de l'écoulement de la nappe et leurs variations saisonnières se manifestent avec d'autant plus de retard et d'atténuation que le point considéré est plus éloigné des zones d'infiltration.

L'interprétation des résultats des analyses physico-chimiques (effectuées depuis 1975) et isotopiques (H, S), s'appuie sur :

- 1) la mise en oeuvre d'expériences faites :
 - . au laboratoire (essais de percolation sur les sables alluvionnaires),
 - . sur le terrain (enregistrements continus des températures et des résistivités des eaux),
- 2) l'application d'une méthode de calcul des équilibres calco-carboniques (méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER) et de sa représentation graphique. La mise en oeuvre de cette méthode a nécessité l'établissement du programme TIESANAL qui a permis de traiter plus de 200 analyses d'eaux.

L'étude des processus hydrochimiques mis en jeu a permis d'attribuer définitivement l'augmentation de la minéralisation totale des eaux au cours du cheminement souterrain :

- 1) au mélange des eaux des apports souterrains avec celles infiltrées en provenance de la Romanche ;
- 2) à l'acquisition des sels minéraux, (notamment du sulfate de calcium) au contact des sables alluvionnaires dans les zones non saturées de la nappe. Elle a permis de mettre en évidence que les variations hydrochimiques sont liées aux mouvements hydrodynamiques de la nappe et par conséquent que les problèmes quantitatifs et qualitatifs qui peuvent se poser, sont intimement liés ; ils doivent donc être traités conjointement, pour le maintien des ressources et la conservation de la qualité des eaux.

Les relations entre la conductivité, enregistrée ou facilement mesurable sur le terrain, et les autres caractéristiques physico-chimiques des eaux, établies à partir des résultats des analyses, permettent de mettre en évidence tout changement quantitatif ou qualitatif intervenant sur la nappe, dans les conditions d'alimentation, d'écoulement et d'exploitation actuelles.

Deux exemples d'application de ces relations sont donnés.

ABSTRACT

KEY WORDS - FRENCH ALPS - VALLEY OF ROMANCHE RIVER - ALLUVIAL GROUND WATER TABLE - HYDROGEOLOGICAL BALANCE SHEETS - AQUIFER RIVER RELATIONS - Ca CO₂ BALANCE RESISTIVITY RECORDS - PROTECTION WATER QUALITY.-

After having described the geographical and geological setting of this study, I have then gone on to bring together all the useful data concerning the hydro-geological unit which constitutes the drainage basin of the Romanche river, situated upstream of the Jouchy plain. I have paid particular attention to the study of the quaternary alluvial filling of the valley, notably that of the Jouchy plain, at Saint-Pierre-de-Mésage. This latter, which is situated between two rock-bars, is made up of a 80 to 100 m deep layer of gravel and sand, which rests on crystalline bed rock. Through this runs a powerful ground-water table which at present is used in order to provide a supply of drinking water to the Grenoble region.

The results of pumping tests have enabled me to calculate the characteristics of the upper layer of alluvia, which is the most permeable and is less than 30 m below the surface. It is in this layer that most of the exchanges take place (infiltrations, pumping, etc.). Its coefficient of permeability is around 10^{-2} m/s, and its effective porosity amounts to 15 %. These results are comparable to those obtained by other conventional methods in hydrogeology.

The piezometry of the water table, which has been arrived at through numerous daily and weekly samplings, taken during years of use, has enabled me to gather abundant data concerning the hydrodynamic movements of the aquifer.

Thus, the results of the hydro-geological balance-sheets show clearly that the infiltrations, whose flow rate varies between 800 and 1 600 l/s, depending on the season, come mainly from the Romanche river. The direct contribution of run off water precipitations accounts for less than 10 % of total infiltrations. The preferential infiltration zone of water from the Romanche is situated upstream of the plain. In periods of high water, the spates of the river are liable to unelog the bed and the banks ; in this case, other zones of infiltration are then created and help to refill the water table. The high water on the Romanche river, in spring and in summer, is thus quite conducive to the natural refilling of the aquifer at a period when it is most used for pumping purposes.

It is because of the snowy-glacial regime of the river and the successive contributions of its main affluents, the Eau d'Olle and Vénéon rivers, that the high water extends from april until september. However the hydroelectric installations in the valley reduce substantially the flow rates of the water along the Jouchy plain. The management of these flow rates, which is of particular interest in the marasement of the alluvial water table is rendered difficult by the sinuous nature of the river in this area. The average daily or monthly flow rates are therefore estimated by computation.

Two methods are used.

Nearly two thousand samples of water, on the surface and underground, have been tested in the drainage basin of the Romanche river. The analyses which have been carried out make it possible to study the physico-chemical characteristics of the water, and the variations in total mineral content in order to determine their evolution in time and space.

The ground water in the Jouchy aquifer is homogeneous from a hydro-chemical point of view. The water is mainly bicarbonated, sulfated, calcic and magnesian. Although its characteristics are much the same as those of the Romanche river, upstream of the plain, the ground water has always a higher mineral content than the river. Their total mineral content, medium or low, is accentuated as the aquifer flows on, and their seasonal variations are all the slower to appear and all the more attenuated as the distance from the infiltration zone increases.

The interpretation of the results of the physico-chemical analyses (carried out since 1975) and of the isotopic analyses is based on :

- 1) the implementation of experiments carried out :
 - . in the laboratory (percolation tests on alluvial sands),
 - . on the spot (regular registering of the temperature and resistivity of the water).
- 2) the application of a method of calculating the Ca-CO₂ balance (method of L. LEGRAND and G. POIRIER) and its graphic representation. The implementation of this method required a TIESANAL programme to be set up. This latter made it possible to treat 200 water analyses.

The study of the hydro-chemical processes involved made it possible to attribute definitively the increase in the total mineral content of the water as it passed underground :

- 1) to the mixing of water from underground with that infiltrated from the Romanche river ;
- 2) to the acquisition of mineral salts (notably calcium sulfate) from contact with alluvial sands in the non-saturated zones of the aquifer. Thus it has been possible to show that the hydro-chemical variations are linked with the hydro-dynamic movements of the aquifer and, consequently, that the quantitative and qualitative problems which may arise are intimately related. Thus they should be dealt with together in order to maintain the resources and conserve the quality of the water.

The relations between conductivity, registered or easily measured on the spot, and the other physico-chemical characteristics of the water, which are established on the bases of the analysis results, make it possible to highlight any quantitative and qualitative change occurring in the aquifer under present of feeding, of flow and used conditions.

Two examples of application of these relations are given.

Et si l'on observe tout ce qui se trouve dans la montagne, son origine... sources, lacs, torrents, fleuves immenses, variétés infinies de plantes, animaux de toutes sortes, on découvre une foule de merveilles et curiosités. J'ai bien souvent réfléchi à tout cela ; souvent j'ai rassasié mes yeux de la douce contemplation des cimes.

Josias SIMLER - O.S. 1861 - Grich 1574.-

Univ. J. Fourier - O.S. 1861
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 43 58
Mail : prabour@ujf-stie.rodie.fr

Les rapports du Service Géologique National (S.G.N.), de 1977 et de 1979, ainsi que ceux de l'Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux (A.G.H.T.M.) de 1981 font état des récentes évaluations de la ressource totale en eau du territoire français qui s'élèverait à 180 km³/an. Une première fraction de cette ressource (70 km³/an) ruisselle et constitue le réseau hydrographique (eaux de surface). L'autre fraction (100 à 110 km³/an) s'infiltré dans le sol et le sous-sol, et contribue ainsi à renouveler la presque totalité des réserves souterraines ; elle vient s'ajouter aux réserves permanentes qui ne représentent que quelques centaines de km³. En fait, la totalité des eaux souterraines des réserves renouvelables et permanentes, ne peut être exploitée. D'une part, ces eaux sont irrégulièrement réparties sur le territoire français, à cause des conditions hydrogéologiques très diverses, et ne correspondent donc pas toujours localement aux besoins ; d'autre part, elles ne sont pas toujours de qualité acceptable. Il est encore difficile d'annoncer un chiffre représentant les ressources en eaux souterraines réellement exploitables. Quoiqu'il en soit, ces ressources sont supérieures aux besoins actuels en eau destinée à la consommation humaine, qui s'élèvent à moins de 5 km³/an (A.G.H.T.M. 1981), c'est-à-dire à environ 1/5e des besoins totaux pour l'industrie, l'alimentation en eau potable, l'agriculture ou les loisirs... ; elles sont généralement supérieures aux besoins prévisibles pour l'an 2000, estimés à environ 8 km³/an (S.G.N. 1977).

Souvent, dans la pratique, choisir la ressource en eau destinée à la consommation humaine consiste à faire le choix entre les eaux de surface et les eaux souterraines, bien qu'il existe entre les deux types de ressources des interférences et des complémentarités. Les eaux de surface sont partout disponibles en France, mais leur débit est très variable ; elles ne suffisent pas toujours en période sèche ; elles présentent une grande vulnérabilité aux pollutions chimiques et aux contaminations bactériennes. Les eaux souterraines sont moins sensibles aux variations naturelles de leurs réserves et elles se caractérisent par une plus grande constance de la qualité assurée par une meilleure protection contre les pollutions.

PAYS (classés par ordre de % décroissant de la part d'eau souterraine)	Pourcentage des quantités d'eau distribuées selon leur origine			Eau de Surface
	Eau souterraine *			
	Eau captée ou: pompe dans les nappes (1)	Eau de Source (2)	Total (1+2)	
Autriche	46	53	99	1
Danemark	98	0	98	2
Italie	57	36	93	7
Allemagne-W (RFA)	75	16	91	9
Hongrie	/	/	88	12
Suisse	42	42	84	16
Pays-Bas	83	0	83	17
Allemagne-E (DDR)	/	/	80	20
Bulgarie	/	/	80	20
Belgique	71	0	71	29
U.R.S.S.	/	/	70	30
Luxembourg	5	65	70	30
Tchécoslovaquie	/	/	58	42
Pologne	/	/	50	50
FRANCE	31	17	48	52
Suède	47	0	47	53
Grande-Bretagne	/	/	31	69
Finlande	/	/	30	70
Espagne	27	2	29	71
Norvège	/	/	5	95

* Y compris avec réalimentation artificielle, notable seulement en R.F.A. (20 %), aux Pays-Bas (19 %) et en Suède (21 %).
(statistiques provenant de plusieurs sources : Association internationale des distributions d'eau pour l'Europe de l'Ouest (1973 à 1975), pour l'Europe de l'Est (1965 à 1970).

Tableau 1 - Origine des eaux d'alimentation distribuées en Europe -
(d'après G. LEYNAUD, 1977). -

La législation française (circulaire du 15 mars 1962) préconise de choisir préférentiellement, pour tout projet d'alimentation en eau potable des collectivités, les gisements aquifères souterrains, "susceptibles de fournir des eaux naturellement pures". Pour convaincante qu'elle puisse paraître, cette solution n'a pas souvent été adoptée, malgré l'importance de la ressource exploitable. En 1970, on estimait qu'un peu moins de la moitié des eaux distribuées en France était d'origine souterraine (tableau 1). Selon l'A.G.H.T.M. (1981), les nouvelles évaluations effectuées par les Agences de Bassin en 1975, celles des Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement et celles du Syndicat Professionnel des Distributeurs d'Eau, permettent d'estimer actuellement à 60 % le pourcentage des eaux distribuées, d'origine souterraine. Dans d'autres pays européens voisins comme l'Autriche, le Danemark, l'Italie ou l'Allemagne (R.F.A.) plus de 90 % des eaux destinées à l'alimentation ont cette origine. Sans doute, la possibilité de capter des eaux superficielles en quantité appréciable, le développement de techniques de traitement, les impératifs économiques d'aménagement et de gestion, ont entraîné un grand nombre de collectivités françaises à opter pour les solutions les plus radicales, dans un contexte de développement industriel et urbain où la production d'eau en quantité importante paraissait l'objectif déterminant. Plus récemment, et notamment depuis l'année de sécheresse de 1976, les besoins accrus en eau, l'aggravation des pollutions, la dégradation des lacs et des rivières ainsi qu'une opinion de plus en plus sensibilisée, ont replacé au premier plan les problèmes de qualité et revalorisé les captages en eau souterraine. En France, de nombreux colloques ont été consacrés à ce sujet ("Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine" - B.R.G.M. - Orléans, mars 1977 - "Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France" - B.R.G.M. - Nice, octobre 1977 - "L'eau, la recherche et l'environnement" - Rennes, 1975 - Montpellier, 1977 - Limoges, 1979 - A.G.H.T.M., 1981, etc.).

Dans ce contexte, la solution du captage des eaux souterraines de la vallée de la Romanche adoptée par le S.I.E.R.G. en 1958, dans une zone particulièrement riche en ressources souterraines d'eau de bonne qualité, offrait incontestablement les meilleures garanties pour l'avenir.

Après la mise en service de la première station de pompage de Pré-Grivel (Vizille), en 1961, les besoins nouveaux, liés à l'expansion démographique des communes du Syndicat, ont conduit à envisager l'installation d'un deuxième captage dans la nappe alluviale de la Romanche, située entre Séchillienne et Vizille. Les premières études hydrogéologiques et géophysiques, confiées par la Direction Départementale de l'Agriculture à la Compagnie de Prospection Géophysique Française (C.P.G.F.) en 1964 ont permis de localiser à Jouchy, en rive gauche de la Romanche, la zone la plus favorable à l'exploitation de la nappe. En effet, les bilans hydrogéologiques effectués ont montré que, dans cette zone, les ressources disponibles en eau de bonne qualité sont suffisamment abondantes. Les sondages mécaniques et électriques effectués ont permis d'y reconnaître les meilleures transmissivités.

Au cours de l'exploitation du premier puits de Jouchy qui a débuté en juin 1967, la surveillance de la nappe alluviale a fourni de nouveaux renseignements sur l'évolution des réserves souterraines.

En 1973, le bilan hydrogéologique de cinq années d'exploitation (1966-1970) effectué par J. DUBUS a permis de conclure à la conservation des ressources disponibles et d'envisager avec optimisme la poursuite de l'exploitation de la nappe. Mais, du fait de l'importance reconnue des infiltrations en provenance de la Romanche, un certain nombre d'incertitudes demeuraient en ce qui concerne l'évolution de la qualité des eaux souterraines.

Afin d'assurer la protection de la qualité des eaux, la législation française a prévu des mesures préventives et des contrôles.

Les mesures préventives consistent dans la détermination des périmètres de protection entourant les points de prélèvements. Mais comme le signalent M. ALBINET (1977) ou J. PERSON (1979), devant les difficultés reconnues de définir les périmètres de protection efficaces des nappes souterraines alluviales, la reconnaissance des risques encourus ne peut se limiter au cadre restreint d'un périmètre immédiat ou rapproché. La protection des nappes souterraines alluviales se confond, avec celle, plus générale, de l'unité hydrogéologique que constitue le bassin versant ; elle suppose la connaissance circonstanciée des mécanismes et des paramètres susceptibles de modifier leur vulnérabilité.

Pour contrôler la qualité des eaux, la législation a prévu des analyses bactériologiques et chimiques "fréquentes" des eaux captées et des eaux distribuées. Dans ces conditions, que les résultats mettent en évidence la potabilité de l'eau ou au contraire, la présence d'une contamination ou d'une pollution, l'interprétation des analyses ne peut être qu'un constat de fait, intervenant à posteriori ; elle n'a rien de préventif. Or, la qualité des eaux captées et distribuées est l'expression et la résultante des différents paramètres conditionnant leurs caractéristiques et leur vulnérabilité. Donc, pour corriger ou maintenir la qualité d'une eau, il faut agir préventivement sur ces facteurs et par conséquent en connaître les effets. Comme l'interprétation des données hydrogéologiques permet d'établir un bilan quantitatif et de prévoir avec plus de sécurité le comportement de la nappe lors de son exploitation future, l'examen des résultats d'analyses effectuées en cours d'exploitation doit permettre de dresser un bilan qualitatif et de prévoir l'évolution de la qualité des eaux dans de nouvelles conditions hydrodynamiques.

Le point de vue de l'hygiéniste qui apprécie la potabilité des eaux doit rejoindre celui du géologue qui en détermine l'origine et la vulnérabilité.

L'intervention de l'hydrogéologue dans le choix, l'exploitation et la protection des captages des eaux destinées à l'alimentation suppose donc une connaissance pluridisciplinaire qui recouvre à la fois le domaine de la géologie, celui de l'hydrologie, celui de l'hygiène, celui de l'hydrochimie et celui du génie civil. J'ai essayé de résumer dans le *tableau 2* les différents niveaux où interviennent ces disciplines en notant les informations qu'elles sont susceptibles de fournir et les services que peut rendre leur interprétation dans la gestion des eaux souterraines.

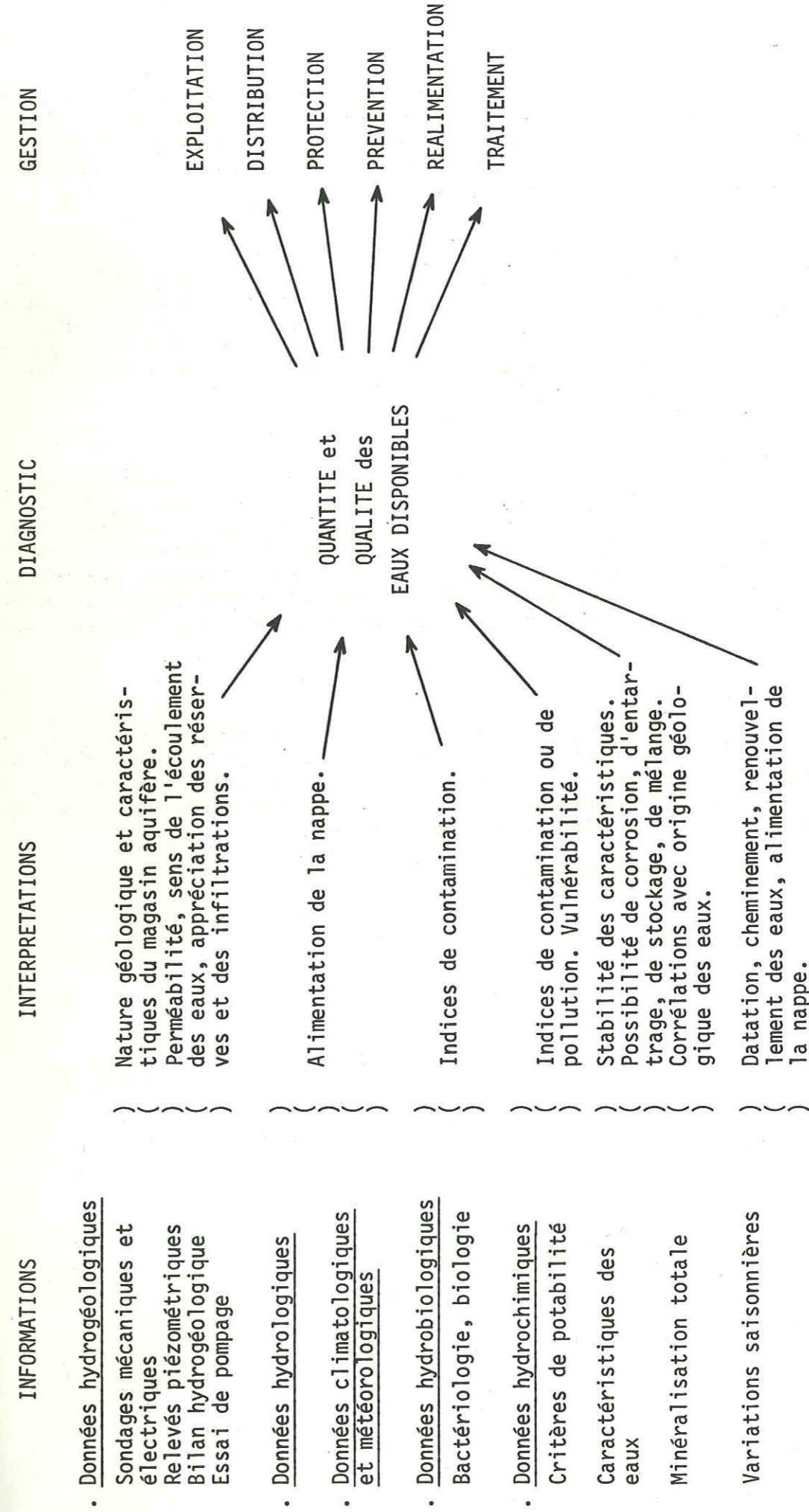


Tableau 2 - Schéma de l'étude continue d'une nappe souterraine en exploitation.

Actuellement, après plus de dix années d'exploitation de la nappe de Jouchy et à la veille de prendre de nouvelles décisions d'aménagement, devenues nécessaires (mise en marche du nouveau puits, réalimentation artificielle de la nappe, etc...), les recherches présentées dans ce mémoire viennent compléter les études initiales déjà effectuées.

Après avoir décrit, le cadre géographique et géologique de l'étude, j'ai regroupé dans une première partie, les informations utiles à la connaissance de l'unité hydrogéologique que représente le bassin versant de la Romanche, situé à l'amont de la plaine de Jouchy. Un chapitre est consacré à l'étude hydrogéologique de la nappe et aux mesures effectuées depuis 1966 permettant d'établir de nouveaux bilans quantitatifs.

La deuxième partie de ce travail est consacrée à l'étude hydrochimique. L'examen des résultats d'analyses des eaux prélevées dans le bassin versant permet d'expliquer les caractéristiques des eaux de la Romanche telle qu'elle se présente à l'amont immédiat de la plaine de Jouchy. L'interprétation des résultats d'analyses des eaux souterraines et l'étude des processus hydrochimiques contribuent à une meilleure connaissance des relations nappe-rivière et de l'évolution des caractéristiques des eaux infiltrées au cours du cheminement souterrain.

Enfin, l'interprétation synthétique des résultats me permet d'envisager l'utilisation des connaissances acquises, sur lesquelles pourront s'appuyer de nouvelles décisions de gestion, dans le souci de répondre à deux exigences essentielles, la conservation de la quantité des ressources disponibles et le maintien de la qualité des eaux distribuées.

=====
=:::==



CADRE GEOGRAPHIQUE,

GEOLOGIQUE et

HYDROLOGIQUE de l'ETUDE



Figure 1 - Situation géographique de la région étudiée.-

I - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CADRE GEOLOGIQUE DE L'ETUDE

I-1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE - CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DE LA ROMANCHE -

La Romanche, sous-affluent de l'Isère, prend sa source dans le massif du Pelvoux à près de 3 500 m d'altitude et, après un parcours de 75 km rejoint le Drac à 10 km environ au Sud de Grenoble, à 260 m d'altitude (figures 1 et 2).

Son bassin versant totalise 1 204 km² ; il est essentiellement montagneux. Il comprend les versants des massifs du Pelvoux et de la Meije, des Grandes Rousses, de la Chaîne de Belledonne et du Taillefer. Il culmine à 4 013 mètres dans la Barre des Ecrins (massif du Pelvoux) et compte quelques sommets à une altitude proche de 4 000 m (la Meije : 3 983 m...).

Les principaux affluents de la Romanche, traversent eux aussi des massifs montagneux de haute altitude ; le Vénéon collecte les eaux des versants du massif du Pelvoux ; l'Eau d'Olle draine celles des versants des massifs des Grandes Rousses et de Belledonne. 8,2 % des surfaces du bassin versant de la Romanche sont situés à plus de 3 000 m d'altitude et 52 % à plus de 2 000 m (figure 3 et tableau 3).

Le bassin versant de la Romanche présente donc une forte proportion de régions susceptibles d'être enneigées plusieurs mois de l'année. La neige et les névés constituent l'essentiel de ses réserves en eau, disponibles régulièrement. C'est à la fonte des neiges puis à celle des névés, au printemps et en été, que l'on doit attribuer l'essentiel de l'alimentation de la rivière.

FIGURE 2

SCHEMA HYDROGRAPHIQUE DE LA ROMANCHE ET DE SES AFFLUENTS

SUPERFICIE DES BASSINS VERSANTS

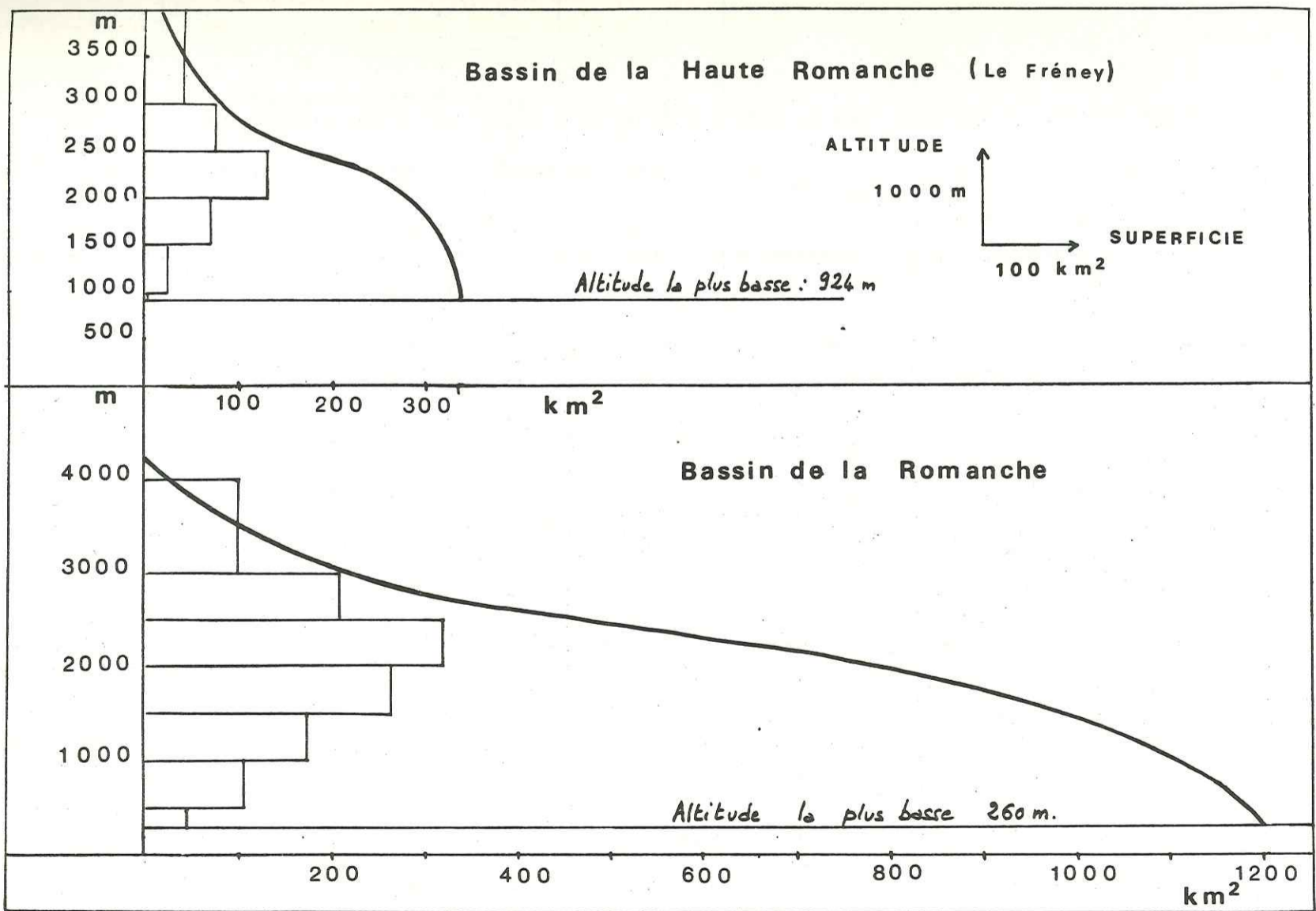
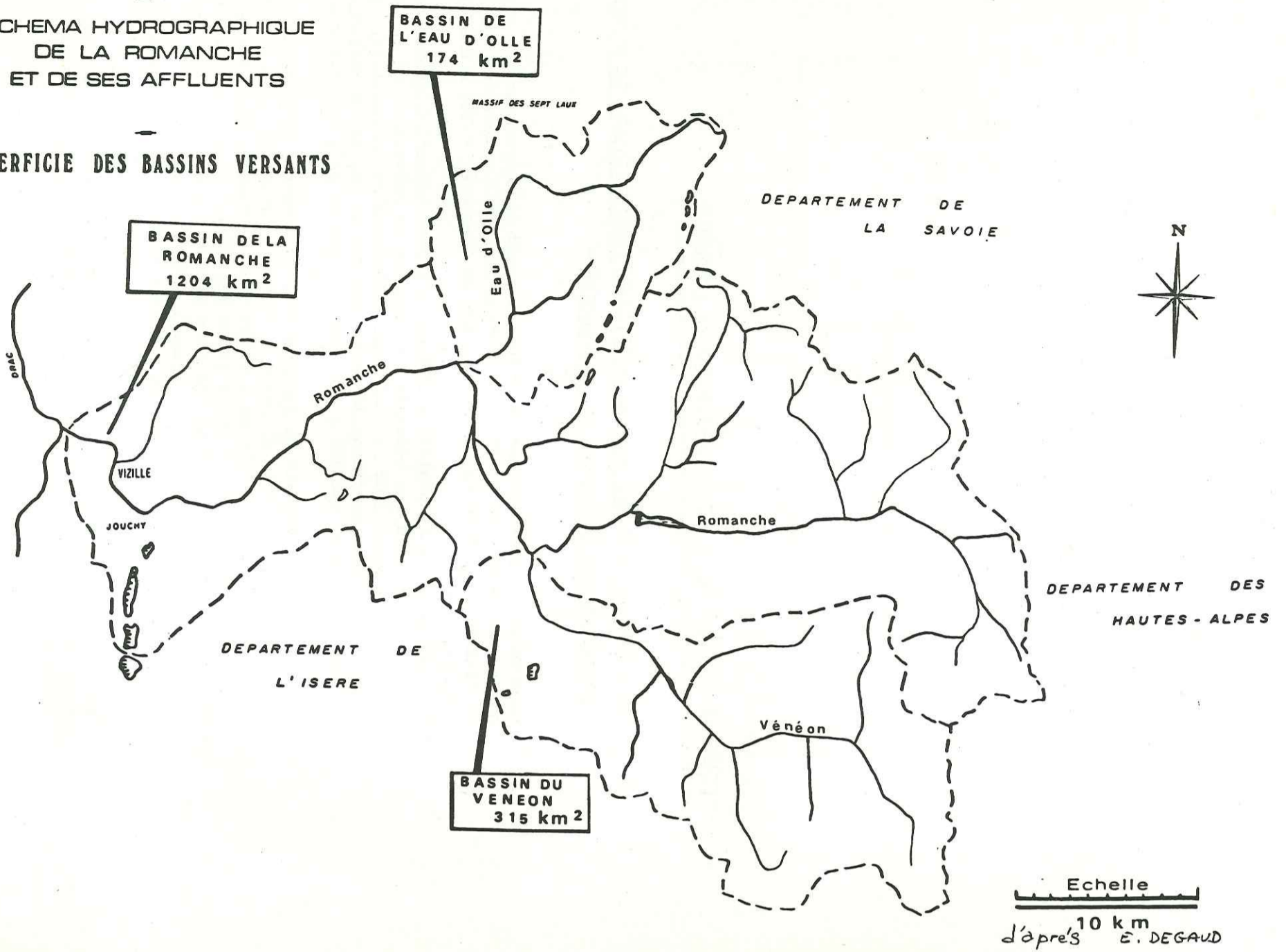


Figure 3 - Courbes hypsométriques et fréquence altimétrique dans le bassin de la Romanche.-

Etagement de la végétation	Etage collinéen < 800 m		Etage montagnard 800 à 1 500 m		Etage subalpin 1 500 à 2 000 m		Etage alpin 2 000 à 2 900 m		Etage nival et glaciaire
	< 500 m	500 à 1 000 m	1 000 à 1 500 m	1 500 à 2 000 m	1 500 à 2 000 m	2 000 à 2 500 m	2 500 à 3 000 m	> 3 000 m	
ALTITUDES	Total								
Bassin de la haute Romanche au Freney	0	0,3	20,7	70,00	132	71,7	40,6		
	0	0,1	6,2	20,9	39,4	21,4	12		
					314 km ²		73 %		
au Pont de la Vénéon (sous bassins du Vénéon et de l'Eau d'Olle compris) Altitude moyenne : 2 122 m	0	47,8	118,6	228,5	302,4	206,7	98,7		
	0	4,8	11,8	22,8	30,2	20,6	9,8		
à Gavet	0,5	59,5	131,5	247,5	316,0	207	98,7		
Altitude moyenne : 2 090 m	0,05	5,6	12,4	23,3	29,8	19,5	9,3		
à Jouchy	9,8	85	158,4	256	318,6	207	98,7		
Altitude moyenne : 1 915 m	0,9	7,5	14	22,6	28,1	18,3	8,7		
	253 km ²		22 %		575 km ²		51 %		306 km ²
	18,9	89,6	160,4	256	318,6	207	98,7		
à Vizille	1,6	7,8	14	22,3	27,7	18	8,6		
à Champ-sur-Drac	42,9	102,9	171,7	262,2	318,6	207	98,7		
	3,6	8,5	14,3	21,8	26,5	17,2	8,2		
Bassin du Vénéon	314 km ²		76 24 %						238 76 %
Bassin de l'Eau d'Olle	174 km ²		38 km ² 22 %		136 km ²		78 %		86 km ² 50 %

Tableau 3 - Répartition des altitudes dans le bassin versant de la Romanche (d'après les annales des Services d'Etude des Grandes Forces Hydrauliques - 1905).

L'originalité du bassin versant de la Romanche est liée à la présence d'un grand nombre de glaciers. L'inventaire des glaciers français, effectué depuis 1967 à l'aide de fiches d'identification (R. VIVIAN - 1970), a permis de dénombrer dans le bassin 226 glaciers de surfaces différentes (tableau 4).

Ils sont, pour la plupart, de petite taille puisque plus de 50 % des glaciers fichés ont moins de 0,01 km² et 0,5 % plus de 0,5 km². Ces glaciers représentent environ 37 % du nombre total des glaciers des Alpes Occidentales pour 24 % de la surface totale englacée (J.L. EDOUARD - 1978).

La grande majorité de ces glaciers est située dans le sous-bassin du Vénéon (51 % de la surface englacée, 67 % du nombre des glaciers) et dans le haut-bassin de la Romanche (41 % de la surface englacée, 28 % du nombre des glaciers). Le reste est réparti dans le sous-bassin de l'Eau d'Olle et le bassin moyen de la Romanche, en rive gauche. Les glaciers représentent une ressource potentielle en eau douce. D'après les travaux les plus récents (P. SITZMANN - 1961, R. VIVIAN - 1975, J.L. EDOUARD - 1978...), les glaciers de l'Oisans, relativement fragiles, sont marqués, comme l'ensemble des glaciers alpins, par un constant mouvement de décrue commencé vers 1860.

BASSINS VERSANTS	Surface du bassin versant km ²	Surfaces englacées		Nombre des glaciers
		km ²	% des surfaces dans le B.V. considéré	
• A la confluence Romanche-Vénéon (bassin du Vénéon exclu)	362	31	8,6	63
• Bassin du Vénéon seul	315	39	12,4	151
• A la confluence Romanche-Vénéon (bassin du Vénéon compris)	677	70	10,3	
• Bassin de l'Eau d'Olle	174	3,8	2,2	10
• A la confluence Romanche-Eau-d'Olle (bassins de la Sarenne et de la Lignarre compris)	968	75	7,8	
• A la confluence Romanche-Drac	1 204	76	6,3	226

Tableau 4 - Répartition des surfaces englacées et dénombrement des glaciers (d'après J.L. EDOUARD - 1978) dans le bassin versant de la Romanche.-

Comment la fonte des glaciers intervient-elle dans l'alimentation des rivières ?

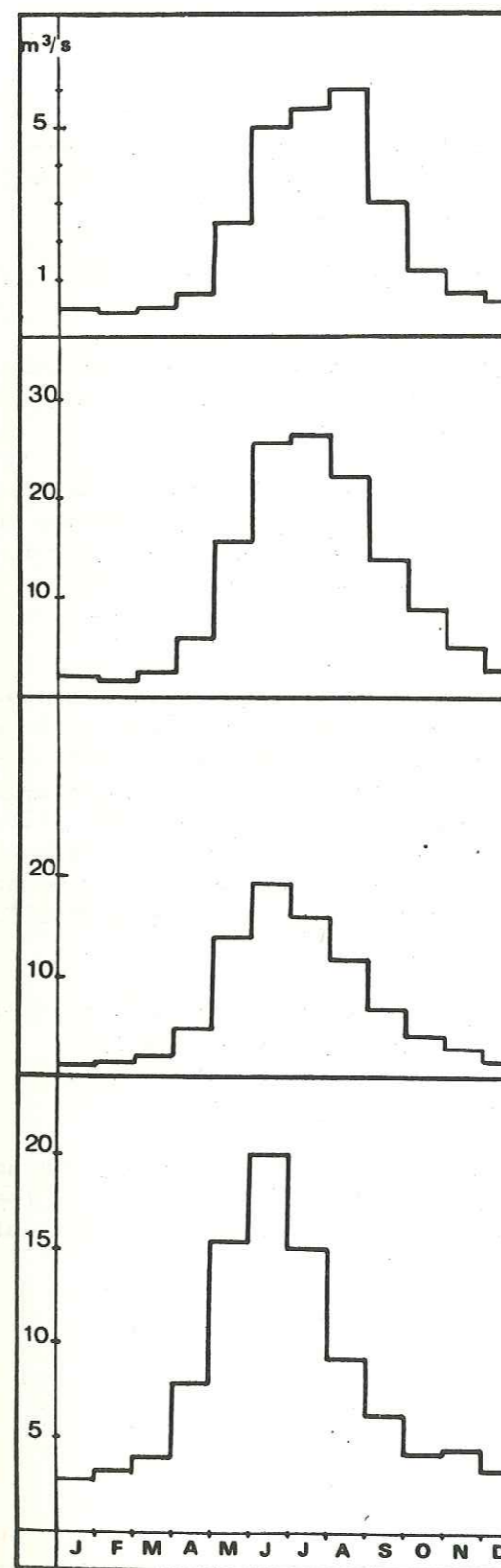
Le volume total d'eau stocké dans les glaciers est difficilement calculable. J.L. EDOUARD (1978) appliquant la formule de F. MULLER (1) et attribuant aux glaciers de moins de 0,5 km² une épaisseur de 5 m, estime à 1,8.10⁹ m³ le volume de la glace accumulé dans les glaciers du bassin versant de la Romanche. Ce volume est relativement faible puisqu'il représente environ 30 fois la capacité du réservoir du Lac Chambon (50 hm³).

Mais plus que par la quantité d'eau stockée, non directement utilisable, c'est par leurs particularités intrinsèques que les glaciers des Alpes jouent un rôle important dans l'alimentation des rivières :

- Ils sont situés à proximité des zones utilisatrices (zones habitées ou industrielles), contrairement aux autres réserves mondiales en glace, essentiellement concentrées loin des zones habitées en latitude (zones polaires) ou en altitude (glaciers des Andes).
- Ils restituent de l'eau douce à une époque où les principaux apports sont taris. C'est en effet, en été, alors que les précipitations sont les moins abondantes et que la fonte des neiges est terminée que la fonte des glaciers devient possible.
- Ils ont une influence positive sur le régime des précipitations. Dans les régions tempérées où les glaciers sont nombreux, on peut constater que le gradient pluviométrique est supérieur à la moyenne de 0,5 mm/m d'altitude. Ainsi, au voisinage du massif du Mont Blanc, le gradient pluviométrique atteint 1 mm/m.

Comme je l'ai dit, la fonte des neiges joue donc le rôle principal dans l'alimentation de la majorité des rivières du bassin versant. Leurs débits maxima sont atteints au mois de juin, lors de la fonte des neiges ; mais plus la surface englacée est importante ou proche en altitude, plus l'influence glaciaire se fait sentir sur le régime des rivières et plus la période des hautes eaux se prolonge au cours des mois d'été (juillet et août). L'influence des glaciers sur le débit des rivières du bassin versant peut donc être mise en évidence par l'examen des débits spécifiques du mois d'août, mois au cours duquel l'ablation glaciaire est la moins concurrencée par la fusion nivale. L'ablation estivale des glaciers est modulée par des facteurs propres au bassin versant (taux d'englacement, exposition des glaciers, pente longitudinale...) et, suivant les années, par des facteurs météorologiques (précipitations neigeuses d'été qui bloquent la fonte des glaciers, importance du manteau neigeux...). L'importance de la participation de la fonte des glaciers à l'alimentation des rivières est donc variable.

(1) - la formule de F. MULLER (in EDOUARD J.L. 1978) relie la surface et l'épaisseur moyenne des glaciers alpins (Épaisseur ± 12 m = 5,2 + 15,4 √ Surface). Elle est applicable aux glaciers dont la surface est comprise entre 0,5 et 23 km².



Régime de type glaciaire
ROMANCHE à VILLAR d'ARENE
(Réf. 1905-1909)

Taux d'englacement du bassin versant :
26 %
====

Régime de type glacio-nival
VENEON au PLAN du LAC
(Réf. 1945-1971)

Taux d'englacement du bassin versant :
14,4 %
====

Régime de type nivo-glaciaire
ROMANCHE au CHAMBON
(Réf. 1950-1977)

Taux d'englacement du bassin versant :
12,2 %
====

Régime de type nival
EAU d'OLLE à la PERNIERE
(Réf. 1961-1975)

Taux d'englacement du bassin versant :
4 %
=

Figure 4 - Régimes et variations saisonnières des débits moyens mensuels des rivières du bassin versant de la Romanche.-

Les rivières du bassin versant présentent des régimes diversifiés (figure 4) :

- . du type glaciaire avec les plus hautes eaux au mois d'août (torrent de la Meije, Romanche à Villar d'Arène, Vénéon aux Etages...) ;
- . du type glacio-nival avec les plus hautes eaux au mois de juillet (Vénéon au Plan du Lac...) ;
- . du type nivo-glaciaire avec des maxima au mois de juin mais avec des hautes eaux s'étalant du mois de mai au mois d'août (Romanche au Chambon, au Champeau...) ;
- . du type nival avec les plus hautes eaux en mai (le Ferrand) et en juin (l'Eau d'Olle). La figure 4 montre l'influence du pourcentage de la surface englacée du bassin versant sur le régime des rivières (d'après J.L. EDOUARD - 1978) (1).

A l'aval de ses confluences avec ses principaux affluents, la Romanche au Champeau (1 000 km²) présente un régime nivo-glaciaire bien caractérisé (figure 21). Le maximum des débits est mesuré en juin mais la décrue est lente et les débits du mois d'août sont quelquefois supérieurs à ceux du mois de mai. Grâce aux apports successifs des eaux des affluents de type nival (notamment l'Eau d'Olle) et de celles des affluents de type glacio-nival (notamment le Vénéon) les hautes eaux de la Romanche au Champeau s'étalent du mois de mai au mois de septembre (figure 22).*

L'influence de l'ablation glaciaire est plus ou moins sensible selon les années ; elle est déterminante lors des années de sécheresse d'été (1920 et 1976).

En aval du Champeau, le régime de la Romanche est influencé par les aménagements hydroélectriques (chapitre II-3) ; il est modulé suivant les points d'observation par les débits réservés, les restitutions des usines hydroélectriques, les apports des versants.

(1) - Pour M. PARDE (1933) le régime d'un torrent de montagne est du type glaciaire lorsque la surface des glaciers dans le bassin versant dépasse 15 %, ceci est valable dans le haut-bassin versant de la Romanche (figure 4).-

* Figure 21 page 68, figure 22 page 69.-

uo : Chevauchement de la zone ultradauphinoise
 sb : Chevauchement de la zone subbriançonnaise

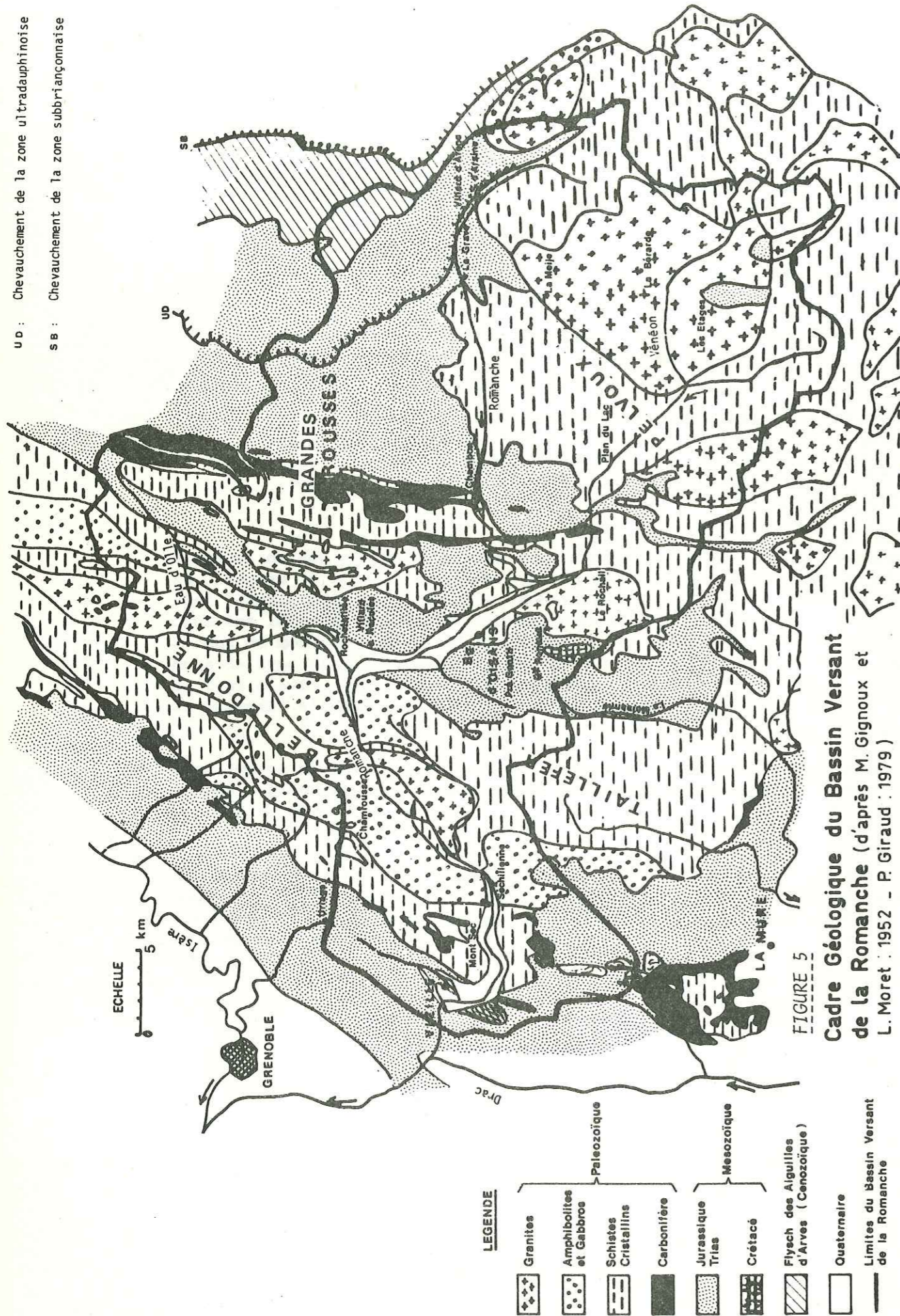


FIGURE 5
Cadre Géologique du Bassin Versant de la Romanche (d'après M. Gignoux et L. Moret : 1952 - P. Giraud : 1979)

I-2 - CADRE GEOLOGIQUE

La géologie du bassin versant de la Romanche a fait l'objet de nombreux travaux depuis ceux de P. TERMIER (1874), de Ch. LORY (1894), de R. BARBIER (1948) et de M. GIGNOUX et L. MORET (1952). Les études sur la morphologie, la tectonique et la pétrographie sont dues, notamment, à P. et Cl. BORDET (1952-60-63), à P. GIRAUD (depuis 1952), A. BARBIERI (1970), F. CARME (1965-70-78), P. LEFORT (1971), R. MICHEL (1958), A. PECHER (1970-71)... en ce qui concerne les terrains cristallins ; à R. BARBIER (1963), J. Cl. BARFETY (1970), M. GIDON (1970), H. BORNUAT (1963), J. DEBELMAS (1960-70), D. DONDEY (1960), J. SARROT-REYNAULD (1961-63), J. VERNET (1964), P. VIALON (1968)... en ce qui concerne les terrains sédimentaires. Plus récemment, à l'occasion du 26ème congrès géologique international (Paris 1980), J. DEBELMAS et Cl. KERCKHOVE ont fait le point des connaissances actuelles sur les Alpes franco-italiennes, d'après les travaux de P. GIRAUD, M. LEMOINE, J. DESMONS, G. MONTJUVENT...

L'hydrogéologie de la vallée a été localement étudiée par M. GIGNOUX (1947), M. GIGNOUX et L. MORET (1940-42), R. MICHEL et J. ROTHE (1959), M. MARCHAND (1957), la C.P.G.F. (1966-1969), J. SARROT-REYNAULD (1972), J. DUBUS (1973), J. et S. SARROT-REYNAULD (1977).

C'est à partir de ces différents travaux et des notices explicatives des cartes géologiques du Service Géologique National, cartes de Vizille (N° 797) et de la Grave (N° 798) que j'ai essayé, en les résumant, de décrire le cadre géologique du bassin versant de la Romanche.

I-2-1 - Cadre géologique du bassin versant de la Romanche
 (figure 5)

A l'échelle de l'ensemble de l'arc des Alpes Occidentales, on distingue un certain nombre d'unités structurales majeures ou "zones". D'après J. DEBELMAS (1980), les conditions paléogéographiques sont en grande partie à l'origine de l'individualisation ultérieure des zones structurales et, commodément, ces dernières et les domaines paléogéographiques portent le même nom.

Ce sont, de l'intérieur vers l'extérieur de l'arc :

- . les zones internes (zones penniques, zones austro et sud-alpines) qui sont situées en dehors du bassin qui nous intéresse ;
- . la zone externe divisée habituellement en zone dauphinoise et zone ultradauphinoise.

Le bassin versant de la Romanche est entièrement compris dans la zone dauphinoise et ultradauphinoise.

Ces deux zones comportent un socle cristallin ancien, une couverture mésozoïque, partiellement surmontée à l'Est, par du tertiaire (flysch des Aiguilles d'Arves dans la zone ultradauphinoise).

- 1) Le bassin versant de la Romanche draine les massifs cristallins de Belledonne, des Grandes Rousses et du Pelvoux. Ces massifs ont subi des déformations dont les plus importantes, et les plus connues (tectonique alpine) comportent une fracturation (accidents plus ou moins verticaux et grandes failles chevauchantes) et un soulèvement qui, selon J. DEBELMAS (1980), s'est fait "*suivant les voûtes à grand rayon de courbure, toujours plus ou moins fracturées*". Le matériel constitutif de ces massifs comprend des granites et des schistes cristallins. Ils sont difficiles à étudier car ils ont été affectés par les divers accidents des orogénèses hercynienne et alpine.

Les granites :

les plus fréquemment rencontrés dans le bassin de la Romanche datent de 300 M.a. environ. La majeure partie a une tendance monzogranitique (Sept Laux, Vallée de l'Eau d'Olle, massif du Rochail, des Etages) ; on y rencontre aussi des granites alcalins dans la vallée du Vénéon (la Bérarde).

Les schistes cristallins :

selon la synthèse des travaux les plus récents, réalisée par J. DEBELMAS et Cl. KERCKHOVE (1980) on peut reconnaître chronologiquement :

- . les schistes quartzeux du Cambro-Ordovicien, intercalés au milieu d'une série métamorphique dans les Grandes Rousses,
- . les ensembles dévono-dinantiens (quartzites et micaschistes, etc.) situés notamment dans le massif de Belledonne (série verte supérieure), dans celui du Taillefer, dans l'Est du massif des Grandes Rousses, et dans le Sud-Ouest du massif du Pelvoux.

On reconnaît aussi :

- . des gneiss, avec intercalations d'amphibolites, ayant subi une seule migmatisation récente,
- . des gneiss ayant subi deux migmatisations, et des blastomylonites,
- . des schistes, quartzites, leptynites à chlorite et sericite de la série satinée du rameau externe de Belledonne.

- 2) Sur ces assises cristallines et cristallophyliennes reposent les terrains du Mésozoïque.

La vallée de la Romanche recoupe des synclinaux houillers du Westphalien-Stephanien, alignés sur les fractures du socle cristallin dans les massifs des Grandes Rousses et de Belledonne ; quelques pincées synclinales de Houiller (schistes noirs micacés, grés, conglomérats, anthracite) ont été autrefois exploitées (mines de l'Herpie dans le massif de Belledonne, mines de Saint-Barthélémy-de-Séchilienne dans le massif du Taillefer, etc.).

Le Permien est absent et le Trias se limite aux minces couches de grés et de conglomérats de base, aux dolomies grises ou rousses, plus ou moins schisteuses ou calcaires, présentes dans les massifs de Belledonne, des Petites Rousses et surtout du Taillefer.

Les terrains du Lias (schistes et calcaires argileux) constituent une bonne partie des terrains traversés par la vallée de la Romanche (haute vallée, synclinal d'Arsine, bassin de Bourg-d'Oisans, dépression d'Uriage-Vizille).

Les terrains du Crétacé sont partout absents, sauf dans le massif du Grand Renaud (bassin de Bourg-d'Oisans).

- 3) Après les phases du plissement alpin qui ont affecté tout le bassin, les dépôts du Tertiaire (Eocène supérieur) ont pris un faciès flysch caractéristique (flysch des Aiguilles d'Arves). On y rencontre des conglomératifs de base surmontés de flysch gréseux.
- 4) Les glaciers quaternaires ont joué un rôle extrêmement important dans la morphologie de la vallée ; on retrouve parmi les terrains sédimentaires du Quaternaire, des formations glaciaires du Würmien, non différencié, qui garnissent toutes les pentes de la vallée de la Romanche et de ses affluents ; les moraines des glaciers actuels, très réduites, tapissent certaines pentes des massifs cristallins de Belledonne, du Taillefer et des Grandes Rousses. Le remplissage quaternaire de la vallée sera étudié au chapitre I-2-2.

==:==:==:==:==

Le bassin versant considéré, totalise à Vizille : 1 135 km². Il est constitué de bassins versants intermédiaires (figure 2).

On distingue de l'amont vers l'aval :

. Le sous-bassin de la haute Romanche

Il totalise 335 km² en aval du lac de la retenue du Chambon et 362 km² à sa confluence avec le Vénéon, à l'amont de Bourg-d'Oisans.

La Romanche est issue du massif cristallin du Pelvoux culminant à plus de 4 000 m dans la Barre des Ecrins. Elle contourne ensuite le massif de la Meije (granites intrusifs et formations migmatiques) sur sa rive gauche, puis celui des Grandes Rousses sur sa rive droite, entre Villar d'Arène et Bourg-d'Oisans.

L'arête culminante du massif des Grandes Rousses est constituée de gneiss, plus ou moins granitisés. Le massif est traversé par deux synclinaux houillers et partiellement recouvert de dolomies triasiques (rousses) et de schistes du Lias (gris) que vient recouper la rivière et qui sont à l'origine des apports solides dans le lac Chambon. Les bassins versants du Gâ et du Maurian drainent la région du flysch des Aiguilles d'Arves.

. Le sous-bassin du Vénéon

Il totalise environ 315 km² ; il est mitoyen de la partie sud du haut-bassin de la Romanche dans le versant nord du massif du Pelvoux (massif des Ecrins). En amont du Plan du Lac, il est essentiellement constitué de granites et de schistes cristallins, puis en aval, par une forte proportion de Lias calcaire et schisteux (M. GIGNOUX et J. MORET - 1952) qui sont à l'origine des apports solides du Merdaret, son affluent de la rive droite.

. La plaine de Bourg-d'Oisans

Jusqu'à Rochetaillée, elle est creusée entre le massif des Grandes Rousses à l'Est (migmatites de Bourg-d'Oisans et Lias de Villard-Reculas) et les contreforts du massif du Taillefer à l'Ouest (Lias de Pré-Gentil et gneiss de Rochetaillée) (M. GIGNOUX et L. MORET - 1952, S. et J. SARROT-REYNAULD - 1977).

. Le sous-bassin de l'Eau d'Olle

Il totalise 174 km² et culmine au Pic de l'Etendard à 3 468 m. Il comprend d'une part, les versants du massif des Grandes Rousses, essentiellement constitués par des schistes cristallins, partiellement recouverts de calcaires argileux et schistes du Lias, et de quelques lambeaux de Trias, et d'autre part, les versants orientaux du massif de Belledonne essentiellement constitués de granites, de schistes cristallins, amphibolites et gabbros.

. En aval de la confluence de la Romanche et de l'Eau d'Olle jusqu'à Séchilienne ("les Portes de l'Oisans")

La rivière traverse la partie méridionale du massif de Belledonne constituée par les roches dures du rameau interne : amphibolites compactes et gneiss de la "série verte".

Sur sa rive gauche, elle recoupe puis longe le petit massif granitique de Livet, au Nord-Ouest du Taillefer.

En aval de Séchilienne, la plaine alluviale s'élargit dans les terrains plus tendres du rameau externe : micaschistes et quartzites leptyniques de la "série satinée". Elle rejoint, à Vizille, les formations liasiques et triasiques des basses vallées de la Romanche et du Drac, dominées à l'Ouest par le petit massif hercynien et houiller de la Mure, et à l'Est par le Mont Sec, contrefort du massif de Belledonne.

I-2-2 - Remplissage quaternaire de la vallée de la Romanche

La vallée de la Romanche correspond à une ancienne auge glaciaire. Elle présente le schéma classique des grandes vallées alpines décrites ainsi par M. GIGNOUX (1947)

"... nos rivières et torrents alpins sont bien loin d'avoir atteint leur "profil d'équilibre", c'est-à-dire que leur profil longitudinal se compose d'une alternance de "rapides" où le cours d'eau déblaye et creuse son lit dans le rocher et de "plaines d'alluvionnement" ("plans" du langage local) qu'ils remblaient progressivement. Ce remblaiement est composé de dépôts de pente éminemment perméables (éboulis, dépôts d'avalanches, cônes de déjection) accumulés au pied des falaises par les torrents affluents qui descendent en cascade des escarpements rocheux" ... le remblaiement du fond de la vallée est formé par les alluvions du torrent principal, à pente modérée, où peuvent se décanter les troubles argileux" (figure 6).

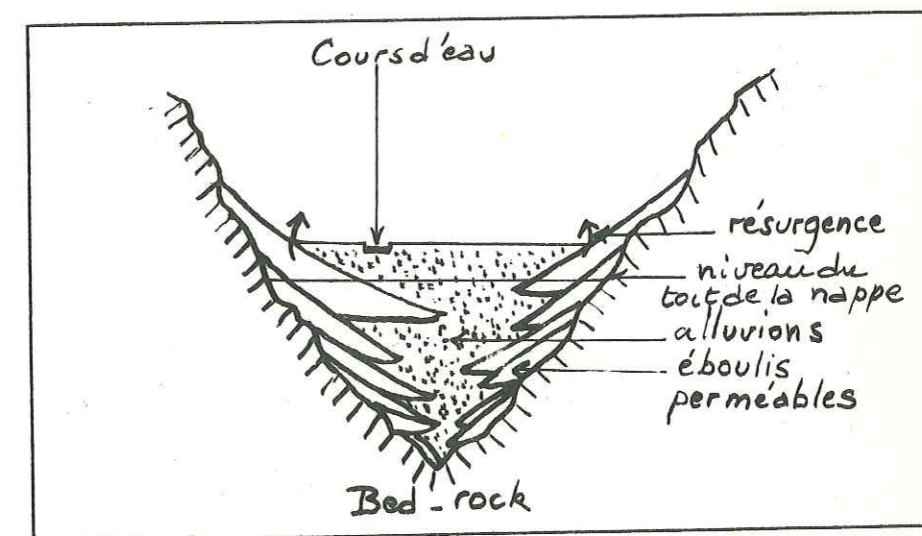


Figure 6 - Profil transversal schématique illustrant le mécanisme du remblaiement des vallées alpines - (d'après M. GIGNOUX - 1947).-

Une telle structure existe dans la vallée de la Romanche. De l'assemblage historique des différents dépôts dépendent l'existence et l'alimentation des nappes souterraines.

Entre deux seuils rocheux ou deux remontées du socle cristallin, l'auge glaciaire s'est comblée par les remblaiements alluviaux et les dépôts de pente. Plusieurs schémas peuvent se présenter. Quand les eaux ont été ralenties à la faveur d'une rupture de pente, d'un élargissement de la plaine ou à l'occasion d'un barrage naturel, les alluvions les plus perméables (blocs, galets, graviers et sables) sont contenues sous un manteau limoneux argileux, plus ou moins épais, dans lequel viennent s'imbriquer les éboulis, les cônes de déjection (figures 7 et 8).

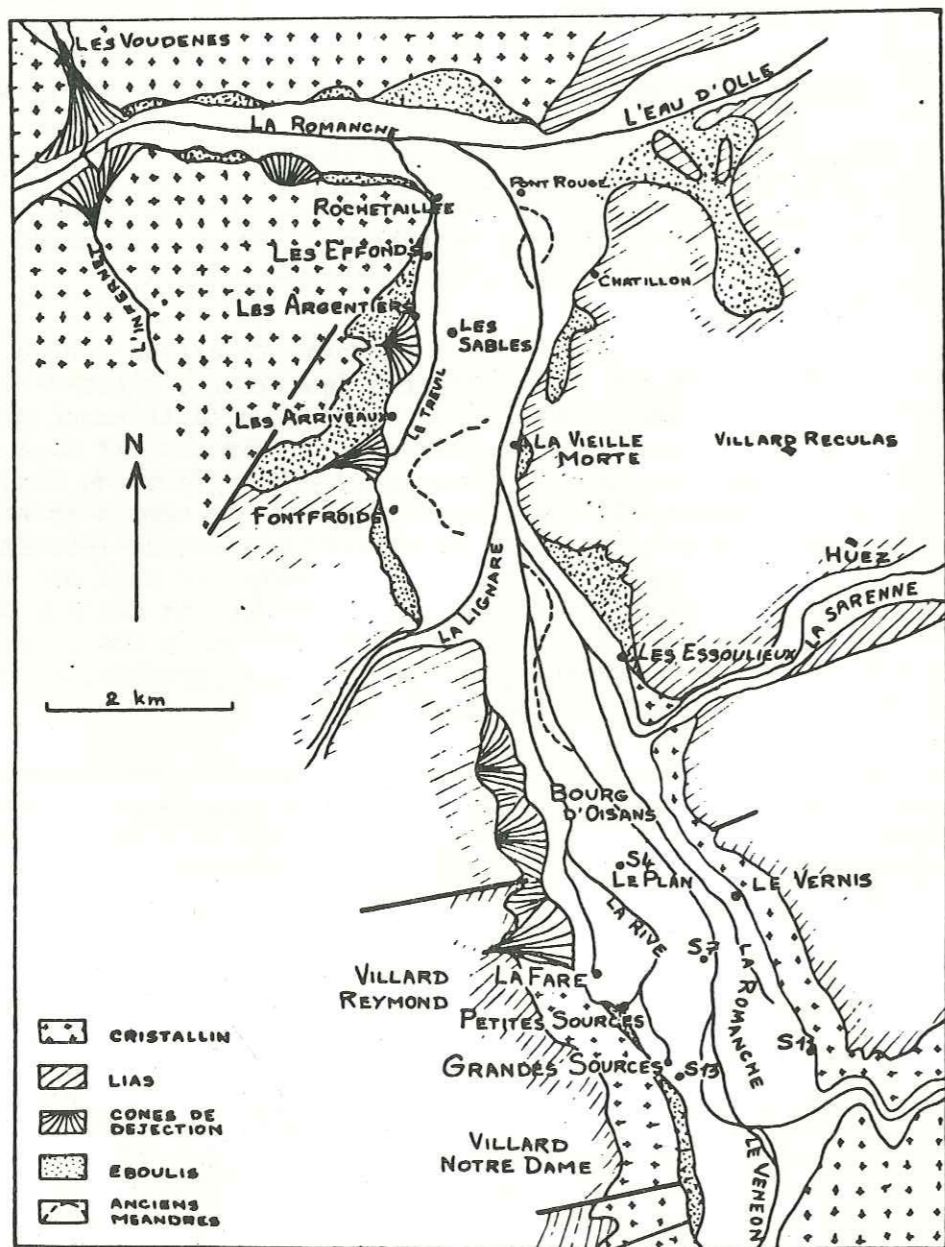


Figure 7 - Schéma hydrographique et géologique de la plaine de Bourg-d'Oisans et de ses bordures - (in J. et S. SARROT-REYNAULD - 1977).-

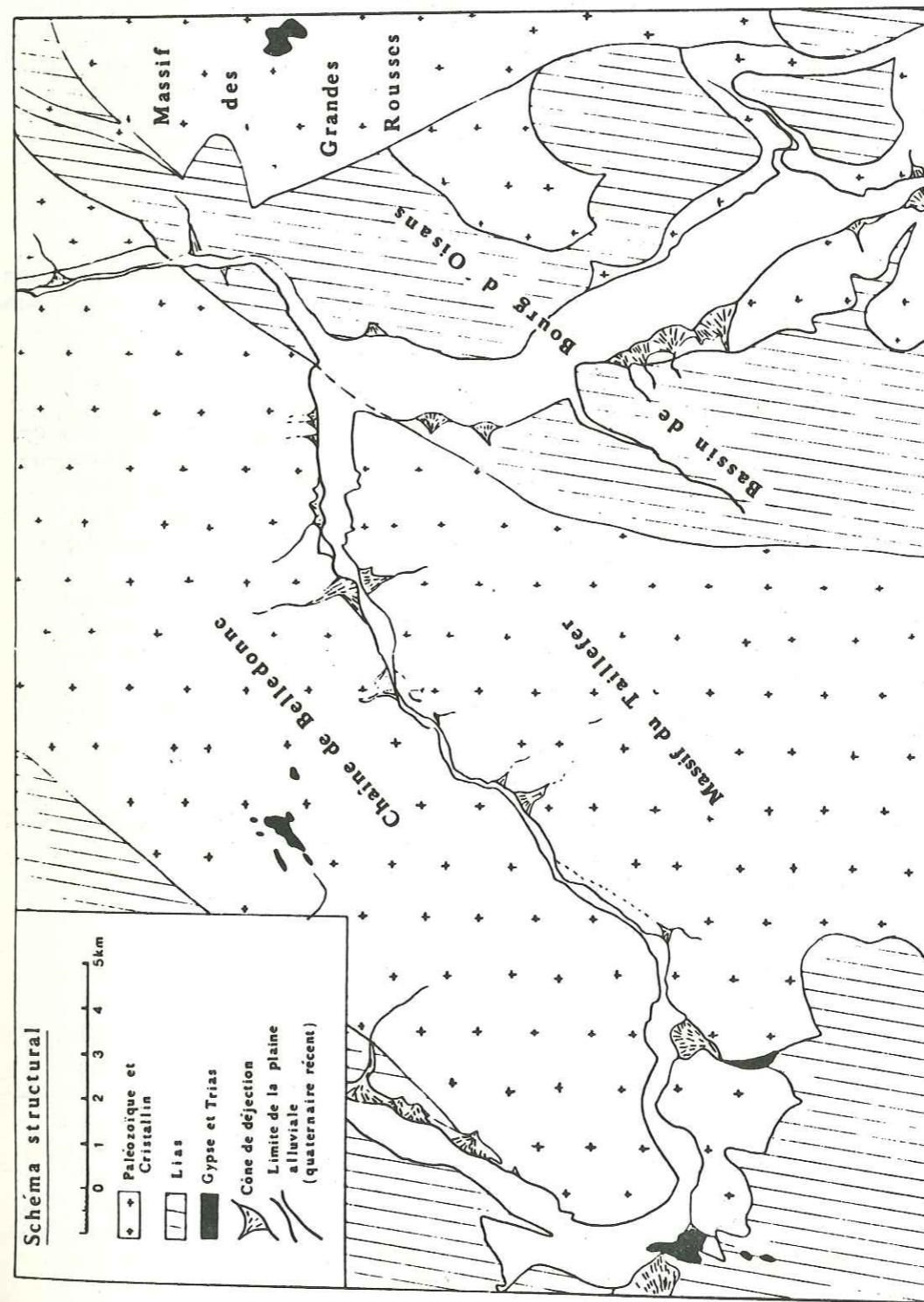


Figure 8 - Schéma structural de la vallée de la Romanche entre Bourg-d'Oisans et Vizille - (d'après carte géologique du S.G.N. - N° 797).-

Dans ce cas, les auteurs (M. GIGNOUX - 1946-47, R. MICHEL - 1961, J. SARROT-REYNAULD - 1972) s'accordent pour attribuer aux eaux venant des versants, traversant les dépôts de pente très perméables, l'essentiel de l'alimentation des nappes souterraines profondes, circulant indépendamment du cours d'eau et de la nappe superficielle, quand elle existe. Au contraire, ailleurs, seules les alluvions sablo-graveleuses ont pu se déposer ; ailleurs encore, elles se sont déposées au-dessus des limons imperméables et leur épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Dans ces deux derniers cas l'essentiel de l'alimentation des nappes souterraines se fait par la rivière ; elle dépend du débit et du colmatage du lit de cette dernière.

Etant donné l'irrégularité et l'hétérogénéité dans les dimensions (profondeur, superficie...) et dans la granulométrie des aquifères, les types d'alimentation des nappes souterraines de la vallée de la Romanche peuvent être divers, selon les zones étudiées.

Ainsi, en amont du barrage constitué autrefois par les cônes de déjection des ruisseaux de la Vaudaine et de l'Infernet, la partie limoneuse, la plus argileuse, peut atteindre une vingtaine de mètres. Dans ces conditions, la nappe phréatique qui circule au-dessus dans les alluvions les plus récentes, est indépendante de la nappe souterraine profonde alimentée par les versants.

Par contre, dans la basse vallée, la couche perméable des alluvions modernes sablo-graveleuses repose sur le socle cristallin lui-même et peut atteindre une centaine de mètres. En aval du seuil rocheux du Péage-de-Vizille, le fond de la cuvette est remblayé par des argiles lacustres imperméables, recouvertes d'une couche d'alluvions graveleuses plus récentes.

La remontée des socles cristallins imperméables et l'étranglement des verrous rocheux qui séparent les plaines alluviales, entraînent la disparition des alluvions perméables ou en réduisent à quelques mètres la profondeur.

La continuité des nappes souterraines de la vallée de la Romanche, séparées par des seuils et des verrous rocheux, n'est donc pas possible, sauf s'il existe des failles.

J. SARROT-REYNAULD a noté en 1971 "... beaucoup d'entre eux (les seuils rocheux) sont entaillés par de profonds sillons torrentiels comme on a pu le constater au Chambon... Dans tous les cas, l'étanchéité des seuils rocheux ne peut être absolue du fait de l'existence des sillons, et les circulations profondes entre les plaines d'alluvionnements successives sont fréquentes..." ; quoiqu'il en soit, les débits transités sont très affaiblis et la rivière draine vraisemblablement, en ces points, les eaux des nappes situées à l'amont.

Les nappes souterraines les plus importantes de la vallée ont fait l'objet d'études hydrogéologiques, compte tenu des projets d'aménagements hydroélectriques d'une part, et de l'importance des réserves exploitables pour l'alimentation de la région grenobloise notamment, d'autre part.

On peut distinguer de l'amont vers l'aval :

- *Le plan de l'Alpe de Villar d'Arène* est la plus élevée des plaines alluviales remblayées par la Romanche (M. GIGNOUX - 1947). La profondeur du talweg rocheux n'y est pas excessive et la nappe profonde a pu être située de 12 à 15 mètres sous la plaine, où elle chemine plus rapidement que dans les zones superficielles.
- *La plaine du Chambon* est devenue le bassin de retenue du barrage hydroélectrique. Les études préliminaires aux travaux d'installation du barrage ont mis en évidence l'existence d'un seuil rocheux en amont duquel les alluvions ont une épaisseur très importante (M. GIGNOUX et L. MORET - 1952). L'alimentation de la nappe profonde est due aux venues d'eau des zones profondes du cône de déjection du ruisseau de Mont-de-Lans affluent de la rive gauche.
- *Les petites plaines alluviales* qui existent dans la vallée de la Romanche, même dans les secteurs les plus étroits de son cours, comportent des nappes profondes. Ainsi, M. GIGNOUX (1947) signale celle cheminant sous l'emplacement de l'usine de Saint-Guillerme (1929) à l'entrée de la Rampe des Commères.
- *dans la vallée du Vénéon*, le "Plan du Lac" remblayé par le Vénéon, a fait l'objet d'études hydrogéologiques dans le cadre des aménagements hydroélectriques de la vallée. Actuellement, le barrage de dérivation superficielle laisse s'écouler la nappe profonde qui circule sous le remblaiement alluvial du Plan du Lac. A l'aval du "Pont Escoffier" et non loin du confluent du Vénéon avec la Romanche, la vallée s'élargit et le Vénéon vient y déposer dans son cône de déjection des éléments grossiers de forte perméabilité, jusqu'à une profondeur de 32 m (rapports J. DUBUS - 1975, E.D.F. CHAMBERY - 1972).
- *la large plaine alluviale de Bourg-d'Oisans* doit son origine au barrage naturel constitué autrefois par les cônes de déjection des torrents de l'Infernet (rive gauche) et de la Vaudaine (rive droite). Elle est constituée de vases lacustres (M. GIGNOUX - 1947) et surtout du remblaiement alluvial récent (J. et S. SARROT-REYNAULD - 1977) dans lequel viennent s'imbriquer les éboulis des flancs de la vallée et les cônes de déjection des torrents des versants. A l'amont de la plaine de Bourg-d'Oisans, près de la confluence du Vénéon et de la Romanche, la nappe souterraine est contenue sous un recouvrement d'argiles et de limons d'épaisseur variable. Des exurgences ascendantes de la nappe se produisent sur les flancs de la vallée à la faveur des cônes de déjection et des éboulis de pente très perméables (sources de la Rive, etc.). A l'aval, et jusqu'à Rochetaillée, la vallée de la Romanche est assez large (1 500 m environ). La nappe souterraine circule sous un recouvrement imperméable atteignant 14 à 20 m (rapport E.D.F. - 1972). Dans cette partie de la vallée, des sources de trop-plein apparaissent en bordure de la plaine alluviale (M. MARCHAND - 1947, S. et J. SARROT-REYNAULD - 1977) comme celle des Sables, des Effants, etc. (figure 7).

• dans la vallée de l'Eau d'Olle, les principales nappes souterraines se situent au Plan de Grand-Maison et dans la plaine de Rochetaillée. En ce dernier point, le vaste cône de déjection de la rivière, s'étend du Pont du Rattier jusqu'à sa confluence avec la Romanche ; Dans la zone amont, les alluvions du cône de déjection sont perméables sur toute leur hauteur permettant l'alimentation de la nappe par les eaux de surface alors qu'en aval se développe une première couche imperméable de graviers colmatés pouvant atteindre 10 à 15 m d'épaisseur ; une deuxième couche hétérogène, horizontalement et verticalement, est constituée par des sables et graviers perméables, entrecoupés de lentilles argileuses. De l'amont vers l'aval de la plaine ces couches argileuses sont de plus en plus fréquentes et profondes ; les graviers et les sables du cône de déjection de l'Eau d'Olle viennent s'imbriquer dans les alluvions argileuses colmatantes déposées par la Romanche. La nappe souterraine qui circule dans les formations sableuses et graveleuses les plus perméables, voit son écoulement freiné en aval et se met en charge. Au lieu-dit "la Pernière" la nappe est artésienne (2 à 3 m au-dessus du sol).

• Entre le Champeau et Séchilienne, malgré l'étroitesse de la vallée de la Romanche, l'hypothèse de l'existence de nappes profondes, circulant indépendamment du cours d'eau superficiel, avait déjà été émise par M. GIGNOUX en 1947. Les bilans hydrogéologiques établis par la C.P.G.F. en 1966, lui ont permis d'estimer à 285 l/s le débit de la nappe souterraine à l'amont de Séchilienne. Elle attribue aux infiltrations des eaux des torrents latéraux dans les cônes d'éboulis l'alimentation de la nappe.

• à l'aval des "Portes de l'Oisans" à la faveur de l'élargissement de la plaine alluviale dans les schistes phylliteux et de la réduction de la pente de la vallée (12‰ à 5‰) les dépôts alluviaux sont plus abondants. La plaine alluviale présente des resserrements rocheux intermédiaires qui permettent de distinguer la plaine de Séchilienne, celle de l'Ile Falcon (en rive gauche de la Romanche), celle de Jouchy (en rive gauche) et du Péage (en rive droite), celle de Vizille. Elle est limitée à l'aval par les Gorges de Jarrie (figure 9).

Cette partie de la vallée a fait l'objet de nombreuses études hydrogéologiques dans le cadre des projets d'alimentation en eau potable de la région grenobloise.

Entre autres, l'étude de la C.P.G.F. effectuée de 1964 à 1967, a permis de mieux connaître cette partie de la vallée.

* le substratum

les alluvions quaternaires de la basse vallée de la Romanche reposent sur un socle cristallin (micaschistes) jusqu'au Péage-de-Vizille puis sur un substratum liasique (marnes calcaires) et triasique (gypses) à Vizille, en rapport avec le bassin intermédiaire limité par la vallée du Drac et le Dôme hercynien de la Mure (figure 5).

Ces socles ont subi un surcreusement, à l'époque glaciaire, plus ou moins important. Le substratum cristallin n'a pu être atteint par les sondages effectués jusqu'à 80 mètres, sauf dans le parc du Château de Vizille où un gros "rocher" (leptynites) a été rencontré à 45 m de profondeur (sondage S1).

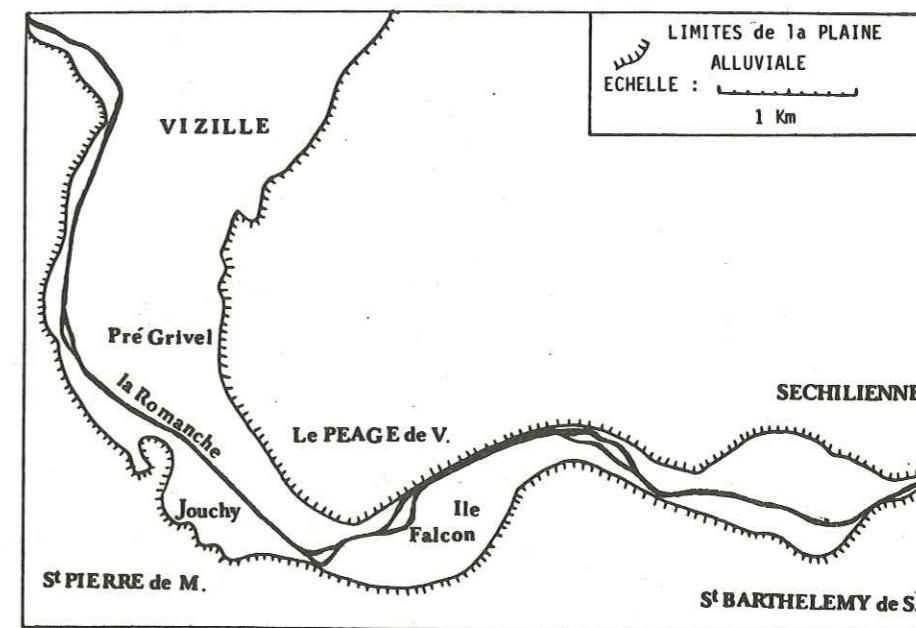


Figure 9 - Limites de la plaine alluviale entre Séchilienne et Vizille.-

Un autre témoin de substratum cristallin figure en rive gauche, sous la forme d'un affleurement culminant à 388 m. Les sondages électriques effectués de 1964 à 1966 ont confirmé la remontée du socle cristallin séparant les plaines du Péage et de Jouchy de celle de Vizille.

* les alluvions (figures 10 et 11)

en amont et en aval de la remontée du socle cristallin au Péage-de-Vizille, le remplissage alluvial profond est de nature différente.

En amont, la couche perméable des alluvions sablo-graveleuses atteint 80 à 100 m d'épaisseur. Sur les 30 m supérieurs les alluvions sont constituées de blocs, graviers, galets et sables très perméables ; sur les 50 m suivants (ou plus ?) la granulométrie diminue, les sables deviennent de plus en plus fins et plus compacts ; ils sont nettement moins perméables

• dans les plaines de Séchilienne et de l'Ile Falcon, les structures géologiques sont comparables.

Les différents sondages électriques et mécaniques ont permis de distinguer :

- une couche supérieure d'alluvions très perméables (blocs, galets, graviers et sables), dont l'épaisseur diminue de l'amont vers l'aval (25 à 30 m à Séchilienne, 20 m dans la partie amont de la plaine de Falcon, 8 à 10 m dans la partie aval de la plaine de Falcon).
- une seconde couche de sables moins perméables, avec quelques passées graveleuses ; son épaisseur est de l'ordre de 50 mètres.

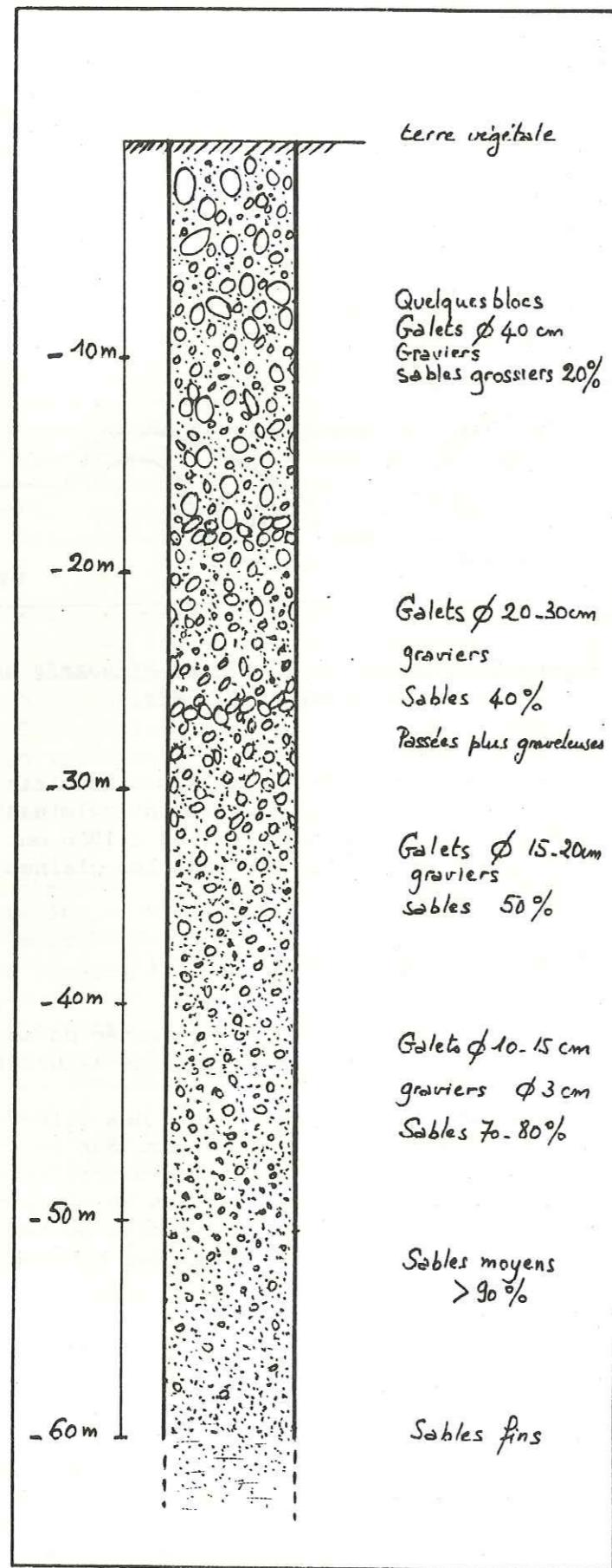


Figure 10 - Coupe géologique synthétique des terrains de la plaine alluviale de Jouchy.-

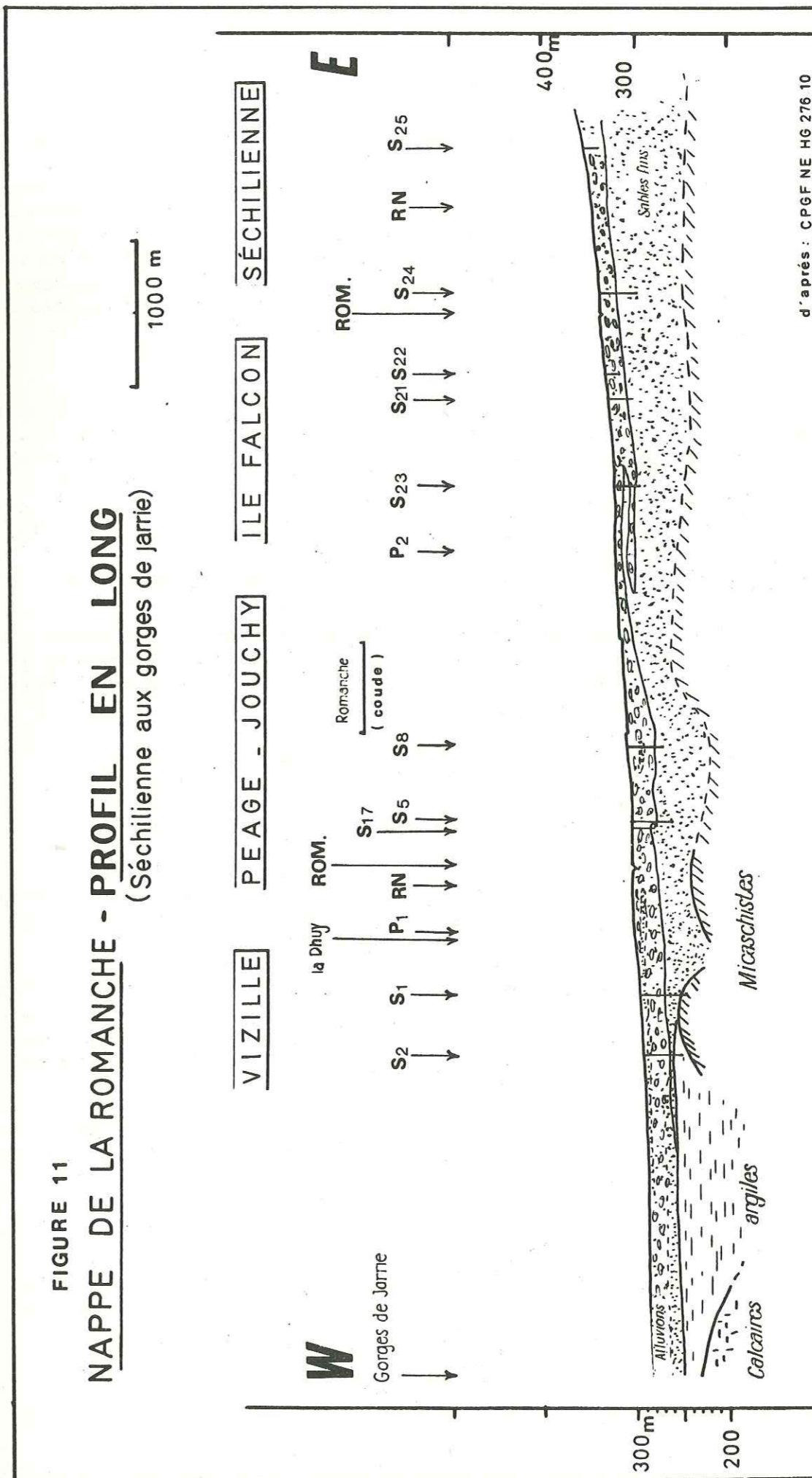


FIGURE 11
 NAPPE DE LA ROMANCHE - PROFIL EN LONG
 (Séchilienne aux gorges de jarrie)

Les sondages mécaniques n'ont pu atteindre le substratum cristallin, mais l'étude géophysique a permis d'évaluer à 80 m environ l'épaisseur des alluvions dont la granulométrie diminue avec la profondeur.

La diminution de l'épaisseur des formations perméables, constatée à l'aval de la plaine de l'Ile Falcon, explique la présence de sources dans la plaine qui constituent les trop-pleins de la nappe. Les niveaux de la nappe varient de plus de 4 mètres au cours de l'année à l'amont de la plaine de l'Ile Falcon ; la nappe en communication avec la rivière est sensible aux fluctuations saisonnières de celle-ci.

à l'aval du verrou rocheux de la croix du Mottet, en rive droite (Péage-de-Vizille) et en rive gauche (Jouchy), il existe le même type de structure (figure 11). A une couche supérieure, composée de blocs, de galets, de graviers et de sables qui dépasse presque partout 30 m de profondeur, succède une couche d'alluvions sableuses, plus compacte et plus homogène, reposant vraisemblablement à plus de 80 m, sur le socle cristallin.

La granulométrie diminue régulièrement avec la profondeur. On constate en effet :

- 1) - une diminution du diamètre des blocs et des galets ; ainsi, le sondage mécanique F 12 (1), à l'amont de la plaine de Jouchy, a révélé la présence de blocs dont les diamètres maxima sont de l'ordre de :

600 mm	de 0,5 à 8,5 m de profondeur
500 mm	de 8,5 à 18,2 m de profondeur
300 mm	de 18,2 à 22,6 m de profondeur
250 mm	de 22,6 à 30,5 m de profondeur.

- 2) - une augmentation du pourcentage des sables fins ; ainsi, le pourcentage des sables prélevés dans le forage F 12 passe progressivement de 20 % à 8 m, à 50 % à 30 m, puis à plus de 90 % à plus de 34 m ;

Le pourcentage des sables dans le sondage situé à l'emplacement de l'actuel puits 2 de Jouchy (aval de la plaine de Jouchy) passe progressivement de 20 % à 20 m de profondeur, à 50 % à 34 m, puis à plus de 90 % à plus de 34 m de profondeur.

En général, dans la partie "graveleuse", les blocs, les galets, et les graviers représentent plus de 50 % ; dans la partie "sableuse", les sables y représentent 90 %. Cette partie sableuse a été rencontrée à plus de 30 m de profondeur :

à 34 m	en F 12
à 31 m	en S 6
à 30 m	en S 5 (près de l'actuel puits 1)
à 34,5 m	dans le puits 2
à 31 m	en S 4 (rive droite)
à 36 m	en S 3 (rive droite)

(1) - Pour l'emplacement des sondages et des piézomètres, se reporter aux figures 13 et 25.-

- 3) - la présence de quelques lentilles de sables argileux dans les zones profondes ; ainsi, les sondages mécaniques ont traversé des passées argileuses :

- à 60 m de profondeur en F 12,
- à 40 m de profondeur dans le puits 2.

En fait, si ce schéma existe partout, on peut également constater une certaine hétérogénéité de structure horizontalement et verticalement.

- . Ainsi, les sondages mécaniques ont révélé la présence de gros blocs à plus de 10 m de profondeur. Ces gros blocs ont été rencontrés :

- à 12 m en F 11 (plaine de Jouchy sur l'emplacement de l'actuel puits 1)
- à 7 m en S 7 (plaine de Jouchy, secteur amont)
- à 15 m (plaine de Jouchy sur l'emplacement de l'actuel puits 2).

- . La couche des blocs, galets et graviers peut atteindre plus de 50 m de profondeur, notamment à l'emplacement des anciens lits de la Romanche, là où la rivière avait creusé les alluvions sableuses et remblayé les excavations créées par des matériaux plus grossiers. Certaines coupes géologiques des sondages mécaniques révèlent des successions de couches graveleuses et de couches de sables plus fins. Ainsi, en rive droite, sous l'actuelle digue (S 26), on rencontre (entre 62 et 70 m de profondeur) une couche de galets et de graviers, comprise entre deux couches de sables (de - 45 à - 62 m et de - 70 m à - 76 m) (figure 14) ;

- . en S 3 (rive droite) on rencontre des couches de galets et de graviers de - 42 à - 44 m, de - 47 à - 52 m, de - 57 à - 58 m, entrecoupées de passées sableuses ;
- . en S 8 (Jouchy amont) on rencontre une couche sableuse de - 13,2 à - 17,8 m, alors que la couche de blocs et de galets se prolonge jusqu'à - 30 m ;
- . en F12 (Jouchy amont) on rencontre une couche de galets de 46 à 52 m entre deux couches de sables (de - 34 à - 46 m et de - 52 à - 62 m).

- . En rive droite, la couche des blocs, galets et graviers est surmontée par des dépôts sableux de 3 à 4 m d'épaisseur (S 3).

- . Des passées argileuses à faible profondeur sont plus fréquentes à l'aval de la plaine qu'à l'amont (F 12 de - 6,5 à - 8 m, sondage 2 près de l'actuel puits 2 de Jouchy à - 18 m...).

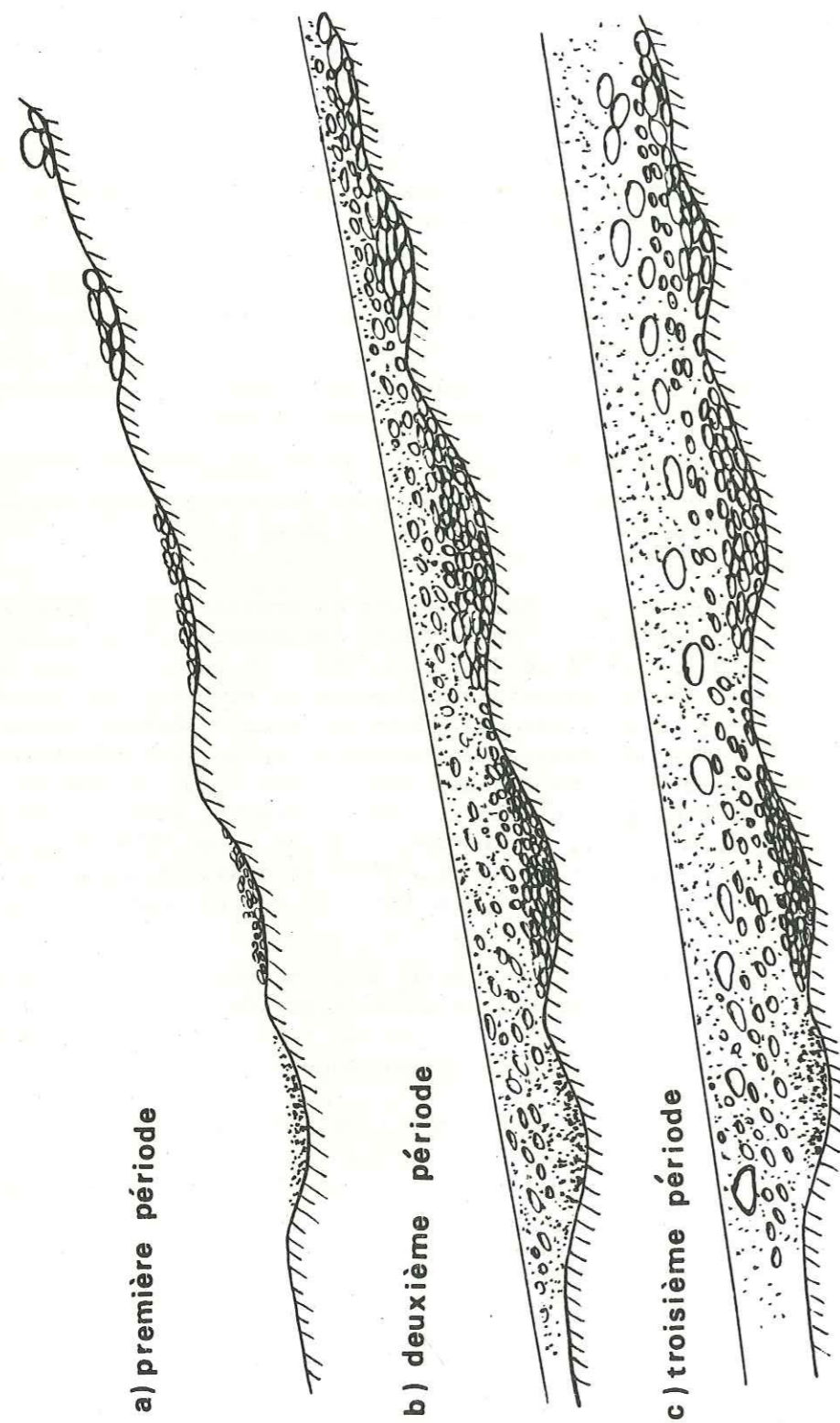


Figure 12 - Schéma d'interprétation de la formation de l'actuelle structure des plaines alluviales de la basse vallée de la Romanche.

On peut être surpris par la disposition des couches alluvionnaires dans cette partie de la vallée. En effet, elle est inverse de celle généralement rencontrée dans les cuvettes où les éléments les plus gros ont tendance à se déposer au fond. Ici, au contraire, les blocs, les galets se rencontrent au-dessus des graviers et des sables fins du fond de la cuvette.

On peut également constater que les différentes couches alluvionnaires ne présentent pas de limites très nettes mais que la granulométrie diminue avec la profondeur ; quelque soit la granulométrie et sur toute l'épaisseur du remplissage alluvial, les sables, graviers et galets ne sont pas altérés, les blocs sont parfaitement sains ; nulle part on ne trouve d'argile de décomposition mais seulement quelques lentilles de limons argileux. On est donc en droit de supposer que tous ces dépôts sont postérieurs à la dernière glaciation et proviennent de l'érosion récente dans le bassin versant.

Pour expliquer cette structure particulière, on peut émettre l'hypothèse suivante sur les modalités de sa formation :

- Lors d'une première période historique (figure 12 - a), à la fin de la dernière glaciation, la succession des remontées des socles cristallins du profil en long de la vallée a favorisé le remplissage des cuvettes par les plus gros blocs à l'amont et progressivement par les plus petits à l'aval. De cette façon, les cuvettes de la basse vallée (notamment celles situées à l'aval des Portes de l'Oisans) ne se sont remplies que de sables.
- Lors d'une deuxième période (figure 12 - b), les cuvettes étant ainsi successivement comblées, les matériaux charriés par la rivière se sont progressivement déposés dans son lit, les éléments les plus gros (galets) dans le lit mineur, les éléments les plus fins (graviers, sables) dans le lit majeur. Le lit se déplaçant dans la plaine alluviale on s'explique l'hétérogénéité actuelle constatée.
- Lors d'une troisième période (figure 12 - c), plus récente encore, la rupture du barrage de la plaine de Bourg-d'Oisans, a entraîné brusquement les blocs le constituant jusque dans la basse vallée. On peut d'ailleurs remarquer que les blocs trouvés à faible profondeur à Jouchy sont de même nature géologique que ceux encore présents dans la vallée de la Romanche sur le lieu du barrage. Les derniers mètres d'alluvions correspondent aux dépôts intervenus depuis la troisième période.

Les résultats des sondages mécaniques effectués dans les cuvettes alluvionnaires, situées à l'amont, devraient confirmer cette hypothèse ; mais à ma connaissance, aucun sondage n'a actuellement atteint les profondeurs susceptibles de nous donner cette confirmation.

à l'aval du verrou rocheux du Pont de Mésage, à Vizille, la plaine alluviale se situe essentiellement en rive droite. La structure des terrains a été décrite par R. MICHEL et J. ROTHE en 1959, à la suite des forages et de la prospection géophysique effectués avant l'établissement des puits de captage de Pré-Grivel par le S.I.E.R.G. En rive droite, la couche supérieure des alluvions récentes est comparable à celle des plaines situées à l'amont ; elle est composée de galets, de graviers et de sables, mais elle comporte un plus grand nombre de lentilles argileuses qui sont toutefois peu épaisses (< à 1,5 m) et peu étendues (< à 30 m).

Au-dessous de cette couche, dont l'épaisseur atteint 20 à 30 m, les forages mécaniques ont traversé, sur 2 à 4 m d'épaisseur, un horizon de sables très fins, plus ou moins micacés ou argileux, avant d'atteindre une couche argileuse, plus ou moins marneuse ; les sondages électriques et mécaniques ont montré que cette dernière couche atteint plus de 100 m d'épaisseur. Il n'existe pas, à proprement parlé, de limite entre la formation aquifère à forte perméabilité des sables et graviers de la couche supérieure et les argiles imperméables plus profonds qui reposent sur le substratum.

En rive gauche, le lit de la Romanche vient suivre le flanc est de la montagne du Connex. Sur le versant, les gypses du Trias et les calcaires du Lias, qui affleurent en plusieurs endroits, sont recouverts de dépôts morainiques et s'enfoncent dans la plaine, sous les alluvions déposées par la rivière : galets, graviers et sables, plus ou moins argileux.

Comme le soulignent R. MICHEL et J. ROTHE, les formations gypseuses triasiques du versant occidental de la vallée ont dû être facilement érodées avant le remblaiement alluvial puisque les trois forages, effectués sur la rive gauche de la rivière jusqu'à - 13,5 m de profondeur, n'ont pas atteint les gypses.

Les dépôts alluvionnaires sont ici, très colmatés, comme l'ont montré les résultats des forages mécaniques et comme en témoigne le jaillissement des sources (source du ruisseau de la Touche...), au contact du versant et des formations alluviales. La C.P.G.F. a estimé à 400 l/s le débit total de ces sources, nombreuses et abondantes. Etant donné la faible superficie du bassin topographique compris entre le Petit David et Notre-Dame-de-Mésage (6 km² environ) on est obligé d'admettre avec J. BIJU-DUVAL (rapport 1977) que certaines sources sont les exutoires de circulations karstiques dues à la présence des calcaires et des gypses et qui intéressent l'ensemble du massif du Connex.

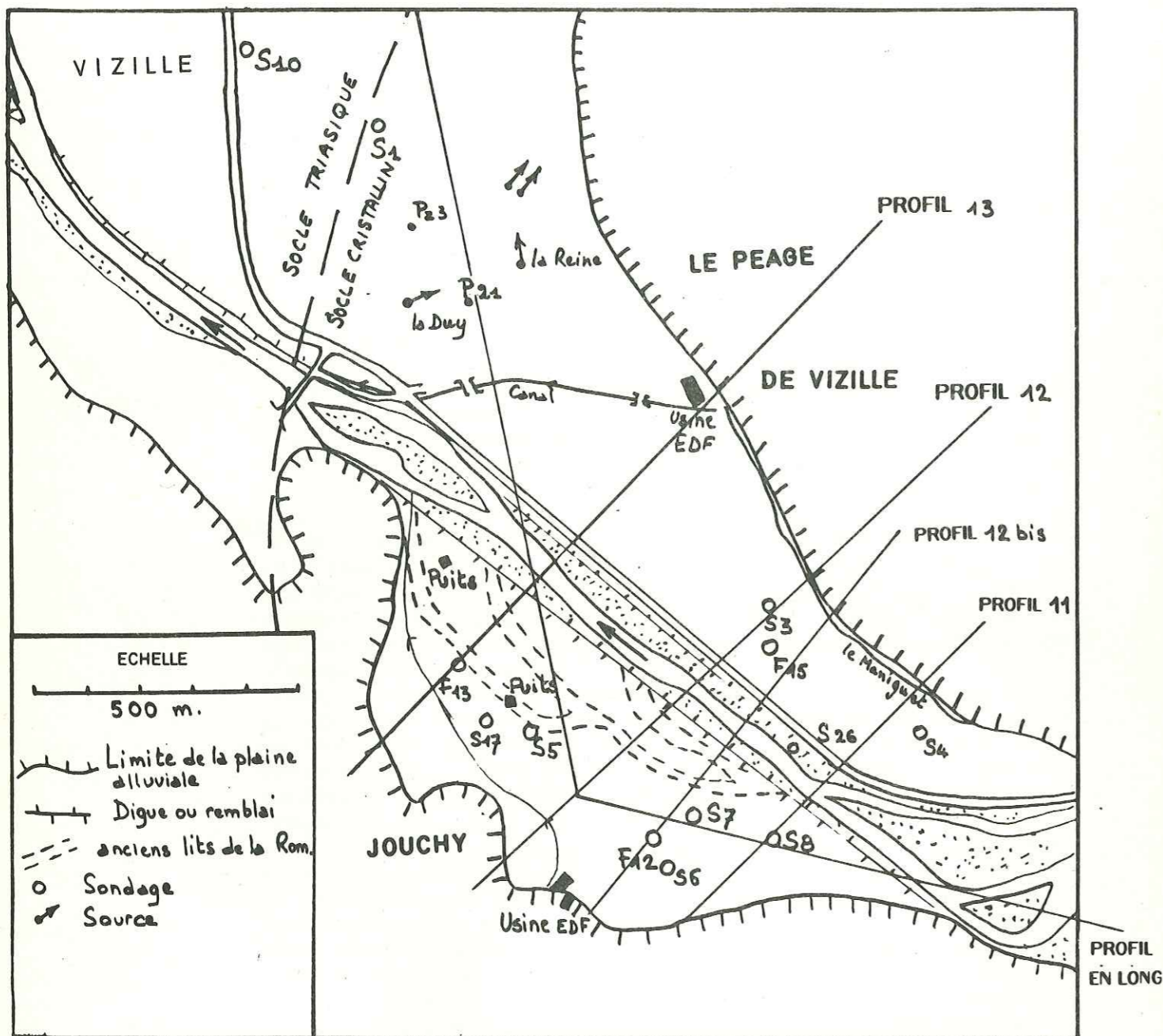


Figure 13 - Emplacement des piézomètres cités et des profils structuraux - (d'après C.P.G.F. - 1966).-

II - HYDROGÉOLOGIE DE LA NAPPE DU PEAGE-DE-VIZILLE ET DE JOUCHY

II-1 - LA FORMATION AQUIFÈRE

II-1-1 - Structure des formations alluvionnaires

Le cadre géologique et la structure des alluvions ont été décrits au chapitre I. Je rappellerai donc seulement que la nappe est située entre deux verrous rocheux (figure 9). A l'amont, elle est délimitée par l'avancée de l'éperon rocheux de la Croix du Mottet dans la plaine alluviale. Actuellement, le lit de la Romanche (30 m de large environ) est presque partout endigué.

On distingue, en rive droite, la plaine alluviale du Péage-de-Vizille, qui suit le contrefort rocheux du massif de Belledonne et en rive gauche, la plaine alluviale de Jouchy, au pied des contreforts du massif du Taillefer. A quelques centaines de mètres en aval, la vallée se resserre de nouveau et la plaine alluviale est limitée par la remontée du substratum cristallin à l'aval duquel on pénètre dans un bassin essentiellement liasique et triasique.

Cette partie de la vallée a été le siège d'un important surcreusement glaciaire où sont venus se déposer les alluvions quaternaires.

Sur une couche de sables fins, assez homogène dont l'épaisseur varie vraisemblablement de 50 à 80 m, la couche graveleuse composée de blocs, galets, graviers et de sables, a une épaisseur de 30 m environ (voir chapitre I et figures 10, 11, 14 et 15).*

* Figure 9 page 31, Figure 10 page 32, Figure 11 page 33.-

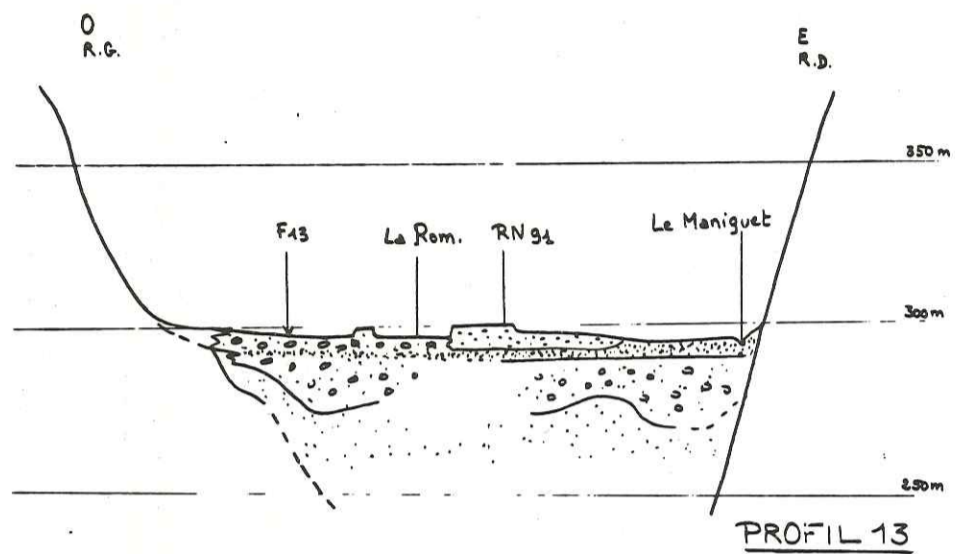
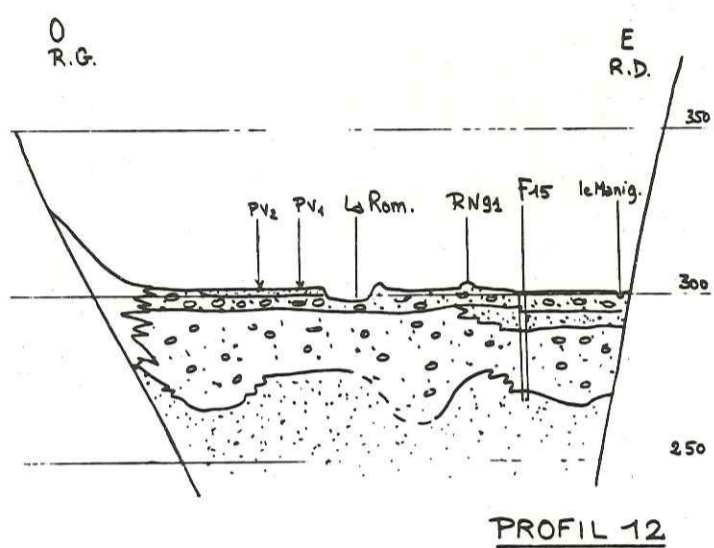
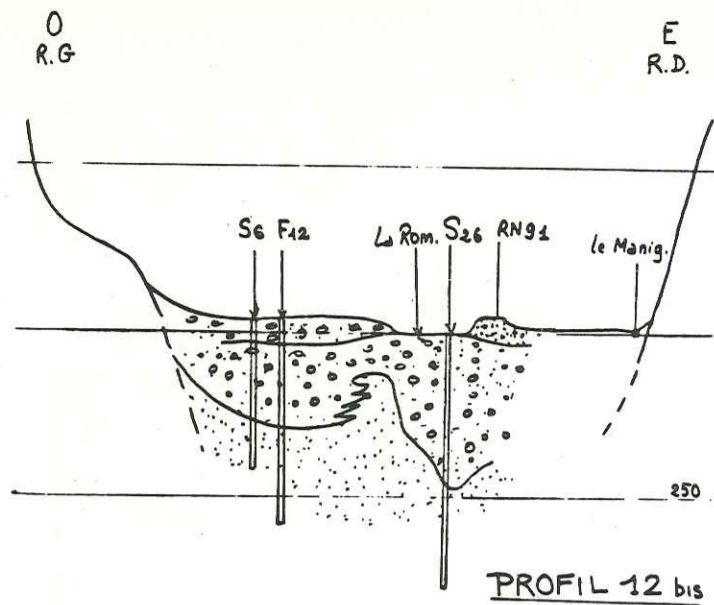
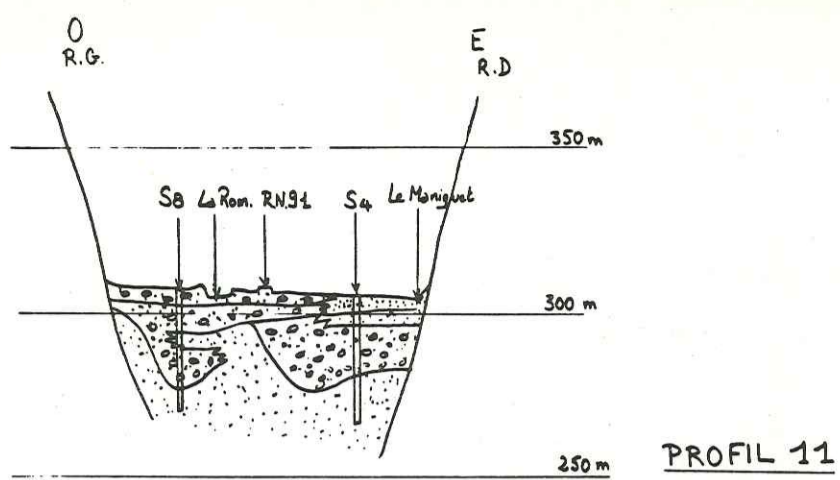
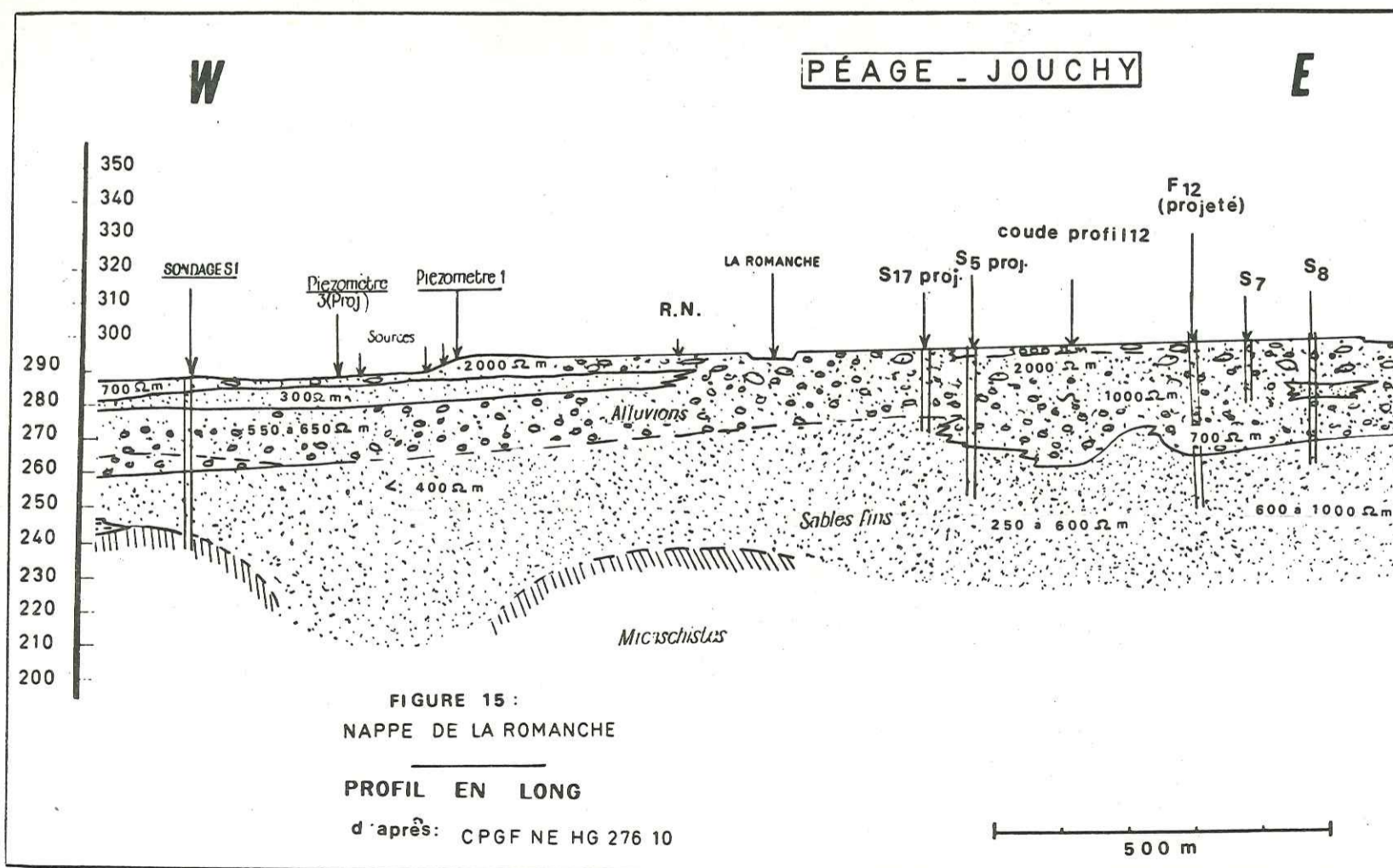


Figure 14 - Schémas des structures alluvionnaires selon les profils P11, P12, P12 bis et P13 - (d'après C.P.G.F. - 1966).-



II-1-2 - Analyse granulométrique des alluvions

L'analyse granulométrique des alluvions effectuée en 1965 par J. PERRIAUX de l'Institut Dolomieu, confirme cette structure. Elle concerne la fraction au diamètre supérieur à 20 mm des échantillons provenant des sondages S 26, S 3, et S 4, en rive droite et des sondages S 8, S 6 et F 12, en rive gauche.

La couche superficielle (30 premiers mètres) correspond à des alluvions grossières, peu uniformes ($\frac{d_{60}}{d_{10}}$ variant de 7,5 à 40), constituée de graviers et de sables dont le diamètre médian d_{50} est compris entre 1 et 3 mm. La couche la plus profonde correspond à des sables plus fins et plus uniformes ($\frac{d_{60}}{d_{10}}$ variant de 4 à 7,5) dont le diamètre médian d_{50} est compris entre 0,3 et 1 mm (figure 16 et tableau 5).

	Sondage	Profondeur	Médiane d_{50}	Description
Rive droite	S 3 Superficiel	20 m	1,08	Graviers et sables
	S 3 Profond	35 m	0,68	Sables
		50 m	0,85	
	S 4 Superficiel	26 m	3,0	Graviers et sables
	S 4 Profond	36 m	0,098	Silts
S 26	Superficiel	16 m	3,0	Graviers et sables
		36 m	2,7	
	Profond	57 m	0,72	Sables
		65 m	1,06	
		75 m	0,71	
Rive gauche	S 8 Superficiel	17 m	0,44	Graviers et sables
	S 8 Profond	35 m	0,65	Sables
	S 6 Superficiel	20 m	1,65	Graviers et sables
S 6 Profond	40 m	0,35	Sables	
F 12 Profond	40 m	0,42	Sables	
	53 m	0,58		

Tableau 5 - Résultats des analyses granulométriques effectuées sur les sondages des plaines alluviales de Jouchy et du Péage-de-Vizille - (d'après J. PERRIAUX - 1965).

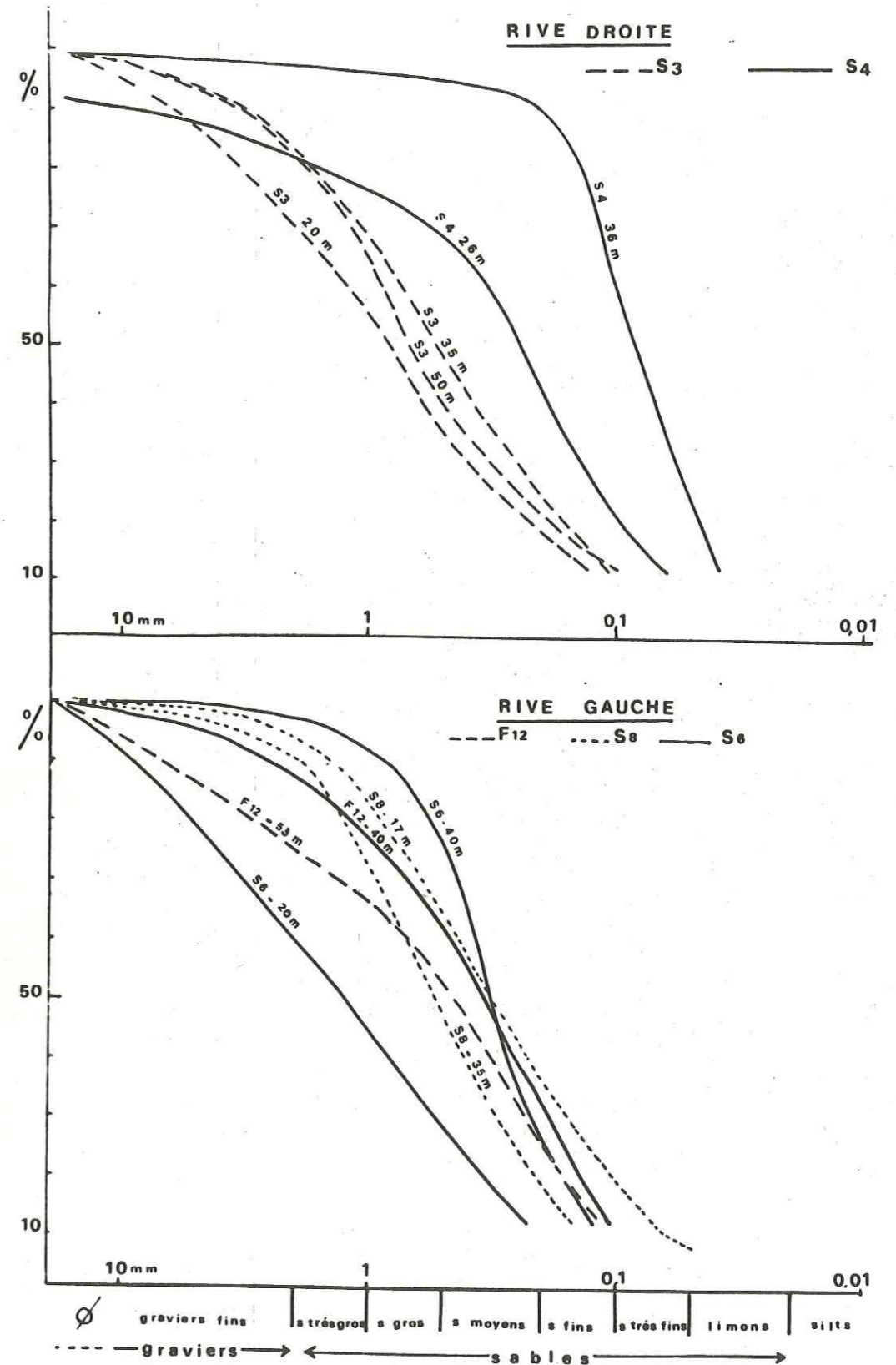


Figure 16 - Courbes granulométriques des alluvions de la nappe de Jouchy - (d'après J. PERRIAUX - 1965).

Description géologique	d 50	K (Lefranc)	Résistivité
Blocs, graviers, galets et sables	1 à 3 mm	$\approx 4.10^{-3}$ m/s	600 à 2 000 ohm.m
Sables dominants	0,5 à 0,7 mm	$\approx 5.10^{-4}$ m/s	200 à 400 ohm.m
Silts et sables fins	< 0,1 mm	$\leq 10^{-5}$ m/s	≈ 50 ohm.m

Tableau 6 - Equivalence des paramètres physiques de la nappe - (d'après C.P.G.F. - 1966).-

II-1-3 - Perméabilité et coefficient d'emmagasinement

*Des essais de perméabilité (type Lefranc) ont été effectués par la C.P.G.F. en 1966 et par SON DARALP en 1972 ; ils confirment la grande perméabilité des alluvions, notamment, de la couche supérieure graveleuse. Le coefficient de perméabilité (K) ainsi mesuré est de l'ordre de 4.10^{-3} m/s au-dessus de 30 m de profondeur, de l'ordre de 5.10^{-4} m/s au-dessous (couche sableuse), de l'ordre de 10^{-5} m/s dans les silts et les sables argileux. La confrontation des résultats des sondages mécaniques, des sondages électriques, des analyses granulométriques et des mesures du coefficient de perméabilité K, a permis à la C.P.G.F. d'établir une équivalence locale entre les paramètres physiques étudiés (tableau 6).

En regroupant les différents résultats, j'ai pu vérifier la validité de ces équivalences pour les sondages S 26 et S 6 (tableau 7).

Comme on pouvait le prévoir au vu des coupes géologiques, on constate, en un point donné, une certaine hétérogénéité verticale des perméabilités. Ainsi, il existe des zones de très forte perméabilité (K Lefranc supérieur à 10^{-2} m/s) notamment à l'amont de la plaine de Jouchy ; en S 8 à 20 m de profondeur il existe une couche de galets et de graviers très perméable (résistivité des terrains entre 17,8 à - 30 m de profondeur = 950 ohm.cm).

Comme dans tout terrain plus ou moins hétérogène, il n'est pas possible d'assimiler le coefficient de perméabilité K, mesuré par les essais Lefranc, à la valeur de la perméabilité horizontale susceptible d'être retenue dans les calculs de débits de la nappe par la loi de Darcy. Seuls les coefficients de perméabilité, mesurés à partir des essais de pompage permettent d'avoir une intégration valable des hétérogénéités des terrains en une zone donnée.

	Description géologique	d 50 mm	K (Lefranc) m/s	Résistivité ohm.m
RIVE GAUCHE S 6	0 à 0,5 m - terre			500 ohm.m
	0,5 à 3 m - blocs terre			0,5 à 5 m : 4 000
	3 à 18 m - blocs gros sables		16,5 m : $3,3.10^{-3}$ m/s	5 à 31 m } 1 050
	18 à 31 m - galets graviers sables	20 m : 1,65 mm	30 m : 2.10^{-3} m/s	
	31 à 38 m - sables grossiers graviers			> 31 m : 700
	38 à 45 m - sables grossiers	40 m : 0,65 mm	45 m : $4,9.10^{-4}$ m/s	

RIVE DROITE S 26	0 à 2 m - sables argile galets			0 à 2 m : 1 600
	2 à 3,5 m - blocs galets graviers			2 à 4 m : 3 000
	3,5 à 22,5 m - galets graviers	16 m : 3,3 mm	17 m : $5,5.10^{-3}$ m/s	4 à 45 m } 900
	22,5 à 45 m - galets graviers sables	35 m : 2,7 mm	27,5 m : $3,8.10^{-3}$ m/s 37,5 m : $3,3.10^{-3}$ m/s	
	45 à 62 m - sables graviers	57 m : 0,72 mm	48 m : $1,6.10^{-3}$ m/s 57 m : $6,5.10^{-4}$ m/s	< 600
	62,5 à 70 m - galets graviers sables	65 m : 1,06 mm	68,5 m : 10^{-3} m/s	
	70 à 76 m - sables graviers	75 m : 0,71 mm	76 m : $4,2.10^{-4}$ m/s	

Tableau 7 - Equivalence des paramètres physiques pour les sondages S 6 et S 26.-

* Les essais de pompage, réalisés dans les gros forages et les puits de la plaine, étant de durée suffisante, la formule de THEISS-JACOB peut s'appliquer pour calculer la transmissivité T :

$$T \text{ m}^2/\text{s} = K \text{ m/s} \times H \text{ m}$$

et S le coefficient d'emmagasinement ou la porosité efficace

$$\Delta m = \frac{2,3 Q}{4 \pi T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S}$$

où Q est le débit d'exhaure en m³/s

T le temps en mn

r la distance du point d'observation au puits en m

Δ le rabattement de la nappe au point d'observation en m.

Suivant les conditions et les résultats de l'essai de pompage, j'ai utilisé, pour calculer la transmissivité T :

. les courbes semi-logarithmiques de remontée dans les piézomètres proches en fonction du temps t,

$$T \text{ m}^2/\text{s} = K H = \frac{0,183 Q}{C}$$

(où C est le coefficient angulaire de la droite tracée) ;

. les courbes semi-logarithmiques de rabattement en fonction de la distance,

$$T \text{ m}^2/\text{s} = K H = 0,366 \frac{Q}{C}$$

Cette dernière courbe permet généralement de mesurer le rayon d'influence R du puits pour le débit d'exhaure Q, rayon au-delà duquel le rabattement de la nappe devient nul.

On pourra ainsi mesurer $S = \frac{2,25 T t}{R^2}$

Quand on pourra émettre l'hypothèse d'une réalimentation induite par la Romanche, on appliquera aussi la formule :

$$S = 2,25 \frac{(K H) t}{4 d^2}$$

où d est la distance du puits au point de réalimentation et t le temps de stabilisation des niveaux.

FORAGES	Perméabilité (essais LEFRANC) d'exhaure	Débit	Transmissivité	K	Transmissivité	K	Coefficient d'emmagasinement
	K m/s	m ³ /h	T = 0,183 Q/c m ² /s	m/s	T = 0,366 Q/c' m ² /s	m/s	S = 2,25 T t/4d ²
RIVE GAUCHE	40 m : 7,3.10 ⁻⁴ 48 m : 8,6.10 ⁻⁴ 53 m : 1,9.10 ⁻³	400 juin 66:	Δ mesurés en P 121 et P 122	13.10 ⁻³	Δ mesurés en F 11, S 8, S 6, S 7, P 124, P 121	13.10 ⁻³	R = 450 m ; t = 10 h 15 %
F 12			370.10 ⁻³		370.10 ⁻³		10 %
F 13		500 avril 66:			Δ mesurés en P 131, P 132, P 133	16.10 ⁻³	
F 11 (Puits 1 JOUCHY)		1 500 mai 66	Δ mesurés en P 115, P 114, P 112	25.10 ⁻³	760.10 ⁻³	27.10 ⁻³	R = 2 200 m ; t = 73 h (fin de pompage) 8,4 à 9,3 % 24 à 27 %
F 1 (Puits 2 JOUCHY)	20 m : 4.10 ⁻² 36 m : 6,8.10 ⁻⁴	200 mars 72	Δ mesurés à 15, 20, 25 m et en P II 3 à 55 m	1,7.10 ⁻³	34,4.10 ⁻³	1,72.10 ⁻³	R = 100 m ; t = 5,5 h 15 % 9,1 %
RIVE DROITE		950 avril 66:	Δ mesurés en S 3, P 152, P 151 A et B	9,6.10 ⁻³	Δ mesurés en S3, P 152, P 153, P 151 A et B	11,4.10 ⁻³	R = 750 m ; t = 32,5 h 12,6 à 15 % 16,8 à 20 %
F 15			270.10 ⁻³		320.10 ⁻³		

Tableau 8 - Résultats des essais de pompages effectués. Calcul des coefficients de perméabilité et des coefficients d'emmagasinement.

Les compte-rendus des essais de pompage effectués en 1966 (sur F 12, F 13, F 11 et F 15) n'ont pas été retrouvés.

J'ai recalculé les transmissivités, les perméabilités et les porosités efficaces à partir des quelques courbes figurant dans l'étude C.P.G.F. Les résultats du *tableau 8* sont peu différents de ceux transcrits dans cette étude ; les coefficients de perméabilité ainsi calculés, semblent élevés et nettement supérieurs à ceux qu'utilise ensuite la C.P.G.F. dans les calculs des bilans ($K = 7.10^{-3}$ m/s pour l'ensemble de la plaine de Jouchy-Péage).

Devant l'incertitude des résultats, et pour tenir compte des erreurs par excès possibles, j'admettrai dans les chapitres suivants la valeur moyenne de :

$K = 5.10^{-3}$ m/s pour la nappe de l'Ile Falcon, au droit de la Croix du Mottet ;

$K = 10.10^{-3}$ m/s pour les zones amont et médiane de la plaine de Jouchy et du Péage ;

$K = 3.10^{-3}$ m/s pour la zone aval de la plaine.

D'après ces essais de pompage, le coefficient d'emmagasinement S varie de 8 à 27 % suivant les points ou les méthodes de calcul.

Pour vérifier ces valeurs, j'ai utilisé deux autres méthodes de calcul :

1) méthode d'ARCHIE :

selon ARCHIE (1942) la "porosité utile brute" (Pub) peut être mesurée à partir de la résistivité électrique d'un horizon aquifère et celle de l'eau contenue dans cet horizon :

$$Pub = \sqrt{Rw/Re} \quad \text{où } Rw = \text{résistivité de l'eau} \\ Re = \text{résistivité des sols.}$$

Pour obtenir la "porosité utile vraie", assimilable au coefficient d'emmagasinement, il faut corriger les résultats obtenus par un coefficient tenant compte de la seule hauteur des aquifères non argileux. A Jouchy, comme les terrains argileux sont inexistant, le coefficient de correction = 1.

Les résultats obtenus à partir des sondages électriques effectués à Jouchy entre le 6 juillet et le 1er août 1964 (C.P.G.F.) et ceux des analyses effectuées au cours des mois de juillet (1975 à 1980) sur les sondages mécaniques correspondants, sont transcrits dans le *tableau 9*.

J'ai considéré que le sol avait une température moyenne de 10°C en cette saison, température de l'eau mesurée dans les couches profondes de la nappe.

Selon cette méthode, le coefficient d'emmagasinement S varie de 13 à 19 % en rive gauche et de 18 à 26 % en rive droite.

On peut remarquer que S ainsi mesuré, est plus faible dans les couches superficielles (où se font les mouvements hydrodynamiques de la nappe) que dans les couches les plus profondes.

S (moyen) mesuré sur les quinze premiers mètres en rive gauche (S 8, S 6 et S 5) s'élève à 16,2 %.

	Profondeur du tube en m	Re ohm.m (d'après C.P.G.F.)	Moyenne des Rw à 20°C	Rw à 10°C ohm.m	$S = \sqrt{\frac{Rw}{Re}}$
Rive gauche					
S 8	12	1 700	36	28	12,8
S 8 P	30	818 (Moy.)	38,5	30	19,1
S 6	15	1 050	42	32,8	17,7
S 6 P	30	1 050	38	29,6	16,8
F 12	30,5	1 000	42	32,8	18,1
F 12 I	45	≈ 800	40	31,2	19,7
F 12 P	54	≈ 700	39	30,4	20,8
S 5	15	900	38	29,6	18,1
Rive droite					
S 3	15	978 (Moy.)	40	31,2	17,9
S 3 P	22	720			
S 4	14,6	530	47,5	37	26,4
S 4 P	30	400			

Tableau 9 - Résultats des calculs du coefficient d'emmagasinement par la méthode d'ARCHIE.-

2) Méthode de H. SCHOELLER (1962)

on peut également calculer la porosité efficace me (que l'on peut assimiler ici au coefficient d'emmagasinement) en comparant les fluctuations des niveaux de la Romanche, à l'amont des zones d'infiltration, à celles d'un front de mer alimentant une nappe souterraine et en appliquant la formule de H. SCHOELLER (1962) :

$$hx = h_0 e^{-d \sqrt{\pi me/t_0}}$$

ou encore :

$$me = \frac{t_0 T}{\pi} \left(\frac{1}{d} 2,3 \log \frac{hx}{h_0} \right)^2$$

où hx et h₀ sont les demi-amplitudes du mouvement de la rivière et du toit de la nappe en un point donné, distant de d mètres des rives

t₀ est la période.

Ainsi, entre le 9 mai et le 6 juin 1979, lors de la recharge de la nappe les niveaux, à l'amont de la plaine, ont varié de 2,10 m (soit $h_0 = 1,05$ m) ; les niveaux du toit de la nappe dans le forage F 12, situé à $d = 200$ m de la rive et où $T = 370.10^{-3}$ m²/s selon les essais de pompages, ont varié de 1,10 m (soit $h_x = 0,55$).

$$me = \frac{t_0 \times 0,370}{\pi} (2,15.10^{-6}) = 15,8 \%$$

Dans le calcul des bilans hydrogéologiques (chapitre II-3) j'adopterai la valeur moyenne de 15 % pour l'ensemble de la nappe de Jouchy, qui correspond aux résultats des essais de pompage (en moyenne).

II-2 - LES FACTEURS CLIMATIQUES

Jusqu'en 1978, nous disposions des renseignements météorologiques fournis par l'Antenne de Météorologie de Montagne de Saint-Martin-d'Hères. En septembre 1977, un poste climatologique a été installé sur le champ de captage de Jouchy, à 300 m d'altitude.

Il comprend :

- . un pluviographe hebdomadaire, enregistreur (SALMORAGHI) ;
- . un thermographe hebdomadaire, enregistreur (J. RICHARD) ;
- . un barographe enregistreur (J. RICHARD) ;
- . un hygrographe enregistreur (J. RICHARD).

Les enregistrements hebdomadaires des températures et des précipitations sont transmis à l'Antenne Météorologique de Saint-Martin-d'Hères.

II-2-1 - Les températures

Le *tableau 10* et la *figure 17* indiquent les moyennes mensuelles des températures maxima, minima et moyennes enregistrées à Jouchy au cours des années 1978, 1979, 1980 et 1981.

Les températures moyennes annuelles enregistrées à Jouchy au cours des quatre dernières années, sont normales pour l'altitude. Elles se situent sur la pente de décroissance des températures relevées dans les stations climatologiques du bassin versant de la Romanche (Rivier d'Allemont, Vaujany, Auris, Bourg-d'Oisans...).

La diminution des températures moyennes annuelles, quand l'altitude s'élève, est légèrement moins rapide dans le bassin de la Romanche que celle donnée par la pente de décroissance standard théorique (*figure 18*).

En raison de l'insolation réduite à quelques heures, sur la plaine de Jouchy, les températures maxima sont faibles pour l'altitude (*figure 19*).

Elles se rapprochent de celles de Bourg-d'Oisans, notamment en automne.

TEMPÉRATURE EN °C	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<u>1978</u>												
Température max. Moyenne : 15,2	4,8	7,0	12,3	13,0	18,3	23,5	25,4	24,5	21,6	15,3	8,9	8,3
Température min. Moyenne : 5,0	-0,7	1,0	2,9	3,5	7,2	10,6	12,4	12,2	8,6	4,7	-2,9	0,5
Température moy. Moyenne : 10,12	2,05	4,0	7,6	8,25	12,7	17,0	18,8	18,3	15,1	10,0	3,0	4,4
<u>1979</u>												
Température max. Moyenne : 14,8	3,4	7,9	12,3	13,4	20,8	22,5	25,6	23,1	20,2	16,0	6,9	6,0
Température min. Moyenne : 4,9	-4,3	1,0	2,8	3,2	7,2	11,4	11,2	11,3	9,2	7,4	-0,2	-1,6
Température moy. Moyenne : 9,86	-0,45	4,45	7,55	8,3	14,0	17,0	18,4	17,2	14,7	11,7	3,35	2,2
<u>1980</u>												
Température max. Moyenne : 13,3	3,2	9,3	9,3	12,0	16,4	20,2	23,3	24,9	22,7	13,3	5,6	-0,3
Température min. Moyenne : 3,7	-2,6	-0,0	0,5	1,8	5,9	9,2	11,0	13,0	9,9	4,8	-2	-7,2
Température moy. Moyenne : 8,5	0,3	4,6	4,9	6,9	11,1	14,7	17,1	19,0	16,3	9,1	1,8	-3,8
<u>1981</u>												
Température max. Moyenne : 13,7	-0,06	1,8	11,7	15,6	18,2	22,05	22,0	24,1	20,8	14,6	7,5	5,45
Température min. Moyenne : 3,6	-7,2	-6,1	1,4	3,9	6,5	9,9	10,5	11,3	10,3	5,2	-2,4	-0,9
Température moy. Moyenne : 8,65	-3,6	-2,15	6,6	9,8	12,35	16,0	16,25	17,7	15,5	9,9	2,55	2,3

Tableau 10 - Températures enregistrées à la station climatologique de Jouchy au cours des années 1978, 1979, 1980 et 1981.-

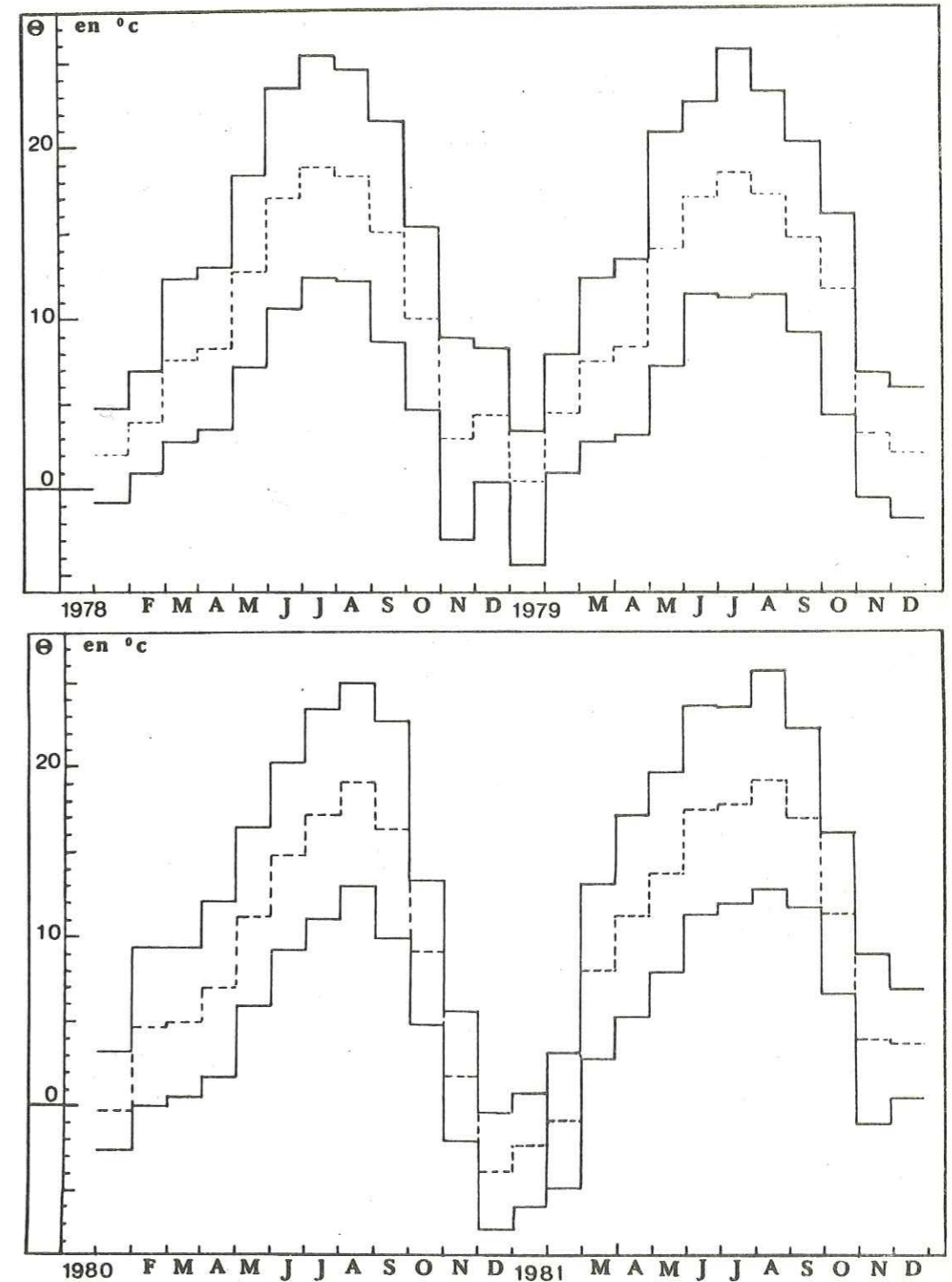


Figure 17 - Moyennes des températures mensuelles enregistrées à Jouchy au cours des années 1978, 1979, 1980 et 1981.-

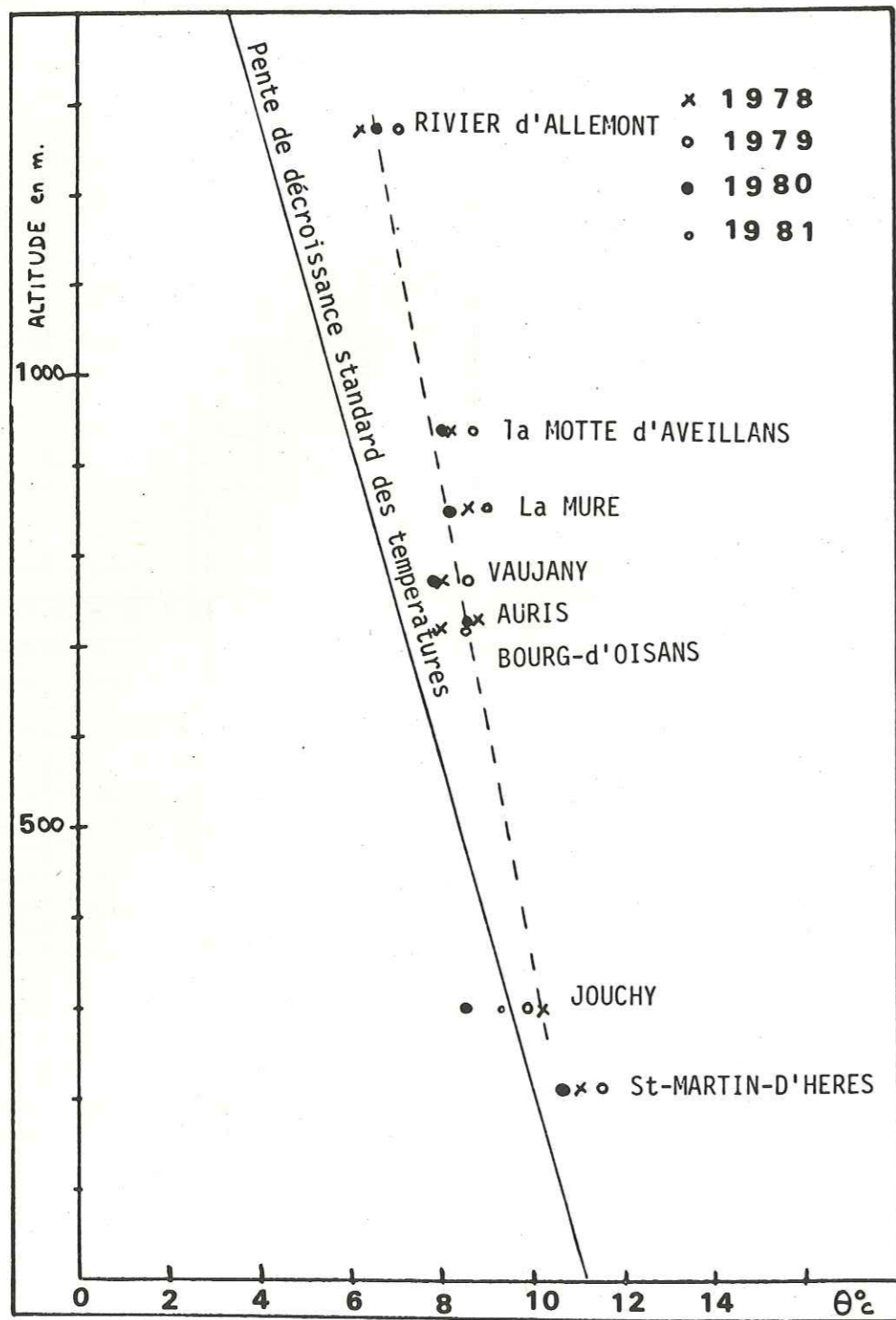


Figure 18 - Répartition des températures moyennes annuelles en fonction de l'altitude pour quelques stations situées dans le bassin versant de la Romanche et la région grenobloise - (d'après l'Antenne Météorologique de Saint-Martin-d'Hères).-

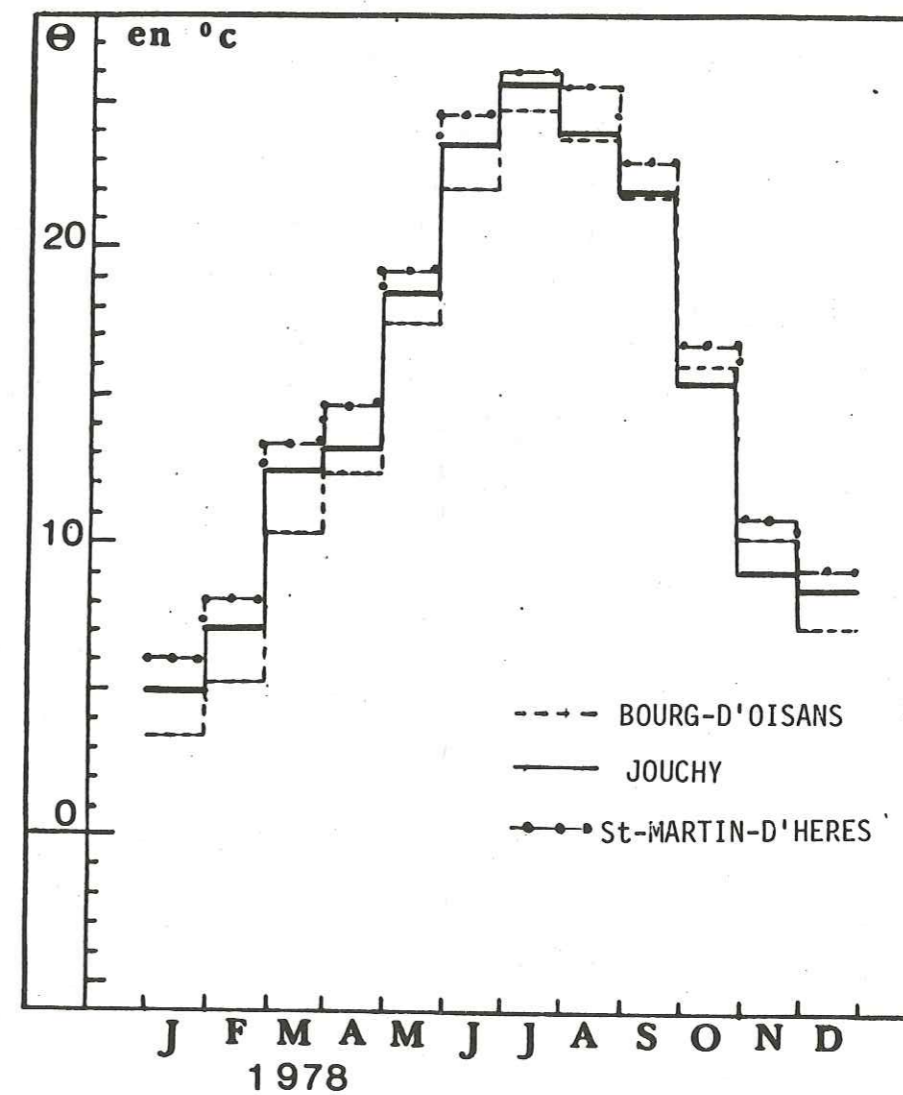


Figure 19 - Variations des températures maxima mensuelles, à Bourg-d'Oisans, Jouchy et Saint-Martin-d'Hères, en 1978.-

II-2-2 - Les précipitations

	Total mm de pluie	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1978													
St-Martin-d'Hères	959,4	138,5	205,6	154,0	56,1	80,7	61,4	50,0	93,5	28,6	15,9	5,7	69,4
St-Pierre-de-Mésage (Jouchy)	780,5	107,6	189,5	89,5	37,5	76,0	34,6	42,0	81,0	26,0	17,1	3,7	76,0
Bourg-d'Oisans	982	152	188	166	32	54	56	64	83	17	12	1	153
1979													
St-Martin-d'Hères	1 149,4	104,8	96,5	104,1	86,6	66,6	104,2	15,1	123,2	39,5	156,5	93,0	159,3
St-Pierre-de-Mésage (Jouchy)	1 036,4	100,8	79,7	111,6	98,5	64,3	96,6	18,4	93,5	45,7	168,6	60,8	97,9
Bourg-d'Oisans	1 226	137	125	148	66	52	48	27	90	34	158	93	248
1980													
St-Martin-d'Hères	1 034,5	74,1	82,4	121,1	35,1	84,7	101,4	94,3	74,8	42,2	170,2	63,5	90,7
St-Pierre-de-Mésage (Jouchy)	956	84,2	51,4	108,2	47,1	77,7	92,4	79,6	71,8	51,5	170,8	52,4	68,9
Bourg-d'Oisans	984	106	96	122	5	57	89	99	52	69	161	57	71
1981													
St-Martin-d'Hères	1 168	187,4	45,6	96,9	18,1	105,2	63,1	105,7	16,4	195,1	116,2	60,9	157,4
St-Pierre-de-Mésage (Jouchy)	877,4	39,2	27,4	75,5	22,4	116,3	65,6	101,6	33,9	148,2	76,7	24,8	145,8
Bourg-d'Oisans	1 353	179	44	118	21	111	64	101	18	161	190	64	282

Tableau 11 - Hauteurs mensuelles des précipitations enregistrées à St-Martin-d'Hères, Jouchy et Bourg-d'Oisans au cours des années 1978, 1979, 1980 et 1981.-

Le tableau 11 transcrit les hauteurs des précipitations enregistrées annuellement et mensuellement aux stations de Saint-Martin-d'Hères, de Jouchy et de Bourg-d'Oisans, au cours des années 1978, 1979, 1980 et 1981. La hauteur annuelle des précipitations enregistrées à Jouchy est nettement inférieure à celles enregistrées dans les stations climatologiques du bassin versant ou de Saint-Martin-d'Hères. Elle est peu différente de celle enregistrée à Auris (730 m d'altitude). Ces deux stations, situées dans des parties encaissées de la vallée de la Romanche, sont protégées par les versants montagneux les plus arrosés (phénomène d'ombre pluviale).

D'une façon générale, la hauteur des précipitations enregistrée au cours de l'année 1978 est peu différente des moyennes établies pour les années de référence. Le coefficient d'hydraulicité moyen, dans le département de l'Isère, en 1978, est de 0,992, il est proche de 1,00 pour les stations de Saint-Martin-d'Hères (0,98), Bourg-d'Oisans (1,04), Ornon (1,05), la Motte d'Aveillans (0,99), la Mure (1,09) et Corenc (0,97), qui sont situées à moins de 950 m d'altitude. La hauteur annuelle "normale" des précipitations à Jouchy est donc probablement proche de celle enregistrée en 1978, soit : 780 mm ce qui est relativement faible.

La méthode de THIESSEN (H. SCHOELLER -1952), établie sur une surface de 481 km² entre les stations de Saint-Martin-d'Hères, Vaujany, la Motte d'Aveillans et Auris, permet de partager cette superficie en 4 zones de surfaces à peu près égales (figure 20) :

- . Saint-Martin-d'Hères : 26 % de la superficie totale
- . la Motte d'Aveillans : 24,5 % de la superficie totale
- . Auris : 25 % de la superficie totale
- . Vaujany : 24,5 % de la superficie totale.

La moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations annuelles des 4 stations retenues pour l'année 1978, et la moyenne annuelle calculée par la méthode de THIESSEN, sont donc peu différentes (tableau 12).

Pour 1978, la hauteur des précipitations enregistrées à JOUCHY est très inférieure à la hauteur moyenne à 663 m d'altitude, calculée par la méthode de THIESSEN. La station météorologique de Jouchy, située à 300 m d'altitude, est donc très utile pour estimer les lames d'eau écoulées sur la plaine et les versants les plus proches.

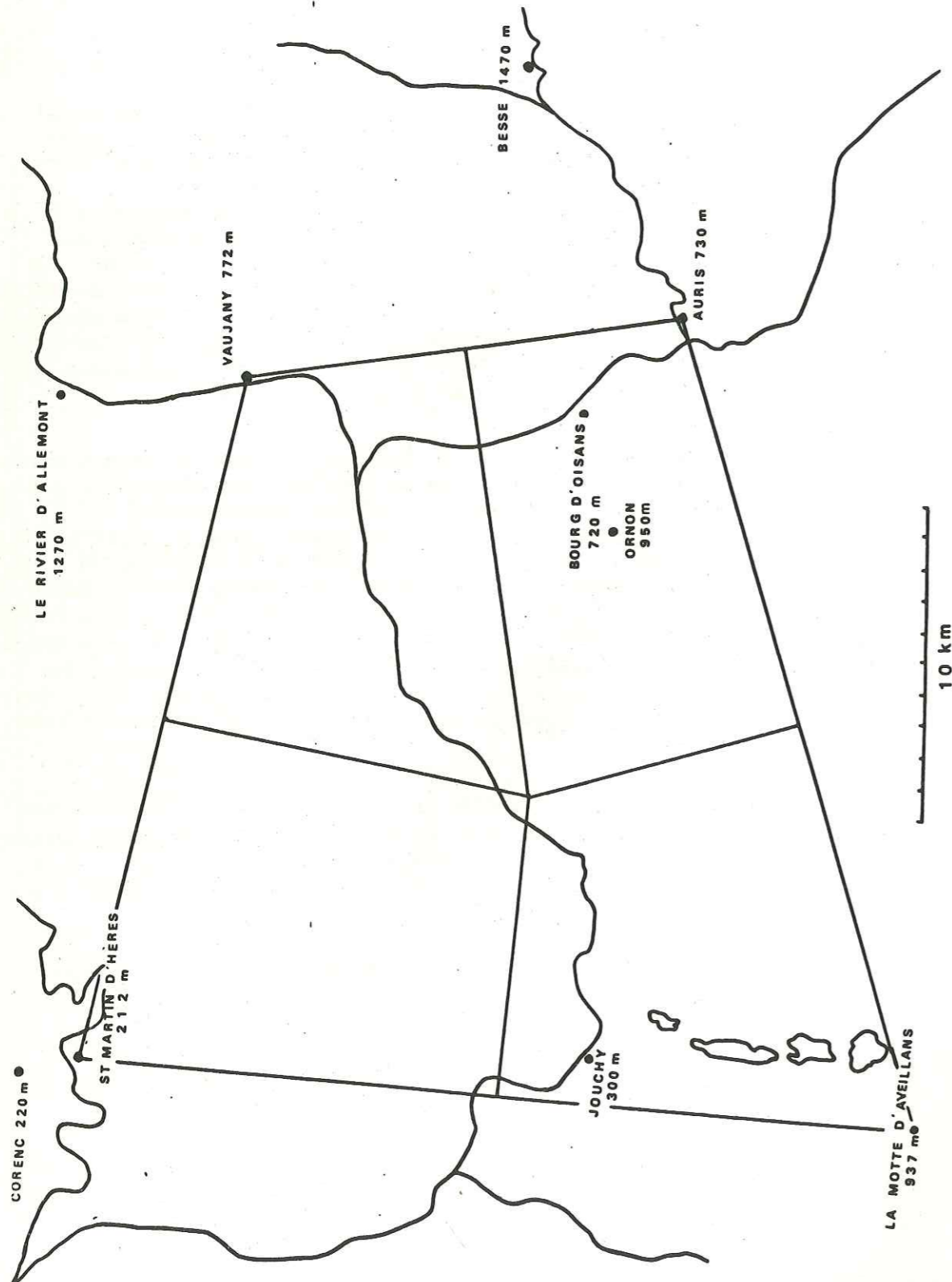


Figure 20 - Répartition des zones d'influence des stations pluviométriques selon THIESSEN.-

1978	St-Martin d'Hères	La Motte d'Aveillans	Auris	Vaujany	Total ou Moyenne	Débit spécifique l/s/km ²
Altitude en m	212	937	730	772	663	
Superficie % ... km ² ..	26 125	24,5 118	25 120	24,5 118	100 481	
Hauteur des pré- cipitations enre- gistrée en mm	961	976	874	1 456	1 067	33,8
calculée selon Thiessen pour la surface considérée	250	239	218,5	357	1 064	33,7

Tableau 12 - Hauteur des précipitations de quelques stations situées dans le bassin versant de la Romanche.-

II-2-3 - Evapotranspiration, précipitations efficaces

Les enregistrements des températures et des précipitations m'ont permis de calculer avec précision, pour les années 1978, 1979 et 1980 la "précipitation efficace" (PE) qui s'infiltré directement à travers le sol de la plaine, en tenant compte de la hauteur des précipitations enregistrées (P) et de l'évapotranspiration réelle E.T.R.

$$PE \text{ mm} = P \text{ mm} - E.T.R. \text{ mm}$$

1) à l'échelle de l'année,

j'ai utilisé trois formules empiriques connues (tableau 13).

Elles tiennent compte :

. de la température moyenne annuelle, T°C

$$(1) \quad E.T.R. \text{ mm} = 210 + 30 T^{\circ}\text{C}$$

. de la température et de la hauteur des précipitations :

- la formule de A. COUTAGNE (1942) :

$$E.T.R. \text{ m} = P \text{ m} - \lambda P^2$$

$$\text{où } \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 T^{\circ}\text{C}}$$

avec T°C = température moyenne annuelle.

elle n'est valable que pour

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$$

ce qui est vérifié à Jouchy pour les années considérées.

- la formule de L. TURC (1951) :

$$E.T.R. \text{ mm} = \frac{P \text{ mm}}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

où P est la hauteur des précipitations annuelles

$$\text{et } L = 300 + 25 T^{\circ}\text{C} + 0,05 T^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Année	P en mm	T °C	(1)		A. COUTAGNE		L. TURC	
			E.T.R.	PE	E.T.R.	PE	E.T.R.	PE
1978	780,5	10,17	515	265,5	506,5	274	488,4	292
1979	1 036,4	9,86	506	531	544	493	522	514
1980	956	8,5	465	491	497	459	478	478
1981	877,4	8,65	469,5	408	495	383	472	405

Tableau 13 - Evapotranspiration et précipitations efficaces annuelles.-

Malgré une certaine dispersion dans les résultats, nous pouvons noter que selon les années, 37 à 50 % (selon L. TURC) des eaux des précipitations ont pu s'infiltrer dans la nappe.

En considérant que la superficie de la plaine du Péage-de-Vizille et Jouchy est peu différente de 760 000 m², cette lame d'eau représente environ 30.10⁴ m³, soit : 3 à 4 % des débits pompés annuellement dans la nappe, c'est-à-dire les débits nécessaires pour 10 à 12 jours de distribution (tableau 14).

Année	Apports directs des pluies			Débit pompé moyen l/s
	PE mm (TURC)	volume annuel m ³	débit moyen l/s	
1978	292	22,2.10 ⁴	7	284
1979	514	39.10 ⁴	12,4	319
1980	478	37,2.10 ⁴	11,8	327

Tableau 14 - Comparaison des débits moyens des apports directs des pluies sur la plaine alluviale et des débits pompés à Jouchy.-

2) à l'échelle du mois,

la formule de C.W. THORNTHWAITE permet de calculer l'évapotranspiration à l'échelle du mois à partir de la valeur de l'évapotranspiration potentielle, fonction de la température moyenne mensuelle établie par l'intermédiaire d'un indice thermique mensuel $i = \frac{(t^{\circ}\text{C})^{1,514}}{5}$ et de la durée astronomique du jour.

L'évapotranspiration, pour chaque mois, est ajustée à l'aide d'un facteur de correction K, donné par l'auteur, qui est fonction de la latitude du lieu. L'évapotranspiration potentielle mensuelle en mm est égale à :

$$E_p \text{ mm} = 16 \left(10 \frac{T}{I}\right)^{\alpha}$$

$$\text{où } I = \sum_{1}^{12} i$$

$$\alpha = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

T = température mensuelle moyenne du mois :

$$\frac{1}{2} (M + m) \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Les valeurs mensuelles de l'évapotranspiration, obtenues pour 1978, 1979 et 1980, par l'application de cette formule sont portées dans le tableau 15.

Pour certains mois secs de l'année (juin, juillet, septembre, octobre, novembre 1978 ; juin et septembre 1979) l'évapotranspiration calculée est supérieure à la hauteur des précipitations enregistrées.

Dans ce cas, la zone de la frange capillaire de la nappe peut être, elle-même, sollicitée par l'évaporation. Les valeurs des hauteurs de la frange capillaire données par les auteurs sont inférieures à 1 m pour le type des terrains rencontrés à Jouchy (tableau 16).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total ou Moyenne
<u>1978</u>													
T moy. °C	2,05	4,0	7,6	8,25	12,7	17,0	18,8	18,3	15,1	10,0	3,0	4,4	10,17°C
i	0,4	0,71	1,88	2,13	4,1	6,38	7,43	7,13	5,23	2,86	0,46	0,82	$\Sigma i = I = 39,6$
E. Pot. mm	10,6	16,2	33,5	36,8	60	83,4	93,5	90,7	73	45,7	11,7	18	$\alpha = 1,134$
K	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74	
E. Pot. corrigée	8,4	13,1	34,2	41,5	77,3	109	123,5	111	75,9	43	9,22	13,3	
P mm	107,6	189,5	89,5	37,5	76	34,6	42	81	26	17,1	3,7	76	780,5 mm
PE mm	99	179	55,3	/	/	/	/	/	/	/	/	62,7	393 mm
<u>1979</u>													
T moy. °C	-0,45	4,45	7,55	8,3	14,0	17,0	18,4	17,2	14,7	11,7	3,35	2,2	9,8°C
i	/	0,84	1,87	2,15	4,75	6,38	7,19	6,49	5,12	3,62	0,55	0,29	$\Sigma i = I = 39,25$
E. Pot. mm	/	18,4	33,5	37,2	67,1	83,6	91,4	84,7	71	54,8	13,4	8,3	$\alpha = 1,128$
K	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74	
E. Pot. corrigée	/	14,9	34,1	42	82,6	109,5	120,6	103,3	73,8	51,6	10,6	6,16	
P mm	100,8	79,7	111,6	98,5	64,3	96,6	18,4	93,5	45,7	168,6	60,8	97,9	1 036,5 mm
PE mm	100,8	64,8	77,5	56,5	/	/	/	/	/	117	50,2	91,7	558,5 mm
<u>1980</u>													
T moy. °C	0,3	4,6	4,9	6,9	11,1	14,7	17,1	19,0	16,3	9,1	1,8	-3,8	8,5°C
i	0,014	0,88	0,97	1,63	3,34	5,12	6,43	7,55	5,98	2,47	0,21	/	$\Sigma i = I = 34,6$
E. Pot. mm	1,21	21,6	23,1	33,2	54,8	73,8	86,6	96,8	82,3	44,5	8,02	/	$\alpha = 1,057$
K	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74	
E. Pot. corrigée	0,95	17,5	23,6	37,5	70,8	96,7	114,5	118,1	85,6	41,8	6,3	/	
P mm	84,2	51,4	108,2	47,1	77,7	92,4	79,6	71,8	51,5	170,8	52,4	68,9	956 mm
PE mm	83,2	33,9	84,6	9,6	6,9	/	/	/	/	129	46,1	68,9	462 mm

Tableau 15 - Précipitation efficace mensuelle en 1978, 1979 et 1980 calculée d'après la formule de THORNTHWAITE.-(1954.)

d 10 des sables prélevés à Jouchy-Péage sur les 25 premiers mètres (d'après J. PERRIAUX)	Expérience de A. HAZEN (1892 in H. SCHOELLER)	Expérience de TSCHEBOTARIOFF (1951 in H. SCHOELLER)
	d 10 hauteur de la frange capil.	hauteur de la frange capil.
S 3 - 20 m : 0,13		sables
S 4 - 24 m : 0,60	0,35	35,6 cm fins et
S 6 - 20 m : 0,23	0,17	40,6 cm grossiers
S 8 - 17 m : 0,07	0,06	91,4 cm 2 mm > d >
moyenne : 0,26		0,025

Tableau 16 - Hauteur de la frange capillaire d'une nappe d'après les expériences de A. HAZEN et TSCHEBOTARIOFF.-

D'après les relevés piézométriques, le toit de la nappe du Péage et de Jouchy est situé à une profondeur supérieure à 1 m, y compris en hautes eaux ; la nappe souterraine, elle-même, est donc à l'abri de toute évaporation.

Comme l'indiquent H. SCHOELLER (1962) et C. THIRRIOT (1973), en climat tempéré, l'évaporation de l'eau déjà infiltrée est freinée, non seulement par la profondeur de la frange capillaire, mais aussi par les phénomènes de transfert de l'énergie thermique et de la circulation de l'eau en milieu saturé.

Par contre, dans le lit mineur et les berges de la Romanche, l'évaporation est possible et nous verrons qu'elle joue un rôle important du point de vue qualitatif des eaux qui s'infiltrent lors des décolmatages de la rivière.

II-3 - LES FACTEURS HYDROLOGIQUES

II-3-1 - Schéma hydraulique de la Romanche - Débits et aménagements

En 1967, J. LOUP considérait la Romanche comme "un bon exemple de rivière de haute montagne peu perturbée par les aménagements". Les installations actuelles et les projets d'aménagements prévus dans le bassin versant de la Romanche influencent l'hydrologie de surface et par conséquent l'hydrologie souterraine de la vallée.

Je n'examinerai ici que les aménagements actuels ayant une influence sur les débits de la Romanche, transitant face au Péage-de-Vizille (tableau 17).

. Les retenues du Chambon et de Saint-Guillerme

La Romanche à l'amont de la retenue du Chambon a un régime nivo-glaciaire (figure 4)* ; son débit moyen annuel est de 7,3 m³/s (années de référence : 1950-1977) ; son débit spécifique est de 33,1 l/s/km². La retenue du Chambon, d'une capacité de 48,5 hm³, recueille :

- . les eaux de la Romanche et celles du bassin versant surplombant le lac, soit un débit moyen annuel de : 8,56 m³/s (années de référence : 1936-1977) ;
- . les débits dérivés du Ferrand jusqu'à concurrence de 7,5 m³/s. Le Ferrand a un débit moyen annuel de 3,1 m³/s (années de référence : 1958-1972)

Le débit réservé à l'aval du barrage est de 100 l/s, auquel viennent s'ajouter :

- . les débits supérieurs à 11 m³/s admis à l'usine du Chambon ; ils représentent environ 9 m³/s en moyenne, du mois de mai au mois d'août ;
- . les débits du Ferrand non dérivés vers la retenue du Chambon (quand le débit est supérieur à 7,5 m³/s, du mois de mai, juin et juillet) ;
- . les apports naturels du bassin versant partiel, les ruisseaux de l'Alpe, du Rif Tournel, de la Rivoire et d'Auris.

Le débit réservé à l'aval de la retenue du Clapier (capacité : 0,2 hm³, altitude : 744 m) est de : 1 m³/s, auquel viennent s'ajouter les débits restitués par l'usine de Saint-Guillerme (jusqu'à 11 m³/s) et les débits naturels de la Romanche.

* Figure 4 page 20.-

	Débit moyen annuel m ³ /s	Débit dérivé m ³ /s	Débit réservé m ³ /s	Apports supplémentaires
ROMANCHE :				
. Amont du Chambon	7,3			
. Le Ferrand	3,1			
. Aval du Chambon	8,56	≤ 11	0,1	Déversés du barrage quand : Q Rom > 11 m ³ /s débits du : Ferrand quand Q > 7,5 m ³ /s : Affluents du bassin inter- médiaire Chasses du Ferrand
. Au Clapier (Bourg- d'Oisans)			1	Débit turbiné jusqu'à 11 m ³ /s + déversés
. Vénéon	12,5			
. Eau d'Olle	7,95			
. Au Champeau (Livet)	36,4			
. A Gavet	39	≤ 42	0,5 ou 1,5	Affluents du bassin in- termédiaire
. A l'amont de Jouchy (Péage-de-Vizille)	12,4			Affluents du bassin in- termédiaire dont débit turbiné à l'usine de l'Ile Falcon
. A Vizille	42			Ruisseau de Laffrey

Tableau 17 - Débits moyens annuels de la Romanche du lac Chambon à Vizille.-

. A l'amont de la station de jaugeage du Champeau (exploitée par la Direction Technique Générale d'E.D.F. Grenoble - D.T.G.) la Romanche reçoit les eaux de ses affluents principaux, le Vénéon et l'Eau d'Olle. Une partie des eaux du Vénéon (la majorité en période d'étiage) est dérivée depuis la retenue du Plan du Lac (1 172 m) et restituée par l'usine du Pont Escoffier (767 m). En amont de sa confluence avec la Romanche, le Vénéon a un débit moyen annuel de 12,5 m³/s. Le débit moyen annuel de l'Eau d'Olle, mesuré au pont de la Pernière à Allemont, est de 7,95 m³/s. Ce débit représente près de 21,8 % du débit de la Romanche mesuré à la station du Champeau.

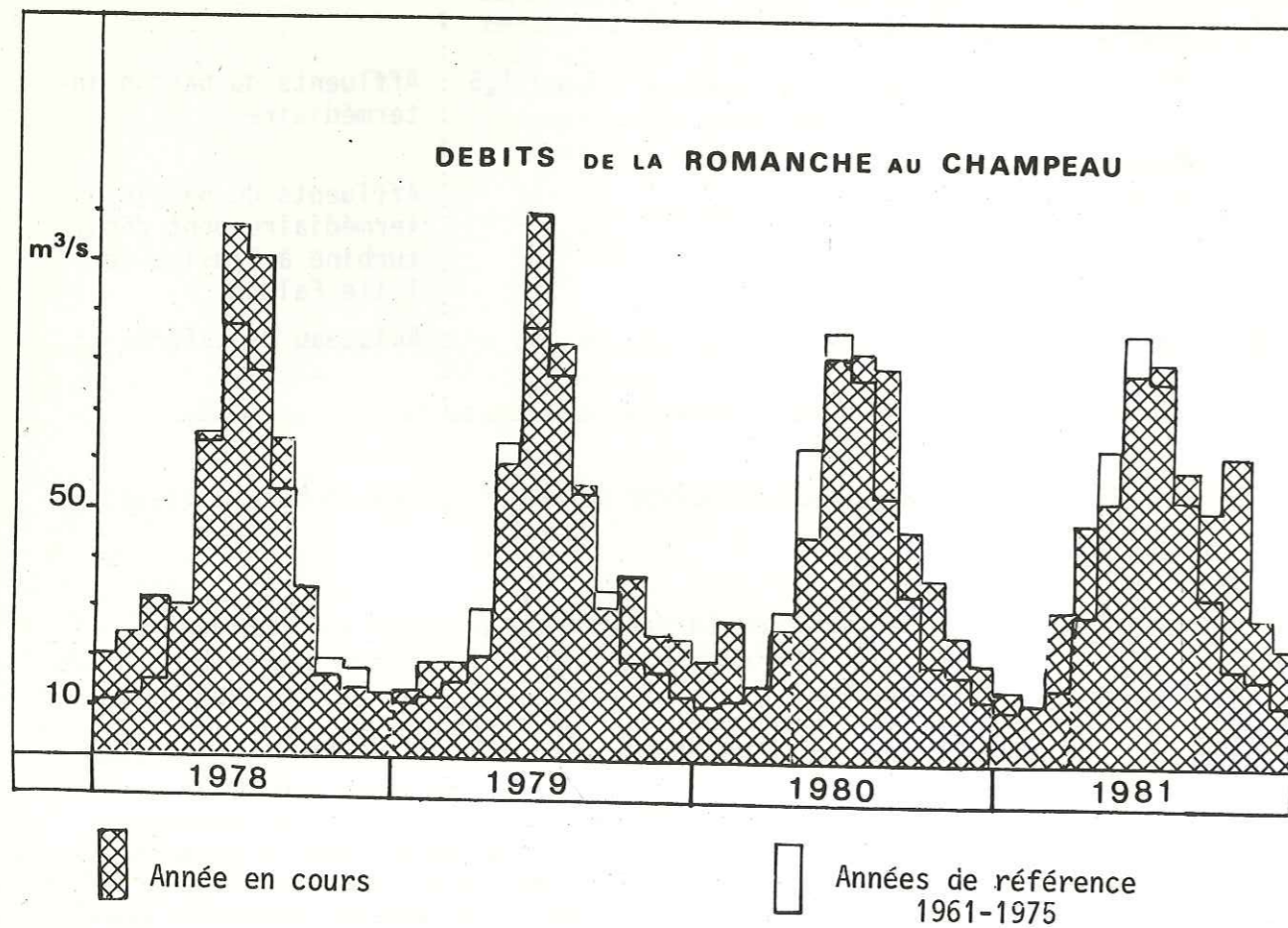
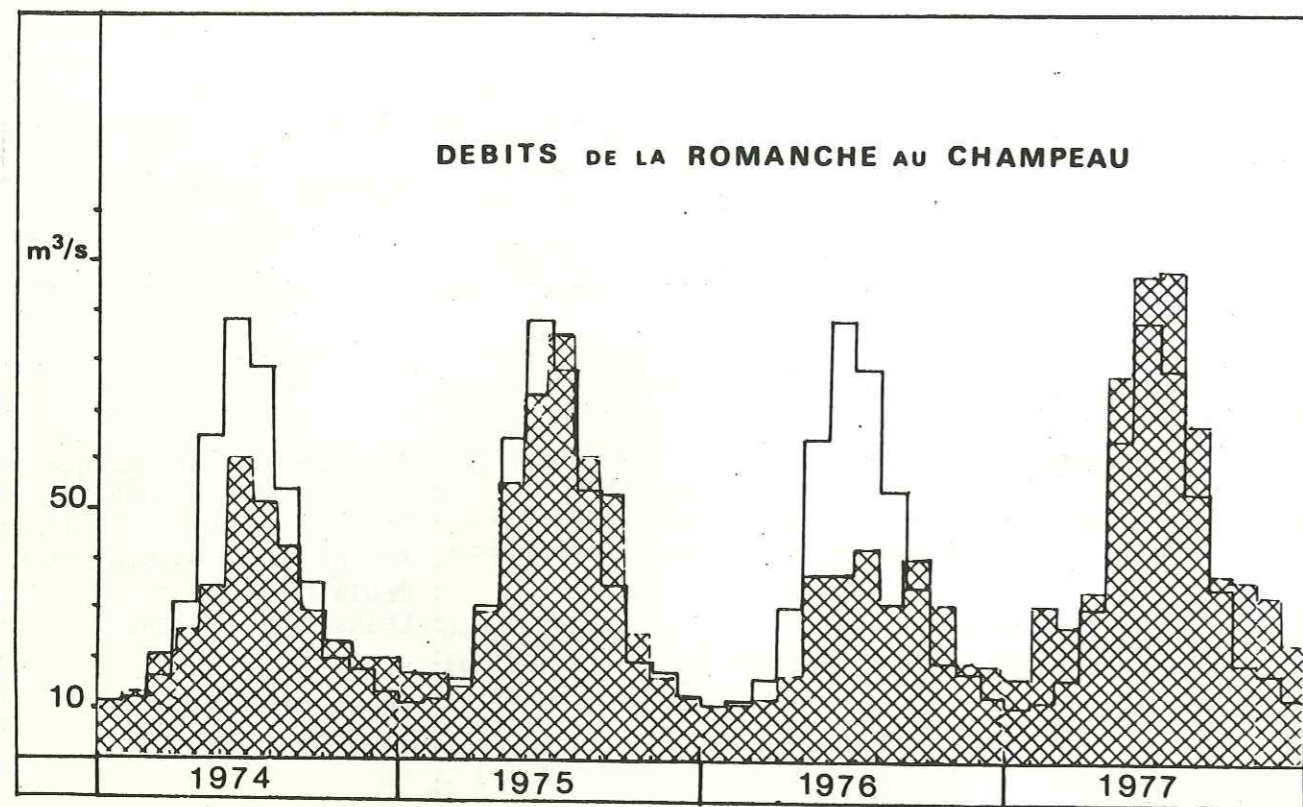


Figure 21 - Variations des débits moyens mensuels mesurés au Champeau, de 1974 à 1980 - (d'après la D.T.G. d'E.D.F. de Grenoble).-

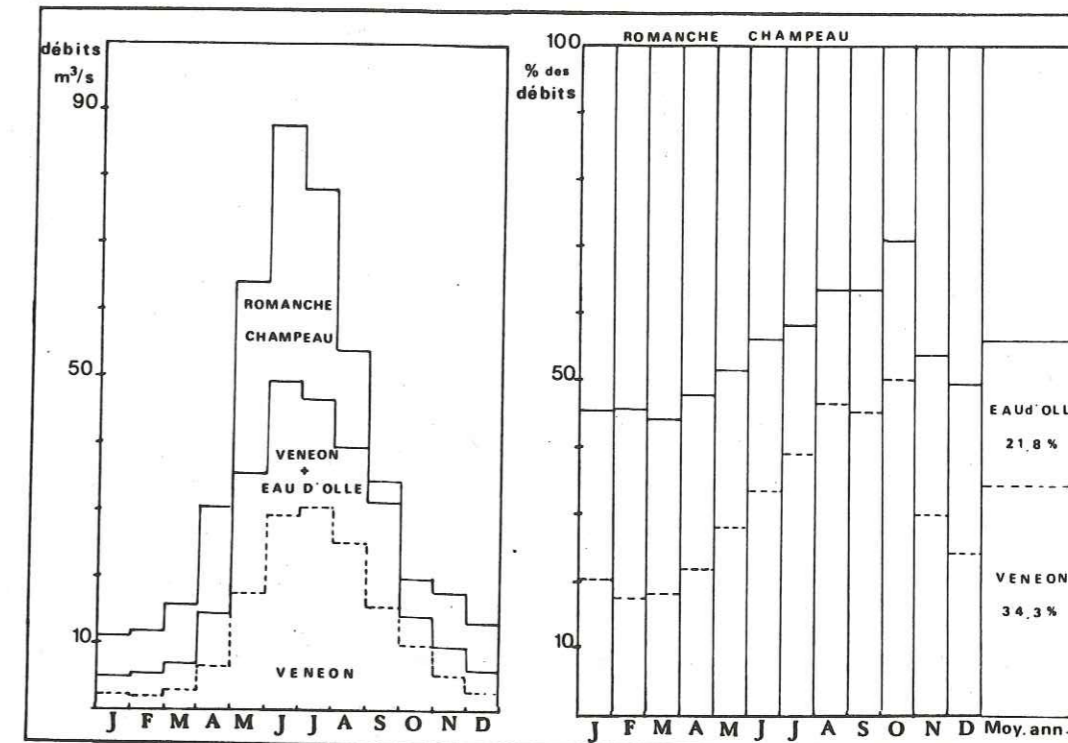


Figure 22 - Participation des apports du Vénéon et de l'Eau d'Olle au débit de la Romanche, mesuré en aval des confluences, à la station du Champeau.-

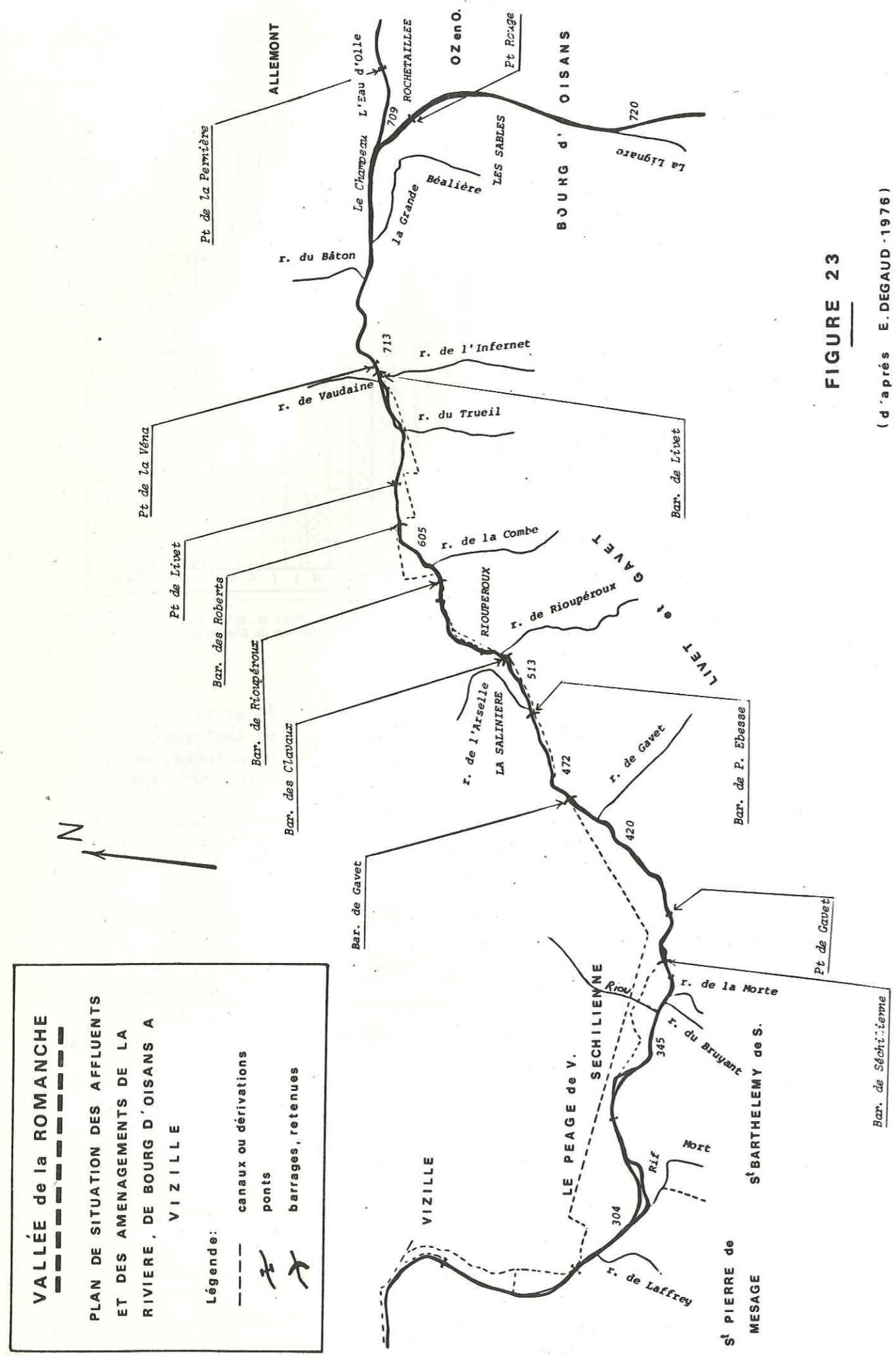
La forte pluviosité de cette vallée (1) et le régime nival de la rivière expliquent l'apport important (20 à 27 %) des eaux de l'Eau d'Olle en automne, en hiver et au printemps (de novembre à juin) aux eaux de la Romanche.

En 1976, année de sécheresse, la baisse des débits naturels de l'Eau d'Olle a entraîné une diminution des apports à la Romanche (pourcentage moyen en 1976 : 17 %).

A la station de jaugeage du Champeau, le bassin versant total de la Romanche a une superficie de 1 000 km². Le débit moyen annuel est de 36,4 m³/s (débit naturel, années de référence 1961 - 1975) ; en basses eaux, (octobre à mars) les débits mesurés sont supérieurs aux débits naturels (calculés par la D.T.G. d'E.D.F., après correction des influences amont) ; en hautes eaux (avril à septembre) ils leur sont inférieurs.

La figure 21 montre les variations des débits moyens mensuels mesurés au Champeau de 1974 à 1981 et la figure 22, la participation des apports du Vénéon et de l'Eau d'Olle au débit de la Romanche, mesuré à l'aval des confluences, à la station du Champeau. On notera la participation prépondérante des eaux du Vénéon au cours des mois d'été et d'automne (août, septembre et octobre).

(1) - moyenne trentenaire (1950-1979) de la hauteur des précipitations au Rivier d'Allemont (1 270 m) = 1 745 mm.-



A l'aval de la station de jaugeage du Champeau, nombreuses sont les prises d'eau et les restitutions. A l'amont du barrage de Gavet, l'ensemble des eaux est restitué à la rivière (figure 23). Les eaux dérivées par ce barrage (29 m³/s, en moyenne), sont restituées à l'aval de l'usine hydroélectrique du Péage-de-Vizille, sous le pont de Saint-Pierre-de-Mésage. De ce fait, 10 km en aval de la prise de Gavet, une partie seulement de l'écoulement de la rivière transite à l'amont des plaines alluviales du Péage et de Jouchy.

Le calcul des débits des rivières de montagne, notamment des rivières aménagées, comportent un certain nombre d'incertitudes, incertitudes qui concernent les débits spécifiques, les débits déversés aux restitutions, les régimes des apports des versants, etc.

Pour contrôler ces calculs, de nombreuses stations de jaugeage seraient nécessaires.

A l'amont ou au droit de la plaine alluviale de Jouchy, la Romanche sinue dans son lit large et mouvant et l'exploitation des appareils ou des échelles limnigraphiques est rendue difficile.

En janvier 1978, nous avons cependant installé un limnigraphe enregistreur (TELEMNIP-NEYRPIC) à l'amont de la plaine de Jouchy, dans une portion de rivière jamais dénoyée ; ceci m'a permis d'établir une relation entre les débits moyens journaliers, Q_c , mesurés au Champeau (d'après D.T.G. d'E.D.F.) et la hauteur moyenne journalière, H, mesurée à l'amont de Jouchy au cours des années 1978 et 1979 (figure 24).

Cette relation s'exprime par la formule :

$$H = 2,7 \log Q_c - 3,78$$

ou

$$Q_c = 10^{0,37 H + 1,4}$$

où H est exprimé en m et Q_c en m³/s.

Cette formule n'est applicable que dans les cas où les débits au Champeau dépassent 42 m³/s ; quand l'essentiel des débits de la rivière est dérivé à Gavet, les variations des hauteurs de la Romanche à Jouchy sont trop faibles pour être significatives.

Nous pouvons constater que la relation, liant les hauteurs mesurées à Jouchy aux débits mesurés à la station du Champeau, a la forme générale d'une courbe de tarage des débits.

En hautes eaux, les débits transitant à l'amont de la plaine de Jouchy dépendent donc essentiellement de ceux transitant au Champeau.

En basses eaux, les débits sont plus fortement influencés d'une part, par les infiltrations dans les nappes souterraines et d'autre part, par les apports des versants.

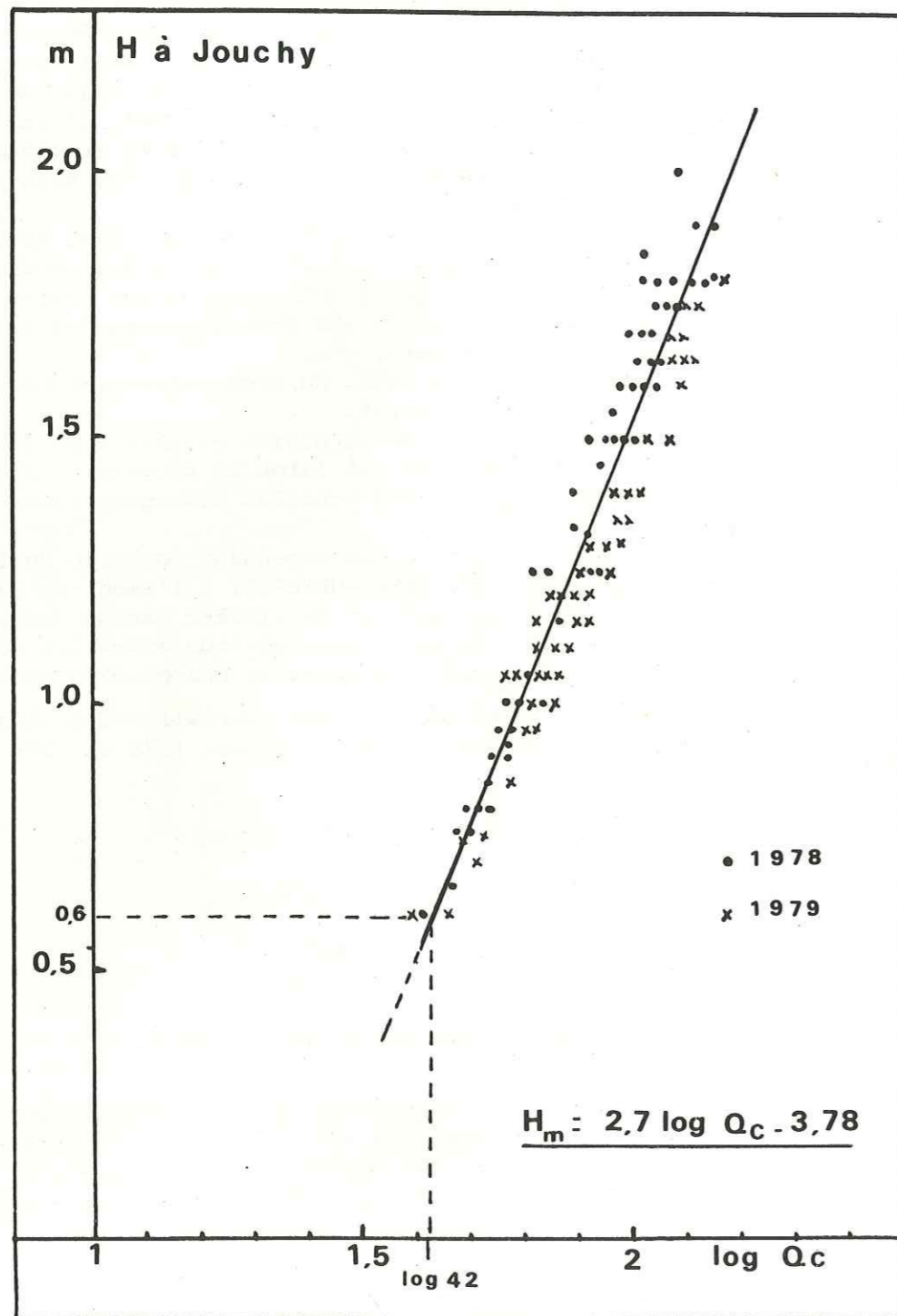


Figure 24 - Relation entre les débits moyens journaliers, Q_c , mesurés au Champeau (D.T.G. d'E.D.F.) et les niveaux moyens journaliers, H , de la Romanche, mesurés à Jouchy, en hautes eaux.-

Les mesures de débits, faites au cours des années de sécheresse, ont montré que les écoulements de la Romanche peuvent être réduits à un débit inférieur à $1 \text{ m}^3/\text{s}$, même pendant les mois d'été, où le débit réservé à Gavet est de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ainsi, en août 1976, le débit mesuré au droit de l'Ile Falcon, à l'aide d'un traceur fluorescent, la Rhodamine W.T., s'élevait à $0,96 \text{ m}^3/\text{s}$ (B. GAILLARD - 1976). En 1966, la C.P.G.F. a calculé qu'au cours de l'année sèche de 1953, le débit de la Romanche au Péage-de-Vizille n'a pas dépassé $1 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant les 4 mois d'hiver (janvier, février, novembre, décembre).

A l'échelle de l'année, on peut calculer les débits transitant à l'amont de la plaine de Jouchy, en tenant compte :

- 1) des débits réservés à l'aval de la prise de Gavet, c'est-à-dire :

$0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ du 16 septembre au 31 mars ;
 $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ du 1er avril au 15 septembre.

A ces débits réservés se substituent les débits déversés lorsque le débit de la Romanche dépasse les $42 \text{ m}^3/\text{s}$ admissibles par la dérivation de Gavet.

- 2) des apports des versants latéraux dans le bassin versant intermédiaire situé entre la station du Champeau et le barrage de Gavet d'une part (altitude moyenne : $2\ 100 \text{ m}$), et celui situé entre le barrage de Gavet et le Péage-de-Vizille d'autre part (altitude moyenne : $2\ 000 \text{ m}$).

La superficie des bassins versants intermédiaires est donnée dans les recueils du Service d'Etudes des Grandes Forces Hydrauliques. Le bassin versant compris entre la station du Champeau et le barrage de Gavet totalise : $62,7 \text{ km}^2$ (bassins des ruisseaux du Bâton, de Rioupéroux, de l'Arselle, etc.). Le bassin versant compris entre le barrage de Gavet et la Croix du Mottet totalise : $59,2 \text{ km}^2$ (bassins des ruisseaux de Gavet, de la Morte, du Bruyant, du Riou de Séchilienne, du ruisseau du Lac Mort, etc.). Une partie des eaux du bassin versant de la rive gauche de la Romanche situé entre Gavet et Jouchy, est dirigée vers le Lac Mort. La restitution de ces eaux s'effectue à l'amont de Jouchy à raison de $0,4$ à $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, en moyenne. Les débits moyens annuels des apports des versants sont difficilement calculables. En effet, les débits des cours d'eau varient selon l'année considérée, l'altitude, l'exposition du versant, etc. Leur calcul comporte nécessairement certaines approximations.

Ainsi, le débit spécifique des affluents, peut être calculé à partir de la pluviométrie enregistrée au Rivier d'Allemont (1 270 m) ; la hauteur des précipitations, moyenne, annuelle, s'élève à 1 745 mm (référence des années 1950 à 1979). La lame d'eau écoulée, compte tenu de l'évapotranspiration, est d'environ 1 280 mm et correspond à un débit spécifique de 40,6 l/s/km².

Le débit moyen annuel des apports des versants entre le Champeau et le barrage de Gavet (A1), ainsi calculé, s'élève à 2,54 m³/s et celui des apports des versants entre le barrage de Gavet et Jouchy (A2) s'élève à 2,40 m³/s.

D'après J. LOUP (1967), l'augmentation du débit spécifique de la Romanche du Chambon vers l'aval, s'explique par l'extension du bassin versant vers l'Ouest où sont situés les versants les plus arrosés. Le débit spécifique passe de 35,2 l/s/km² au Chambon, à 36,4 au Champeau, 40,8 à Rioupéroux et 42,8 à Gavet, etc. En appliquant ces débits spécifiques aux apports des versants, en considérant qu'ils tiennent plus justement compte des altitudes moyennes, les débits A1 s'élèvent à 2,47 m³/s et les débits A2 à 2,55 m³/s (tableau 18).

D'après ces deux types de calculs, on peut estimer à 2,5 m³/s le débit moyen annuel des apports des versants A1 et A2.

Le débit de la Romanche transitant à l'amont de Jouchy peut être calculé par la formule synthétique :

$$Q_J \text{ m}^3/\text{s} = (Q_C + A1) - Q' + A2 = Q_G' + A2$$

- où Q_J = débits à l'amont des plaines alluviales de Jouchy et du Péage,
- Q_C = débits moyens mensuels à la station du Champeau (Réf. 1961-1975),
- A1 = apports du bassin intermédiaire compris entre le Champeau et Gavet,
- Q' = débits dérivés au barrage de Gavet,
- Q_G' = débits à l'aval du barrage de Gavet,
- A2 = apports du bassin intermédiaire compris entre le barrage de Gavet et les plaines alluviales de Jouchy et du Péage (y compris les restitutions de l'usine hydroélectrique de l'Ile Falcon.

Le débit moyen annuel, transitant face à Jouchy, ainsi calculé, s'élève à : 12,4 m³/s, (débits de surface et underflow confondus (tableau 18)).

$$Q_J \text{ m}^3/\text{s} = (36,4 + 2,5) - 29 + 2,5 = 12,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

débit moyen annuel

	Bassin versant km ²	Bassin versant total km ²	Débit spécifique l/s/km ²	Débit moyen annuel m ³ /s
La Romanche (Le Champeau)	1 000	1 000	36,4	36,4 = Q _C
Apports entre le Champeau et Gavet	. Le Bâton	9,64	39,4	0,38
	. Entre le Bâton et Rioupéroux	31,1		1,22
	. Ruis. de Rioupéroux	7,84		0,31
	. Entre Rioupéroux et Gavet	14,1		0,56
	TOTAL	62,7		2,47 = A1
La Romanche à l'amont du barrage de Gavet :		1 063		38,9 = Q _G
Dérivés à Gavet :				29,0 = Q'
Apports entre Gavet et Jouchy	. Torrent à Gavet	8,91	43,1	0,38
	. Entre Gavet et Séchilienne	8,65		0,37
	. Bruyant et ruisseau de la Morte	19,0		0,82
	. Entre Séchilienne et Jouchy	22,6		0,98
	TOTAL	59,2		2,55 = A2
La Romanche à l'amont immédiat de Jouchy		1 122		12,4 = Q _J

Tableau 18 - Evaluation des débits moyens annuels de la Romanche et des apports du bassin versant entre le Champeau et Jouchy (débits de surface et underflow confondus).-

En admettant que le régime de l'écoulement des apports des versants se rattache au régime du Lac Mort, on peut appliquer un coefficient d'hydraulicité mensuel aux débits A1 ou A2 et ainsi calculer approximativement le débit moyen mensuel de la Romanche à l'amont de Jouchy, débits de surface et underflow confondus (tableau 19).

Les débits moyens mensuels sont ainsi calculés par défaut, car ils ne tiennent pas compte des déversés possibles à Gavet, au cours des mois où le débit moyen mensuel est inférieur à 42 m³/s. Toutefois, nous pouvons constater que le débit moyen mensuel, Q_J, est de l'ordre de 2 m³/s, 7 mois par an.

Débits en m ³ /s	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	module m ³ /s
Q _C = débits moyens mensuels au Champeau (Réf. DTG -1961-1975)	13,8	14,4	17,4	29,6	56,5	80	76	54	36	23	19,9	16,1	36,4
A1 = apports des versants entre le Champeau et Gavet	1,32	1,15	1,83	3,62	5,65	5,03	2,72	1,63	1,55	1,72	2,03	1,7	2,5
Q _G = débits moyens mensuels à Gavet Q _G = Q _C + A1	15,1	15,5	19,2	33,2	62,2	85,0	78,7	55,6	37,6	24,7	21,9	17,8	38,9
Q' = débits moyens mensuels dérivés à Gavet	14,6	15,0	18,7	31,7	42	42	42	42	36,6	24,2	21,4	17,3	29,0
Q' _G = débits moyens mensuels à l'aval de la prise de Gavet Q' _G = Q _C - Q'	0,5	0,5	0,5	1,5	20,2	43,0	36,7	13,6	1,0	0,5	0,5	0,5	9,9
A2 = apports des versants entre Gavet et Jouchy (y compris les débits turbinés du Lac Mort)	1,32	1,15	1,83	3,62	5,65	5,03	2,72	1,63	1,55	1,72	2,03	1,7	2,5
Q _J = débits moyens mensuels à l'amont de Jouchy Q _J = Q' _G + A2	1,8	1,65	2,3	5,1	25,8	48	39,4	15,2	2,55	2,2	2,5	2,2	12,4

Tableau 19 - Evaluation des débits moyens mensuels de la Romanche à l'amont de la plaine de Jouchy (débits de surface et underflow confondus).-

On peut de même calculer approximativement le débit moyen journalier à Jouchy. Si on ne connaît pas le coefficient d'hydraulicité d'alimentation du Lac Mort, on déterminera pour le jour considéré le coefficient d'hydraulicité à partir du débit de la Romanche mesuré au Champeau :

$$\text{Coefficient d'hydraulicité : Coef. H} = \frac{Q_c}{36,4}$$

$$\begin{aligned} \text{On calculera : } A1 \text{ m}^3/\text{s} &= 2,5 \times \text{Coef. H} \\ A2 \text{ m}^3/\text{s} &= 2,5 \times \text{Coef. H} \end{aligned}$$

Deux cas peuvent se présenter :

- 1) $Q_c + A1 > 42 \text{ m}^3/\text{s}$, dans ce cas :
 $Q_J \text{ m}^3/\text{s} = Q_c + A1 - 42 + A2$
- 2) $Q_c + A1 < 42 \text{ m}^3/\text{s}$, dans ce cas :
 $Q_J \text{ m}^3/\text{s} = Q_R + A2$

où Q_R est le débit réservé à l'aval du barrage de Gavet (soit 0,5 m³/s du 16 septembre au 31 mars et 1,5 m³/s du 1er avril au 15 septembre).

=====
=====
=====

La vitesse des eaux de la Romanche a été évaluée par A. ALLIX (1917) à 2 m/s en basses eaux. Elle peut atteindre 5 m/s en hautes eaux. Au droit de Jouchy, pour un débit de pointe de 170 m³/s (200 m³/s environ au Champeau), la Romanche envahit toute la largeur de son lit. La section mouillée atteint alors environ 30 m² ; la vitesse de l'eau est donc proche de 5,7 m/s. Les variations importantes de la vitesse du cours d'eau expliquent sa turbulence en hautes eaux.

II-3-2 - Ruissellement et apports des versants sur les plaines du Péage-de-Vizille et de Jouchy

Le "ruisseau de Laffrey" a, à l'exutoire du lac Laffrey, un débit moyen annuel de 442 l/s (B. DELAQUAIZE - 1979). 100 à 300 l/s sont turbinés par les usines E.D.F. de l'Oula et de Jouchy et rejoignent les eaux de trop-plein des lacs et celles recueillies dans le petit bassin versant intermédiaire à l'amont immédiat du champ de captage de Jouchy. Après avoir longé le champ de captage, le ruisseau de Laffrey rejoint la Romanche, en rive gauche, à l'amont du Pont de Mésage. Comme le montrera l'étude hydrochimique, ce ruisseau est extrêmement colmaté ; on peut négliger ses apports à la plaine par infiltration sauf dans quelques cas exceptionnels.

Comme en de nombreux points de la vallée de la Romanche, les eaux de ruissellement des versants est et ouest de la plaine, forment de petits ruisseaux ou "drayes", dont les eaux se perdent dans leur cône de déjection au raccordement avec la plaine ; ils rejoignent entièrement la nappe alluviale, puisqu'aucun ruisseau superficiel n'apparaît à l'aval. Le plus important d'entre eux, la "cascade de Jouchy" est situé en rive gauche. Son régime est lié à la pluviométrie ; il est abondant du mois d'octobre au mois de mars.

Le bassin versant des drayes et ruisseaux, des panneaux non drainés, représente une superficie totale de 3,6 km², soit :

- . en rive gauche : 2,55 km² dont 0,9 km² pour la cascade de Jouchy ;
- . en rive droite : 1,05 km².

Sur les deux rives, les versants peu perméables, sont recouverts de forêts. La lame d'eau qui ruisselle sur ces versants puis rejoint la plaine pour s'y infiltrer, est difficilement calculable.

En négligeant l'eau interceptée par la végétation, on peut calculer (par excès) le débit moyen annuel qui s'infiltré, au raccordement de la plaine alluviale.

L'altitude des versants varie de 300 à 1 000 m. En tenant compte du gradient pluviométrique, de la répartition hypsométrique des surfaces considérées, on peut évaluer la hauteur des précipitations tombée sur les versants et le débit moyen annuel des apports sur la plaine alluviale (tableaux 20 et 21).

Le débit spécifique du ruissellement ainsi calculé est comparable à celui du ruisseau des Moulins (18,3 l/s/km² - B. DELAQUAIZE - 1979), situé à proximité dans le bassin versant des lacs de Laffrey et Petitchet.

		Année	1978	1979	1980
		Pen mm	780,5	1 036,4	956
altitude/m	gradient pluvio. (1)	% des surfaces			
300 à 500	46 mm/100 m	29	253	327	304
500 à 750	47,5 mm/100 m	36	324	416	387
750 à 1 000	50 mm/100 m	35	317	406	378
		Pmm corrigée	894	1 149	1 069

(1) gradient pluviométrique, dans le bassin versant, d'après A. MARCHAND (1965)

Tableau 20 - Hauteur annuelle des précipitations tombées sur les versants de la plaine alluviale en 1978, 1979 et 1980.-

	1978	1979	1980
P corrigée en mm	894	1 149	1 069
Evapotranspiration en mm (selon TURC)	488	522	514
Lame d'eau écoulee sur les versants	406	627	555
Volume écoulé en m ³	146.10 ⁴	226.10 ⁴	200.10 ⁴
Débit moyen annuel en l/s	46,3	71,6	63,3

. en rive droite	13,5	20,9	18,5
. en rive gauche	32,8	50,7	44,9
dont pour la cascade de Jouchy	11,6	17,9	15,8
Débit spécifique du ruissellement l/s/km ²	12,9	20,0	17,6

Tableau 21 - Evaluation du débit moyen annuel des apports des versants à la plaine alluviale en 1978, 1979 et 1980.-

II-3-3 - Variations des niveaux piézométriques - Bilans hydrogéologiques

II-3-3-1 - VARIATIONS des NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

On trouvera dans la *figure 25* l'emplacement des puits, des forages et des piézomètres situés sur la plaine de Jouchy et dans le *tableau 22* les principales caractéristiques, la cote et la fréquence des relevés des piézomètres pris comme exemples pour rendre compte de l'évolution des niveaux piézométriques.

Afin de comparer les variations des niveaux de la nappe en différents points, on a porté sur la *figure 26*, les moyennes mensuelles des relevés hebdomadaires effectués au cours de dix années d'exploitation (1970-1979).

On notera que :

- . l'allure générale des tracés est identique pour tous les piézomètres,
- . les hautes eaux de la nappe se situent au cours des mois d'été (mai, juin, juillet, août),
- . après la décrue automnale, les niveaux les plus bas sont relevés au mois de janvier (basses eaux),
- . les battements de la nappe les plus importants sont relevés en amont de la plaine, en rive droite (S 4 > P 154) comme en rive gauche (S 8 > F 12...) ; les variations des niveaux piézométriques sont faibles à l'aval de la plaine (P 154),
- . les apports des versants ne sont pas déterminants sur l'allure générale du tracé à l'échelle de l'année hydrologique. Ainsi, le piézomètre S 6, situé près des versants, présente un tracé comparable à celui du F 12, situé plus au Nord.

II-3-3-2 - EXPRESSION du BILAN HYDROGEOLOGIQUE

Pour calculer les bilans hydrogéologiques, j'ai adopté la méthode classique, basée sur l'équation de DARCY, permettant de calculer les débits des eaux souterraines :

$$Q = S K i$$

où Q est exprimé en m³/s

S est la surface de la section traversée en m²

i est le gradient de la nappe

K est le coefficient de perméabilité en m/s.

Dénomination	Ø int. (mm)	Profondeur (m)	Crépinage (en m de prof.)	Nature des terrains traversés	Cote N.G.F. (m) Sol	Tube	Fréquence des relevés
F 12	470	- 30,5	- 4,5 à - 30,5	Blocs, galets, sables	303,31	303,73	relevé journalier
F 12 profond	80	- 45	- 40 à - 45	Sables et graviers			relevé hebdomadaire
F 12 très profond	36	- 54	- 49 à - 54	Galets et sables			relevé hebdomadaire
S 6	125	- 15	- 10 à - 15	Blocs, galets, sables grossiers	303,62	304,31	relevé hebdomadaire
S 6 profond	36	- 30	- 25 à - 30	Galets, graviers et sables			relevé hebdomadaire
P IV 1	85	- 8			300,95	301,63	relevé journalier
S 4	125	- 14,6	- 9,6 à - 14,6	Blocs, galets, graviers et sables	303,92	304,55	relevé hebdomadaire
S 4 profond	36	- 30	- 25 à - 30	Sables, graviers, galets			relevé hebdomadaire
P 154	80	- 5	- 2 à - 5		294,12	294,95	relevé hebdomadaire

Tableau 22 - Principales caractéristiques des piézomètres F 12, P IV 1, S 6 (rive gauche) S 4, P 154 (rive droite).-

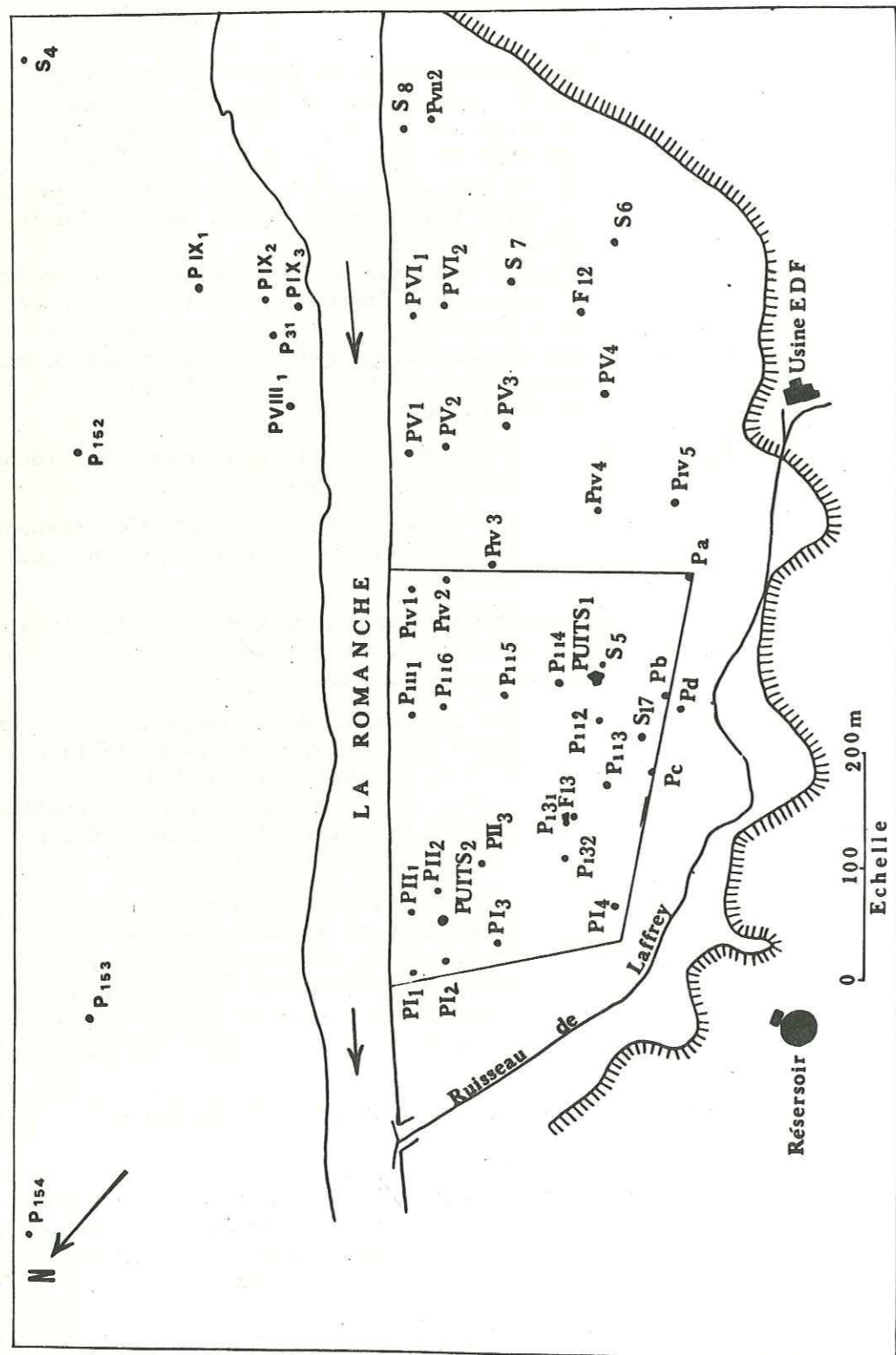


Figure 25 - Emplacement des sondages et des piézomètres dans la plaine alluviale de Jouchy et du Péage.-

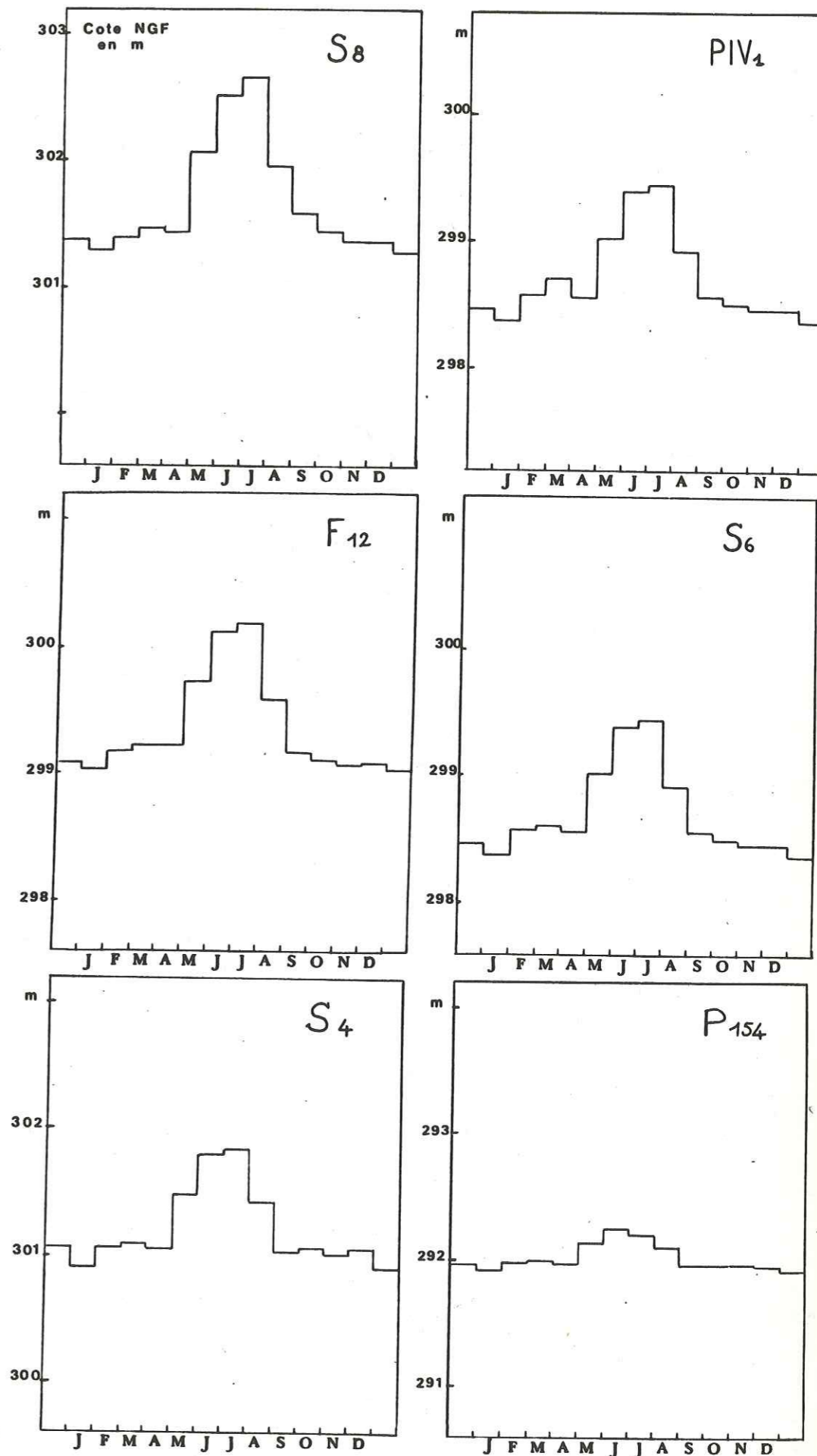


Figure 26 - Variations des niveaux du toit de la nappe relevés dans les piézomètres (moyenne mensuelle des relevés hebdomadaires des années 1970 à 1979).-

Cette méthode de calcul, déjà utilisée par J. DUBUS (1973) m'apparaît être rigoureuse et m'a permis de comparer les résultats avec ceux obtenus après 5 années d'exploitation.

Par une méthode de calcul comparable, j'ai calculé ensuite, la part des infiltrations pénétrant dans la nappe à l'amont de la plaine alluviale.

La nappe alluviale de Jouchy (rive gauche) et du Péage-de-Vizille (rive droite) constitue une unité, comprise entre le verrou rocheux de la Croix-du-Mottet à l'amont et le socle cristallin de Vizille, à l'aval.

Son bilan hydrogéologique s'équilibre entre :

- les apports :

- . apports souterrains de la nappe de l'Ile Falcon située à l'amont,
- . infiltrations directes de la pluie, ruissellements, apports des versants,
- . infiltrations de la rivière.

- les départs :

- . départs souterrains vers la nappe de Vizille, située à l'aval,
- . pompages,
- . sources.

Quand le volume des eaux des apports est supérieur à celui des départs, la nappe se recharge, ses réserves exploitables augmentent, le niveau du toit de la nappe s'élève.

Quand le volume d'eau des apports est inférieur à celui des départs, la nappe se vidange, ses réserves diminuent, le niveau du toit de la nappe s'abaisse.

Dans le calcul des bilans hydrogéologiques, on tiendra compte des variations de débits dans les couches supérieures de la nappe. C'est en effet, à moins de 30 m de profondeur, dans la couche graveleuse des alluvions dont le coefficient de perméabilité varie de 10^{-2} à 10^{-3} m/s que l'essentiel des échanges ont lieu (infiltrations, pompages, etc...). On peut considérer que le débit de la nappe dans les couches plus profondes reste constant.

. Les apports souterrains : Q_1 en l/s

Les apports souterrains de la nappe de l'Ile Falcon à la nappe de Jouchy peuvent être calculés en considérant les débits transitant dans la section alluviale située à l'amont du verrou de la Croix-du-Mottet. La largeur de la plaine est environ de 700 m, la profondeur du magasin aquifère est réduite à l'amont du verrou à 8 mètres, le gradient i est facilement calculable à partir des niveaux du toit de la nappe dans les piézomètres implantés dans la plaine. Il est peu différent de 11‰ . A l'amont du verrou de la Croix-du-Mottet, dans la couche supérieure de blocs, galets et graviers, la perméabilité moyenne est de : 5.10^{-3} m/s (voir chapitre II-1-3).

Les débits Q_1 varient selon les saisons de 220 à 250 l/s (237 l/s en moyenne, par an).

. Les infiltrations nouvelles : I en l/s

Il s'agit :

- . des infiltrations directes de la pluie sur la plaine ; la hauteur des précipitations est enregistrée à Jouchy depuis septembre 1977 ;
- . des infiltrations des eaux de ruissellement sur les versants est et ouest de la plaine ;
- . des infiltrations des ruisseaux et de la Romanche.

Les infiltrations totales sont calculées par différence dans le bilan, les autres termes étant connus.

. Les pompages à Jouchy : J en l/s

Le puits 1 de Jouchy, exploité depuis 1967 est situé en rive gauche à 650 m de l'amont de la plaine et à 180 m des rives de la Romanche. Il est profond de 40 m et est crépiné entre - 14 et - 30 m. Il est équipé de 3 pompes capables d'un débit d'exhaure de 200 l/s. Un débitmètre permet de connaître les débits pompés qui se sont élevés en moyenne à 320 l/s au cours des années 1975 à 1980.

Mis à part les pompages effectués à Jouchy, par le S.I.E.R.G., aucun autre pompage n'est effectué au Péage-de-Vizille ; les pompages de Pré-Grivel et des Papeteries Perron intéressent la nappe alluviale de Vizille.

. Les sources : S en l/s

Les sources qui émergent à l'aval de la plaine alluviale à la faveur de la dénivellation qui correspond à la remontée du socle cristallin, décrit plus haut, correspondent aux trop-pleins de la nappe.

Il s'agit :

- . de la source du Maniguet qui naît au pied de la montagne du versant est, à la hauteur de la centrale E.D.F. du Péage. Cette source recueille en outre, les eaux de ruissellement du coteau ; ses eaux sont turbinées avant de rejoindre les autres sources, dans le parc du Château de Vizille ;
- . de la source de la Dhuy, la plus importante ;
- . des sources de l'Ours et de la Reine.

L'ensemble de ces sources engendre un canal qui va rejoindre l'établissement de pisciculture du parc du château. Le débit des sources est connu avec une bonne approximation, plusieurs échelles étant installées sur leur parcours. Leur débit total varie beaucoup au cours de l'année ; en basses eaux, il est de l'ordre de 400 l/s, en hautes eaux, il peut atteindre 1 600 l/s (980 l/s en moyenne, par an, d'après nos relevés depuis 1967).

. *Les départs souterrains : Q_2 en l/s*

Les départs souterrains vers la nappe de Vizille sont calculés comme les apports souterrains Q_1 à partir de la loi de DARCY. La largeur de la plaine est de 700 m, la profondeur de la couche alluvionnaire supérieure est de 20 à 25 m, le gradient i est peu différent de 7‰, la perméabilité moyenne est de $3 \cdot 10^{-3}$ m/s (chapitre II-1-3). Les débits souterrains à l'amont de la plaine de Vizille varient selon les saisons de 300 à 350 l/s (317 l/s en moyenne, par an).

. *La variation des réserves : ΔV l/s*

La variation des réserves peut être calculée en considérant les battements du toit de la nappe au cours de la période considérée, la surface intéressée, et en tenant compte du coefficient d'emmagasinement moyen des alluvions (porosité efficace : $S = 15\%$). Les surfaces considérées sont planimétrées sur des cartes de battements établies à partir des relevés piézométriques,

$$\Delta V \text{ l/s} = \frac{\Delta h \times \text{surface} \times 0,15}{t}$$

où t est le temps considéré en secondes

La surface totale de la nappe est de :
760 000 m².

. *Expression du bilan :*

$$\Delta V = Q_1 + I - J - S - Q_2$$

Recharge de la nappe : $\Delta V > 0$

$$I \text{ l/s} = (Q_2 + S + J) + \Delta V - Q_1$$

Vidange de la nappe : $\Delta V < 0$

$$I \text{ l/s} = (Q_2 + S + J) - \Delta V - Q_1$$

En moyenne, la variation des réserves au cours d'une année hydrologique est nulle, c'est-à-dire que les recharges de la nappe équilibrent ses vidanges.

Si $\Delta V = 0$, pour une année hydrologique, le débit moyen des infiltrations s'élève donc à :

$$I \text{ l/s} = (317 + 980 + 320) - 237 = 1\ 380 \text{ l/s.}$$

II-3-3-3 - EXEMPLES de CALCULS de BILANS HYDROGEOLOGIQUES
(tableau 23)

Les bilans ont été établis pour des périodes au cours desquelles le sens des variations des réserves ne change pas, c'est-à-dire lors des vidanges de la nappe (baisse continue des niveaux du toit de la nappe) ou lors des recharges de la nappe (élévation continue des niveaux du toit de la nappe). Les périodes de vidange de la nappe correspondent aux périodes de basses eaux dans le bassin versant et les périodes de recharge correspondent aux périodes de hautes eaux dans le bassin versant ou de forte pluviosité. Dans le cas où les périodes considérées comportent des épisodes pluvieux, j'ai calculé l'apport direct des pluies sur la plaine et évalué le ruissellement sur les versants.

II-3-3-3-1 - *Vidange de la nappe*

A la fin de l'été, aux périodes de décrue des rivières dans le bassin versant correspond la vidange de la nappe.

1er août - 26 septembre 1979

Apports souterrains

$$S_1 = 6,07 \times 700 = 4\ 250 \text{ m}^2$$

$$i = 0,011 \cdot 10^3$$

$$K = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$Q_1 \text{ l/s} = 4\ 250 \times 0,011 \cdot 10^3 \times 5 \cdot 10^{-3} = 230 \text{ l/s}$$

Départs souterrains moyens :

$$S_2 = 21 \times 700 = 14\,720 \text{ m}^2$$

$$i = 0,00713 \cdot 10^3$$

$$K = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$Q_2 = 14\,720 \times 0,00713 \cdot 10^3 \times 3 \cdot 10^{-3} = 315 \text{ l/s}$$

$$\text{Débit des sources : } S = 830 \text{ l/s}$$

$$\text{Débits pompés : } J = 344 \text{ l/s}$$

Variations des réserves du 1er août au 26 septembre 1979 :

$$\Delta V = -28 \text{ l/s } (\Delta h \text{ moyen} = 1,20 \text{ m})$$

$$\text{Infiltrations : } I = 1\,230 \text{ l/s}$$

Au cours de cette période encore estivale, la précipitation efficace est nulle (d'après THORNTHWAITE - tableau 15). L'essentiel des infiltrations provient donc de la Romanche.

II-3-3-3-2 - Recharge de la nappe

Les recharges de la nappe peuvent être très rapides, notamment au printemps, quand la fonte des neiges intervient et que les débits de la Romanche à Gavet, dépassent les 42 m³/s, admissibles par la dérivation. Les faibles débits transitant face à Jouchy augmentent alors très rapidement.

Ainsi, au mois de mai 1979, le temps sec, l'ensoleillement et l'élévation des températures enregistrées à partir du 8 mai, ont provoqué la fonte des neiges dans le bassin versant et une augmentation du débit de la Romanche. Le 12 mai, le débit à la station du Champeau atteint 52,2 m³/s (moyenne journalière) et celui transitant face à Jouchy passe de 6 à 7 m³/s le 11, à 17 m³/s environ le 12.

Les niveaux de la nappe assez stables avant le 12, s'élèvent de plus d'un mètre à l'amont de la plaine entre le 12 et le 16 mai.

9 mai - 16 mai 1979

(Recharge de printemps sans pluie)

$$Q_1 = 4\,158 \times 0,0112 \cdot 10^3 \times 5 \cdot 10^{-3} = 233 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 14\,805 \times 0,0074 \cdot 10^3 \times 3 \cdot 10^{-3} = 320 \text{ l/s}$$

$$S = 790 \text{ l/s}$$

$$J = 332 \text{ l/s}$$

$$\Delta V = +150 \text{ l/s } (\Delta h \text{ moyen} : 0,80 \text{ m})$$

$$I = 1\,360 \text{ l/s}$$

9 mai - 6 juin 1979

(Recharge de printemps suivie d'une période de pluies)

$$Q_1 = 4\,438 \times 0,0109 \cdot 10^3 \times 5 \cdot 10^{-3} = 241 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 14\,790 \times 0,0074 \cdot 10^3 \times 3 \cdot 10^{-3} = 328 \text{ l/s}$$

$$S = 1\,155 \text{ l/s}$$

$$J = 324 \text{ l/s}$$

$$\Delta V = +77 \text{ l/s } (\Delta h \text{ moyen} : 0,75 \text{ m})$$

$$I = 1\,640 \text{ l/s}$$

Au cours de cette période, 73,5 mm de pluies sont tombés à Jouchy ; la température moyenne s'est élevée à :

$$\frac{23,4 + 11}{2} = 17,2^\circ\text{C}$$

D'après THORNTHWAITE (tableau 15) la précipitation efficace et le ruissellement sont nuls. On peut donc attribuer aux infiltrations de la Romanche l'essentiel des infiltrations calculées.

En basses eaux, les premiers redoux ou des épisodes pluvieux provoquent des remontées importantes des niveaux du toit de la nappe et une augmentation des réserves régulatrices.

30 janvier - 6 février 1980

(Recharge de la nappe en basses eaux, lors d'un épisode pluvieux)

$$Q_1 = 4\,480 \times 0,011 \cdot 10^3 \times 5 \cdot 10^{-3} = 246 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 14\,760 \times 0,00723 \cdot 10^3 \times 3 \cdot 10^{-3} = 320 \text{ l/s}$$

$$S = 900 \text{ l/s}$$

$$J = 310 \text{ l/s}$$

$$\Delta V = +115 \text{ l/s } (\Delta h \text{ moyen} : 0,60 \text{ m})$$

$$I = 1\,400 \text{ l/s}$$

Au cours de cette période, 48,8 mm de pluies sont tombés à Jouchy.

D'après THORNTHWAITE la précipitation efficace en janvier 80 représente 99 % de la lame d'eau précipitée et en février 80, elle représente 66 % de la lame d'eau précipitée ; du 30 janvier au 6 février la précipitation efficace représente environ 74 % de lame d'eau précipitée, c'est-à-dire 36,2 l de pluie par m² en 8 jours, soit un débit de : 6 l/s. La lame d'eau écoulée par ruissellement des eaux pluviales peut être évaluée comme je l'ai fait au chapitre II-3-2.

Compte tenu du gradient pluviométrique, la lame d'eau écoulée sur 3,6 km² en 8 jours, représente un débit de :

$$q = 0,201 \text{ m}^3/\text{s}$$

Les infiltrations en provenance de la Romanche peuvent être évaluées à :

$$I_R = I - PE - R = 1\,400 - 6 - 201 = 1\,193 \text{ l/s}$$

II-3-3-3-3 - Maintien des réserves

Lors de l'année de sécheresse 1976, la décrue automnale, s'est amorcée très tôt dans l'été (juillet).

Les orages du mois d'août bien que peu nombreux, ont permis de maintenir les niveaux du toit de la nappe. Malgré des températures estivales et une évapotranspiration importante, l'apport du ruissellement sur les versants pendant une telle période est suffisant pour maintenir les niveaux de la nappe. Les débits de la Romanche n'ont dépassé qu'exceptionnellement 42 m³/s à Gavet, les débits transitant face à Jouchy sont donc restés très faibles.

4 août - 25 août 1976

$$Q_1 = 3\,755 \times 0,012 \cdot 10^3 \times 5 \cdot 10^{-3} = 225 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 14\,582 \times 0,0069 \cdot 10^3 \times 3 \cdot 10^{-3} = 304 \text{ l/s}$$

$$S = 730 \text{ l/s}$$

$$J = 293 \text{ l/s}$$

$$\Delta V = 0$$

$$I = 1\,100 \text{ l/s}$$

II-3-3-3-4 - Colmatage du lit de la Romanche

Ces quelques exemples montrent l'importance des infiltrations nouvelles au droit de Jouchy et du Péage-de-Vizille dans le bilan des eaux souterraines.

Dans le cas d'un colmatage de la Romanche, les infiltrations en provenance de la rivière étant limitées, les réserves régulatrices de la nappe diminuent rapidement.

Ainsi, la vidange décennale de la retenue du barrage du Chambon, en 1980, a entraîné une augmentation du taux des matières en suspension, notamment des fines argileuses dans la rivière.

La baisse du toit de la nappe a été très importante, au cours des mois de mars, avril et au début du mois de mai. Les niveaux les plus bas ont été atteints le 7 mai, puis les niveaux se sont stabilisés (apports des pluies) ; la recharge de la nappe n'a eu lieu que lors de la fermeture des vannes de la retenue coïncidant avec les plus forts débits du printemps 1980.

Vidange de la nappe : 5 mars - 7 mai 1980

$$Q_1 = 2\,985 \times 0,0120 \cdot 10^3 \times 5 \cdot 10^{-3} = 178 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 14\,430 \times 0,0069 \cdot 10^3 \times 3 \cdot 10^{-3} = 300 \text{ l/s}$$

$$S = 400 \text{ l/s (en moyenne)}$$

$$J = 296 \text{ l/s}$$

$$\Delta V = -24 \text{ l/s } (\Delta h \text{ moyen : } 1,2 \text{ m})$$

$$I = 794 \text{ l/s (en moyenne)}$$

Recharge de la nappe : 21 mai - 18 juin 1980

$$Q_1 = 3\,878 \times 0,0114 \cdot 10^3 \times 5 \cdot 10^{-3} = 220 \text{ l/s}$$

$$Q_2 = 14\,700 \times 0,0070 \cdot 10^3 \times 3 \cdot 10^{-3} = 309 \text{ l/s}$$

$$S = 1\,025 \text{ l/s}$$

$$J = 203 \text{ l/s}$$

$$\Delta V = +98 \text{ l/s } (\Delta h \text{ moyen : } 2 \text{ m})$$

$$I = 1\,415 \text{ l/s}$$

Du 5 mars au 7 mai 1980, 152 mm de pluies sont tombés sur la plaine de Jouchy en 63 jours.

D'après THORNTHWAITE, la précipitation efficace est de 94,8 mm, soit un débit de 13,2 l/s.

La lame d'eau écoulée par ruissellement des eaux pluviales sur les versants = 114 mm sur 3,6 km², soit un débit de : 76 l/s.

Infiltrations en provenance de la Romanche :

$$I_R = 794 - 13,2 - 76 = 705 \text{ l/s}$$

Du 21 mai au 18 juin, 98,8 mm de pluies sont tombés sur la plaine de Jouchy, en 28 jours.

D'après THORNTHWAITE, l'évapotranspiration s'élève à 86,7 mm, la précipitation efficace est donc égale à 12 mm, soit un débit de 3,8 l/s.

La lame d'eau écoulée par ruissellement des eaux pluviales sur les versants : 15,7 mm sur 3,6 km², soit un débit de : 22,0 l/s.

Infiltrations en provenance de la Romanche :

$$I_R = 1\,415 - 3,8 - 22,0 \approx 1\,390 \text{ l/s}$$

Bilan, exprimé en litres/sec.

Dates	ΔV variation des réserves	Q_1 apports souterrains	F Pompages	S Sources	Q_2 Départs souterrains	I Infiltrations totales	Infiltrations à l'amont de la plaine %
9 mai - 16 mai 79	150	233	332	790	320	1 360	71
9 mai - 6 juin 79	77	241	324	1 155	328	1 640	61
30 janv.-6 févr. 80	115	246	310	900	320	1 400	71
1er août- 26 sept. 79	- 28	230	344	830	315	1 230	87
4 - 26 août 76	0	225	293	730	304	1 100	95
5 mars-27 mai 80	- 24	178	296	400	300	794	100
21 mai - 18 juin 80	+ 98	220	203	1 025	309	1 415	87

Tableau 23 - Récapitulatif des calculs des bilans hydrogéologiques.-

II-3-3-3-5 - Zones d'infiltration préférentielle

Les cartes de variations des niveaux du toit de la nappe (figure 27) montrent que les battements les plus importants, en dehors de ceux provoqués par les pompages, sont localisés à l'amont de la plaine. On peut calculer le débit des infiltrations dans cette zone. Sa superficie est d'environ 200 000 m² ; le gradient i est de l'ordre de 8‰ ; le coefficient de perméabilité moyen K , calculé à partir des essais de pompages sur les sondages F 15 (rive droite) et F 12 (rive gauche) est de $12,5 \cdot 10^{-3}$ m/s, mais pour tenir compte de l'hétérogénéité des terrains, on adoptera $K = 10 \cdot 10^{-3}$ m/s.

x
x x x
x x x

Le tableau 23 permet de faire les constatations suivantes :

- Les infiltrations représentent le terme le plus important du bilan. Elles varient de 800 à 1 600 l/s. Celles en provenance de la rivière se font essentiellement dans la zone amont de la plaine ; elles représentent près de 100 % des infiltrations totales quand le lit et les rives de la Romanche sont colmatés, c'est-à-dire, en basses eaux ou lors de la vidange de la retenue du Chambon. Elles ne représentent plus que 60 à 70 % des infiltrations totales lors du décolmatage du lit de la rivière, c'est-à-dire en hautes eaux ; d'autres zones d'infiltration sont donc alors créées en aval.
- Les apports et les départs souterrains sont peu variables ; cependant, lors de la vidange du Chambon, les apports de la nappe de l'Ile Falcon, elle-même colmatée, ont été très diminués.
- Le débit des sources varie comme celui des infiltrations.

II-3-4 - Écoulement des eaux souterraines et alimentation de la nappe

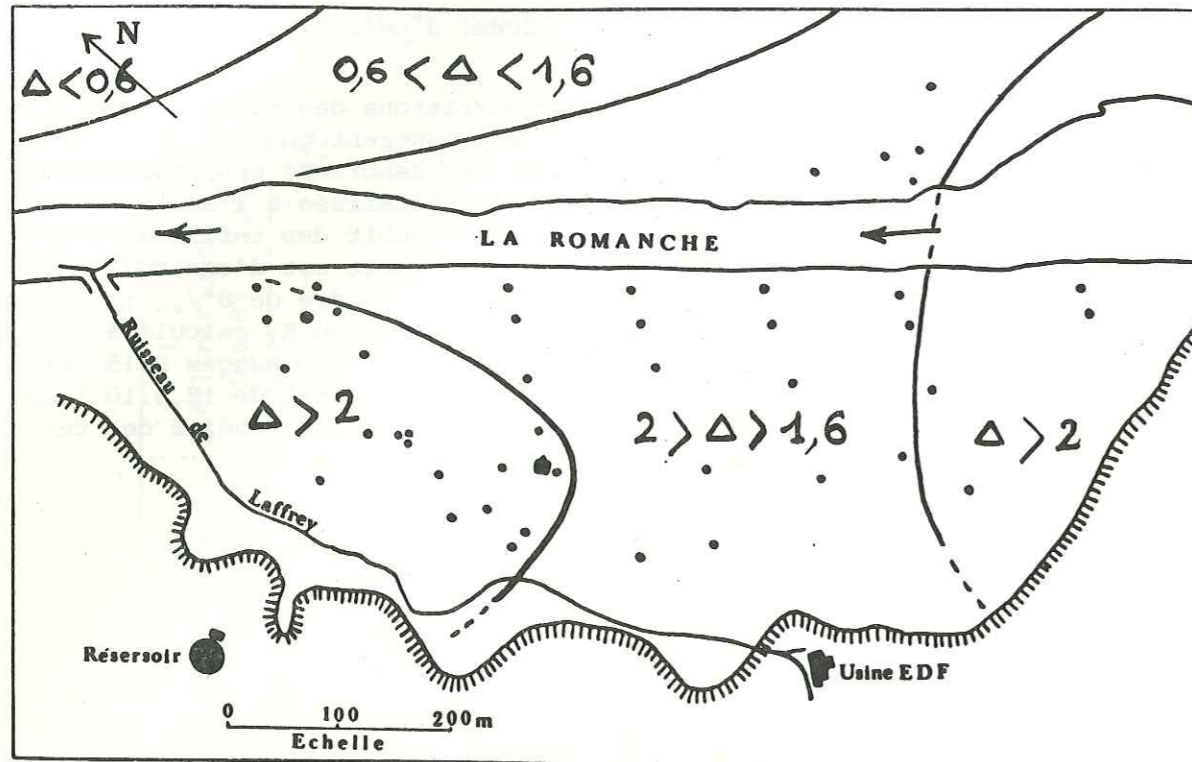


Figure 27 - a

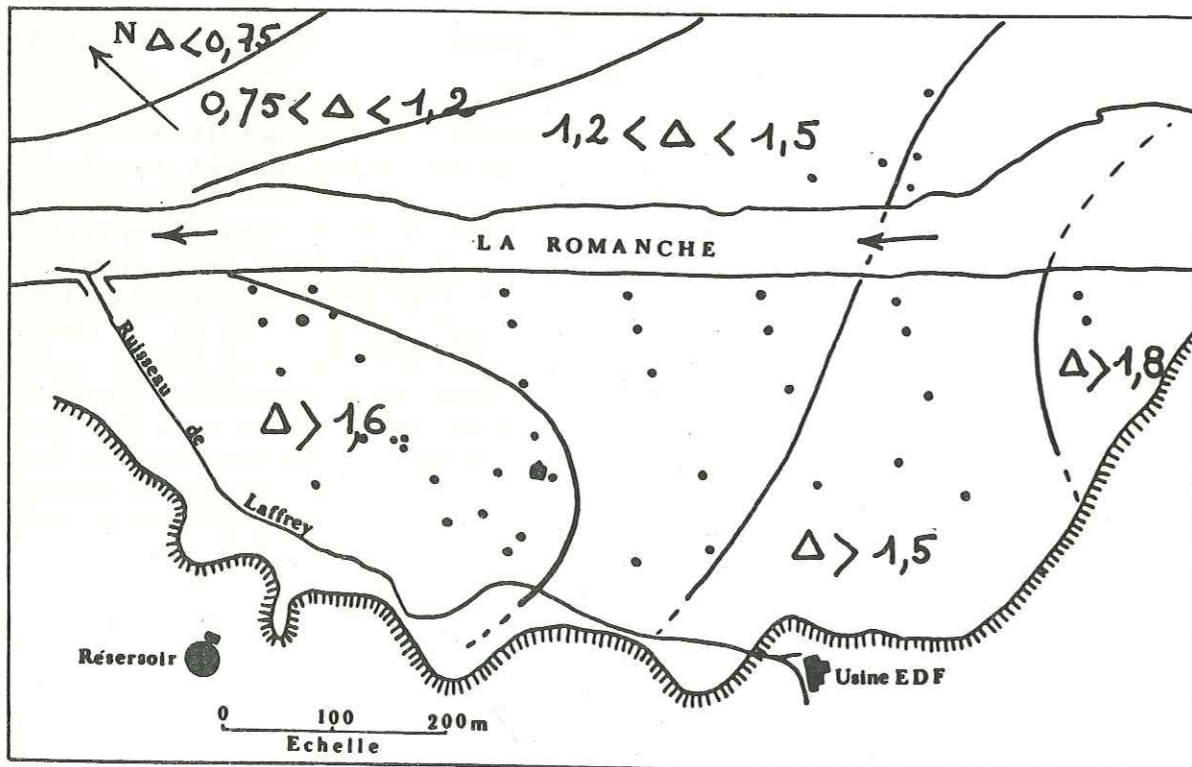


Figure 27 - b

Figure 27 - Cartes de battements du toit de la nappe (en cours d'exploitation du puits 1 de Jouchy)

a - recharge de la nappe au printemps, du 9 mai au 6 juin 1979

b - vidange de la nappe du 1er août au 26 septembre 1979.

Δ = battement de la nappe en m

L'établissement des cartes du toit de la nappe à partir des relevés piézométriques, avant tout pompage dans la plaine de Jouchy (C.P.G.F. - 1966) après 5 années d'exploitation (J. DUBUS - 1973-74) et lors des dernières années (figures 28, 29, 30 et 31) permet de mettre en évidence le sens de l'écoulement des eaux souterraines dans la plaine du Péage et de Jouchy. D'une façon générale, la nappe accompagne la Romanche, elle s'écoule vers les points bas de la plaine, c'est-à-dire, de la Croix-du-Mottet vers le verrou du Péage-de-Vizille où sourdent les sources du parc du château, qui sont les trop-pleins de la nappe.

Dans la plaine de Vizille, aux nouvelles infiltrations de la Romanche, viennent s'ajouter les apports des versants de la rive gauche et les apports latéraux de la vallée de Vaulnaveys.

A Jouchy, les lignes isopiézométriques sont perpendiculaires au lit de la rivière sauf à la pointe amont de la plaine (à l'amont du piézomètre P VI 1) où elles indiquent un écoulement des eaux vers la plaine. Ceci s'explique aisément. En effet, la réduction de la couche graveleuse des alluvions à une dizaine de mètres à l'aval de la plaine de l'Ile Falcon, et le rétrécissement de la plaine alluviale à la Croix-du-Mottet provoquent l'apparition de sources qui alimentent les béalières dans le lit de la rivière. A l'aval du verrou au contraire, l'élargissement de la plaine, notamment en rive gauche, la pente et la plus grande perméabilité des alluvions, favorisent les infiltrations nouvelles vers la nappe. Cette zone reste tout au long de l'année une zone d'infiltration préférentielle. C'est également dans cette zone que l'on enregistre les battements maxima du toit de la nappe (figure 27).

Les pompages du puits de Jouchy provoquent eux aussi des battements du même ordre de grandeur mais la zone d'influence du puits reste localisée en rive gauche, dans la plaine.

Le calcul du bilan, a permis d'évaluer à : 60 à 100 % des infiltrations totales celles qui se produisent à l'amont de la plaine.

A la faveur du décolmatage du lit de la Romanche, d'autres zones d'infiltration peuvent apparaître le long des rives.

. Apports des versants :

En hiver, c'est-à-dire en basses eaux, ces apports peuvent être très importants. Ainsi, à la suite des pluies torrentielles du 24 janvier 1978 (38 mm en 14 heures), la "cascade de Jouchy" a formé trois bras aux débits d'une importance inhabituelle. Les eaux se sont entièrement infiltrées dans la nappe. Entre le 23 et le 25 janvier, c'est dans les piézomètres les plus proches de la cascade (S 6) ou des coteaux (Pa, Pd...) qu'exceptionnel-

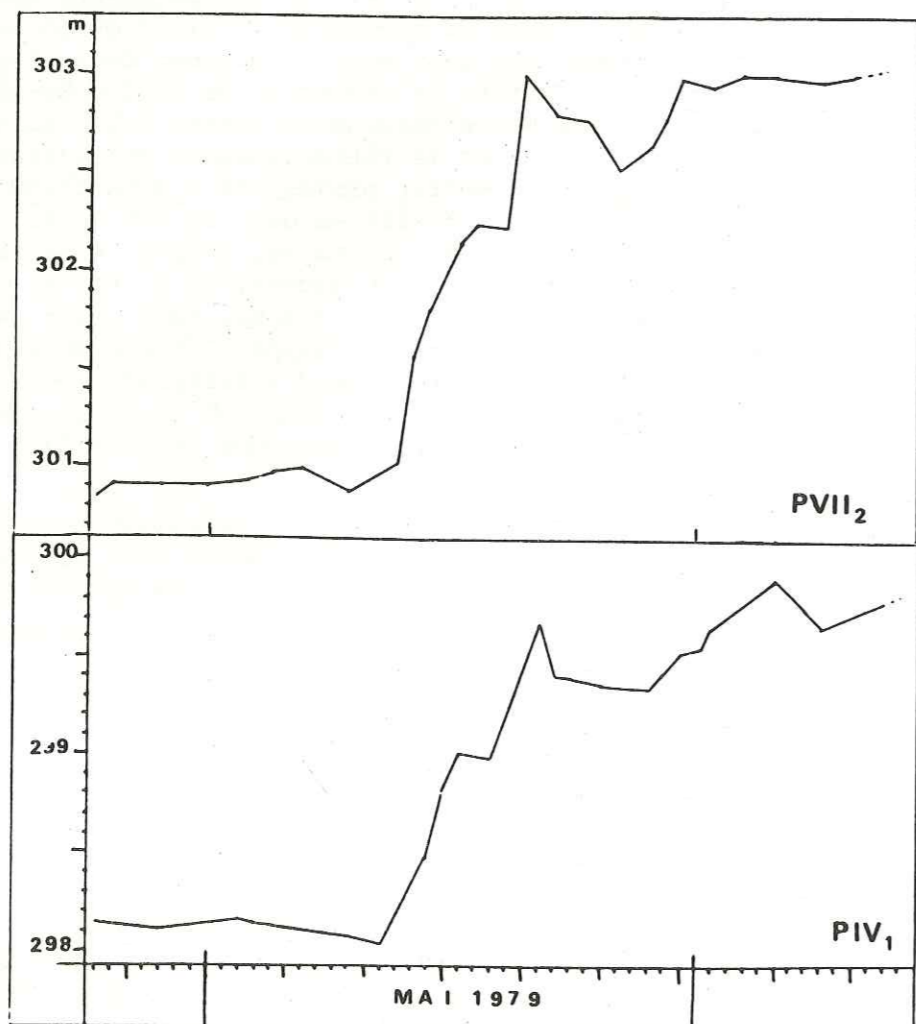
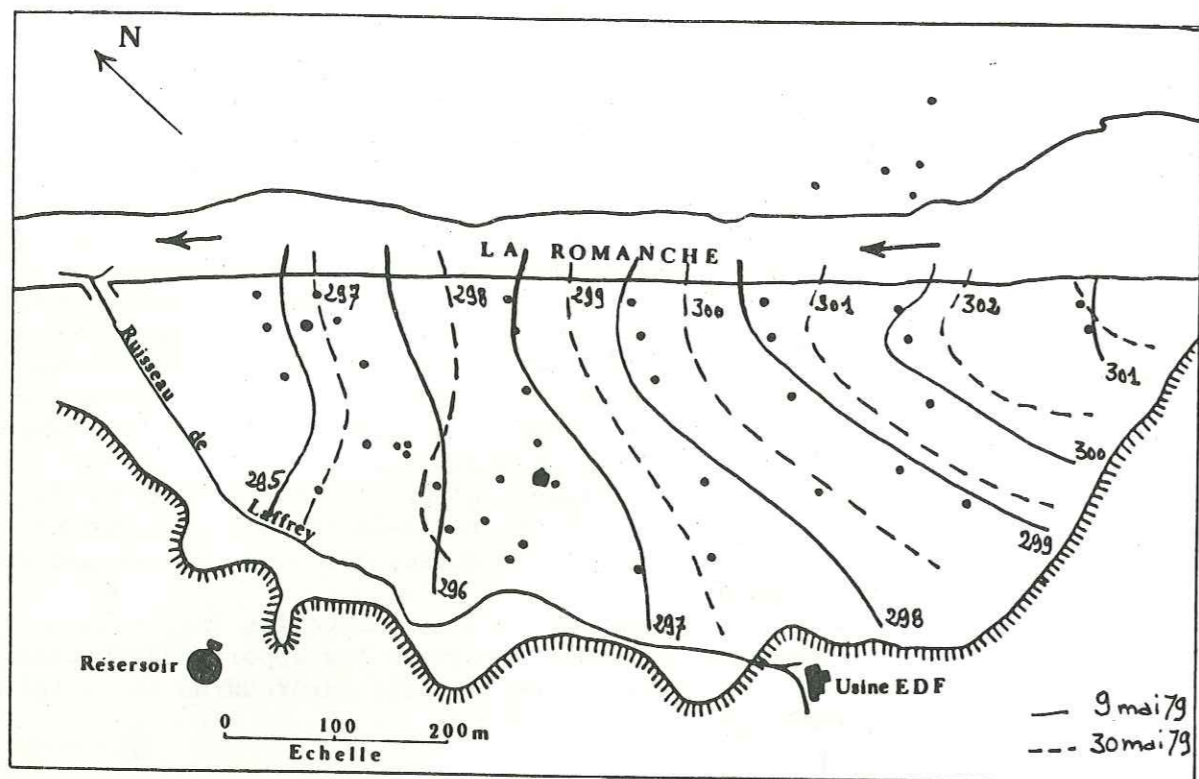


Figure 28 - Carte isopiézométrique de la nappe de Jouchy lors de la recharge du printemps et variations du niveau du toit de la nappe pendant la même période dans la zone d'infiltration préférentielle (P VII 2) et le long des rives (P IV 1).-

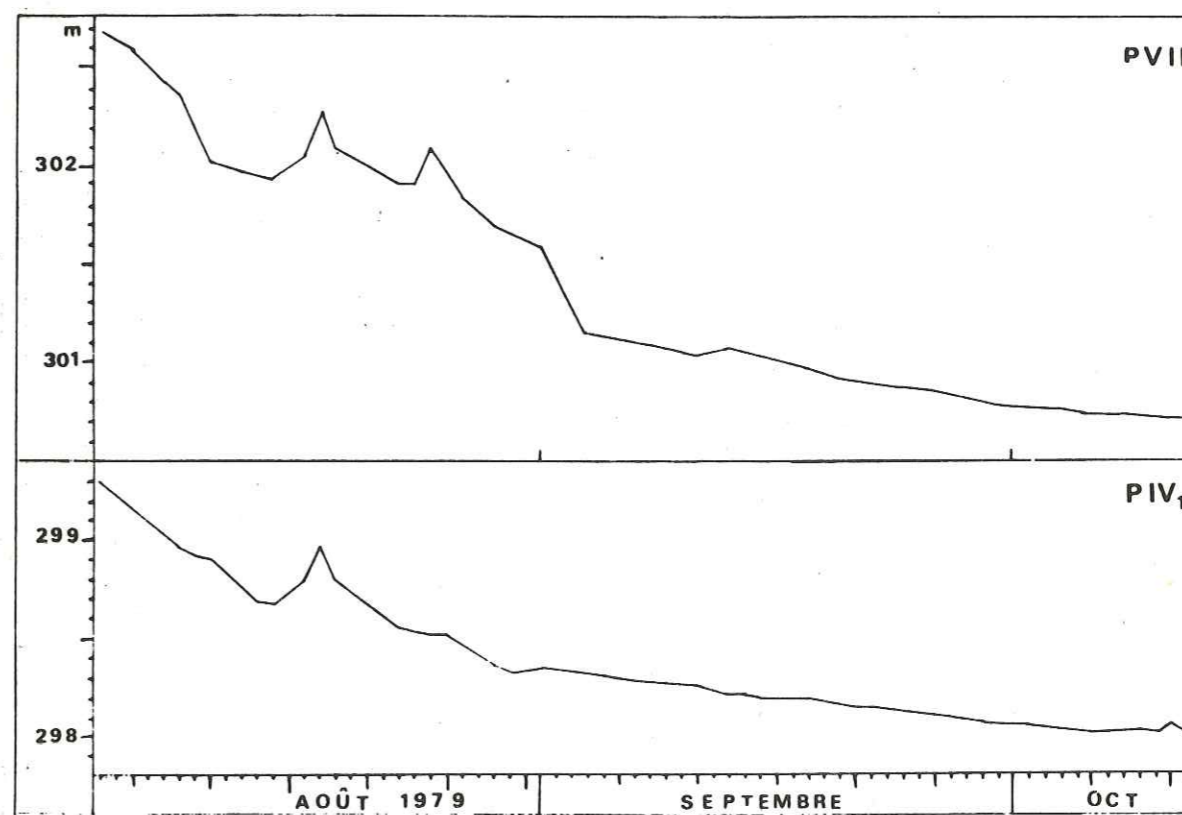
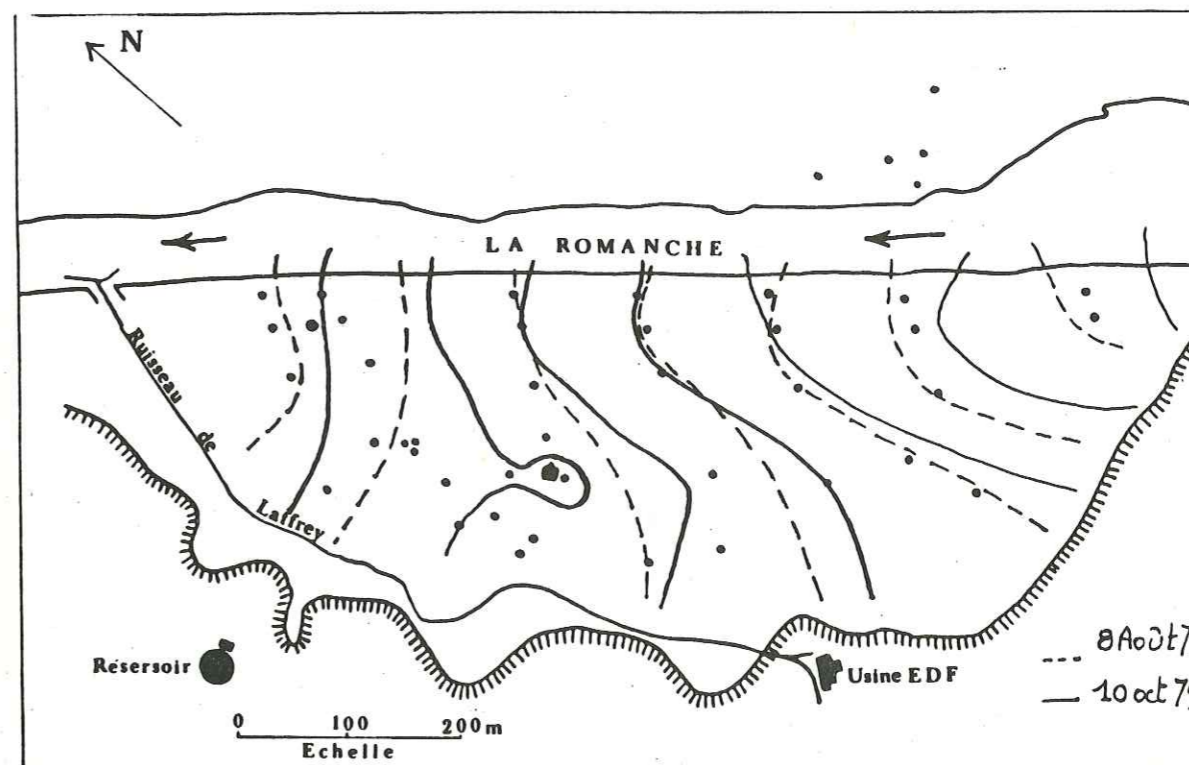


Figure 29 - Carte isopiézométrique de la nappe de Jouchy lors d'une décrue en automne et variations du niveau du toit de la nappe pendant la même période dans la zone d'infiltration préférentielle (P VII 2) et le long des rives (P IV 1).-

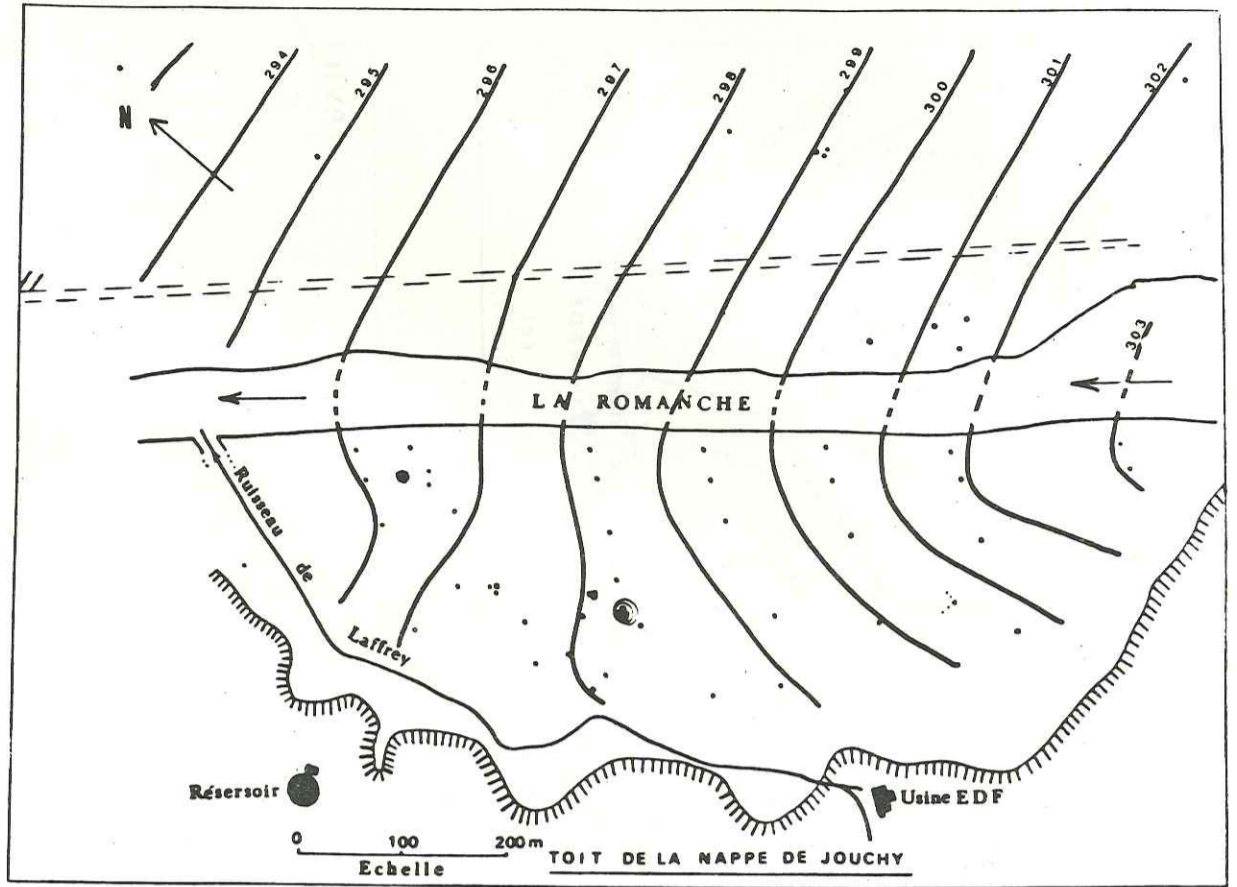
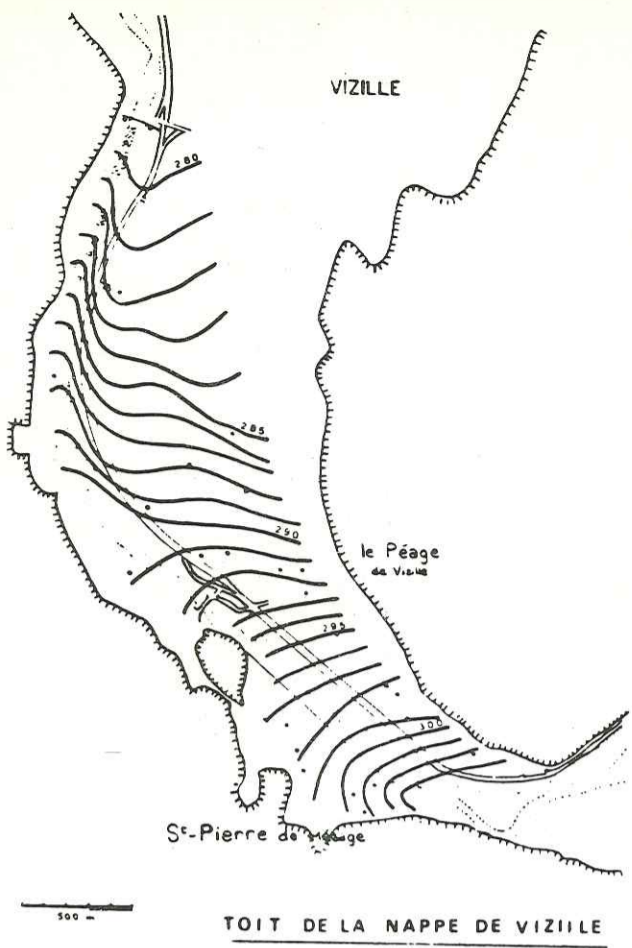


Figure 30 - Carte isopiézométrique du toit de la nappe en hautes eaux.-

050 030717 8

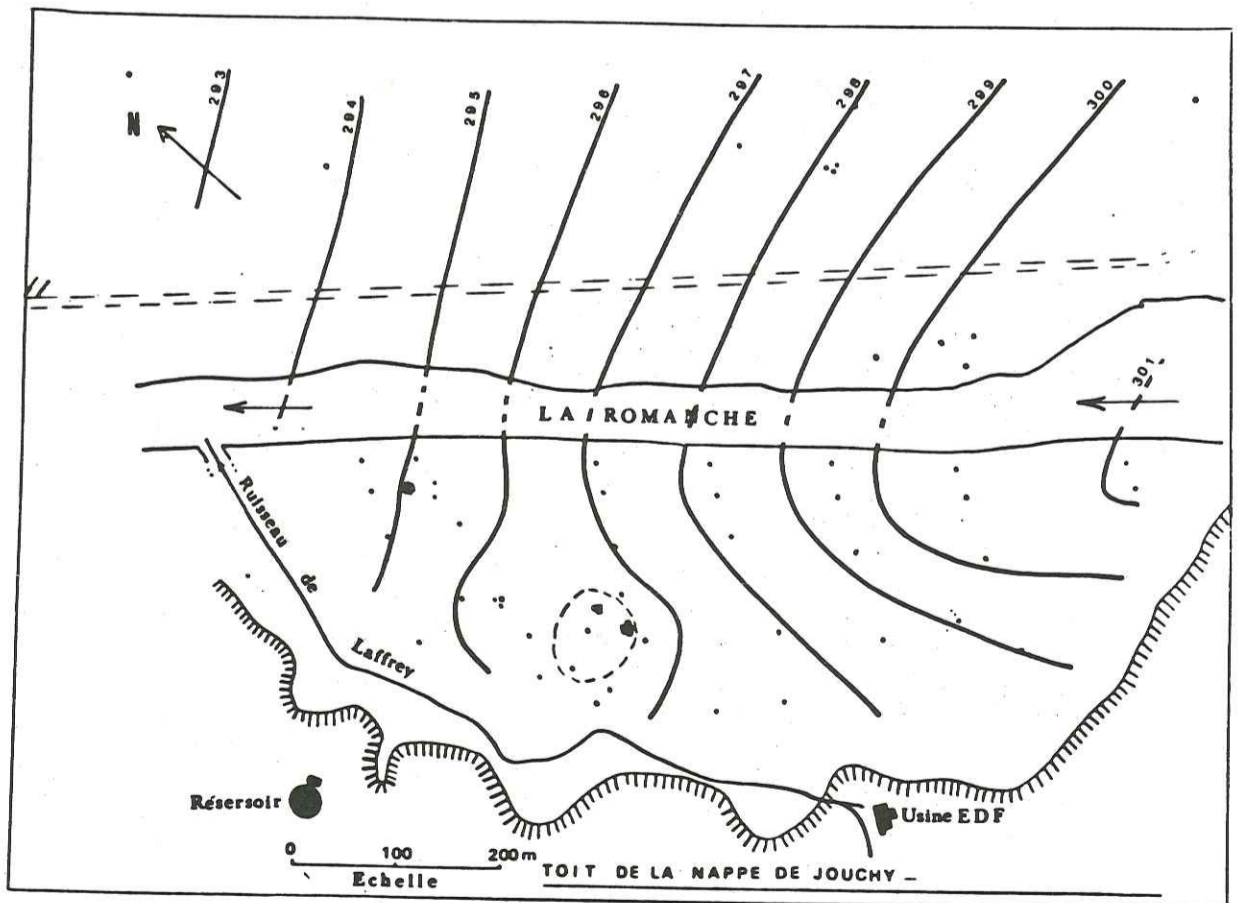
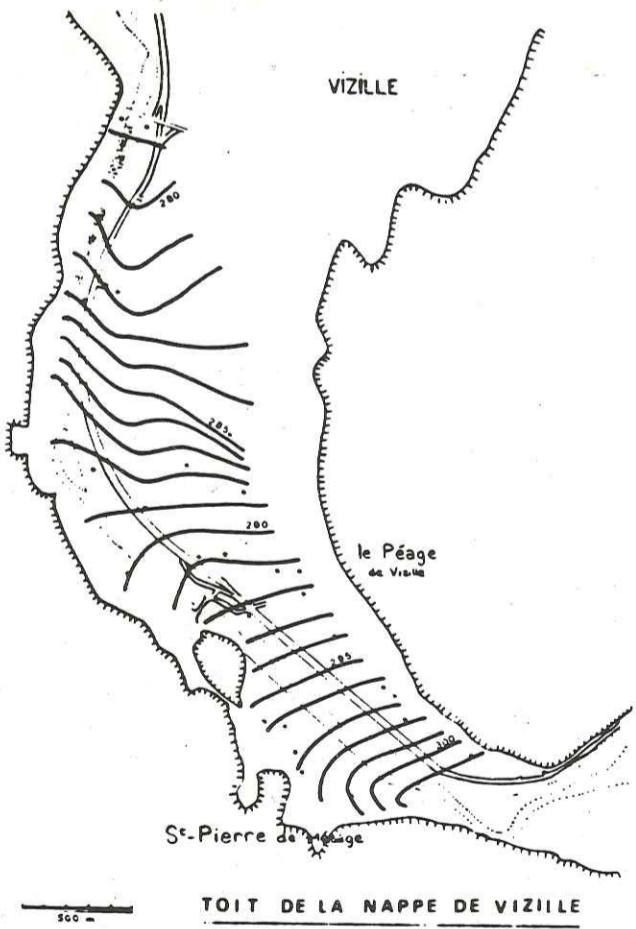


Figure 31 - Carte isopiézométrique du toit de la nappe en basses eaux.-

lement les niveaux du toit de la nappe se sont le plus élevés (80 cm en S 6, 60 cm en Pa ou Pd...). Dans la zone d'infiltration préférentielle, là où on enregistre habituellement les battements les plus importants (P VII 2, S 8, S 7...) les niveaux ne se sont élevés que de 42 cm.

Du 18 (9 h) au 25 (7 h) janvier on a enregistré 56,2 mm de précipitations à Jouchy. En janvier 1978, la précipitation efficace représente : 92 % des précipitations totales (voir *tableau 15*)* soit P.E. = 51,7 mm.

Les apports directs des pluies sur la plaine, représentent un volume de :

$$0,0517 \times 760\ 000 = 39\ 295\ \text{m}^3 \text{ infiltrés en 166 heures}$$

soit : un débit de 66 l/s.

Les apports des versants par ruissellement représentent environ :

$$(0,0512 \times 3,6 \cdot 10^6) \sin \alpha = 184\ 000\ \text{m}^3$$

soit : un débit de 308 l/s (dont 220 l/s en rive gauche).

Le bilan hydrogéologique établi entre le 18 et le 25 janvier 1978 permet d'évaluer à 1 520 l/s les infiltrations totales.

Les apports dus à la pluie (308 l/s + 66 l/s = 374 l/s) représentent alors 25 % des infiltrations totales.

Il s'agit là d'un épisode pluvieux exceptionnel. Même en basses eaux, l'allure des cartes isopiézométriques et les cartes de battement, n'indiquent pas que l'apport des versants est conséquent pour l'alimentation de la nappe. A l'échelle de l'année, l'apport direct des pluies sur la plaine et l'apport du ruissellement par les versants représentent 3 à 10 % des infiltrations totales (*tableaux 14 et 21*).*

Colmatage et décolmatage du lit et des rives de la Romanche

L'examen des cartes piézométriques et l'établissement des bilans hydrogéologiques ont permis de constater que l'essentiel des infiltrations se produit à l'amont de la plaine, là où l'importance de la pente des terrains entraîne un autocurage du lit de la rivière et s'oppose à son colmatage en toutes saisons (J. DUBUS - 1974).

Plus en aval, le long des rives et des digues, à la faveur des replats du profil en long, la Romanche dépose dans son lit, les sédiments fins qu'elle charrie et qui freinent la recharge de la nappe souterraine.

* *Tableau 15 page 64, Tableau 14 page 63, Tableau 21 page 79.-*

En hautes eaux, le décolmatage favorise les infiltrations en d'autres zones.

L'effet bénéfique du décolmatage du lit de la rivière pour la recharge de la nappe a été mis en évidence en novembre 1967 lors d'un curage artificiel le long de la digue de la rive gauche de la Romanche (A. MARCHAND - 1967, J. DUBUS - 1974).

Le processus naturel de décolmatage peut être expliqué de différentes façons :

- 1) il peut être attribué, comme l'a fait J. DUBUS (1973) au drainage des eaux de la nappe vers la rivière, à un "phénomène similaire à celui du nettoyage d'un filtre à sable par circulation inverse". En fait, ce phénomène ne peut avoir lieu en rive gauche, la rivière étant partout et continuellement perchée au-dessus de la nappe de Jouchy (*figure 32*). En effet, face au puits I, par exemple, les quelques relevés du niveau du fil de l'eau et des bancs de sables du lit permettent de situer à 300,40 m la cote du lit de la rivière (1) quelque soit la saison ; le lit de la rivière étant suffisamment large, la Romanche envahit toute la largeur disponible en hautes eaux, le niveau du fil de l'eau et du fond du lit varient par conséquent peu, sauf très localement.

Le niveau du toit de la nappe relevé dans le piézomètre P IV 1, est toujours inférieur et n'a pas dépassé 300,30 m au cours des dix dernières années (*tableau 24*)

	Cote minimum N.G.F.		Cote maximum N.G.F.	
1970	298,71	(27 janvier)	300,30	(18 juin)
1971	297,69	(20 décembre)	300,10	(26 mai)
1972	297,71	(31 janvier)	299,67	(30 juin)
1973	298,08	(7 décembre)	299,63	(1er juin)
1974	298,10	(10 mai)	299,56	(1er juillet)
1975	298,22	(8 avril)	300,19	(16 septembre)
1976	298,08	(31 août)	299,29	(30 septembre)
	298,14	(30 décembre)		
1977	298,21	(17 janvier)	299,95	(10 juin)
1978	298,43	(23 janvier)	300,29	(13 juin)

Tableau 24 - Relevés du niveau du toit de la nappe dans le piézomètre P IV 1.-

(1) Relevés de la cote du fil de l'eau de la Romanche face au piézomètre P IV 1, par E. DEGAUD { en 1968 : 300,37 m
en 1978 : 300,40 m.-

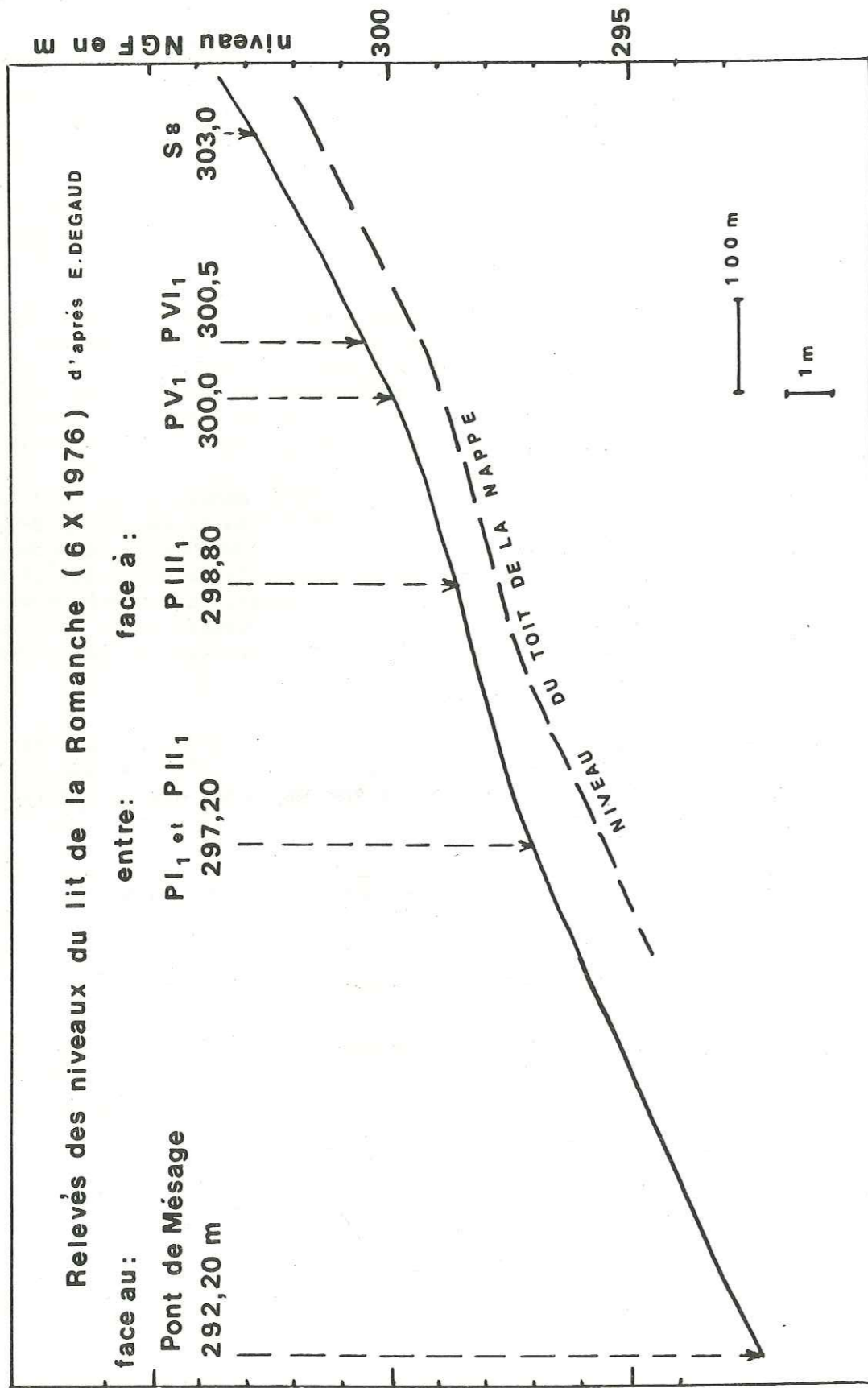


Figure 32 - Niveaux du lit de la Romanche et niveaux du toit de la nappe de Jouchy.-

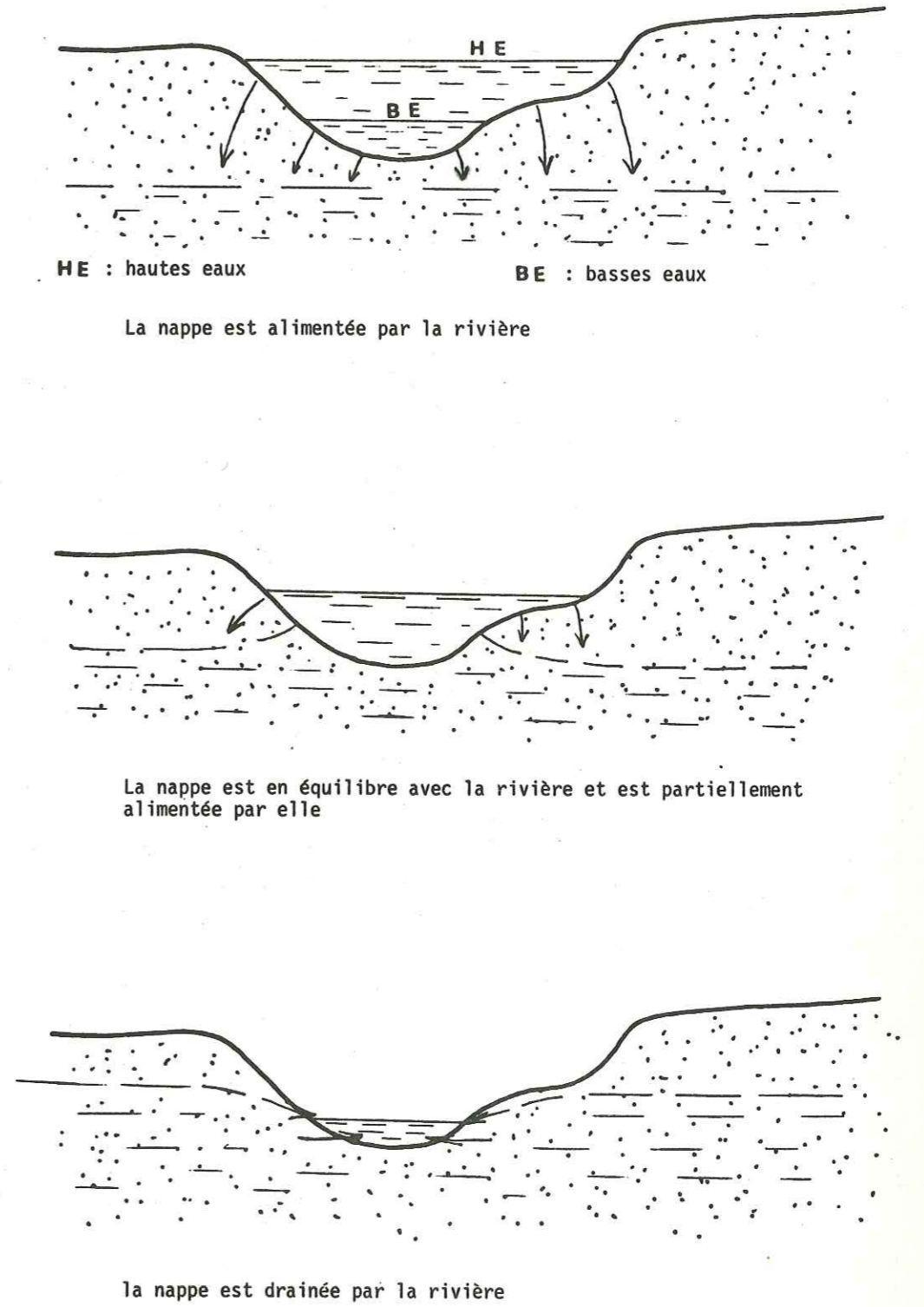


Figure 33 - Schémas représentatifs des modes d'infiltration dans le lit et les berges de la rivière.-

En rive droite, la pente de la rivière et le sens de l'écoulement des eaux excluent le drainage de la rivière, mais étant donné la faible différence des niveaux relevée dans la nappe et au fil de l'eau de la rivière, on ne peut y écarter définitivement cette hypothèse.

- 2) Il me semble plus vraisemblable que le décolmatage des rives et du lit de la Romanche soit dû à la turbulence des eaux de la rivière quand les débits augmentent. En hautes eaux, les eaux de la rivière sont très chargées en matières en suspension mais leur turbulence ne permet pas de dépôt ; au contraire, elles participent au curage naturel du lit et des rives favorables aux infiltrations de la rivière dans la nappe. En basses eaux, une lente percolation des eaux dans les sédiments du lit mineur de la rivière existe. Ce phénomène a été décrit par A. MARCHAND (1950) ; il avait constaté que :

"Dans le lit majeur du torrent, il existe plusieurs dépressions, profondes de 60 à 80 cm. Après les crues, ces dépressions restent pleines d'eau ce qui démontre bien que le lit est colmaté ; mais, on constate cependant que l'eau s'infiltré lentement dans le sol, de sorte qu'une huitaine de jours après la crue, toutes les dépressions sont vides". Par un court calcul, il avait chiffré approximativement le volume de ces infiltrations au niveau de l'Ile Falcon et avait pu conclure que "... même pour un torrent comme la Romanche, dont le lit est très colmaté, les infiltrations qui peuvent se produire dans les alluvions du lit ne sont pas négligeables".

Comme l'ont décrit H. CAMBEFORT (1963) et D. ROUSSELOT (1976) les infiltrations d'une rivière, non colmatée, alimentant une nappe alluviale libre, peuvent se faire dans un plan vertical, perpendiculaire à l'axe de la rivière, alors que l'écoulement de la nappe se fait dans le même sens que la rivière (figure 33).

En hautes eaux, des infiltrations plus importantes viennent s'ajouter aux précédentes et intéressent l'ensemble du lit majeur et des berges de la rivière.

II-4 - RESUME DES ETUDES HYDROGEOLOGIQUES

Située à l'amont de la plaine de Vizille et en aval de celle de l'Ile Falcon, la plaine alluviale du Péage-de-Vizille et de Jouchy, est constituée d'une épaisse couche d'alluvions (80 à 100 m d'épaisseur) reposant sur un socle cristallin.

Les alluvions constituent le magasin aquifère d'une nappe souterraine. La couche supérieure des alluvions (jusqu'à - 30 m de profondeur) est constituée de blocs, de galets, de graviers et de sables très perméables. D'après les essais de pompage effectués, le coefficient de perméabilité (K) de cette couche est peu différent de 10^{-2} m/s et la porosité efficace S de 15 %.

La nappe souterraine s'écoule, de la Croix-du-Mottet au verrou du Péage (limitée en profondeur par une remontée du socle cristallin), parallèlement à la rivière.

Les infiltrations nouvelles dans la nappe représentent un débit de l'ordre de 1 000 l/s (variant de 800 à 1 600 l/s suivant les saisons). Ces apports d'eau proviennent essentiellement des infiltrations de la Romanche dans sa nappe d'accompagnement.

La zone d'infiltration préférentielle est toute l'année, située à l'amont de la plaine, notamment en rive gauche. A l'échelle de l'année, l'apport direct des pluies sur la plaine et l'apport du ruissellement sur les versants représentent 3 à 10 % des infiltrations totales.

L'alimentation de la nappe souterraine dépend donc essentiellement des débits transitant dans la rivière à l'amont de la plaine alluviale et son régime est lié à celui de la Romanche. Celle-ci est soumise à un régime nivo-glaciaire avec un étiage hivernal et dispose de ses hautes eaux au mois de mai, juin, juillet et août. Les crues de la rivière sont favorables au décolmatage du lit et des rives, et donc à la recharge de la nappe ; les décrues de la rivière entraînent un colmatage du lit et des rives et par conséquent la vidange de la nappe.

A l'issue de cette étude hydrogéologique qui a permis une connaissance approfondie des échanges hydrodynamiques nappe-rivière, un certain nombre de questions restent sans réponse, dans le cadre des techniques utilisées :

- . Quel est le processus du mélange des eaux infiltrées et des apports souterrains dans la nappe ?
- . Quel est le temps de séjour des eaux infiltrées dans le magasin aquifère ?
- . Existe-t-il des zones où le renouvellement des eaux est ralenti ?
- . En combien de temps les eaux infiltrées parviennent-elles dans les zones de pompages ?

Univ. J. Fourier - UJF-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 : platour@ujf-grenoble.fr

Il est bien évident qu'en cas de pollution de la Romanche la reconnaissance rapide et l'observation des zones d'infiltration, le suivi du cheminement des eaux infiltrées dans la nappe, permettraient d'envisager une protection efficace des puits exploités.

Aux questions précédemment posées, concernant l'aspect quantitatif, viennent s'ajouter celles concernant la qualité des eaux.

Dans la deuxième partie de ce travail, j'examinerai, d'une part, quelles sont les caractéristiques naturelles des eaux de la nappe et leur évolution au cours du cheminement souterrain, et d'autre part, comment l'interprétation des processus hydrochimiques permet de confirmer ou de compléter l'étude hydrogéologique pour la sauvegarde de la qualité des eaux.

En hydrochimie, la physico-chimie d'une eau est définie par :

1) grâce à sa teneur totale en sels minéraux dissous (ou en minéralisation totale),
la mesure de la résistivité électrique d'une eau (ou de son inverse, la conductivité électrique) permet d'évaluer rapidement sa minéralisation totale. On sait que la mesure de relation entre la résistivité et la teneur en sels dissous dépend de la nature de ces sels ;
Elle n'est valable que pour les concentrations inférieures à 1 g/l.
Dans la "Nomenclature", sont généralement désignés les sels dissous de la façon suivante :
est élevé ; on peut donc utiliser la formule simplifiée de calcul de la teneur en sels dissous (1963) qui lie linéairement la teneur totale en sels dissous (en mg/l) et la résistivité (1) en $\Omega \cdot \text{cm}$ à 20°C ou la conductivité (2) en $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ à 20°C :

DEUXIEME PARTIE

EXAMEN des RESULTATS d'ANALYSES

PHYSICO-CHIMIQUES des EAUX

1) Pour la mesure de la conductivité (ou de la résistivité) on utilise un appareil de mesure de la teneur en sels dissous à la norme A.T.A. (A.T.A. N.F.T. 34.431, décembre 1971) j'indiquerai :
pour la mesure de la conductivité en $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ à 20°C
et pour la mesure de la résistivité en $\Omega \cdot \text{cm}$ à 20°C.
Selon la même norme, le symbole de la résistivité standard est ρ_{20} et celui de la conductivité est σ_{20} . Pour les mesures physiques et afin d'éviter des confusions, j'utiliserai les symboles R pour ρ_{20} et G pour σ_{20} et la précision d'unité utilisée et la température de référence.

En hydrochimie, la physionomie d'une eau est définie :

- 1) grâce à sa teneur totale en sels minéraux dissous (ou sa minéralisation totale).
La mesure de la résistivité électrique d'une eau (ou de son inverse, la conductivité électrique) permet d'évaluer rapidement sa minéralisation totale. On sait que la courbe de relation entre la résistivité et la teneur en sels dissous dépend de la nature de ces derniers ; Elle n'est linéaire que pour des concentrations inférieures à 1 g/l. Dans la pratique, les eaux naturelles, non "minérales", sont généralement dans ce dernier cas, et le degré de dissociation de leurs ions est élevé ; on peut donc utiliser la formule empirique de DOROSCHEWSKY (in G. CHARLOT - 1963) qui lie linéairement la teneur globale en sels dissous (M en mg/l) à la résistivité (1) (ρ en $\Omega \cdot \text{cm}$ à 20°C) ou à la conductivité (1) (γ en $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ à 20°C) :

(1) l'unité de mesure de la résistivité électrique est l' $\text{ohm} \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$ et celle de la conductivité (son inverse) est le $\mu\text{S} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2$. Dans la suite du texte, pour se conformer à la norme A.F.N.O.R. (N.F.T. 90.031, décembre 1977) j'écrirai :

$\text{ohm} \cdot \text{cm}$ ou $\Omega \cdot \text{cm}$ pour l' $\text{ohm} \cdot \text{cm}^2 / \text{cm}$.
et $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour le $\mu\text{S} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2$.

Selon la même norme, le symbole de la résistivité électrique s'écrit ρ et celui de la conductivité γ . Pour des raisons graphiques et afin d'éviter des confusions, j'utiliserai les symboles R pour ρ et G pour γ en précisant l'unité utilisée et la température de référence.

$$M \text{ (mg/l)} = \frac{750\ 000}{R \text{ (\Omega.cm à 20°C)}} = 0,75 \text{ G (\mu S.cm}^{-1}\text{)}$$

J'adopterai la classification, figurant dans le *tableau 25*, généralement admise pour les eaux naturelles (J. RODIER - 1978).

Minéralisation totale	Résistivité (Ω.cm à 20°C)	Conductivité (μS.cm ⁻¹ à 20°C)
Très faible	R > 10 000	G < 100
Faible	5 000 < R < 10 000	100 < G < 200
Moyenne, peu accentuée	3 000 < R < 5 000	200 < G < 330
Moyenne	1 500 < R < 3 000	330 < G < 670
Importante ou excessive	R < 1 500	G > 670

Tableau 25 - Classification des eaux naturelles en fonction de leur minéralisation totale.

- 2) grâce aux caractéristiques minérales qui permettent de classer et de comparer les eaux. Chaque classe d'eaux, de mêmes caractéristiques, est déterminée par la prédominance d'un ou plusieurs ions. Il n'existe pas de classification normalisée des eaux naturelles mais on les range généralement, comme l'a fait O.A. ALEKINE (1953) en tenant compte des anions prédominants (type bicarbonaté, sulfaté ou chloruré...) et des cations qui les accompagnent (type calcique, magnésien, sodique...).

Au cours des douze premières années d'exploitation du puits I de Jouchy, de nombreuses analyses bactériologiques et chimiques des eaux ont été effectuées par le laboratoire régional d'analyses (1), dans le cadre des contrôles exigés par la législation. Elles concernent les eaux distribuées et les eaux superficielles alimentant la nappe.

Les analyses physico-chimiques que j'ai effectuées au laboratoire du S.I.E.R.G. depuis 1975 sont, elles, destinées à étudier plus particulièrement leurs caractéristiques hydrochimiques (2).

x
x^xx^x
x^xx

Dans cette deuxième partie, j'examinerai les résultats des analyses des eaux superficielles :

- . du bassin versant de la Romanche, dont les caractéristiques et le minéralisation sont susceptibles d'influencer celles de la rivière au droit des zones d'infiltration de la nappe ;
- . de toutes les eaux qui s'infiltrent dans la nappe.

(1) Laboratoire d'Hygiène, Faculté de Médecine - 38700 LA TRONCHE.

L'examen des résultats d'analyses des eaux de la nappe et du puits I de Jouchy, actuellement en exploitation, me conduira à étudier les variations hydrochimiques que subissent les eaux au cours de leur cheminement souterrain et d'en expliquer les processus mis en jeu.

Je proposerai enfin une méthodologie appliquée au secteur étudié permettant de déceler ou de prévoir les changements qualitatifs intervenant à l'occasion des mouvements hydrodynamiques de la nappe.

=::=:=::=

(2) Voir annexe I les méthodes d'analyses employées au laboratoire du S.I.E.R.G.-

I - EXAMEN DES RESULTATS DES ANALYSES DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN VERSANT

DE LA ROMANCHE

Les caractéristiques chimiques des eaux naturelles sont liées à la géologie des terrains dont elles sont issues ou sur lesquels elles circulent. Commodément, les hydrogéologues utilisent les résultats des analyses d'eau pour en déceler l'origine. En considérant les possibilités de mise en solution des ions contenus dans les principaux minéraux présents, il est possible de définir, comme le fait H. SCHOELLER (1962), les caractéristiques des eaux des calcaires, des dolomies, des gypses, etc.

Dans le bassin versant de la Manche, on peut lier la minéralisation totale et certaines caractéristiques des eaux prélevées, aux minéraux présents dans les terrains.

Ainsi, dans les zones cristallines qui correspondent aussi, le plus souvent, aux zones les plus élevées, les eaux sont peu minéralisées ; les roches cristallines et cristallogéniques, non altérées, sont peu solubles dans l'eau, dans les conditions de température, de pression, de temps de contact que rencontrent les eaux superficielles les plus abondantes (eaux de fonte de neiges, de ruissellement).

Au contact des terrains sédimentaires, des couvertures tertiaire et secondaire, plus solubles, les eaux s'enrichissent notamment en sels de métaux alcalino-terreux dont la mobilité et la solubilité sont les plus grandes. Il s'agit essentiellement des sulfates et des bicarbonates de calcium et magnésium, des gypses, des calcaires, des dolomies présents. Leur solubilité augmente avec la salinité et la pression partielle en gaz carbonique et en oxygène acquis au cours de l'écoulement. En dehors de tout apport souterrain, il est donc normal que les eaux de surface voient leur minéralisation totale augmenter de l'amont vers l'aval.

A la faveur des resserrements rocheux et des remontées du socle cristallin dans la vallée, les eaux des rivières sont grossies par les eaux vadoses ascendantes des nappes souterraines qui se sont enrichies au contact des alluvions quaternaires perméables, dans des conditions physiques et hydrodynamiques favorables.

La différenciation des caractéristiques chimiques des eaux superficielles, liées à la géochimie des terrains rencontrés, est appréciable surtout en basses eaux. En effet, leur hydrochimie est également liée à leur régime hydraulique. Leur débit et leur vitesse d'écoulement augmentent considérablement lors de la fonte des neiges, leurs possibilités de mise en solution et d'attaque sont réduites, et leur différenciation tend à s'estomper. La minéralisation des eaux de surface subit donc des variations saisonnières importantes.

Dans les zones les plus cristallines, les eaux de surface présentent en toutes saisons des caractéristiques peu différentes des eaux météoriques ou de fonte des neiges qui les alimentent. Elles sont très peu minéralisées. Ailleurs, même les plus minéralisées subissent en hautes eaux, des dilutions dues à l'apport prédominant des eaux de fonte de neige. Leur minéralisation totale diminue alors et leur différenciation est moins évidente. Si ce phénomène de dilution par les eaux météoriques est universellement valable, il est particulièrement accentué dans le bassin versant de la Romanche où le régime de la majorité des rivières est de type nival ou nivo-glaciaire et où les débits de hautes eaux masquent les effets des apports des eaux plus minéralisées.

A l'échelle d'un bassin versant de plus de 1 000 km², comme celui de la Romanche, où la géologie et le schéma hydraulique sont complexes, on peut constater une grande variabilité de la minéralisation totale et des caractéristiques hydrochimiques des eaux, dans le temps et dans l'espace. Les eaux superficielles sont, tout au long de leur cours, les sièges de mélanges, d'apports ou de dilutions. Il n'est donc pas toujours possible d'interpréter les variations constatées.

Les analyses des eaux superficielles du bassin versant de la Romanche que j'ai pu effectuer, depuis 1975, permettent cependant de reconnaître leurs principales caractéristiques et de suivre leurs variations saisonnières.

I-1 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN DE LA HAUTE ROMANCHE

D'après les analyses effectuées par G. BOCQUET (1976) au cours de l'été des années 1973 et 1974, les eaux du bassin essentiellement cristallin de la haute Romanche, sont très peu minéralisées. Les eaux prélevées au Pied du Col en amont de Villar d'Arène (1 650 m) ont des résistivités de 10 000 à 30 000 ohm.cm. G. BOCQUET a pu y constater d'une part, que : *"c'est dans les bassins cristallins (torrent de l'Homme, Béous, Romanche amont) que la minéralisation est la plus faible alors que dans les sites sédimentaires elle est beaucoup plus marquée"*... (torrent du Maurian...) et d'autre part que... *"les plus faibles résistivités sont enregistrées à l'aval des torrents... ce qui implique... une aptitude... des eaux à dissoudre des éléments..."*. Malheureusement, l'auteur ne mentionne pas d'analyse effectuée à cette altitude en d'autres saisons.

A l'aval de l'usine E.D.F. de Saint-Guillerme, la Romanche a parcouru 40 % de son cours total et a reçu les eaux superficielles de 30 % de son bassin versant. Les analyses effectuées au laboratoire du S.I.E.R.G. montrent que ses eaux se sont enrichies, notamment en bicarbonates et sulfates alcalino-terreux, grâce à l'apport des eaux issues des terrains schisteux et calcaires du massif du Mont de Lans. A l'amont de sa confluence avec le Vénéon, au Clapier, la Romanche présente le faciès d'une eau à la minéralisation moyenne (tableau 26) ; dans la plaine de Bourg-d'Oisans, elle est grossie par les eaux peu minéralisées de ses affluents issus des massifs cristallins de la Meije et des Grandes Rousses (la Sarenne, les Cascades, la Rive... tableau 26).

I-2 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN DU VENEON DE SAINT-CHRISTOPHE A BOURG-D'OISANS

En amont du Plan du Lac, l'origine des eaux de surface (eaux de fonte des neiges et des névés qui rejoignent la vallée sans rencontrer d'obstacles) et la nature cristalline des terrains (granites et schistes du massif des Ecrins) expliquent facilement la très faible minéralisation des eaux prélevées (tableau 27).

Les eaux des dérivations artificielles des torrents du Lauvitel et de la Muzelle, issues elles aussi, des massifs cristallins des Ecrins et qui rejoignent le Vénéon au Plan du Lac, ne sont pas de nature à augmenter sa charge minérale (tableaux 27 et 28).

Par contre, les eaux qui s'infiltrent dans les alluvions récentes de la plaine du Plan du Lac (150 à 200 m d'épaisseur) s'enrichissent au cours de leur cheminement souterrain. Elles viennent reconstituer la rivière à l'aval. Ainsi les eaux du Vénéon à l'amont de Bourg-d'Arud présentent, aux mêmes dates, des minéralisations plus accentuées qu'au Plan du Lac (Analyses 367 et 368 du tableau 27 et figure 35).

	La Romanche au Clapier (745 m)			La Sarenne	La Rive en amont de Bourg-d'Oisans			
	1.4.75	20.6.75	6.4.77		5.4.77	29.1.75	1.4.75	20.6.75
Date du prélèvement	1.4.75	20.6.75	6.4.77	5.4.77	29.1.75	1.4.75	20.6.75	22.6.76
Heure	13 h	16 h 10	9 h 45	10 h	12 h 30	14 h 20	16 h 45	10 h 35
Température air °C		18°8	2°7	2°5	4°7		15°2	23°4
Température eau °C	4°6	7°4	3°9	1°9	7°9	7°5	7°9	7°6
pH à 20°C	7,95	7,85	7,75	7,25	8,25	7,85	7,95	7,8
Résistivité en Ω.cm à 20°C	2 890	4 845	3 460	6 025	5 860	5 990	5 875	6 030
Conductivité en μS.cm ⁻¹ à 20°C	347	203	290	166	171	167	170	166
D.H.T. en °f.	21,0	12,3	17,3	8,1	9,8	9,9	9,9	9,0
T.A.C. en °f.	11,2	8,25	10,4	7,2	7,5	7,6	7,35	7,2
Bicarbonates en mg/l de HCO ₃ ⁻	137	101	127	88	91	93	90	88
Chlorures en mg/l de Cl ⁻	5	3	5,5	9	3	3,5	3	2
Nitrates en mg/l de NO ₃ ⁻	1,0	0,8	2,0	3,4	2	1,25	1,0	1,2
Sulfates en mg/l de SO ₄ ⁼	78	29	63	16	17	20	20	18
Phosphates en mg/l de PO ₄ ⁼	0,14					0,0		0,12
Calcium en mg/l de Ca ⁺⁺	61	37	50	25	29	29	29	28
Magnésium en mg/l de Mg ⁺⁺	14	6,7	11,7	4,4	6,3	6,6	6,6	4,9
Sodium en mg/l de Na ⁺					1,7			
Potassium en mg/l de K ⁺					0,7			
Silice en mg/l de SiO ₂	7,5		5,8	6,1	3,0	8,8		4,6
M.E.S. en mg/l								
N° Analyse S.I.E.R.G.	223	374	1038	1039	206	224	375	820

Tableau 26 - Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux superficielles du bassin de la haute Romanche.-

LE VENEON	Le Plan du Lac	En amont de Bourg-d'Arud		A Venosc en amont des ruisseaux		Au Pont des Gauchoirs				Le Bucllet aval usine E.D.F.			
										Rive droite	Boucle centrale		
Date du prélèvement	20.6.75	1.4.75	20.6.75	1.4.75	20.6.75	29.1.75	1.4.75	20.6.75	22.6.76	11.4.75	20.6.75	11.5.75	20.6.75
Heure	14 h	10 h 40	14 h 30	11 h 10	15 h	14 h 40	12 h 10	13 h 40	10 h	12 h 35	15 h 50	12 h 35	15 h 50
Température air °C	16°1	3°7	18°2	2°7	15°1	6°	4°2	13°	20°2	5°1	15°	5°1	15°
Température eau °C	9°9	4°5	7°3	5°7	7°9	5°2	7°	3°4	9°3	8°2	8°2	7°4	8°3
pH à 20°C	7,3	7,65	7,5	7,3	7,7	7,8	7,85	7,65	7,55	7,75	7,1	7,75	7,2
Résistivité en Ω.cm à 20°C	19 860	8 160	8 950	7 040	7 620	3 070	4 220	5 720	12 160	7 000	13 370	6 400	15 620
Conductivité en μS.cm ⁻¹ à 20°C	50,4	123	111	142	131	326	237	174	82	143	75	156	64
D.H.T. en °f.	3,7	6,6	6,8	8,1	7,9	17,2	13,0	10,4	4,55	7,8	3,85	8,7	4,1
T.A.C. en °f.	2,8	5,6	4,3	5,6	5,45	9,2	8,5	6,55	3,5	4,7	2,2	5,6	2,35
Bicarbonates en mg/l de HCO ₃ ⁻	34,2	68,3	53	68,3	66	112	104	80	43	57,3	26,8	68,3	29
Chlorures en mg/l de Cl ⁻	2,5	4	2,5	3	2,5	15	4	2,5	3,0	5	2,5	5	2,5
Nitrates en mg/l de NO ₃ ⁻	1,0	0,9	1,0	0,9	1,4	3,7	1,3	2,75	0,8	0,9	0,8	1,0	0,8
Sulfates en mg/l de SO ₄ ⁼	7,5	15,8	15,4	21,6	19	64	43	30	12	26,4	9,8	29	10
Phosphates en mg/l de PO ₄ ⁼		0,23		0,16			1,0		0,15	0,1		0,13	
Calcium en mg/l de Ca ⁺⁺	9	23,6	21,6	26,4	25,6	57	39	32	14,8	24,8	10,4	26	11,2
Magnésium en mg/l de Mg ⁺⁺	3,6	1,7	3,4	3,6	3,5	7,8	7,8	5,1	3,5	3,9	2,5	5,3	2,5
Sodium en mg/l de Na ⁺													
Potassium en mg/l de K ⁺													
Silice en mg/l de SiO ₂		9,0		9,0			9,5		3,0	9,0	7,6	9,0	
M.E.S. en mg/l	9,2		4,4		147	2 300							4,4
N° Analyse S.I.E.R.G.	367	215	368	217	370	207	220	365	825	222	373	221	372

Tableau 27 - Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux du Vénéon, de l'amont (au Plan du Lac) vers l'aval (à Bourg-d'Oisans).-

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

Les ruisseaux Vallée du Vénéon	R. de Lairette à Venosc		Le Merdaret à Venosc		R. du Lauvitel aux Gauchoirs			Cascade près des sources de la Rive			cascade de la Pisse Bourg-Oisans	
	1.4.75	20.6.75	29.1.75	1.4.75	20.6.75	1.4.75	20.6.75	22.6.76	29.1.75	1.4.75		20.6.76
Date du prélèvement	1.4.75	20.6.75	29.1.75	1.4.75	20.6.75	1.4.75	20.6.75	22.6.76	29.1.75	1.4.75	20.6.76	20.6.75
Heure	11 h 10	15 h	15 h	11 h 30	13 h 45	12 h	15 h 30	9 h 50	12 h	14 h 30	17 h	17 h 20
Température air °C	2°7	15°1	4°4	3°7	14°1	4°6	15°1	20°2	5°4			15°2
Température eau °C	4°2	9°4	4°4	5°3	13°7	4°9	8°3	8°9	3°4			7°4
pH à 20°C	7,65	8,05	7,9	7,3	8,15	7,45	7,4	7,55	8,3	8,0		7,7
Résistivité en Ω.cm à 20°C	1 460	2 660	1 150	1 000	1 275	11 280	12 800	12 800	4 620	4 250		8 050
Conductivité en µS.cm ⁻¹ à 20°C	685	375	870	1 000	785	89	78	78	216	235	à sec	124
D.H.T. en °f.	26,4	23,5	54,0	45,2	54,0	5,3	5,0	4,35	12,9	14,5	à	8,0
T.A.C. en °f.	26,0	15,5	15,3	21,5	19,2	4,1	3,5	3,60	11,2	12,0		6,15
Bicarbonates en mg/l de HCO ₃ ⁻	317	189	187	262	234	50	42,7	44	137	146		75
Chlorures en mg/l de Cl ⁻	30	5	34,5	94	10	4	2,5	2,0	2,5	4		4
Nitrates en mg/l de NO ₃ ⁻	0,0 *	2,7	3,6	0,0 *	1,85	0,0	0,8	0,5	0,25	0,0		0,75
Sulfates en mg/l de SO ₄ ⁼	243	60	355	255	312	5,7	11	7,5	8,5	16,8		12
Phosphates en mg/l de PO ₄ ⁼	10,8			3,5		0,08		0,12		0,12		
Calcium en mg/l de Ca ⁺⁺	79	70	168	136	154	14,4	12,4	13	40	42,5		22,4
Magnésium en mg/l de Mg ⁺⁺	16,5	13	21	27	37,7	4,1	4,6	2,7	7,0	9,5		5,8
Sodium en mg/l de Na ⁺												
Potassium en mg/l de K ⁺												
Silice en mg/l de SiO ₂	18			22		6,0		3,0		7,0		
M.E.S. en mg/l	78	42,5	21 000	565	20,8	0,0	4,0					
N° Analyse S.I.E.R.G.	216	369	208	218	366	219	371	824	209	225		376

* L'absence des nitrates de ces ruisseaux peut s'expliquer par leur réduction en dérivés azotés réduits (NH₃, NO₂...) ou leur dégradation biologique rapide.

Tableau 28 - Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux des affluents du Vénéon.-

A Venosc, le Vénéon reçoit sur sa rive droite les eaux fortement minéralisées et souvent polluées du massif liasique, calcaire et schisteux de l'Alpe de Venosc.

Parmi les ruisseaux et torrents affluents du Vénéon, les ruisseaux de Lairette et le Merdaret, en rive droite, présentent les minéralisations les plus élevées (Analyses 216 - 369 - 208 - 218 - 366, du tableau 28) ; ils sont particulièrement riches en sulfates alcalino-terreux. Ces ruisseaux reçoivent les effluents du village de Venosc et une partie des eaux usées de la station des Deux Alpes. Ils présentent des taux importants de chlorures, sulfates, phosphates alcalins, des matières en suspension et des détergents imputables aux pollutions organiques et minérales des eaux usées.

Le Merdaret charrie des débris schisteux en suspension qui proviennent du versant de la rive droite du Vénéon et qui sont à l'origine de l'aspect noirâtre de ses eaux. Ces matières en suspension sont pour leur plus grande part d'origine minérale ; leur taux est très variable et fonction du débit et de la turbulence des eaux du ruisseau. Nous avons pu mesurer 21 000 mg/l de matières en suspension le 29 janvier 1975, 565 mg/l le 1er avril 1975, 21 mg/l le 22 juin 1975. Les apports des eaux des versants liasiques, calcaires et schisteux (ruisseau de Lairette et du Merdaret notamment) expliquent l'augmentation sensible des sulfates calciques et magnésiens des eaux du Vénéon à l'aval de Venosc. En basses eaux, l'eau du Vénéon est là, fortement chargée par les matières dissoutes ou en suspension en provenance de ces ruisseaux, jusqu'au village des Gauchoirs. Ce n'est qu'à l'aval de la confluence avec le ruisseau du Lauvitel, issu du massif cristallin des Ecrins, et de la restitution des eaux peu minéralisées du Plan du Lac par l'usine E.D.F. du Pont Escoffier, que les eaux du Vénéon, suffisamment diluées voient leur minéralisation diminuer (Tableau 29 - Figures 34 et 35).

Conductivité des eaux du Vénéon en µS.cm⁻¹ à 20°C

	Conductivité des eaux du Vénéon en µS.cm ⁻¹ à 20°C	
	Basses eaux	Hautes eaux
	1.IV.75	20.VI.75
. Au Plan du Lac		50
. En amont du village de Bourg-d'Arud	123	111
. A Venosc, en amont de sa confluence avec le ruisseau de Lairette	142	123
. En amont du pont des Gauchoirs	237	174
. Au Buclet	143	73

Tableau 29 - Conductivités des eaux du Vénéon, de l'amont vers l'aval, en basses et hautes eaux.-

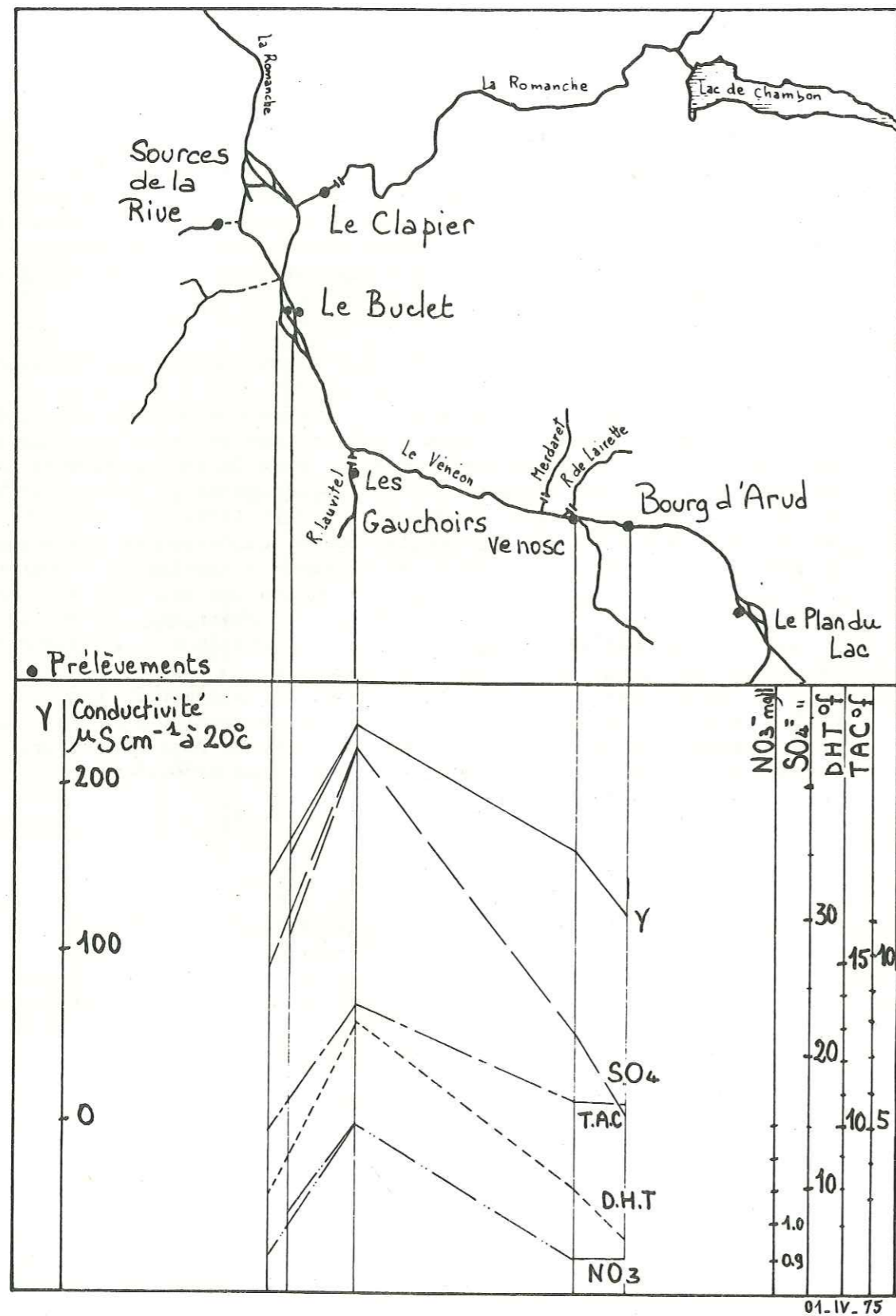


Figure 34 - Variations de la minéralisation des eaux du Vénéon de l'amont vers l'aval, en basses eaux (1.IV.75).-

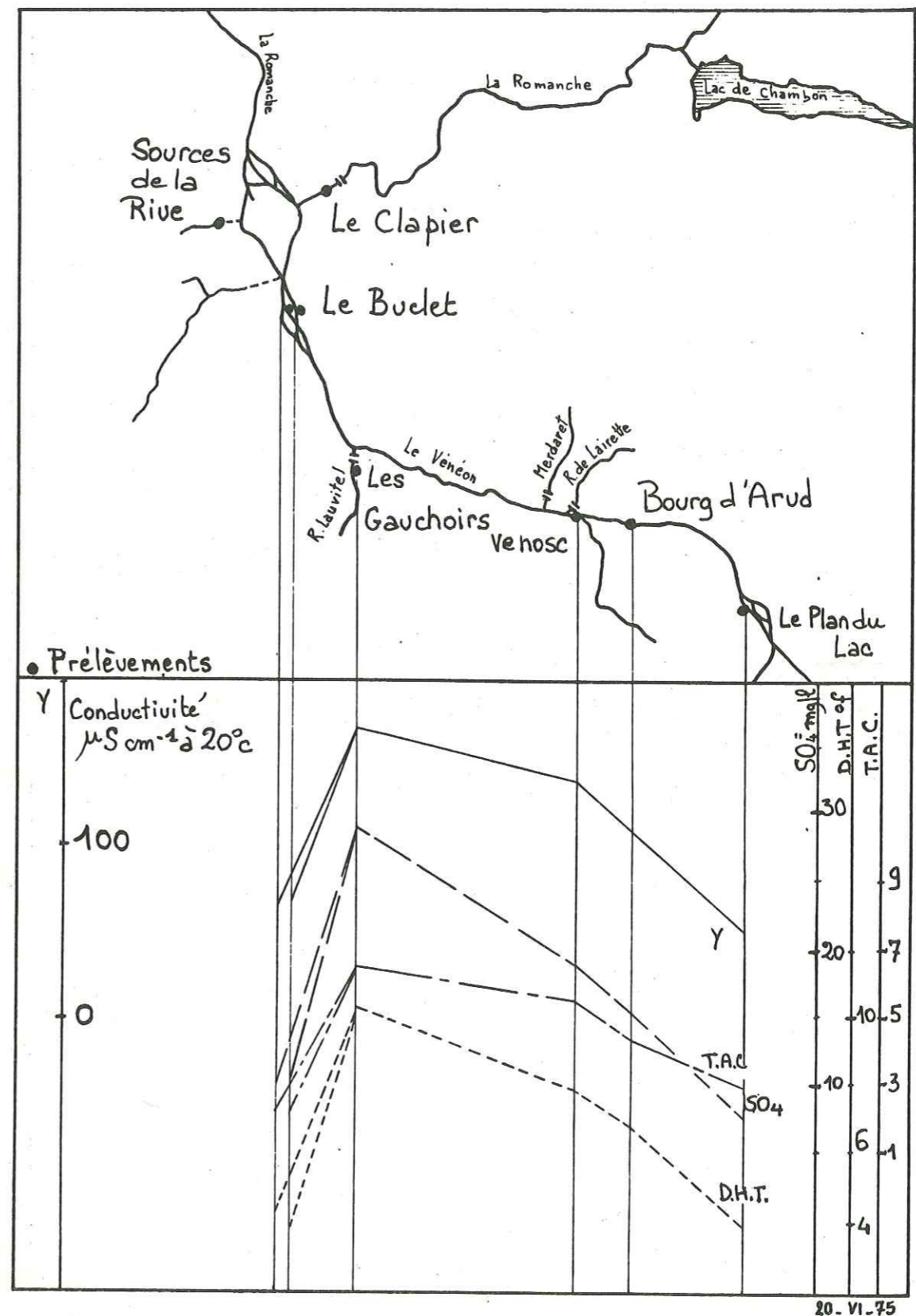


Figure 35 - Variations de la minéralisation des eaux du Vénéon de l'amont vers l'aval, en hautes eaux (20.VI.75).-

I-3 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX SUPERFICIELLES DU BASSIN DE L'EAU D'OLLE (Figure 36)

I-3-1 - De l'amont vers l'aval

Dans la partie cristalline du bassin versant de l'Eau d'Olle, constituée de granites, de schistes, d'amphibolites et de gabbros, les eaux prélevées sont très peu minéralisées ; leur résistivité est supérieure à 10^4 ohm.cm à 20°C en toutes saisons. L'ensemble du haut bassin de la rivière est formé par les massifs cristallins de Belledonne et des Grandes Rousses, mais ceux-ci sont le siège de nombreux accidents tectoniques (failles, fossés d'effondrement...) recouverts ou remplis par des terrains houillers, triasiques ou liasiques. C'est au contact de ces formations et des alluvions quaternaires (éboulis, cônes de déjection, alluvions...) que les eaux de l'Eau d'Olle acquièrent des sulfates et des bicarbonates de calcium et de magnésium. Ainsi, la minéralisation des eaux de la rivière s'accroît du Plan du Suel à la plaine de Grand-Maison (tableau 30).

Toutefois, les apports des abondantes cascades chutant du massif de Belledonne (cascade de la Sagne, de la Combe et des Ilettes...) maintiennent la faible minéralisation des eaux de l'Eau d'Olle et son faciès d'eau peu minéralisée issue de terrains cristallins, dans sa moyenne vallée.

Ce n'est que dans la basse vallée, à l'aval du Pont du Rattier, que les affluents de sa rive gauche (notamment le Flumet qui est le plus abondant) issus du massif de Vaujany à couverture calcaire et schisteuse, accentuent sa minéralisation (Figure 37). Plus en aval encore, à Allemont, l'Eau d'Olle voit sa minéralisation diminuer, du Pont des Faures à sa confluence avec la Romanche, du fait des apports importants des ruisseaux aux faibles minéralisations des versants de la rive droite et des eaux de la restitution du canal E.D.F. de la fonderie à Allemont (prise des eaux au Verney à l'amont de la confluence du Flumet).

I-3-2 - Minéralisation totale et caractéristiques physico-chimiques des principaux ruisseaux affluents de l'Eau d'Olle et variations saisonnières (Figure 37 - Tableaux 31)

A l'amont du Pont du Rattier, les ruisseaux issus des massifs cristallins de Belledonne et des Grandes Rousses, présentent des minéralisations très faibles tout au long de l'année ; leurs conductivités sont de l'ordre de 20 à $50 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ à 20°C (Tableau 31 a).

Le débit (1) de la cascade de la Sagne a lui seul, représente 4 % du débit de l'Eau d'Olle mesuré au Pont du Rattier (débit naturel de la cascade : $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$).

(1) Les débits des principaux affluents de l'Eau d'Olle sont mesurés mensuellement à la demande du Comité Hydrologique de Grand-Maison. - Direction Interdépartementale de l'Industrie - Région Rhône-Alpes.-

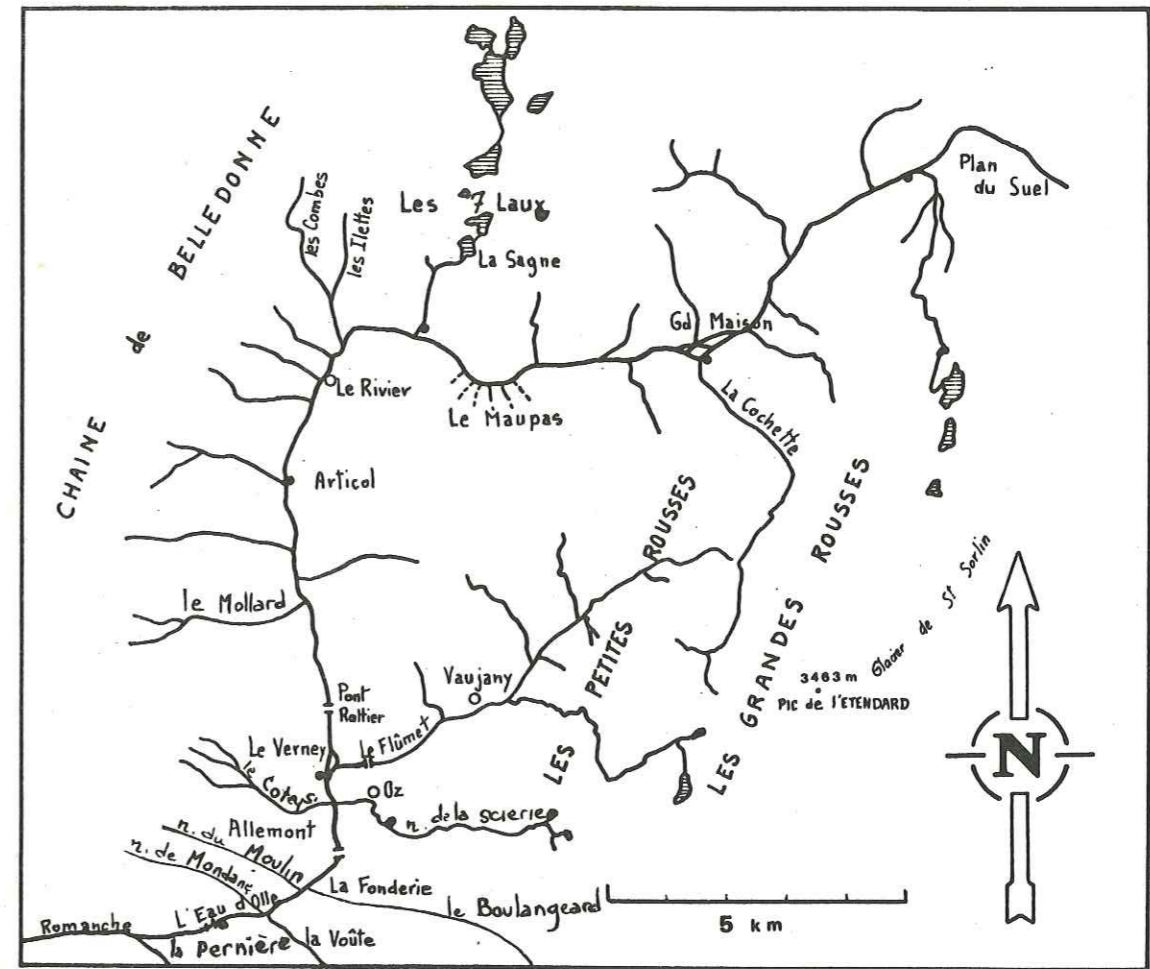


Figure 36 - Schéma hydrographique de l'Eau d'Olle - Prélèvements effectués au cours de la campagne du 25 août 1975.-

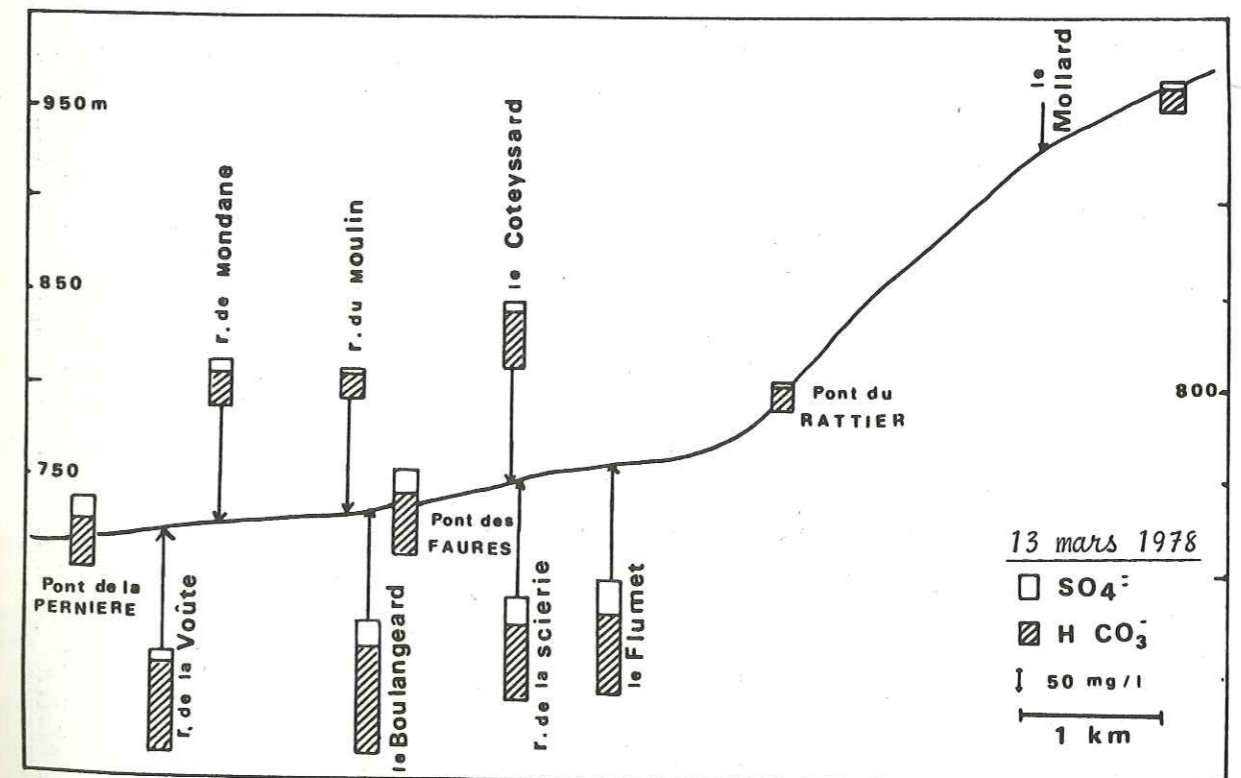


Figure 37 - Variations de la minéralisation des eaux de l'Eau d'Olle et de ses affluents en aval du Pont du Rattier.-

L'EAU d'OLLE de l'amont vers l'aval	Plan du Suel	Grand-Maison	Articol	Le Rattier	Le Verney	La Pernière	Le Rivier Amont	Articol	La Pernière	Défilé du Maupas	Le Rivier Amont	Articol	La Pernière	Le Rattier	Les Faures	La Pernière	Le Rattier	Les Faures	La Pernière	Le Rattier	Les Faures	La Pernière		
Date du prélèvement	25 août 1975						24 sept. 1975						25 mai 1976			13 mars 1978			23 mai 1978			14 novembre 78		
Heure	15 h	15 h 30	17 h	17 h 30	17 h 45	18 h 30	16 h 30	16 h 40	17 h 10	10 h	10 h 45	11 h 15	11 h 40	1 h 25	12 h	13 h	10 h 50	11 h 10	11 h 15	15 h 45	16 h 15	16 h 25		
Température air °C	10°2	10°2	11°	11°		13°5	20°3	15°	14°6	15°	17°	15°2	15°	3°	3°	3°	4°1	4°2	3°9	11°	11°	11°		
Température eau °C	7°8	8°1	9°3	10°	9°	9°8	10°5	9°5	9°5	4°6	6°6	6°6	5°9	5°5	5°2	4°7	4°1	4°2	3°9	6°2	6°9	6°5		
pH à 20°C	7,5	7,75	7,8	7,8	7,75	7,85	7,85	7,75	7,85	7,7	7,5	7,6	7,55	7,85	8,1	7,95	7,9	8,05	7,9	7,7	8,2	7,8		
Résistivité en Ω.cm à 20°C	11 780	7 230	9 980	10 180	7 620	6 770	8 680	9 340	5 930	4 330	8 510	8 900	6 750	8 380	3 845	4 397	7 980	6 340	6 180	7 580	2 502	4 430		
Conductivité en μS.cm ⁻¹ à 20°C	85	138	100	96	131	148	115	107	169	231	117	112	148	119	260	227	125	158	162	132	400	226		
D.H.T. en °f.	4,9	8,5	5,6	5,5	8,3	8,6	5,9	5,3	8,8	13,3	5,1	5,1	8,3	6,1	14,4	12,3	6,8	8,9	8,2	7,6	22,2	12,2		
T.A.C. en °f.	3,0	5,25	4,5	4,7	4,35	5,4	4,4	4,8	6,1	7,8	4,8	4,8	5,6	4,8	11,1	7,65	5,4	6,6	6,9	5,3	10,1	6,7		
Bicarbonates en mg/l de HCO ₃ ⁻	36	84	55	57	53	66	53,7	59	74	95	58,5	58,5	67	59	136	93	66	81	84	65	124	82		
Chlorures en mg/l de Cl ⁻	3	4,5	4	4	3,5	3	3,5	4	3,5	3,5	4,5	3,0	3,0	0,7*	0,85	0,8	0,4	0,4	0,4	0,8	1,7	0,9		
Nitrates en mg/l de NO ₃ ⁻	0,35	0,5	0,7	0,5	0,5	0,55	0,5	0,75	0,1	1,8	1,0	0,9	0,9	0,8	1,2	1,3	1,0	0,9	1,0	0,3	0,6	0,6		
Sulfates en mg/l de SO ₄ ⁼	15,5	33	9	9,5	30	30	16,5	6,5	28	50	22	17	30	11	47	43	19,5	25	15,5	15	116	47		
Phosphates en mg/l de PO ₄ ⁼																								
Calcium en mg/l de Ca ⁺⁺	14,2	24	17,8	18	23,6	26	20,4	19,4	26,5	43	20	20	22	20	42	39	20	24	24	22	64	39		
Magnésium en mg/l de Mg ⁺⁺	3,3	6	2,7	2,4	5,8	5,3	1,95	1,2	5,3	6,3	3,0	3,0	7,0	2,7	9,2	7,5	4,6	7	5	4,9	15	5,8		
Sodium en mg/l de Na ⁺																								
Potassium en mg/l de K ⁺																								
Silice en mg/l de SiO ₂																								
M.E.S. en mg/l																								
N° Analyse S.I.E.R.G.	385	386	389	390	391	394	406	407	408	770	771	772	773	1754	1755	1756	1824	1823	1822	1976	1977	1978		

* Changement de méthode analytique (voir annexe 1)

Tableau 30 - Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux de l'Eau d'Olle.-

	Cascade de la Sagne				La Combe et les Illettes	le Coteyssard			le Moulin			Ruisseau de Mondane				
Date du prélèvement	25.8.75	25.5.76	11.7.76	19.8.76	25.5.76	13.3.78	6.3.79	11.7.79	13.3.78	6.3.79	11.7.79	12.5.77	13.3.78	20.10.78	6.3.79	11.7.79
Heure	16 h 45	9 h 45	16 h	16 h	10 h	12 h 30	15 h 20	11 h	12 h 25	15 h 15	10 h 55	11 h 15	12 h 25	11 h 05	15 h 30	10 h 30
Température air °C	12°2	14°2			15°	3°	12°	20°	3°	20°	20°	10°	3°	6°	12°	20°
Température eau °C	8°6	5°6			6°1	7°	6°5	11°4	5°1	6°5	9°1	8°2	5°7	6°8	6°7	10°1
pH à 20°C	7,15	6,75	6,75	7,2	7,0	7,65	7,75	7,5	7,7	7,8	7,95	7,85	7,95	8,0	7,8	
Résistivité en Ω.cm à 20°C	39 420	41 600	39 420	20 000	26 400	7 310	10 770	14 170	10 180	10 250	10 740	7 300	6 580	7 050	7 420	7 210
Conductivité en μS.cm ⁻¹ à 20°C	25	24	25	50	38	137	93	71	98	97,5	93	137	152	142	135	139
D.H.T. en °f.	1,6	1,4	1,65	2,7	2,0	6,95	4,6	3,75	4,2	4,85	5,0	7,5	8,0	7,2	6,6	7,35
T.A.C. en °f.	1,0	1,2	1,25	2,0	1,9	6,1	3,9	3,1	4,0	4,0	4,3	5,9	5,6	5,9	5,25	5,95
Bicarbonates en mg/l de HCO ₃ ⁻	12,2	14,6	15	24,4	23	74	47,6	38	49	49	52	72	68	72	64	73
Chlorures en mg/l de Cl ⁻	3	3	3	3	3	0,9	0,4	0,5	0,4	0,3	0,65	1,0	0,6	0,55	0,5	1
Nitrates en mg/l de NO ₃ ⁻	0,15	0,5	0,65	0,65	0,9	1,3	0,75	0,45	0,65	0,8	0,45	1,25	0,25	1,3	1,65	1
Sulfates en mg/l de SO ₄ ⁼	3	5	3	4	8	9,5	6	6	10	8,5	8	16	19,5	12	15,5	13
Phosphates en mg/l de PO ₄ ⁼																
Calcium en mg/l de Ca ⁺⁺	3,8	4,6	4,4	8,4	6,8	22	14	22,5	16,4	14,6	14,8	24,0	24,0	23	16,8	21,8
Magnésium en mg/l de Mg ⁺⁺	1,6	0,6	1,3	1,5	0,7	3,5	2,7	5,6	2,7	2,9	6,1	3,6	4,8	3,6	5,8	9,5
Sodium en mg/l de Na ⁺																
Potassium en mg/l de K ⁺																
Silice en mg/l de SiO ₂							3					2,6				
M.E.S. en mg/l							18,5			< 1					< 1	
N° Analyse S.I.E.R.G.	388	769	863	897	774	1763	2046	2132	1762	2045	2131	1067	1761	1948	2047	2129

Tableau 31 a - Résultats des analyses physico-chimiques des eaux, effectuées sur les eaux des affluents de l'Eau d'Olle.-

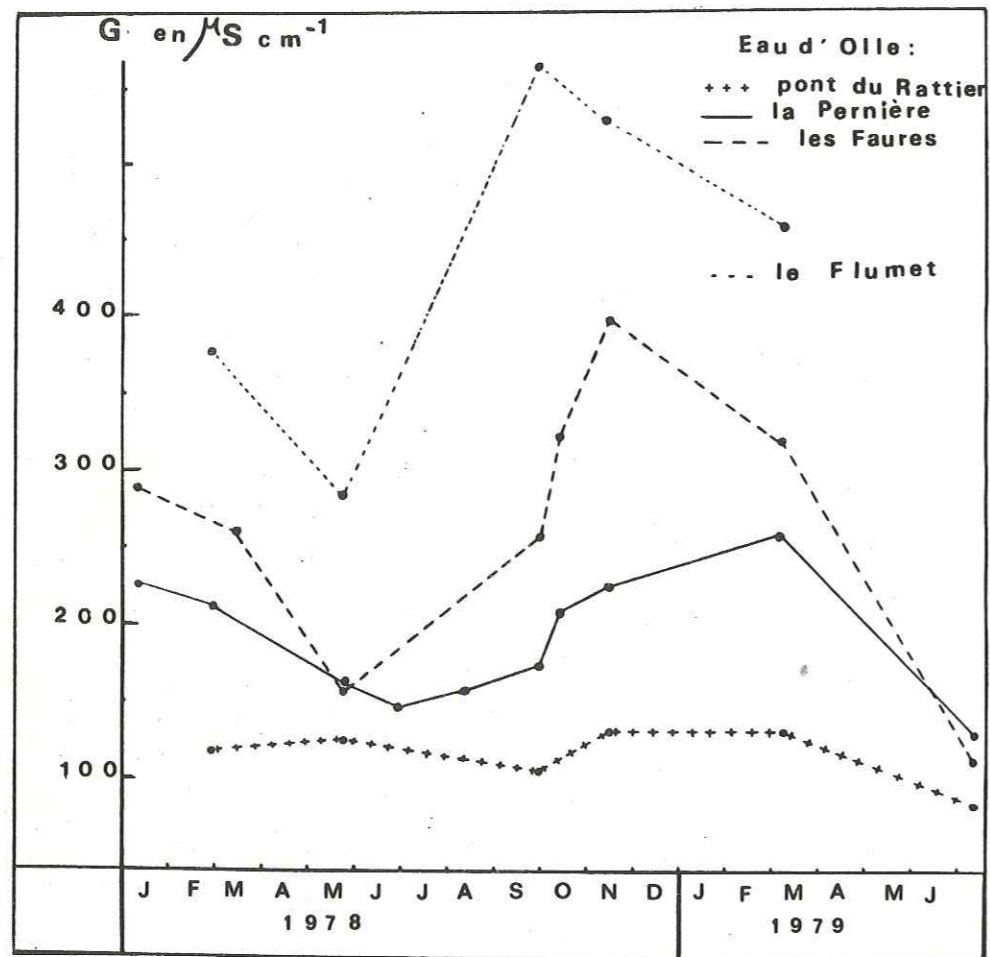


Figure 38 - Variations saisonnières des conductivités des eaux du Flumet et de l'Eau d'Olle.-

. Au pont de la Pernière, elle présente par conséquent, des variations moins accentuées (figure 38) qui portent sur l'ensemble des critères physico-chimiques analysés, notamment les sulfates.

Au cours d'une année hydrologique, aux faibles débits de la rivière (2 à 5 m³/s) correspondent les minéralisations les plus élevées (≈ 260 μS.cm⁻¹ à 20°C) et aux débits les plus abondants (supérieurs à 10 m³/s) correspondent les minéralisations les plus faibles (≈ 140 μS.cm⁻¹ à 20°C).

Mais c'est plus à l'origine nivale des eaux qu'à l'abondance de celles-ci, que l'on doit cette baisse de la minéralisation. Ainsi, au cours de l'année sèche 1976, aux débits relativement faibles du printemps et de l'été (≈ 7 m³/s) correspondent des minéralisations totales faibles étant donné l'origine nivale ou glaciaire des eaux circulant alors dans la rivière (Figure 39).

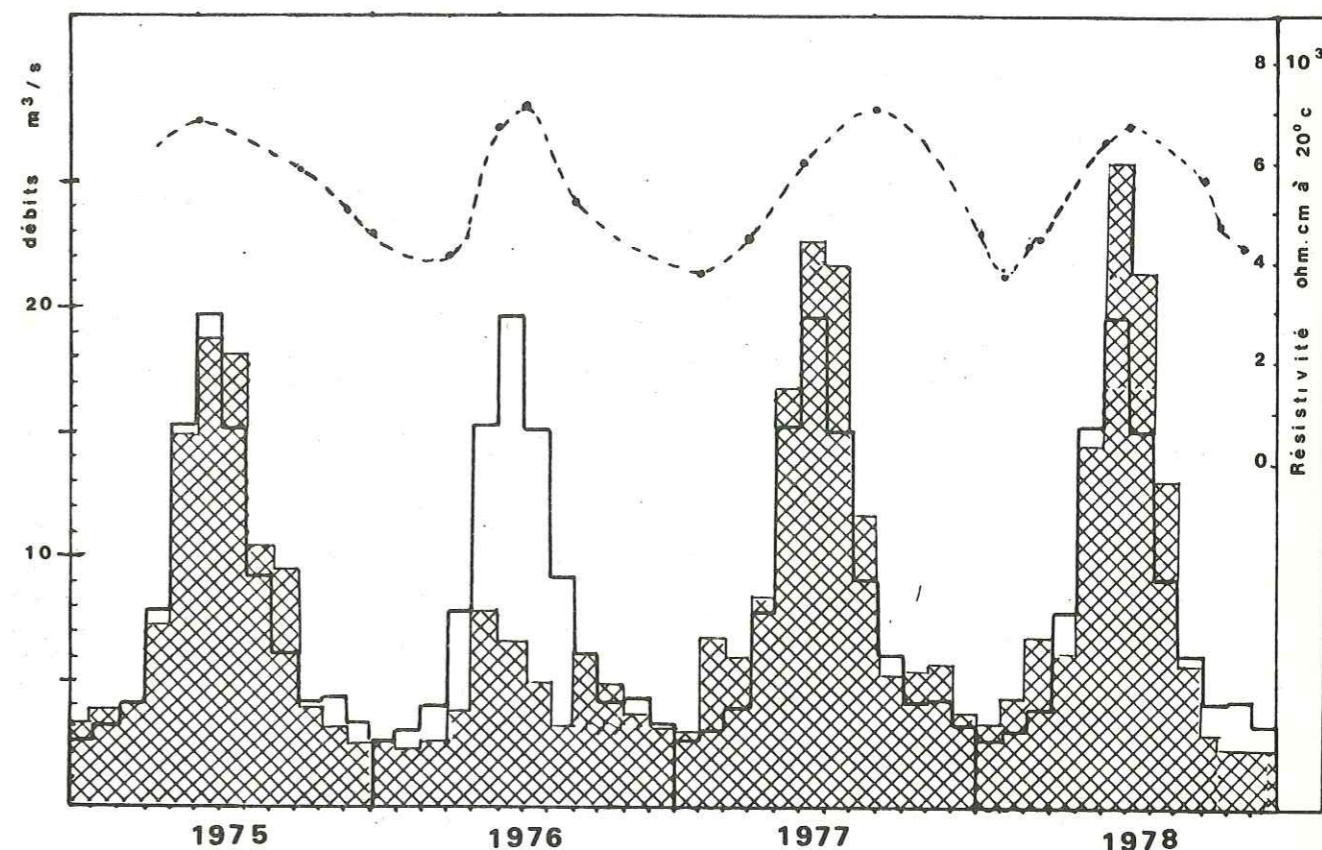


Figure 39 - Variations saisonnières de la minéralisation totale des eaux et des débits de l'Eau d'Olle au pont de la Pernière.-

- débits moyens mensuels (années de référence : 1961-1975)
- ▣ débits moyens mesurés pour l'année en cours, d'après D.T.G.-E.D.F.
- Variation de la résistivité des eaux.-

Les conséquences des aménagements de Grand-Maison et du Verney sur les caractéristiques hydrochimiques des eaux de l'Eau d'Olle et sur leurs variations saisonnières, sont actuellement difficiles à prévoir.

Les eaux restituées en hiver dans la rivière seront celles stockées au cours de l'été (vraisemblablement de faible minéralisation).

En été, alors que le débit minimum de 2 ou 3 m³/s circulera dans l'Eau d'Olle, la minéralisation de la rivière dépendra, plus qu'aujourd'hui, de celle des ruisseaux affluents, à l'aval du barrage du Verney.

I-4 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DE LA ROMANCHE DANS LE BASSIN INTERMEDIAIRE, ENTRE BOURG-D'OISANS ET VIZILLE

I-4-1 - A l'amont de la prise d'eau de Gavet

Les caractéristiques chimiques des eaux de la Romanche prélevées à l'amont immédiat de la prise de Gavet, sont marquées par les apports de ses principaux affluents, le Vénéon et l'Eau d'Olle.

En effet, les apports des eaux peu minéralisées, issus des bassins essentiellement cristallins du Vénéon et de l'Eau d'Olle, représentent en moyenne 56 % du débit de la Romanche mesuré à la station du Champeau. Ils permettent de diluer les eaux de la Romanche enrichies en amont, par celles issues des terrains schisteux et calcaires du massif du Mont de Lans. Comme nous l'avons vu, les eaux du Vénéon et de l'Eau d'Olle présentent, à l'amont de leur confluence, des caractéristiques peu différentes de celles issues du haut bassin de la Romanche; elles sont essentiellement bicarbonatées ou sulfatées, calciques et magnésiennes, mais leur minéralisation totale est, toute l'année, plus faible que celle de la Romanche prélevée à l'amont des confluences, au Clapier.

- Toute l'année, les eaux du Vénéon permettent de diminuer la minéralisation totale de la Romanche, à l'aval de la confluence.
- A Rochetaillée, au Pont Rouge, à l'amont de la confluence de l'Eau d'Olle et de la Romanche, les eaux de la rivière présentent 9 mois par an, une minéralisation totale plus élevée que celle de son affluent, prélevé au pont de la Pernière à Allemont. Les apports des eaux de l'Eau d'Olle permettent alors une nouvelle dilution des eaux de la Romanche en aval de la confluence. Par contre, à partir du mois de juillet et jusqu'en octobre, alors que l'influence nivale est atténuée dans son bassin versant, la minéralisation totale de l'Eau d'Olle est plus accentuée que celle de la Romanche prélevée au Pont Rouge, elle-même grossie par les eaux du Vénéon (tableau 32).

Lieu de Prélèvement	Conductivité en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 20°C		
	La Romanche au Pont Rouge à l'amont de l'Eau d'Olle	l'Eau d'Olle au pont de la Pernière	La Romanche au Pont de la Véné à l'aval de l'Eau d'Olle
Date			
20.I.77	296	248	259
6.III.79	300	259	265
10.VII.79	103	129	122
26.VIII.80	134	160	136

Tableau 32 - Conductivité des eaux de la Romanche, prélevées à l'amont et à l'aval de sa confluence avec l'Eau d'Olle.-

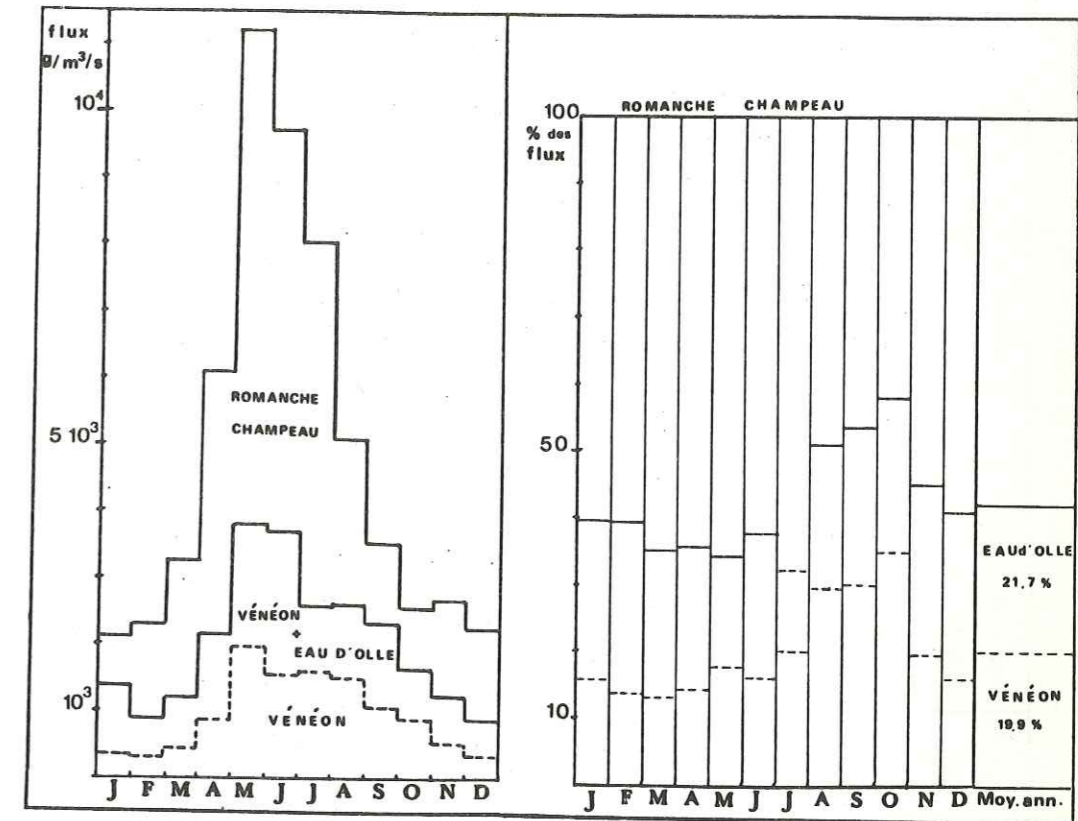


Figure 40 - Participation des flux du Vénéon et de l'Eau d'Olle à la minéralisation totale des eaux de la Romanche prélevées à l'aval des confluences (les flux sont calculés en appliquant la formule classique de DOROSCHEWSKY).-

Les apports de hautes eaux, d'origine nivo-glaciaire, aux très faibles minéralisations (conductivités inférieures à $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 20°C) provenant d'une part, de son haut bassin versant et d'autre part, successivement, de l'Eau d'Olle en avril, mai et juin ou du Vénéon en juin, juillet, août et septembre, permettent de maintenir, en aval des confluences, une minéralisation totale peu accentuée des eaux de la Romanche pendant plus de 6 mois de l'année (Figure 40).

Les affluents de la Romanche issus du bassin intermédiaire situé entre Rochetaillée et Gavet (la Grande Béalière, les ruisseaux du Bâton, de la Vaudaine, de l'Infernet, de l'Ar-selle...) n'ont pas un débit suffisant ou ne sont pas de nature à faire varier la minéralisation des eaux de la rivière d'une façon très sensible. En effet, leur débit total représente seulement 6 % du débit de la Romanche à Gavet (Tableau 19 page 76) et leurs caractéristiques hydrochimiques sont comparables à celles de la Romanche (Tableau 33).

RUISSEAUX AFFLUENTS DE LA ROMANCHE	La Grande Béalière		Le Bâton		Ruisseau de Vaudaine		Ruisseau de l'Arseille la Salinière		Ruisseau de Gavet		Ruisseau de la Morte		Le Bruyant		Cascade de Jouchy		Ruisseau de Laffrey						
	Date	Heure	Date	Heure	Date	Heure	Date	Heure	Date	Heure	Date	Heure	Date	Heure	Date	Heure	Date	Heure					
Température air °C	10,4		14,7		12,7		16,0		12,2		9,2		5,7		7,2		3,9		15,6				
Température eau °C	8,2		7,4		8,05		7,6		7,4		7,9		8,1		8,0		7,8		8,4				
pH à 20°C	8,25		7,4		8,05		6,9		7,5		7,9		7,6		7,95		8,0		8,4				
Résistivité en Ω.cm à 20°C	2 854		18 560		8 400		25 360		14 800		19 900		8 710		3 520		7 650		4 560				
Conductivité en µS.cm ⁻¹ à 20°C	350		54		112		39,4		67,5		50,4		115		284		131		219				
D.H.T. en °f.	18,6		3,1		6,2		1,85		3,4		8,0		6,2		17,6		7,5		11,7				
T.A.C. en °f.	14,3		1,9		4,85		1,0		2,5		5,9		4,65		12,5		4,5		10,0				
Bicarbonates en mg/l de H CO ₃ ⁻	174		23		59,2		12		30,5		21,3		56,7		152,5		120		122				
Chlorures en mg/l de Cl ⁻	2,85		0,75		1,25		2,2		0,6		3,45		1,6		1,15		2,2		8,6				
Nitrates en mg/l de NO ₃ ⁻	1,4		0,75		1,0		0,3		1,4		1,5		3,35		3,0		2,3		1,9				
Sulfates en mg/l de SO ₄ ⁼	38		6		10,5		5		6		17		5,5		49		25,5		19				
Phosphates en mg/l de PO ₄ ⁼																							
Calcium en mg/l de Ca ⁺⁺	46		7,6		15,8		3,8		10		21		20		50,9		14,4		36				
Magnésium en mg/l de Mg ⁺⁺	17,3		2,9		5,5		2,0		2,2		6,8		3,0		11,9		8,4		7				
Sodium en mg/l de Na ⁺																							
Potassium en mg/l de K ⁺																							
Silice en mg/l de Si O ₂	3,5		2,2		4,5		0,0		3,2		2,2				90				8				
M.E.S. en mg/l																							
N° Analyse S.I.E.R.G.	2049		2119		2120		2025		2123		2124		2005		2006		1716		1753		1847		1893

Tableau 33 - Caractéristiques physico-chimiques des eaux des ruisseaux affluents de la Romanche à l'aval de sa confluence avec l'Eau d'Olle.

La conductivité des eaux affluentes peut être très faible, inférieure à 50 µS.cm⁻¹ à 20°C (ruisseaux de Gavet, de l'Arseille, du Bâton...) ou au contraire atteindre 300 µS.cm⁻¹ à 20°C (la Grande Béalière, le Bruyant...). Malgré cette dispersion, surtout sensible en basses eaux, les eaux issues du bassin versant sont comme celles de la Romanche, essentiellement bicarbonatées et sulfatées, calciques et magnésiennes. Elles sont dépourvues de nitrates, de chlorures, de sels acalins... ; elles ne changent donc pas le faciès hydrochimique des eaux de la Romanche.

I-4-2 - A l'aval de la prise de Gavet

Les eaux issues du bassin intermédiaire situé entre Gavet et l'Ile Falcon (ruisseaux de Gavet, du Bruyant, de la Morte en rive gauche, Riou de Séchilienne en rive droite...) viennent grossir la Romanche en amont de Jouchy. On peut supposer qu'en basses eaux, alors que seul le débit réservé s'écoule en aval de Gavet, la composition hydrochimique de la Romanche est fortement influencée par ces derniers apports. En fait, leurs caractéristiques et leur régime hydrologique étant comparables à ceux de la Romanche, ils changent peu le faciès hydrochimique et la minéralisation totale de la rivière en aval. Ainsi, les conductivités des eaux prélevées à l'aval du barrage de Gavet sont peu différentes de celles des eaux prélevées sous le pont de l'Ile Falcon (Tableau 34).

Dates	Conductivité en µS.cm ⁻¹ à 20°C			
	Romanche à Gavet	Romanche à l'Ile Falcon	Ruisseau du Lac Mort	Romanche face à Jouchy
Basses eaux				
8.XII.78	234	228	211	218
6.II.79	240	233	210	214
28.XII.79	234	228	199	220
31.I.80	259	253	207	232
14.X.80	157	164	175	172
22.XII.80	206	214	187	206
12.I.81	254	251	192	217
24.II.81 etc.	275	277	200	227
Moyennes et hautes eaux				
27.VIII.76	123	124	205	155
11.VII.79	126	113	182	119
10.IX.79	131	122	190	160
26.VIII.80 etc.	131	132	170	145

Tableau 34 - Conductivité des eaux de la Romanche (prélevées de Gavet, à l'Ile Falcon et à Jouchy) et des eaux du ruisseau du Lac Mort (à l'Ile Falcon).

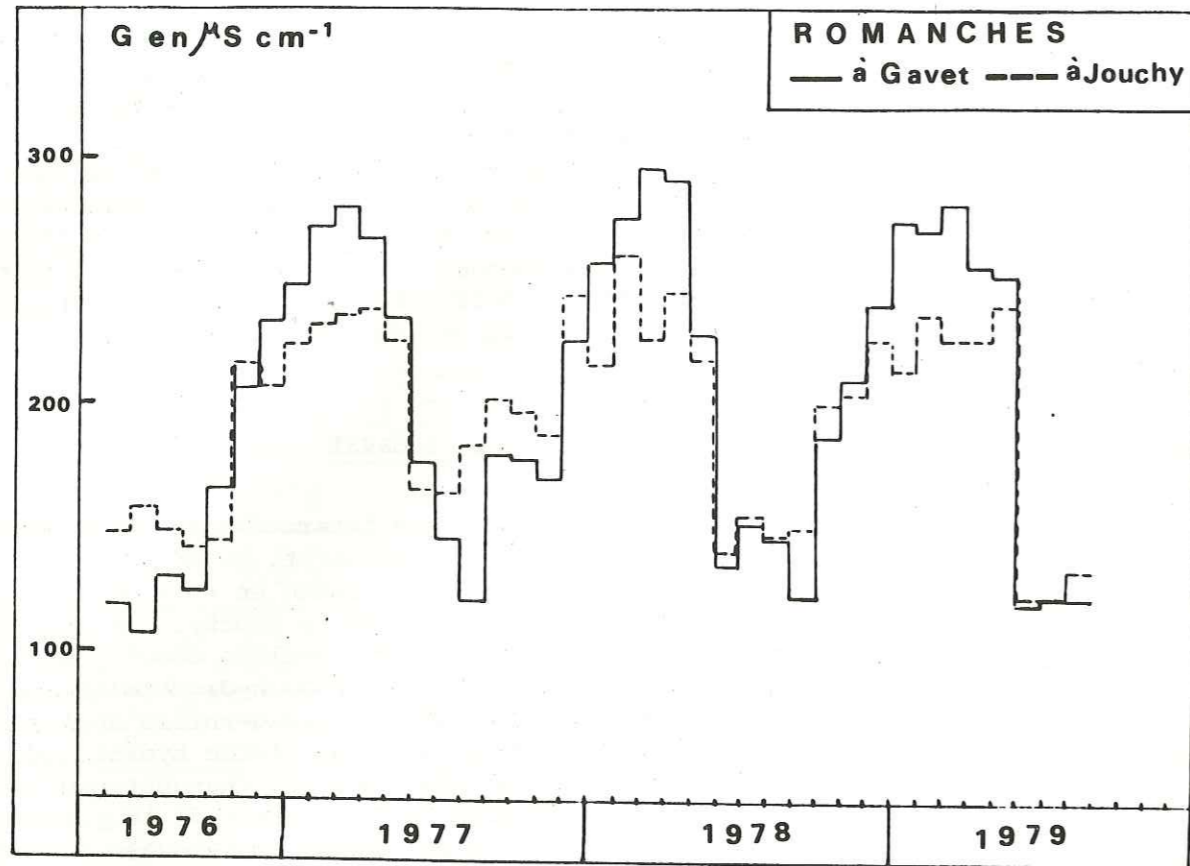


Figure 41 - Variations saisonnières des conductivités des eaux de la Romanche prélevées à Gavet et face à Jouchy.-

Par contre, plus en aval, en moyennes et basses eaux, alors que le débit de restitution du ruisseau du Lac Mort est légèrement supérieur ou égal au débit réservé de la Romanche, la minéralisation des eaux du ruisseau influe nettement sur celle de la rivière transitant face à Jouchy (Figure 41).

La minéralisation totale des eaux du ruisseau restitué est assez stable, tout au long de l'année. C'est une eau essentiellement bicarbonatée, calcique et magnésienne, dont le taux des sulfates varie de 10 à 25 mg/l. En basses eaux, alors que le taux des sulfates des eaux de la Romanche peut atteindre 55 mg/l, les eaux du Lac Mort viennent diluer favorablement celles de la Romanche.

On peut ainsi évaluer les apports du ruisseau turbiné à la Romanche ; on calcule à partir du taux des sulfates des eaux, la répartition des apports de la Romanche et des apports du ruisseau dans le mélange qu'ils constituent, face à Jouchy (Tableau 35 - Figure 42).

Si x est le pourcentage des eaux de la Romanche (prélevées à l'Ile Falcon) et y le pourcentage des eaux turbinées du Lac Mort :

$$x + y = 100 \text{ et}$$

$$|SO_4^{=}| \text{ Rom. Ile Falcon} \times x + |SO_4^{=}| \text{ Lac Mort} \times y \\ = 100 |SO_4^{=}| \text{ Rom. Jouchy}$$

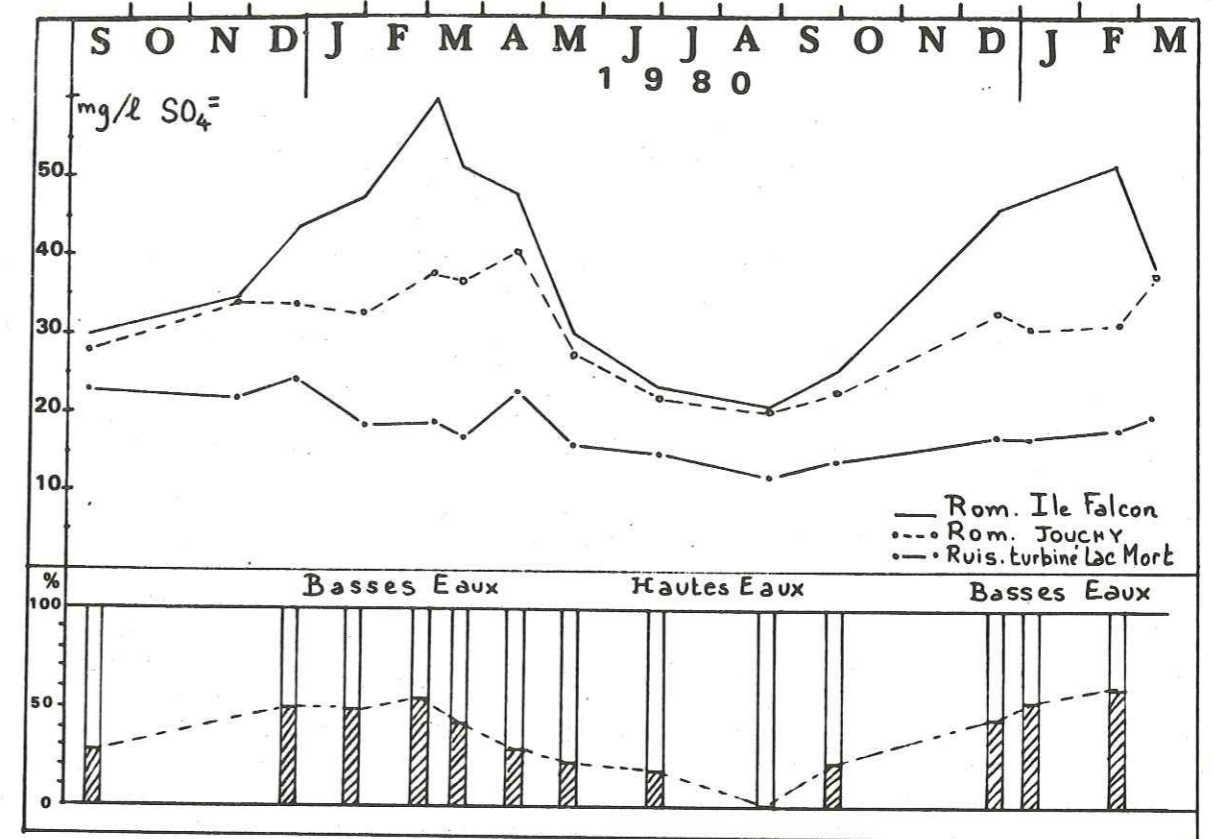


Figure 42 - Variations saisonnières du taux des sulfates des eaux de la Romanche à l'Ile Falcon, à Jouchy et du ruisseau du Lac Mort.-

▨ Pourcentage des apports du ruisseau à la Romanche.

Dates des prélèvements	Concentration en $SO_4^{=}$ en mg/l			Pourcentages			
	Romanche Ile Falcon	Lac Mort	Romanche Jouchy	Romanche Ile Falcon	Lac Mort	Romanche Jouchy	
10/09/79	30	23	28	72	28	100	Moyennes eaux
26/11/79	34	22	34,5	≅ 100	≅ 0	100	Moyennes eaux
28/12/79	44	24,5	34	49	51	100	Basses eaux
31/01/80	47,5	18,5	33	51	49	100	Basses eaux
5/03/80	60	19	38	46	54	100	Basses eaux
19/03/80	51,5	17	37	58	42	100	Basses eaux
28/04/80	48	23	41	72	28	100	Moyennes eaux
16/05/80	30,5	16	27,5	79	21	100	Moyennes eaux
1/07/80	23,5	15	22	82	18	100	Moyennes eaux
26/08/80	21	12	21	≅ 100	≅ 0	100	Hautes eaux
30/09/80	25,5	14	23	78	22	100	Moyennes eaux
22/12/80	46	17	33	55	45	100	Basses eaux
12/01/81	47,5	16,5	31	47	53	100	Basses eaux
24/02/81	51,5	18	31,5	40	60	100	Basses eaux
12/03/81	37,5	20	38	≅ 100	≅ 0	100	Hautes eaux

Tableau 35 - Calcul, à partir du taux des sulfates des eaux, de la répartition des apports de la Romanche et des apports du ruisseau du Lac Mort dans le mélange qu'ils constituent, face à Jouchy.-

En hautes eaux, l'influence des eaux du ruisseau est naturellement moins évidente quand les débits de la restitution sont faibles par rapport à ceux de la Romanche amont.

Il est possible de faire le type d'évaluation précédent avec des éléments ioniques tels que les sulfates, quand ils n'entraînent pas de réactions chimiques par mélange et qu'ils varient toujours dans le même sens :

$|\text{SO}_4^-|$ Rom. I. Falcon est toujours plus grand que $|\text{SO}_4^-|$ ruisseau

Ce n'est pas le cas de tous les éléments hydrochimiques, ce qui explique que les eaux du ruisseau influent en toutes saisons, sur la minéralisation totale des eaux de la Romanche en aval, même en hautes eaux, comme le montre le tableau 34.

La dilution des eaux de la Romanche par celles du ruisseau turbiné du Lac Mort, est, en basses eaux, favorable au maintien de la minéralisation totale moyenne des eaux de la rivière, au droit des zones d'infiltration préférentielles de la nappe de Jouchy ; en cette saison, la minéralisation de la Romanche s'accroît à l'amont. Nous verrons dans le chapitre suivant, qu'elle intervient favorablement dans les variations hydrochimiques des eaux souterraines.

x
x x x
x x x

En résumé, il est intéressant de noter que, du fait des dérivations et des restitutions successives et du fait des apports des affluents peu minéralisés, la minéralisation moyenne des eaux de la Romanche se maintient de Rochetaillée à Vizille. Cette minéralisation est moins élevée, en toutes saisons, que celle des eaux de la rivière prélevées au Clapier à Bourg-d'Oisans, à l'amont de ses confluences avec ses principaux affluents, le Vénéon et l'Eau d'Olle (Tableau 36 - Figure 43).

Dates	Conductivités en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 20°C de la Romanche			
	à Bourg-d'Oisans: au Clapier	à Gavet	Face à Jouchy	à Vizille
1.IV.1975	347	282	233	239
16.VI.1975	206	145	122	126
6.IV.1977	290	263	238	264
26.VIII.1980	215	131	145	130

Tableau 36 - Conductivités des eaux de la Romanche, de Bourg-d'Oisans à Vizille.-

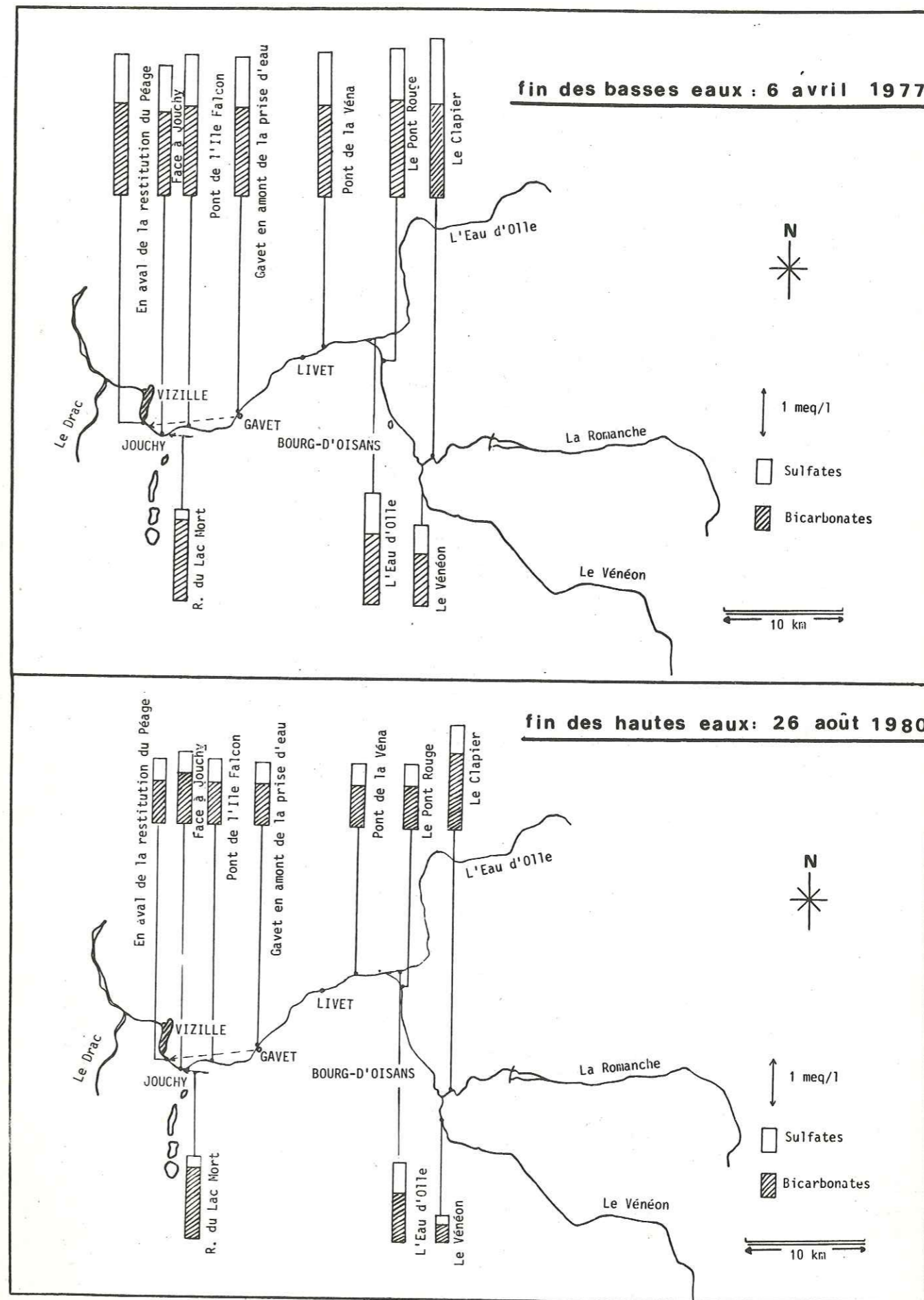


Figure 43 - Variations des taux des sulfates et des bicarbonates des eaux de la Romanche, de Bourg-d'Oisans à Vizille en basses et hautes eaux.-

I-5 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DE LA ROMANCHE A L'AMONT IMMEDIAT DE LA NAPPE DE JOUCHY

I-5-1 - Caractéristiques physico-chimiques et variations saisonnières

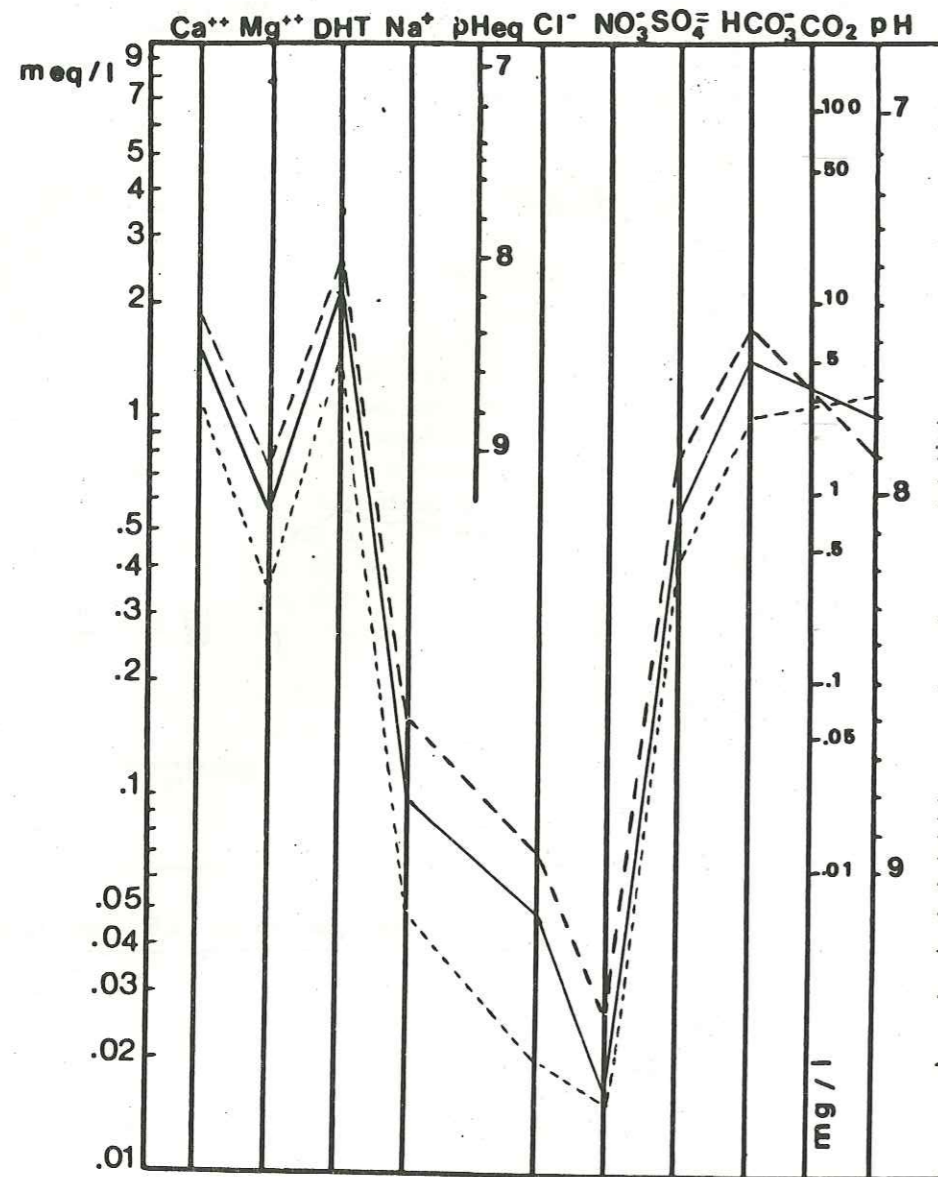


Figure 44 - Diagramme semi-logarithmique représentatif de la minéralisation des eaux de la Romanche prélevées à l'amont immédiat de Jouchy.-

- moyenne annuelle
- - - basses eaux (mois de février)
- . - . hautes eaux (mois d'août).-

J'ai effectué d'avril 1975 à décembre 1980, 160 prélèvements en rive gauche, en bordure des rives, à l'amont immédiat de la plaine de Jouchy, c'est-à-dire au droit des zones d'infiltration préférentielles de la nappe.

Les résultats des analyses m'ont permis de vérifier que les caractéristiques physico-chimiques des eaux de la Romanche sont constantes ; ce sont des eaux, essentiellement bicarbonatées, calciques et magnésiennes, légèrement sulfatées (Figure 44). Leur taux de chlorures, nitrates, phosphates, de cations alcalins (Na⁺, K⁺) sont faibles. Leur minéralisation totale est faible ou peu accentuée, leurs conductivités varient de 110 à 250 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ à 20°C. Elles subissent des variations saisonnières importantes.

Pour étudier les variations saisonnières, j'ai fait les moyennes mensuelles des résultats d'analyses pour chaque critère examiné (Tableau 37 - Figure 45).

Les variations concernent toutes les caractéristiques hydrochimiques. Tout se passe comme si les eaux de la Romanche circulant dans la rivière, subissaient une dilution par les eaux de fonte des neiges au printemps et en été, puis une concentration progressive jusqu'au printemps suivant.

Mais nous pouvons faire plusieurs remarques :

- . C'est à la fin des hautes eaux (en août) que l'on enregistre les concentrations les plus faibles et non pas au moment où les débits sont les plus abondants (juin, juillet) ; à cette époque, les eaux de faible minéralisation du Vénéon, au régime nivo-glaciaire, ont une influence prépondérante (Figure 40 - page 131).
- . Au cours de l'année 1976, année de sécheresse d'été, malgré les très faibles débits maintenus dans la rivière (960 l/s, le 25 août d'après B. GAILLARD - 1976) les minéralisations des eaux de la Romanche sont restées très faibles et leurs conductivités s'écartaient peu des moyennes mensuelles des mois considérés (les conductivités exprimées en $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ à 20°C sont de 139 le 11 juin, 173 le 6 juillet et de 155 le 18 août 1976).
- . Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, en basses eaux, les eaux du ruisseau du Lac Mort, à la faible minéralisation, viennent diluer les eaux de la Romanche à la minéralisation moyenne, dont le débit réservé, grossi des apports du bassin versant intermédiaire, est faible en cette saison (1).

(1) Le mélange des eaux en provenance de la Romanche et des eaux turbinées du Lac Mort, se fait correctement à l'amont immédiat de Jouchy. En effet, tous les prélèvements effectués simultanément sur le bord des rives gauche ou droite, à l'amont de la plaine ou face au puits, ne montrent pas de différence dans les minéralisations que les analyses puissent déceler.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
pH 169 analyses Moyenne : 7,8	7,82	7,9	7,94	7,93	7,82	7,8	7,81	7,75	7,88	7,8	7,56	7,49
Température en °C 150 relevés à 9 h Moyenne : 7,43	2,8	4,2	6,0	7,5	9,1	9,3	10,0	11,4	12,0	8,6	4,45	3,8
Conductivité en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 20°C 165 analyses Moyenne : 193	228	240	238	228	186	152	136	138	164	184	210	217
D.H.T. en °F 160 analyses Moyenne : 10,65	13,2	13,15	13,0	12,8	9,25	8,4	7,3	7,5	8,8	10,0	11,9	12,5
T.A.C. en °F 160 analyses Moyenne : 7,48	9,12	9,0	9,08	8,9	7,62	6,2	5,26	5,20	6,29	6,8	7,7	8,64
Bicarbonates en mg/l HCO_3^- 160 analyses Moyenne : 91	111	110	111	109	93	76	64	63	77	83	94	105
Sulfates en mg/l de $\text{SO}_4^{=}$ 156 analyses Moyenne : 29	34,2	39,3	36,2	33,9	25,9	20,7	20,5	21,2	25,9	29,6	30,3	30,8
Chlorures en mg/l de Cl^- 111 analyses Moyenne : 1,63	2,0	2,6	3,0	2,3	1,7	1,3	0,7	0,7	1,2	1,2	1,6	1,25
Nitrates en mg/l de NO_3^- 133 analyses Moyenne : 1,07	1,33	1,63	1,72	1,48	1,20	0,91	0,88	1,0	0,92	0,91	1,1	0,97

Tableau 37 - Moyenne mensuelle des principales caractéristiques physico-chimiques des eaux de la Romanche, prélevées à l'amont immédiat de la plaine de Jouchy.-

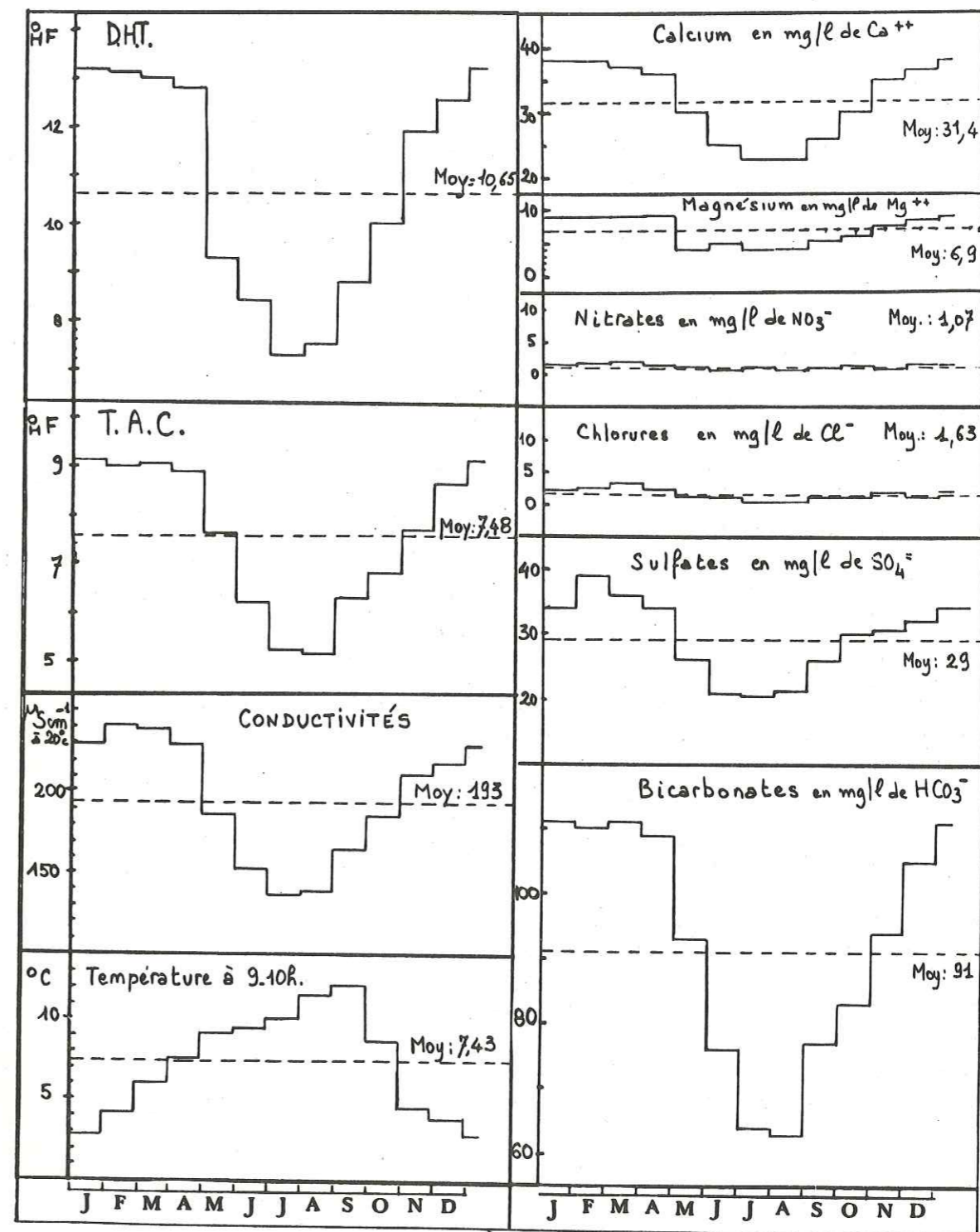


Figure 45 - Variations saisonnières des caractéristiques hydro-chimiques de la Romanche, prélevée à l'amont immédiat de Jouchy - (moyennes établies à partir de 160 analyses).-

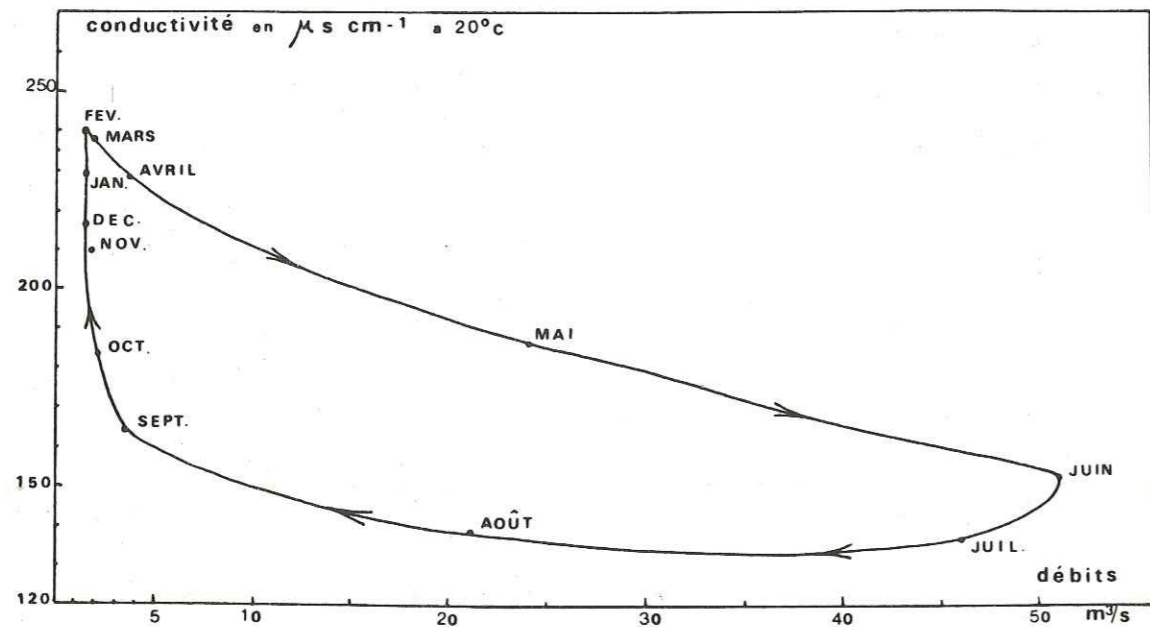


Figure 46 - Relation entre les débits et la conductivité des eaux de la Romanche prélevées face à Jouchy au cours d'une année hydrologique.-

C'est donc à l'origine même des eaux circulant dans la rivière à une époque donnée et à leur abondance relative, plus qu'à leurs débits absolus, que l'on doit la régularité des variations hydrochimiques saisonnières des eaux de la rivière et le maintien des caractéristiques de ces eaux.

Il n'existe pas de relation linéaire entre les concentrations des eaux de la rivière et leur débit (Figure 46).

I-5-2 - Débit solide de la rivière - Matières en suspension

Comme les autres grandes vallées alpines de la région grenobloise (Isère, Arc, Drac...), la vallée de la Romanche est caractérisée par l'importance des formations quaternaires (J.C. FOURNEAUX - 1976). Comme nous l'avons vu au chapitre I-2-2 - 1ère partie, l'épaisseur du remplissage alluvial peut atteindre 100 m. Les transports solides ont été à l'origine de la formation des dépôts alluvionnaires dans lesquels circulent les nappes souterraines ; actuellement, le phénomène inverse se produit, et les limons superficiels, particulièrement friables, fournissent la plus grande partie du débit solide de la rivière, au régime torrentiel et au fort pouvoir érosif.

Le débit solide d'une rivière est constitué des matières transportées en suspension et des matières transportées par charriage du fond (traction, roulement ou saltation) (G. BESANVAL - 1970, D. ROBBE - 1975).

Les deux types de transport se distinguent essentiellement par la granulométrie des matériaux transportés ; la suspension intéresse les parties les plus fines du débit solide, le charriage intéresse les parties les plus grossières. Leur importance réciproque dépend des mêmes paramètres ; les limites de différenciation entre ces deux modes de transport sont mal définies. De même, la limite entre les matières en solution et les matières en suspension est différemment appréciée par les auteurs. Notons que la méthode par filtration préconisée par la législation française pour la mesure des M.E.S.T., stipule l'emploi de préfiltres de fibres de verre dont le diamètre des pores est de l'ordre de 5 à 8 µ (I.R.C.H.A. 1968, norme française homologuée : N.T. 90-105, 1978).

I-5-2-1 - ORIGINE, DIMENSION et NATURE des MATIERES en SUSPENSION

Le débit solide des rivières peut être d'origine naturelle ou artificielle.

Sont d'origine naturelle :

- Les produits d'érosion des sols du bassin versant ; il s'agit des matériaux emportés par les eaux de ruissellement à la suite d'orages, de la fonte des neiges, etc. L'importance du débit solide, ainsi transporté, dépend de la superficie du bassin versant, de la nature des sols plus ou moins pulvérulents, des conditions climatiques (le sol devient plus pulvérulent à la suite des périodes de sécheresse), de la végétation (le déboisement favorise l'érosion des sols).

Ce débit solide concerne essentiellement les matières en suspension. Dans le cas des avalanches, des éboulements, des glissements de terrain, des matériaux de plus gros calibre atteignent aussi la rivière et sont transportés par charriage, si les conditions de turbulence s'y prêtent.

- Les produits d'érosion des berges et du lit de la rivière ; il s'agit des sédiments et des matériaux déposés antérieurement ou en amont, qui sont remis en suspension ou transportés à l'aval.

Sont d'origine artificielle :

- Les apports des rejets d'eaux usées industrielles, agricoles ou ménagères, les poussières des rejets gazeux, retombées puis entraînées par les eaux de ruissellement, etc. Malgré l'importance du tonnage global de ces apports artificiels, ROBINSON (in D. ROBBE - 1975) a estimé que cette partie du débit solide ne représentait, en 1971, que 0,15 à 0,20 % du débit solide total des rivières.

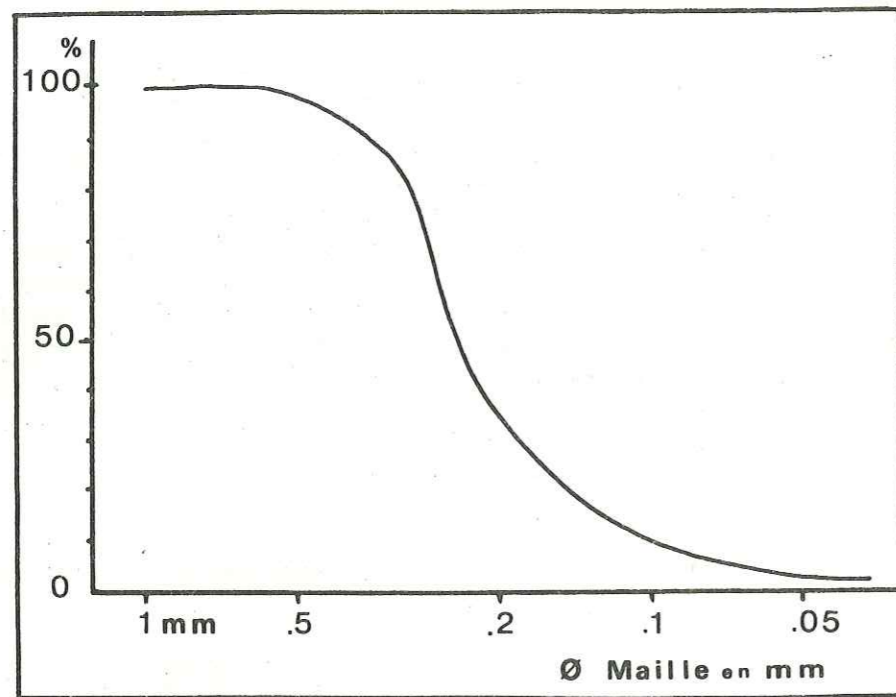


Figure 47 - Courbe granulométrique des sables alluvionnaires déposés par la Romanche face à Jouchy.-

Vide de la maille du tamis (en mm)	Masse des fractions (en g)	Pourcentage	
		de chaque fraction	cumulé
			100
1	0,1	0,02	99,98
0,8	0,1	0,02	99,96
0,63	2,8	0,64	99,32
0,5	7,8	1,78	97,54
0,4	25,8	5,88	91,66
0,315	37,8	8,62	83,04
0,250	129,2	29,46	53,58
0,200	82,8	18,9	34,68
0,160	49	11,17	23,51
0,125	37,4	8,53	14,99
0,100	18,2	4,15	10,84
0,08	15,4	3,51	7,33
0,063	10,4	2,37	4,96
0,05	5,8	1,32	3,65
0,04	9,2	2,1	1,55
< 0,04	6,8	1,55	
TOTAL	438,6	100 %	

Tableau 38 - Analyse granulométrique des sables alluvionnaires recueillis sur les rives de la Romanche, à Jouchy.-

Malheureusement, ces matières en suspension de natures diverses (métaux lourds, produits organiques peu solubles, etc.) sont parfois toxiques pour la faune et la flore benthique.

Une analyse granulométrique (1) des sables alluvionnaires déposés en bordure de la rive gauche de la Romanche au droit de la plaine de Jouchy et prélevés en janvier 1977, révèle que leurs diamètres sont faibles, puisqu'inférieurs à 1 mm. Les fractions les plus fines, dont le diamètre est inférieur à 8 microns (2) représentent moins de 10 % du poids total des sables analysés.

Le taux des M.E.S.T. mesuré par la méthode A.F.N.O.R. par filtration, permet donc de peser plus de 90 % des sables susceptibles de se déposer dans le lit de la rivière.

La "taille effective" (d₁₀) de sables est de 0,1 mm ; le "coefficient d'uniformité" ou "coefficient de HAZEN" (d₁₀/d₆₀) est égal à 2,6 ; ce coefficient étant supérieur à 2, on peut considérer que la granulométrie est "variée" ou "étalée" (Figure 47, Tableau 38).

L'analyse semi-quantitative par diffraction aux rayons X (1) a été effectuée sur 3 fractions des sables alluvionnaires, au diamètre inférieur à 0,2 mm de diamètre. Les résultats de cette analyse montrent que l'on y retrouve les minéraux caractéristiques présents dans le bassin versant de la Romanche (Tableau 39).

Minéral %	< 0,04 mm	0,050 < d < 0,060mm	0,100 < d < 0,125mm	0,160 < d < 0,200mm
quartz	32	29	36	50
calcite	28	19	11	10
albite	8	12	15	13
felspath K	10	12	17	7
amphibole	5	4	3	1
pyroxène	2	4	1	3
chlorite	6	7	7	7
mica blanc	8	13	10	9

Tableau 39 - Analyse semi-quantitative, par diffraction aux R. X, des sables alluvionnaires recueillis sur les rives de la Romanche à Jouchy.-

(1) L'analyse granulométrique et l'analyse semi-quantitative aux R. X. ont été effectuées au laboratoire de sédimentologie de l'Institut Dolomieu. La diffraction aux R. X. a été faite sur diffractomètre, PHILIPS, à anticathode de cuivre et monochromateur au fluorure de lithium.

(2) 8 microns = limite supérieure du diamètre des pores des filtres de fibres de verre, utilisés pour la mesure des M.E.S.T.

Ainsi, les minéraux les plus représentés sont les quartz, que l'on rencontre dans tous les massifs du bassin versant, et la calcite, présente notamment dans le synclinal de Bourg-d'Oisans.

L'albite, provient essentiellement des micaschistes de la série satinée, entre Séchilienne et Vizille, le feldspath K, du massif du Pelvoux (le Rochail) et des Grandes Rousses, le pyroxène et l'amphibole, des massifs de Belledonne (Rochetaillée...) et du Taillefer (Séchilienne), la chlorite, des massifs internes des Grandes Rousses et de la série satinée, les micas blancs de la série satinée.

On peut remarquer :

- Que la calcite ayant subi un long transport, est proportionnellement plus abondante dans les fines (28 % pour $d < 0,04$ mm) que dans les sables au diamètre plus grand (10 % pour $0,16 \text{ mm} < d < 0,2$ mm); au contraire, l'albite provenant de la série satinée plus proche, est proportionnellement plus abondante dans les sables au diamètre supérieur à 0,1 mm, que dans les fines. Le quartz, le plus résistant, est d'autant plus abondant que le diamètre des sables qui le contiennent est élevé (32 % dans les fines pour 50 % pour les sables dont le diamètre est compris entre 0,16 et 0,20 mm).
- Que les sables ne contiennent pas de dolomites, de gypses ou de pyrites à des pourcentages supérieurs à 1 %.



Le taux des matières en suspension organiques (M.E.S.O.) est difficilement mesurable en basses eaux quand le taux de M.E.S.T. est inférieur à 50 mg/l.

En hautes eaux, les M.E.S.O. représentent environ 1 % des M.E.S.T. (Tableau 40). Les matières en suspension de la Romanche sont donc essentiellement d'origine minérale. Elles peuvent être le support de micro-polluants (détergents, métaux...) qui décantent avec elles et sont remis en suspension lors d'un nouveau transport.

Date du Prélèvement	M.E.S.T. mg/l	M.E.S.O.	
		mg/l	% des M.E.S.T.
11 juin 1976	498	7	1,4
23 mai 1977	1 480	15	1
22 juin 1977	626	8,5	1,3
30 mai 1978	1 010	9	0,9
26 mai 1981	1 265	12	1

Tableau 40 - Pourcentage des matières en suspension organiques, dans les matières en suspension totales, des eaux de la Romanche prélevées face à Jouchy.

I-5-2-2 - Le TAUX des MATIERES en SUSPENSION TOTALES (M.E.S.T.)

Les eaux de la Romanche transitant face à Jouchy, ont été mesurées une ou plusieurs fois par mois depuis 1968, par les soins du laboratoire régional de la Tronche, et par mes soins, depuis avril 1975.

Le taux des M.E.S.T. n'est pas nécessairement représentatif de tout le charriage. Il ne tient compte que des matières transportées en suspension, c'est-à-dire, les plus fines, quelque soit leur origine.

Les valeurs absolues du taux des M.E.S.T. n'ont pas d'intérêt en soi, étant donné que les analyses sont faites sur des prélèvements ponctuels dans la rivière ; mais la comparaison de leur valeur moyenne peut fournir des renseignements intéressants.

Au regard des 241 résultats obtenus depuis 1968 (Tableau 41), en faisant les moyennes mensuelles du taux des M.E.S.T., il apparaît que les taux les plus élevés correspondent aux mois de hautes eaux, c'est-à-dire, aux mois de mai, juin, et juillet.

Aussi, il est remarquable de 1968 à 1980, qu'aucune analyse effectuée au mois de juin, ne révèle des taux inférieurs à 10 mg/l et que, par contre, aucune analyse effectuée au cours des mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février et avril, ne révèle des taux supérieurs à 25 mg/l ; au cours de ces mois de basses eaux, le taux moyen des M.E.S.T. s'élève à : 5,3 mg/l.

On peut observer une forte dispersion des taux obtenus autour de la moyenne arithmétique. Ceci est dû au fait que les débits de la rivière changent brutalement au cours des mois pluvieux (mars, septembre...) ou au cours des mois de fonte des neiges (mai, juin, juillet...).

Les taux des M.E.S.T. peuvent ainsi décupler ou même centupler au cours du même mois.

La densité des M.E.S.T. peut être évaluée en mesurant le volume des matières décantées en 24 heures et séchées à 110°C (Tableau 42). Cette mesure ne peut être faite qu'en hautes eaux, quand le volume des matières décantables contenues dans 2 à 5 litres d'eau dépasse 1 ml.

Cette mesure n'est pas précise, mais les densités ainsi mesurées sont comparables à celles des sables alluvionnaires recueillis sur les rives de la Romanche face à Jouchy, en hautes ou basses eaux (Tableau 43). Par ces mesures, on se rend compte que les volumes quotidiens de matières en suspension transportées dans un tronçon de rivière sont considérables.

Ainsi, lors d'une crue, le 16 juin 1975, le débit mesuré au Champeau était de 107 m³/s. Ce débit correspond à un débit d'environ 70 m³/s ou 6 048.10³ m³/jour face à Jouchy.

	J	F	M	A	M	J	J	J	A	S	O	N	D
Nombre d'analyses effectuées de janvier 1968 à décembre 1979	18	17	17	22	33	28	19	21	18	17	17	17	14
Moyenne mensuelle du taux des M.E.S.T. en mg/l	4,3	7,1	25	12,5	138	138	61	30	20	5,6	4,7	4,8	
Nombre d'analyses dont le taux des M.E.S.T. est < à 10 mg/l	15	13	11	16	6	0	2	10	11	13	16	10	
% ..	83	76	65	73	18	0	10,5	48	61	76	94	71	
Nombre d'analyses dont le taux des M.E.S.T. est < à 25 mg/l	18	15	13	20	14	7	5	15	16	17	17	14	
% ..	100	88	76	91	42	25	26	71	89	100	100	100	
Nombre d'analyses dont le taux des M.E.S.T. est < à 100 mg/l	18	17	15	22	25	19	16	19	19	17	17	14	
% ..	100	100	88	100	76	68	84	90	89	100	100	100	

Tableau 41 - Taux des matières en suspension totales des eaux de La Romanche prélevées face à Jouchy.

Dates	M.E.S.T. mg/l	Matières décantées en 24 H (ml/l)	Densité
11 juin 1976	498	0,4	1,245
23 mai 1977	1 480	1,2	1,23
22 juin 1977	626	0,4	1,56
30 mai 1978	1 010	0,75	1,35

Tableau 42 - Densité des M.E.S.T. des eaux prélevées face à Jouchy.

Sables alluvionnaires recueillis en rive gauche			
	Volume en ml	Poids en g	soit en g/l
en basses eaux le 20 janvier 1977	25	32,26	1 290
	25	34,09	1 360
	50	64,81	1 300
	50	68,35	1 370
	60	78,92	1 315
	60	74,36	1 240
	60	79,15	1 320
	60	81,47	1 360
	60	83,82	1 400
MOYENNE : 1 328 g/l ± 46 (densité 1,33)			
en hautes eaux le 20 juin 1978	25	32,93	1 320
	25	33,91	1 360
	50	67,21	1 340
	50	65,27	1 305
	60	84,54	1 410
	60	85,30	1 420
	60	79,00	1 320
	60	80,93	1 350
	60	85,20	1 420
MOYENNE : 1 360 g/l ± 43 (densité 1,36)			

Tableau 43 - Rapport poids/volume des sables alluvionnaires recueillis face à Jouchy.

Le taux des M.E.S.T. s'élevait ce jour là à 300 mg/l, soit : 1 800 tonnes ou 1 350 m³ par jour. Cette quantité peut atteindre 3 000 m³ par jour (pour un débit de 100 m³/s et 500 mg/l de M.E.S.T.) ou être réduite à quelques dizaines de litres par jour (pour un débit de 1 m³/s et un taux de M.E.S.T. inférieur à 1 mg/l).

Bien que l'on puisse constater qu'aux périodes des forts débits correspondent des taux de M.E.S.T. élevés, il n'existe pas de relation simple entre le débit de la Romanche et le taux des M.E.S.T. transportés (Figure 48). En effet, ce dernier est fonction des nombreux paramètres influant sur le degré de turbulence des eaux et les variations de la vitesse de l'écoulement liquide. (2)

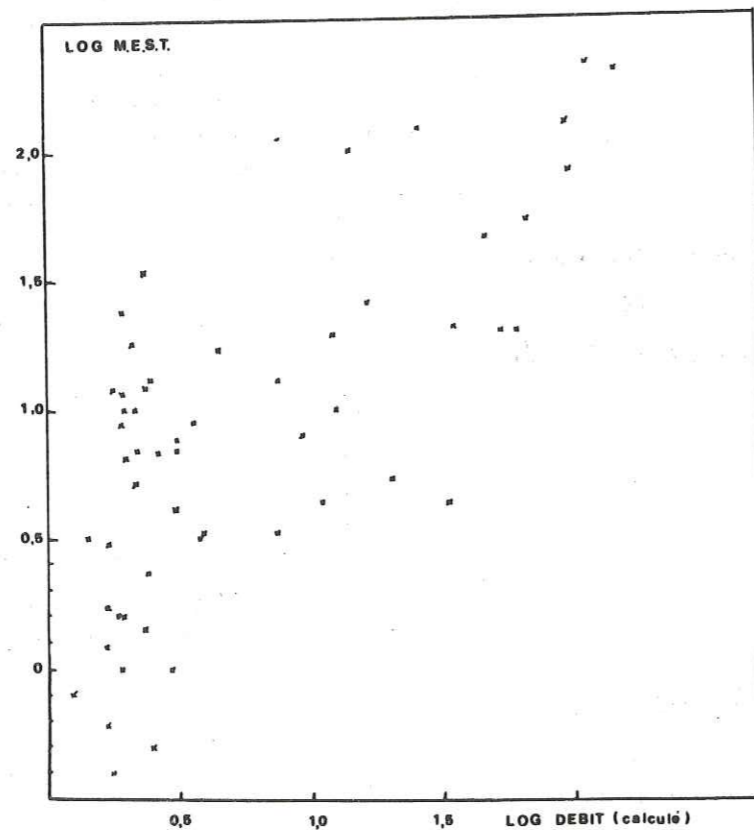


Figure 48 - Taux des M.E.S.T. des eaux de la Romanche et débits (calculés) de la rivière face à Jouchy.-

L'arrachement, le transport ou le dépôt des matériaux solides, leur volume et leur calibre sont influencés à la fois par des facteurs naturels (superficie du bassin versant, nature géologique des terrains traversés, conditions de pente et largeur du lit) et par des facteurs artificiels (dérivations, travaux d'endiguement, extractions de matériaux...).

En ce qui concerne la Romanche face à Jouchy, la diminution de la pente de la rivière et les replats du profil en long, sont des facteurs favorables au dépôt des matières transportées. Nous avons vu que le lit de la rivière est le siège d'une succession de phénomènes de colmatage et de décolmatage. Les observations faites, permettent de dire que ces phénomènes interviennent à un rythme saisonnier. Paradoxalement, c'est lors des premières crues de printemps ou des crues automnales, alors que le taux des M.E.S.T. est le plus élevé, que le décolmatage du lit de la rivière peut se produire et qu'il favorise les infiltrations dans la nappe souterraine.

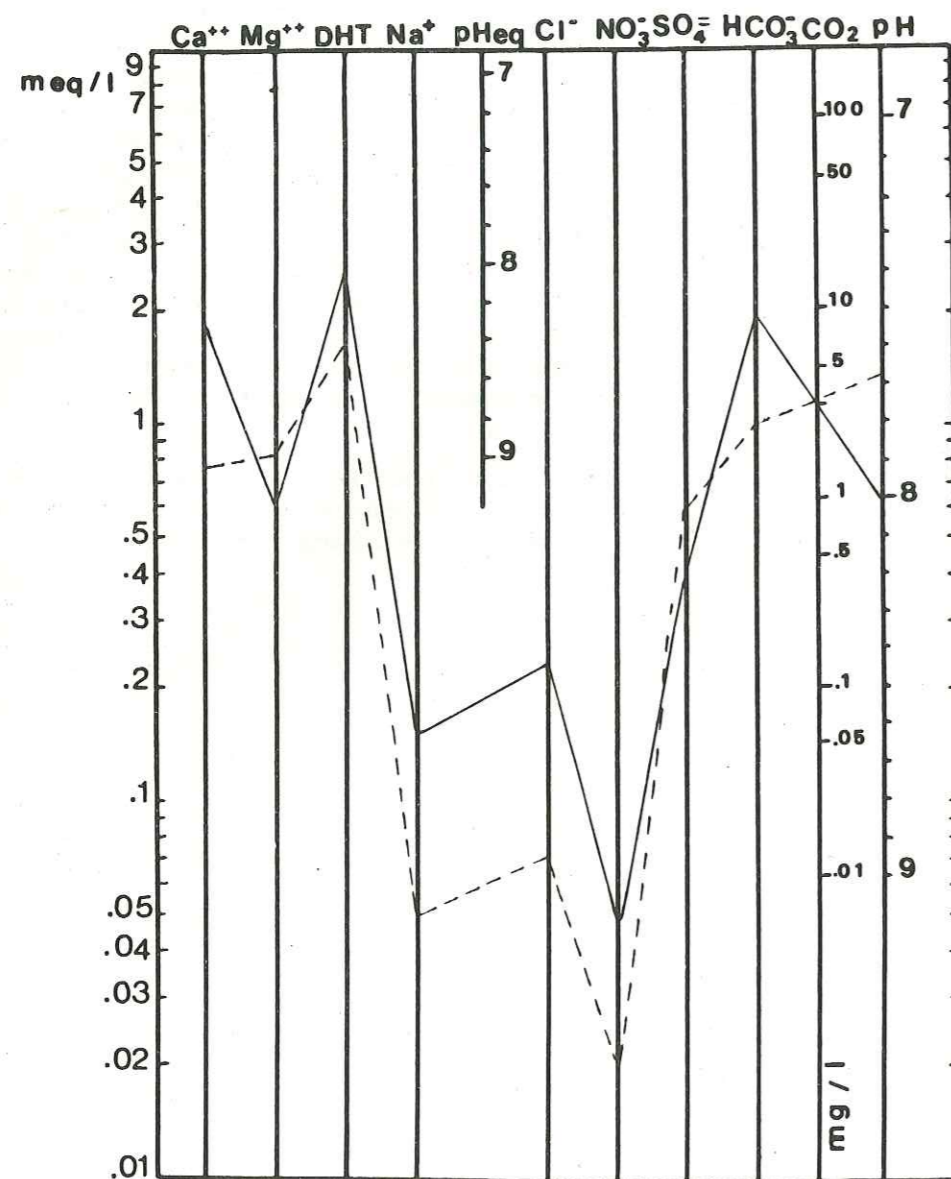
Nous examinerons, dans les chapitres suivants, les conséquences de ces phénomènes sur les caractéristiques et la qualité des eaux infiltrées.

(2) La relation générale, du type :

$$|M.E.S.| = a Q^b$$

(où M.E.S. est exprimée en mg/l et Q en m³/s) donnée par G. MULLER et V. FOSTNER (1968), que nous avons utilisée avec succès pour la rivière Isère à Grenoble, en 1972 (J. APRAHAMIAN et Coll.), n'est pas applicable aux rivières très aménagées comme la Romanche, à Jouchy.-

I-6 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DES APPORTS DU VERSANT OUEST DE LA PLAINE DE JOUCHY



Ruisseau de Laffrey : $\frac{n SO_4^-}{n HCO_3^-} = 0,192$; $\frac{n Mg^{++}}{n Ca^{++}} = 0,334$

Cascade de Jouchy : " = 0,645 ; " = 1,08

Figure 49 - Diagrammes semi-logarithmiques représentatifs des minéralisations des eaux de la cascade de Jouchy et du ruisseau de Laffrey (moyennes des analyses effectuées).-

Les eaux de la cascade de Jouchy, qui s'infiltrent entièrement dans la nappe, présentent une minéralisation totale faible et stable du mois d'octobre au mois d'avril. Les autres mois, le débit de la cascade est négligeable. La conductivité des eaux que j'ai prélevées (12 analyses effectuées de 1975 à 1979) s'élève à $149 \pm 12 \mu S.cm^{-1}$ à 20°C. Ce sont des eaux essentiellement bicarbonatées et sulfatées, calciques et magnésiennes (Figure 49).

Les eaux du ruisseau de Laffrey, qui longent le champ de captage de Jouchy ; elles sont issues du mélange des eaux du trop-plein des lacs de Laffrey et des eaux turbinées par l'usine E.D.F. de Jouchy. Leur minéralisation totale est moyenne, peu accentuée. La conductivité des eaux que j'ai prélevées (26 analyses effectuées de 1975 à 1979) s'élève à $237 \pm 18 \mu S.cm^{-1}$ à 20°C. Ce sont des eaux essentiellement bicarbonatées, légèrement sulfatées, calciques et magnésiennes. Les lacs recevaient jusqu'en 1980, la totalité des rejets des hameaux riverains ; actuellement ces rejets rejoignent le ruisseau en aval de l'exutoire des lacs. Les eaux du ruisseau, présentent quelquefois des taux de nitrates plus élevés que ceux que l'on rencontre dans le bassin versant de la Romanche (5,2 mg/l le 11/02/1977, 4,6 mg/l le 27/02/1979, 6,25 mg/l le 17/07/1979, 4,8 mg/l le 12/05/1981...) Cependant, la teneur moyenne des nitrates mesurés dans les eaux prélevées en aval de la restitution de l'usine E.D.F. n'est pas très élevée (2,32 mg/l de NO_3^-).

Les teneurs en chlorures sont elles aussi plus élevées que celles rencontrées dans l'ensemble du bassin versant (moyenne des 24 analyses effectuées : 7,9 mg/l). Pour B. DELAQUAIZE (1979), ces teneurs en chlorures élevées, relevées dans les eaux des lacs Petichet et Laffrey, sont à attribuer à une pollution due aux épandages de sels sur les routes d'hiver ; mais comme ces taux ne sont pas moins élevés en été, nous pouvons penser qu'ils proviennent aussi des rejets d'eaux usées d'origine humaine ou animale dans cette région à vocation rurale et touristique. Les caractéristiques des eaux du ruisseau sont assez différentes de celles de la cascade, issues du bassin versant voisin. Elles se distinguent notamment par les rapports :

$$\frac{r Mg}{r Ca} \text{ et } \frac{r SO_4^-}{r HCO_3^-} \text{ (en meq/l) (Figure 49)}$$

Les valeurs relativement élevées des rapports calculés pour les eaux de la cascade peuvent s'expliquer par la présence des couvertures triasiques plus abondantes dans son bassin versant.

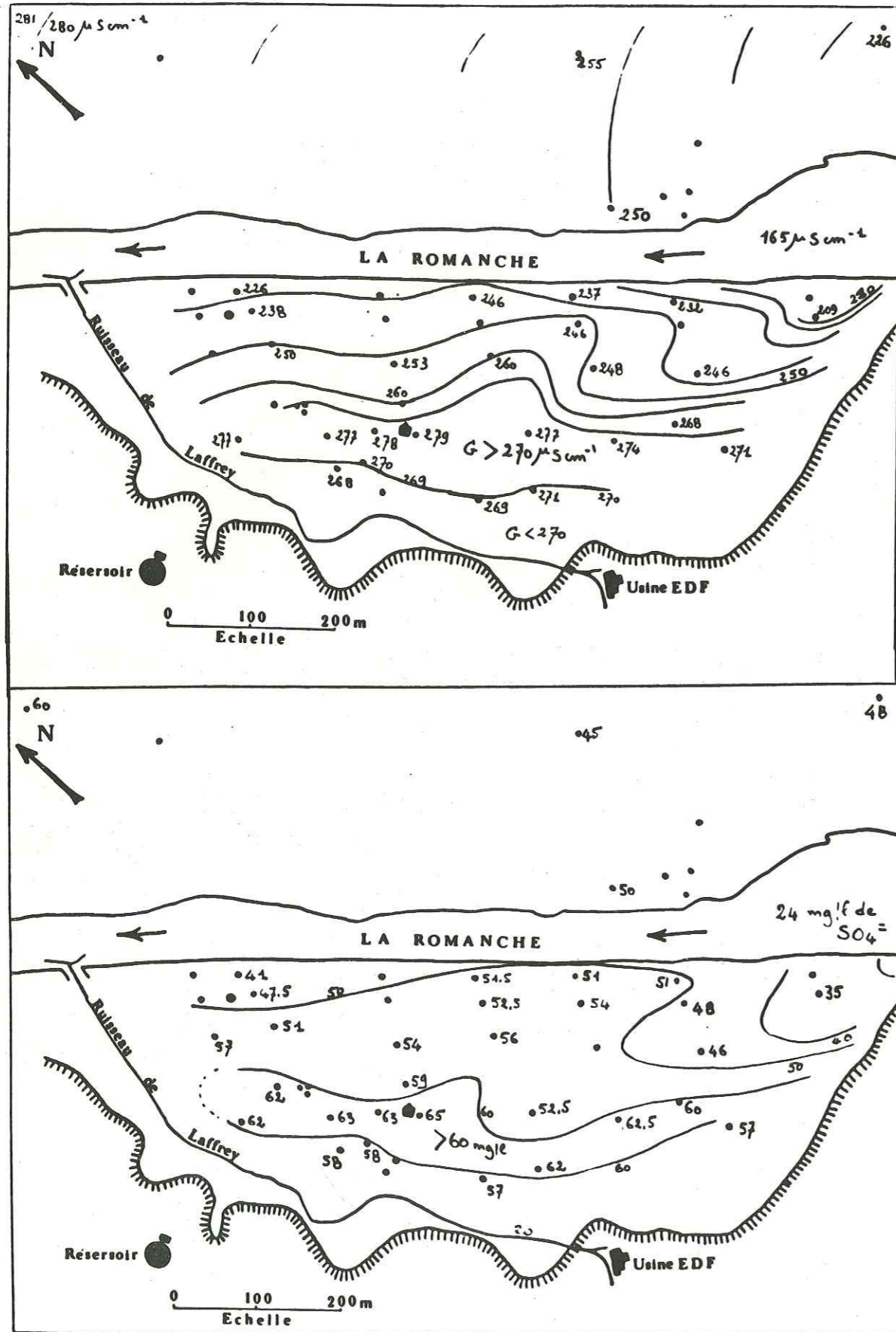


Figure 51 - Cartes des isocones (isoconductivités) et des isoteneurs en sulfates des eaux de la nappe de Jouchy au début des hautes eaux (mai 1977).-

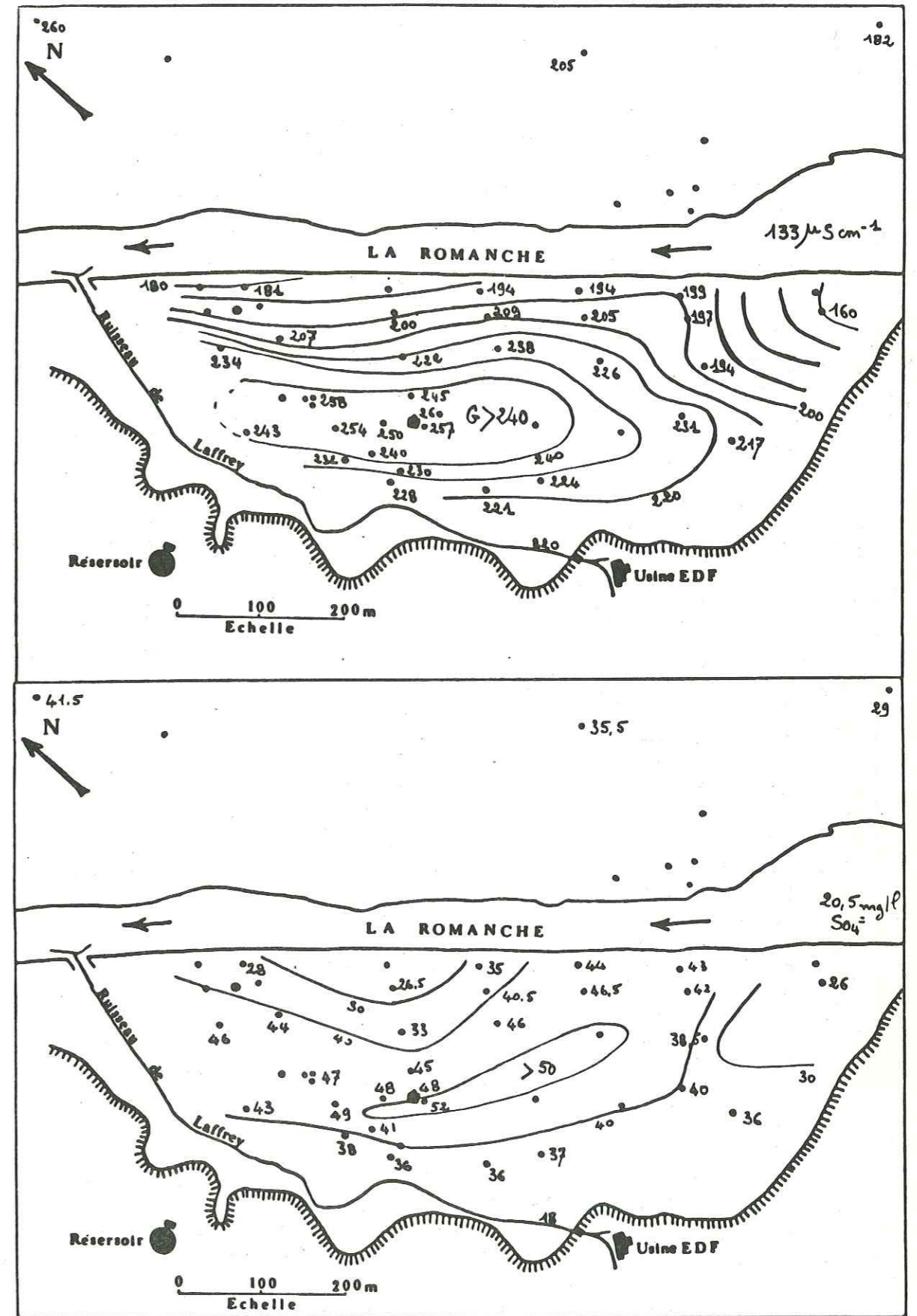


Figure 52 - Cartes des isocones (isoconductivités) et des isoteneurs en sulfates des eaux de la nappe de Jouchy à la fin des hautes eaux (août 1977).-

Date du prélèvement Heure Température air °C Température eau °C pH à 20°C Résistivité en Ω.cm à 20°C Conductivité en µS.cm ⁻¹ à 20°C D.H.T. en °f. T.A.C. en °f. Bicarbonates en mg/l de HCO ₃ ⁻ Chlorures en mg/l de Cl ⁻ Nitrates en mg/l de NO ₃ ⁻ Sulfates en mg/l de SO ₄ ⁼ Phosphates en mg/l de PO ₄ ⁼ Calcium en mg/l de Ca ⁺⁺ Magnésium en mg/l de Mg ⁺⁺ N° Analyse S.I.E.R.G.	Romanche face à Jouchy			Piézomètre P VII 2			Piézomètre P IV 1			Puits 1 de Jouchy		
	26.9.77 15 h 50 21° 14°9 7,8 5750 174 9,8 6,5 79 0,8 0,6 31 30 5,6	12.77 10 h 30 7°6 3°8 8,1 4505 220 12,9 8,25 100 0,3 1,4 43	7.3.78 10 h 6°3 5°8 8,1 4320 231 13,3 9,05 110 3,4 2,6 35	13.6.78 11 h 30 20° 8°2 8,2 6980 143 7,8 5,85 71 3,0 0,8 18	26.9.77 15 h 21° 11°5 7,8 5270 190 11,0 7,4 90 1,5 1,0 34	12.77 14 h 30 8°2 4°2 7,8 4630 216 13,4 8,8 107 1 1,4 39	7.12.77 14 h 10 8°2 7°3 7,7 4090 244 13,5 8,5 104 0,75 1,9 48	26.9.77 13 h 19° 10°2 7,7 3870 259 15,0 9,35 114 1,7 2,0 51	13.6.78 11 h 20°6 9°4 7,9 4520 221 12,0 8,8 107 2,5 1,2 32	7.12.77 14 h 25 8°2 8°6 7,6 3680 272 15,1 7,55 92 0,75 2,1 54	7.12.77 11 h 20 6°3 8° 7,7 3700 270 15,4 9,5 116 2,7 2,6 53	13.6.78 13 h 50 21°2 8°9 7,9 3810 262 14,8 9,65 118 4,2 2,1 46

Tableau 44 - Exemples d'analyses des eaux de la Romanche, des piézomètres P VII 2 et P IV 1, du puits 1, prélevées en moyennes, basses et hautes eaux.

Dès les premières campagnes d'analyses, j'ai pu faire plusieurs constatations importantes :

Première constatation :

La nappe constitue un ensemble homogène du point de vue hydrochimique. Il n'existe pas, en effet, de piézomètre dont les eaux présentent localement des caractéristiques hydrochimiques particulières ou aberrantes par rapport à l'ensemble de la nappe. Ces eaux sont essentiellement bicarbonatées, légèrement sulfatées, calciques et magnésiennes. Leurs teneurs en chlorures, en nitrates, en phosphates, en cations alcalins, sont faibles. Ces caractéristiques sont comparables à celles de la Romanche transi-tant face à Jouchy (Chapitre I-5 - 2ème partie). Mais, à un moment donné, les eaux de la nappe sont toutes plus minéralisées que celles de la Romanche (Figures 50 à 53 - Tableau 44).

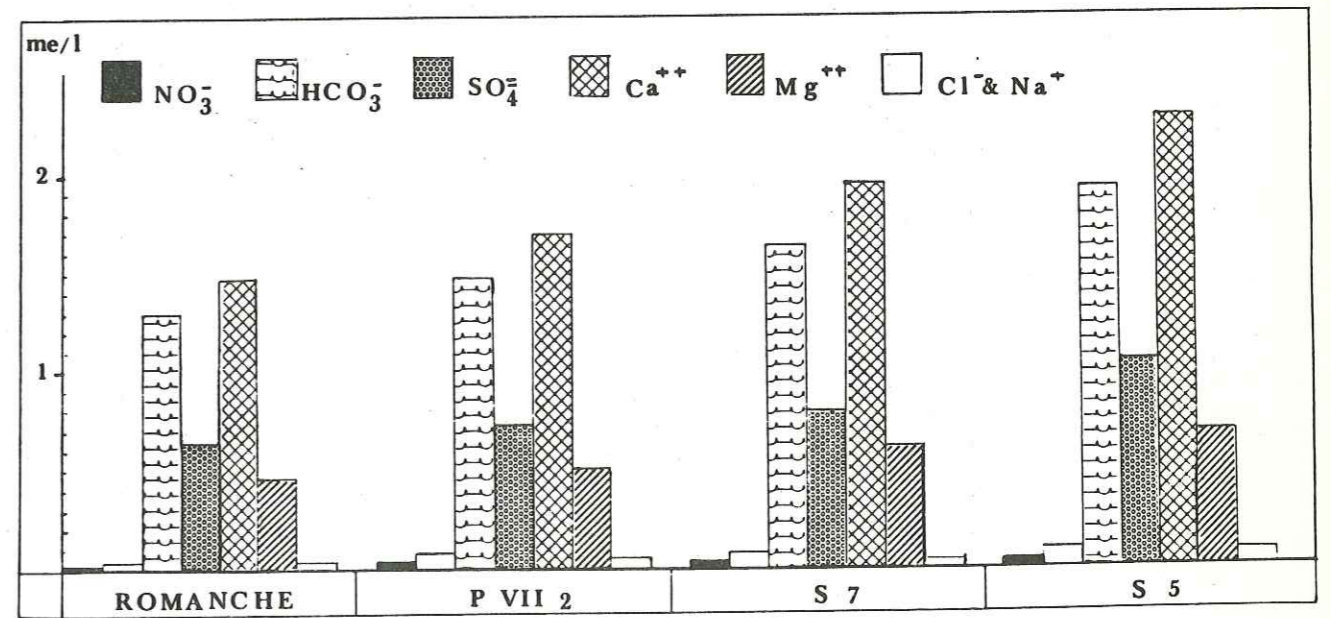


Figure 53 - Diagrammes représentatifs de la minéralisation des eaux de la Romanche et de 3 piézomètres, en moyennes eaux (Septembre 1979) -

P VII2, S 7 : zone amont,
S 5 : "coeur" de la nappe.-

Deuxième constatation :

La minéralisation des eaux s'accroît suivant certaines directions privilégiées (Figures 54 et 55). En effet, l'étude des gradients hydrochimiques des eaux de la nappe montre une accentuation de la minéralisation dans le sens de l'écoulement des eaux que l'étude hydrogéologique a déterminé.

Ainsi, en rive gauche, dans la zone amont de la plaine, zone d'infiltration préférentielle, les gradients hydrochimiques sont les plus marqués et gardent le même sens toute l'année.

Des rives vers le puits, le gradient est positif en hautes eaux, il s'inverse en basses eaux suivant l'importance des infiltrations supplémentaires ou occasionnelles en provenance de la rivière (Figure 54).

En rive droite, on constate également une accentuation de la minéralisation des eaux de l'amont vers l'aval (S4, S3, P152, P154...) dans la direction de l'écoulement des eaux, en toutes saisons.

L'absence de piézomètres disposés sur une même ligne, perpendiculairement aux rives, ne permet pas d'étudier les gradients suivant cette direction.

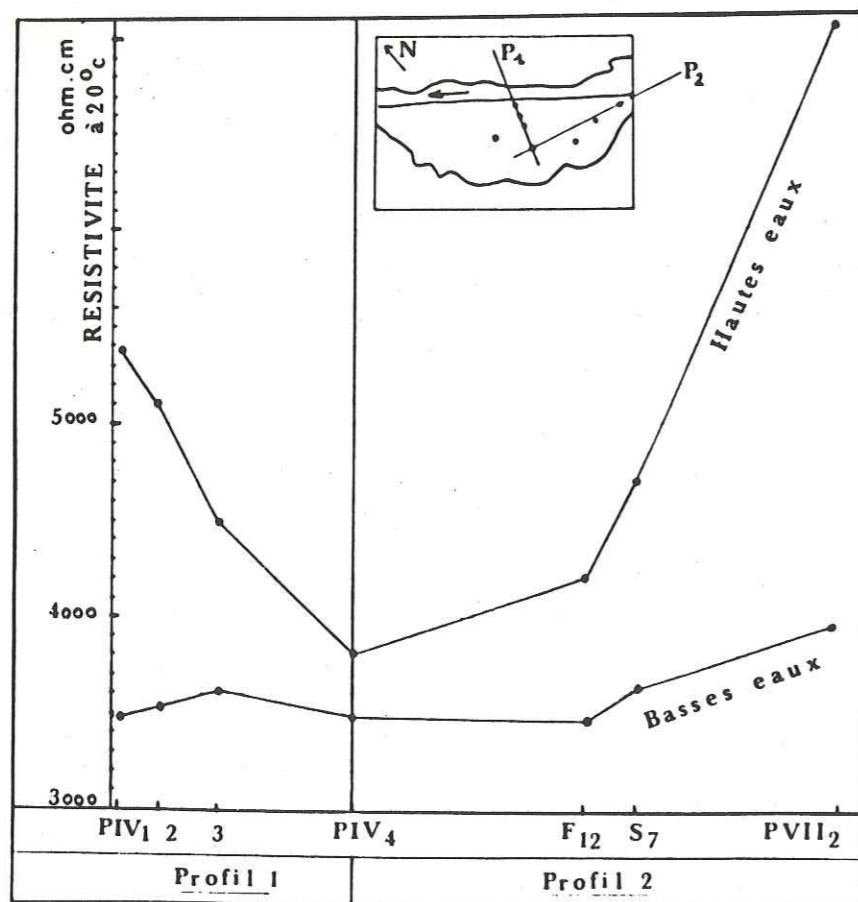
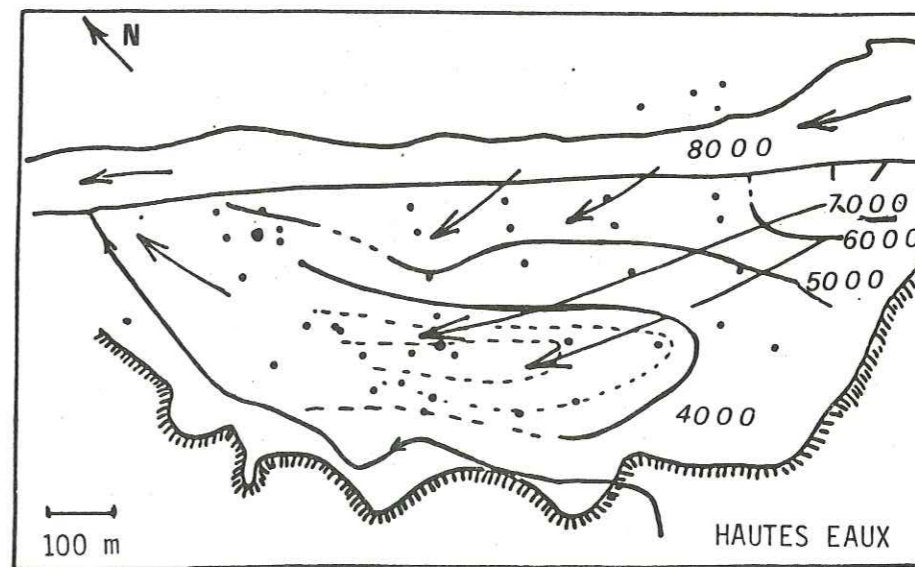
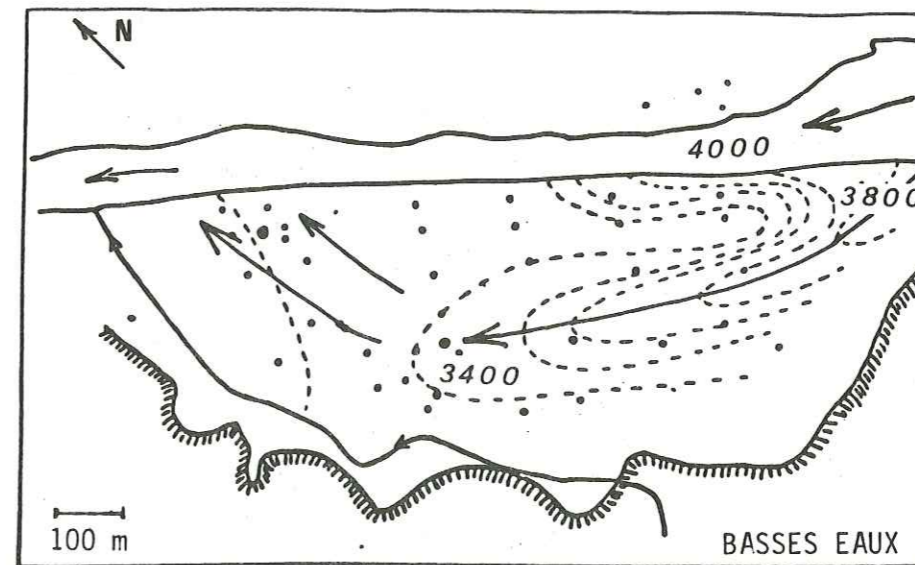


Figure 54 - Variations des résistivités des eaux des piézomètres selon deux profils en hautes et basses eaux.-



← Sens de l'écoulement des eaux

Figure 55 - Cartes des isorésistivités des eaux de la nappe de Jouchy. Mise en évidence des gradients chimiques dans le sens de l'écoulement des eaux.-

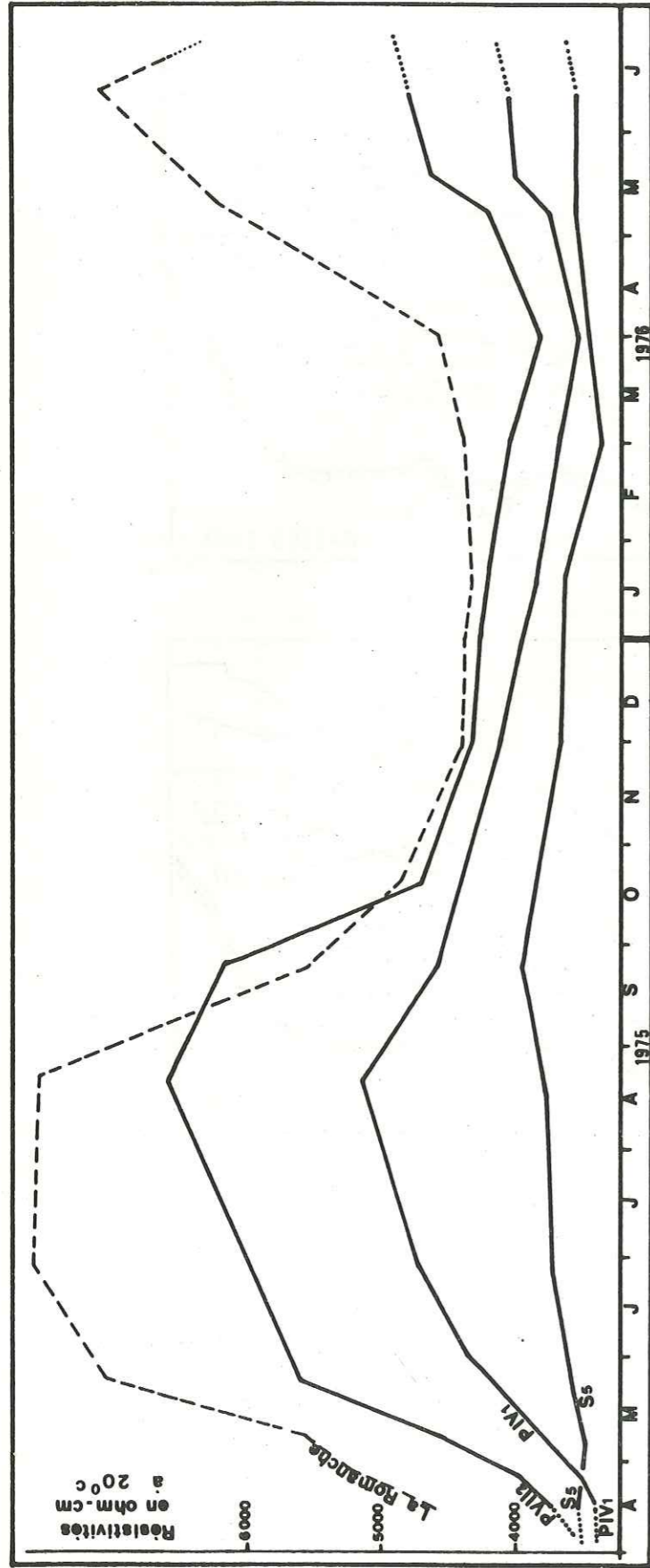


Figure 56 - Variations saisonnières des résistivités des eaux de la nappe et de La Romanche au cours de l'année hydrologique (1975-1976) -

P VII 2 : dans la zone d'infiltration préférentielle,

P IV 1 : le long des rives,

S 5 : au "coeur" de la nappe.-

Troisième constatation :

Les eaux de chaque piézomètre de la nappe subissent des variations saisonnières comparables à celles que subissent les eaux de la Romanche (Figures 56 et 57).

Ces variations se manifestent avec d'autant plus de retard et d'atténuation, que le point considéré, est plus éloigné des zones d'infiltration établies par l'étude hydrogéologique.

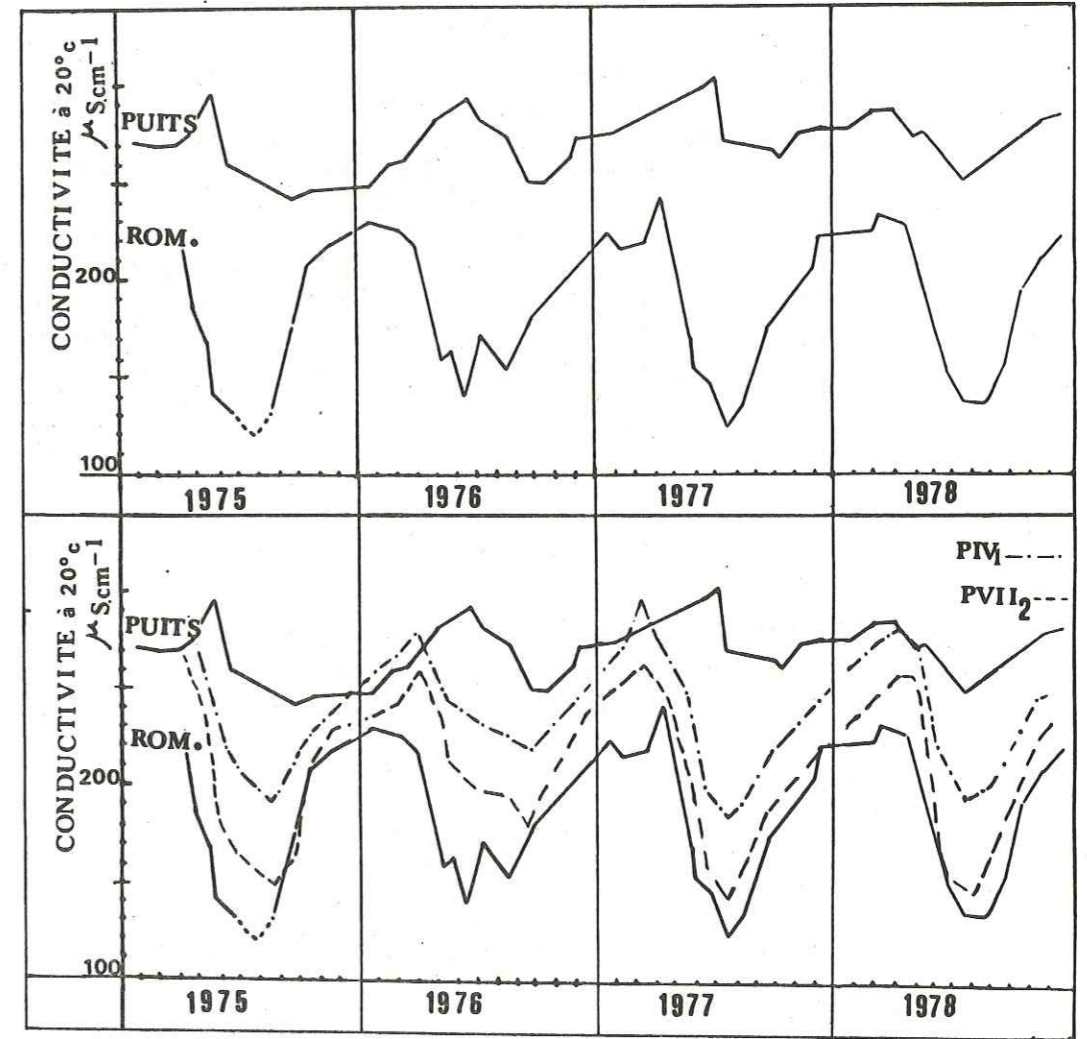


Figure 57 - Variations saisonnières des conductivités des eaux de la Romanche, du puits I et des piézomètres P VII 2 et P IV 1, au cours des années 1975 à 1978.
P VII 2 : dans la zone d'infiltration préférentielle,
P IV 1 : le long des rives.-

Ces trois premières constatations confirment que les eaux souterraines constituent un ensemble homogène ; il n'existe pas de zonalité géologique déterminant des caractéristiques hydrochimiques particulières. L'augmentation en sels dissous des eaux dans la nappe, ne peut être attribuée à des différences de nature du terrain. Elle est due, comme le signale H. SCHOELLER (1962) pour d'autres nappes, d'une part à l'origine des eaux infiltrées, et d'autre part à certains phénomènes modificateurs : temps de contact avec les sables alluvionnaires, longueur du trajet, mélange des eaux, etc. L'examen des variations de la minéralisation totale des eaux, dans le temps et dans l'espace, doit donc permettre d'étudier les échanges nappe-rivière.

On constate, en effet, que les eaux souterraines s'enrichissent dans le sens de l'écoulement des eaux infiltrées en provenance de la Romanche (deuxième constatation) et qu'elles font l'objet de variations saisonnières comparables à celles de la rivière (troisième constatation). Elles subissent donc une influence primordiale, celle de la Romanche. Ceci n'est pas fait pour nous étonner puisque les bilans hydrogéologiques montrent que les infiltrations en provenance de la Romanche constituent le terme le plus important des apports (Chapitre II-3-3, première partie). De plus, les sables et les graviers alluvionnaires déposés dans la plaine, susceptibles de participer à cette minéralisation, proviennent de l'ensemble du bassin versant et sont donc de même nature et de même origine géologique que celles des terrains où la rivière a pu, elle-même, s'enrichir en sels minéraux.

Quatrième constatation : zonalité verticale :

Il existe des différences dans les minéralisations totales des eaux prélevées dans les couches superficielles de la nappe et celles prélevées dans les couches plus profondes.

Ainsi, les eaux du piézomètre S 8, prélevées entre 7 et 30 m de profondeur présentent, toute l'année, des minéralisations plus élevées que celles du piézomètre P VII 2, profond de 9 mètres, et situé à moins de 15 mètres du premier. Ces deux piézomètres sont situés dans la zone amont de la plaine. Les eaux du premier proviennent des apports souterrains profonds (en provenance de la nappe de l'Ile Falcon) et celles du second, des infiltrations en provenance de la Romanche. Plus on s'éloigne des zones d'infiltration, plus la zonalité verticale s'estompe (dans les sondages S 6, F 12, S 5, puits 1...). L'interprétation du phénomène sera développée dans le chapitre III-1-3.

Cinquième constatation : zonalité horizontale :

On peut remarquer que certaines zones de la nappe présentent une individualité remarquable du point de vue hydrochimique. Ainsi, les eaux prélevées dans la zone amont, zone d'infiltrations préférentielle, présentent, en toutes saisons, les minéralisations les moins élevées et les plus proches de celles de la Romanche. Au contraire, au "coeur" de la nappe, dans la zone des rabattements dus aux pompages

du puits 1, les eaux présentent les minéralisations les plus élevées, en toutes saisons. On serait tenté d'attribuer ce phénomène au seul rabattement dû aux pompages, mais les premières cartes hydrochimiques dressées en 1965 par la C.P.G.F., en l'absence de tout pompage, faisaient déjà apparaître cette plage de plus forte minéralisation.

J'essayerai, dans le chapitre III, d'interpréter ce phénomène. Tout autour du "coeur" de la nappe, dans la zone longeant les versants comme dans la zone aval, les eaux souterraines présentent une minéralisation moins élevée.

Nous avons vu que le long des rives, la minéralisation totale des eaux est, soit plus élevée (en basses eaux), soit moins élevée (en hautes eaux) que celles du "coeur" de la nappe (Figure 54).



L'examen des cartes hydrochimiques et des variations saisonnières de la minéralisation de l'ensemble des eaux prélevées dans les piézomètres, m'a permis de choisir un certain nombre d'entre eux, soit qu'ils représentent une zone géographique de la plaine (zone ouest, zone est, zone proche des rives, zone amont de la rive gauche...), soit qu'ils représentent une zone définie par les mouvements hydrodynamiques de la nappe (zone d'infiltration, zone d'appel du puits...) (Figure 58).

Toute délimitation très stricte de ces zones, serait naturellement arbitraire. Selon les phénomènes à étudier, j'ai complété cette approche par l'analyse des eaux d'autres piézomètres.

Les piézomètres P VII 2 et S 7, sont représentatifs de la zone amont et permettent d'étudier en toutes saisons, les eaux infiltrées en provenance de la Romanche.

- . Le piézomètre profond, S 8, est représentatif des couches profondes de la nappe et permet d'étudier les eaux en provenance de l'Ile Falcon (apports souterrains).
- . Les piézomètres S 6 et F 12, sont représentatifs d'une zone intermédiaire et permettent d'étudier d'une part, l'évolution des eaux au cours du cheminement souterrain et d'autre part, les apports du versant ouest (cascade de Jouchy).
- . Les piézomètres PA et P I 4, sont représentatifs de la zone ouest de la nappe et permettent d'étudier éventuellement les infiltrations en provenance du ruisseau de Laffrey.
- . Les piézomètres P V 1, P IV 1, P III 1, P II 1, sont représentatifs des zones situées en bordure des rives de la Romanche et permettent d'étudier les éventuelles infiltrations des eaux de la rivière à travers les rives.
- . Les piézomètres P IV 1, P IV 2, P IV 3... permettent de suivre ces mêmes infiltrations.

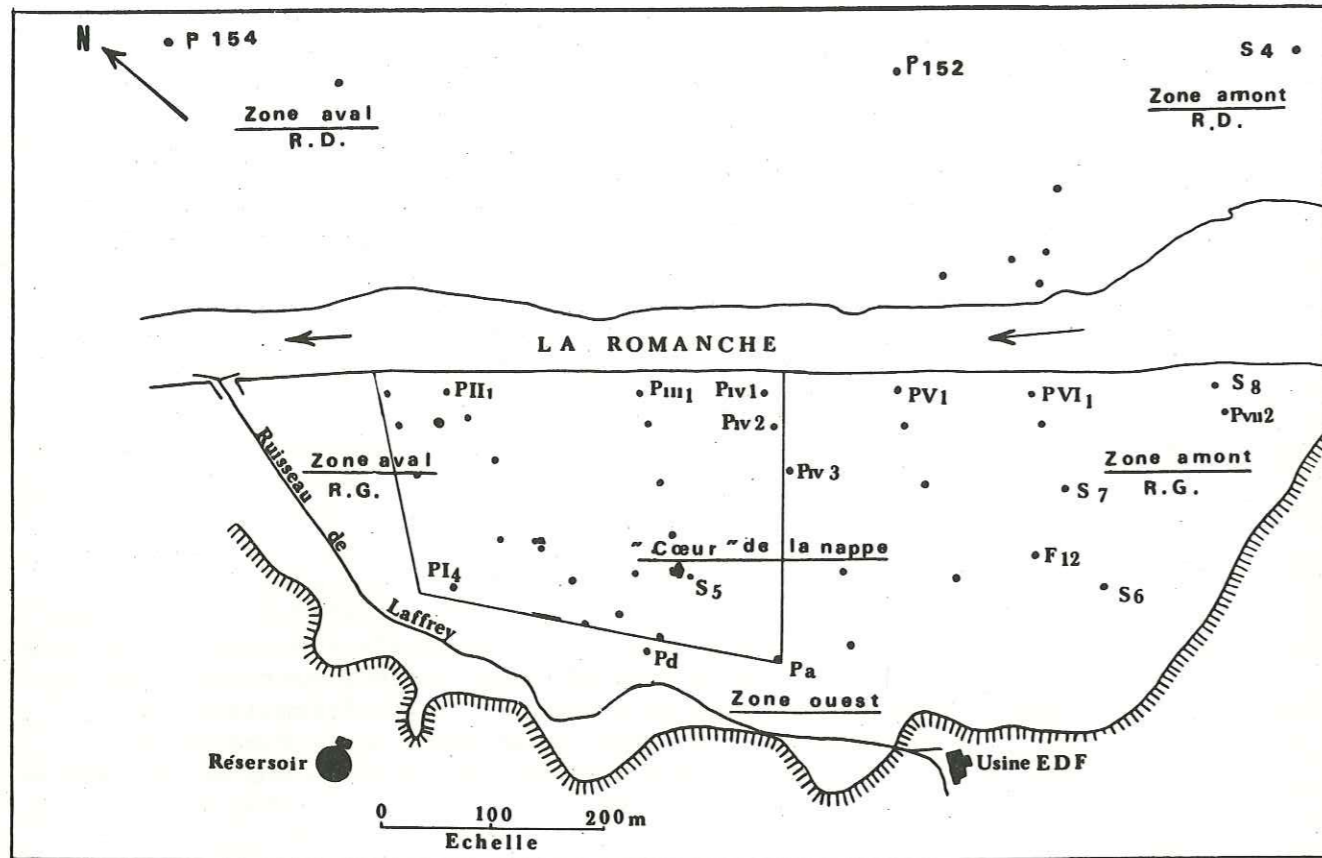


Figure 58 - Emplacement des piézomètres représentatifs des "zones" de la nappe de Jouchy, utilisés pour l'étude hydrochimique.-

- . Le piézomètre S 5, est représentatif du "coeur" de la nappe.
- . Les piézomètres S 4, S 3, P 152, P 154, situés de l'amont vers l'aval de la plaine, permettent d'étudier l'évolution des eaux au cours du cheminement souterrain, en rive droite.

x^x
x^x x^x
x^x x^x

Il n'est pas possible de reproduire ici toutes les analyses effectuées au cours des campagnes de prélèvements, sur tous les piézomètres ou lors des prélèvements réguliers des piézomètres les plus représentatifs, pour des raisons évidentes de place (1 760 prélèvements et au moins 12 critères physico-chimiques différents).

Je représenterai ici, grâce aux diagrammes semi-logarithmiques de SCHOELLER et BERGALOFF, les caractéristiques hydrochimiques des eaux des piézomètres les plus représentatifs, en hautes et basses eaux (Figures 59 - 60 - 61).

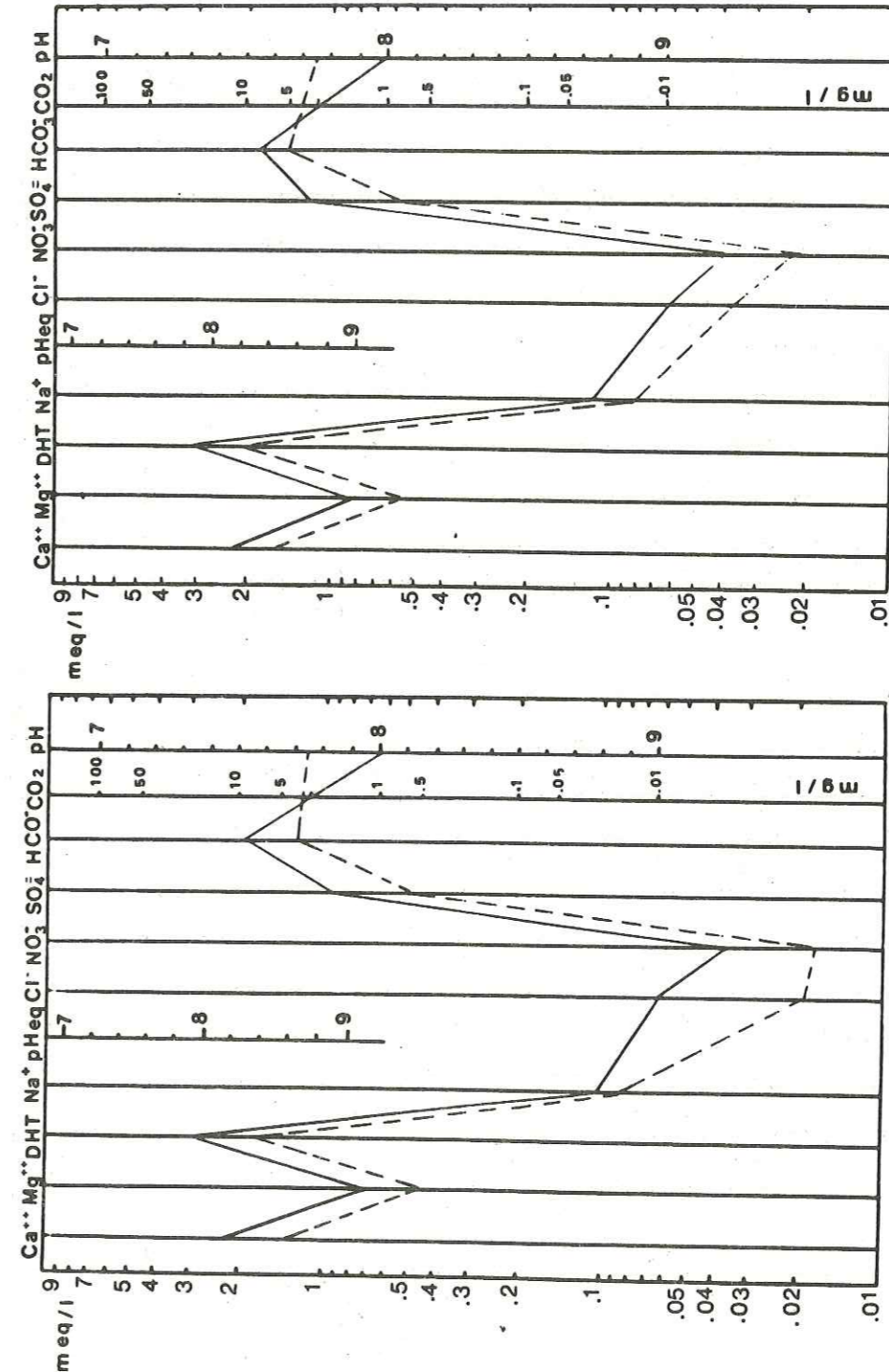


Figure 59

Piézomètre P IV 1
Bordures des rives, face au puits 1
--- hautes eaux (10 août 1977)
— basses eaux (10 février 1977)

Piézomètre P VII 2
Zone amont, rive gauche

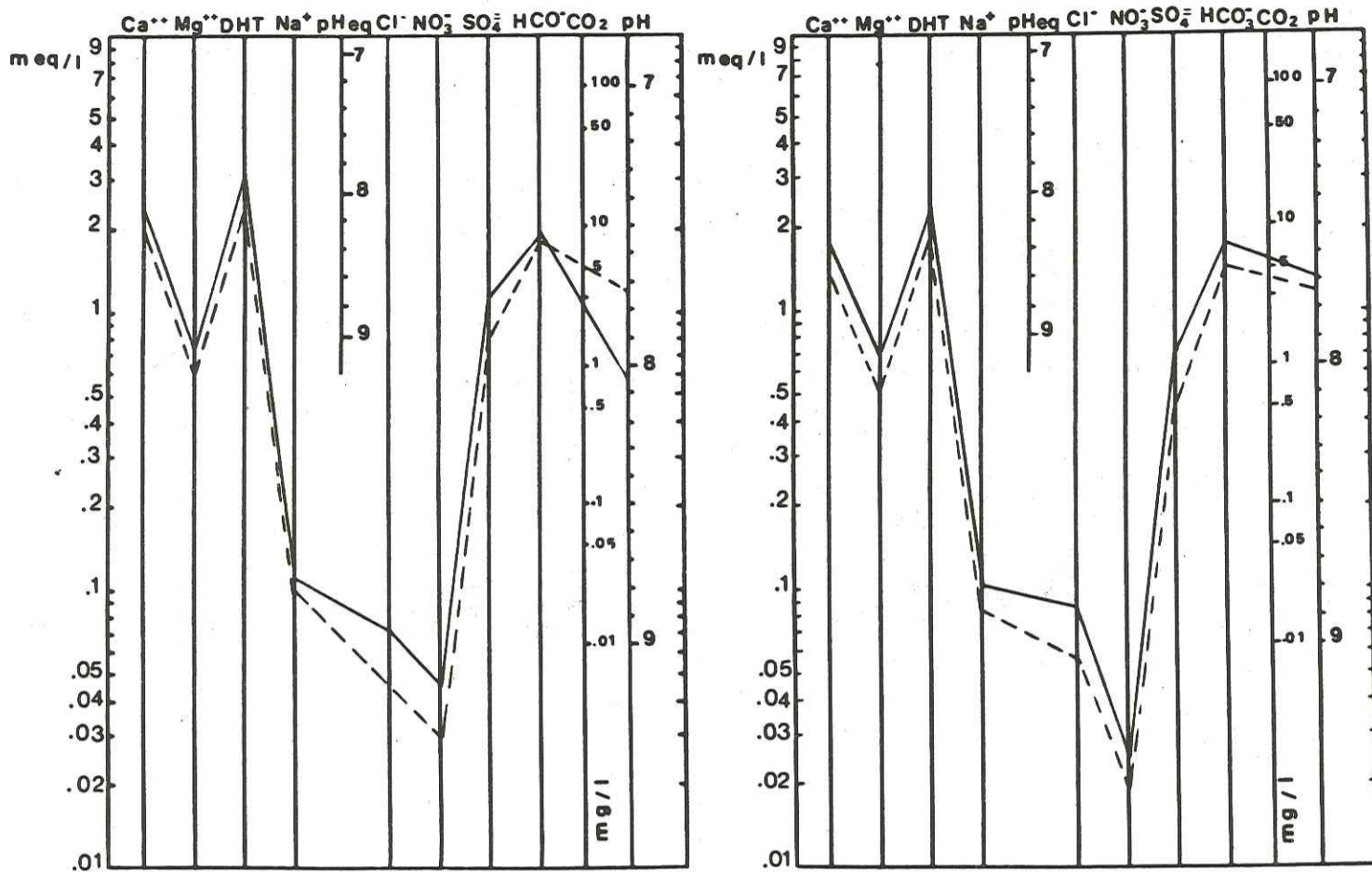


Figure 60

Piézomètre P I 4
(zone ouest, rive gauche, en aval puits 1)

Piézomètre S 4
(zone amont, rive droite)

--- hautes eaux (10 août 1977)
— basses eaux (10 février 1977)

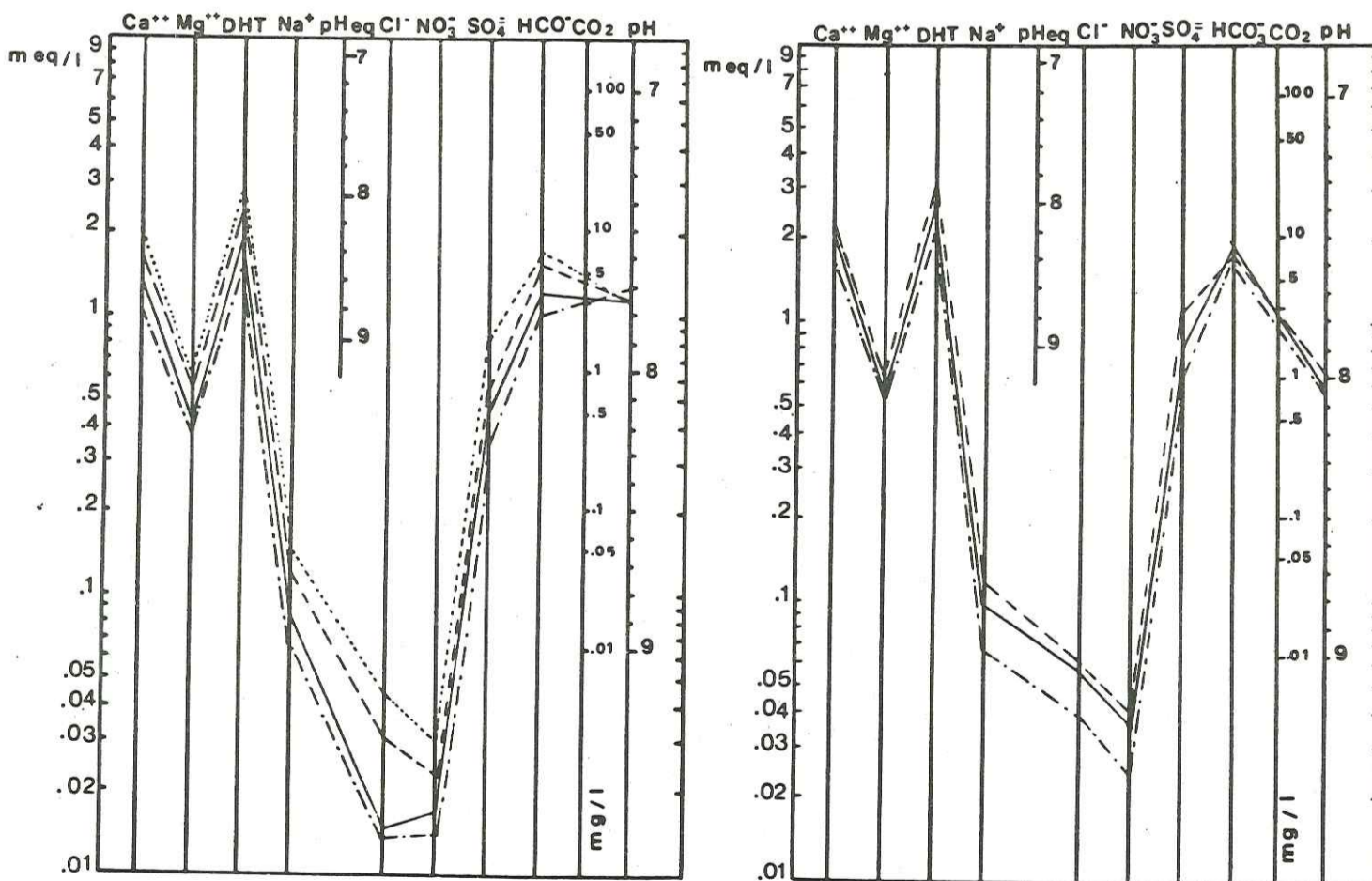


Figure 61

Romanche et Piézomètres
en hautes eaux (10 août 1977)
— • — Romanche
— P VII 2

en basses eaux (10 février 1977)
--- S 7
..... S 5

Ce type de diagrammes ne permet pas de voir apparaître nettement les variations saisonnières des eaux souterraines les plus faibles comme celles du "cœur" de la nappe, ni les variations dans l'espace en basses eaux (figure 61).

Je présenterai dans les chapitres suivants, une autre méthode permettant d'étudier sur graphique, l'évolution des eaux dans l'espace et dans le temps, à l'occasion de l'étude des processus hydrochimiques (Chapitre III-2).

II-2 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DU Puits I DE JOUCHY - QUALITE HYGIENIQUE - AGRESSIVITE ET POUVOIR CORROSIF, STABILITE, VARIATIONS SAISONNIERES ET VULNERABILITE

Les résultats des analyses physico-chimiques que j'ai effectuées d'avril 1975 à décembre 1980, sur 120 prélèvements, ainsi que les analyses mensuelles de type II, effectuées par le laboratoire régional de La Tronche, m'ont permis de vérifier, que les caractéristiques physico-chimiques des eaux du puits étaient constantes ; ce sont des eaux essentiellement bicarbonatées et sulfatées, calciques et magnésiennes (Figures 62 et 63).

Leur taux de chlorures, nitrates, phosphates et cations alcalins sont très faibles. Leur minéralisation totale est moyenne, leur conductivité variant de 250 à 300 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C.

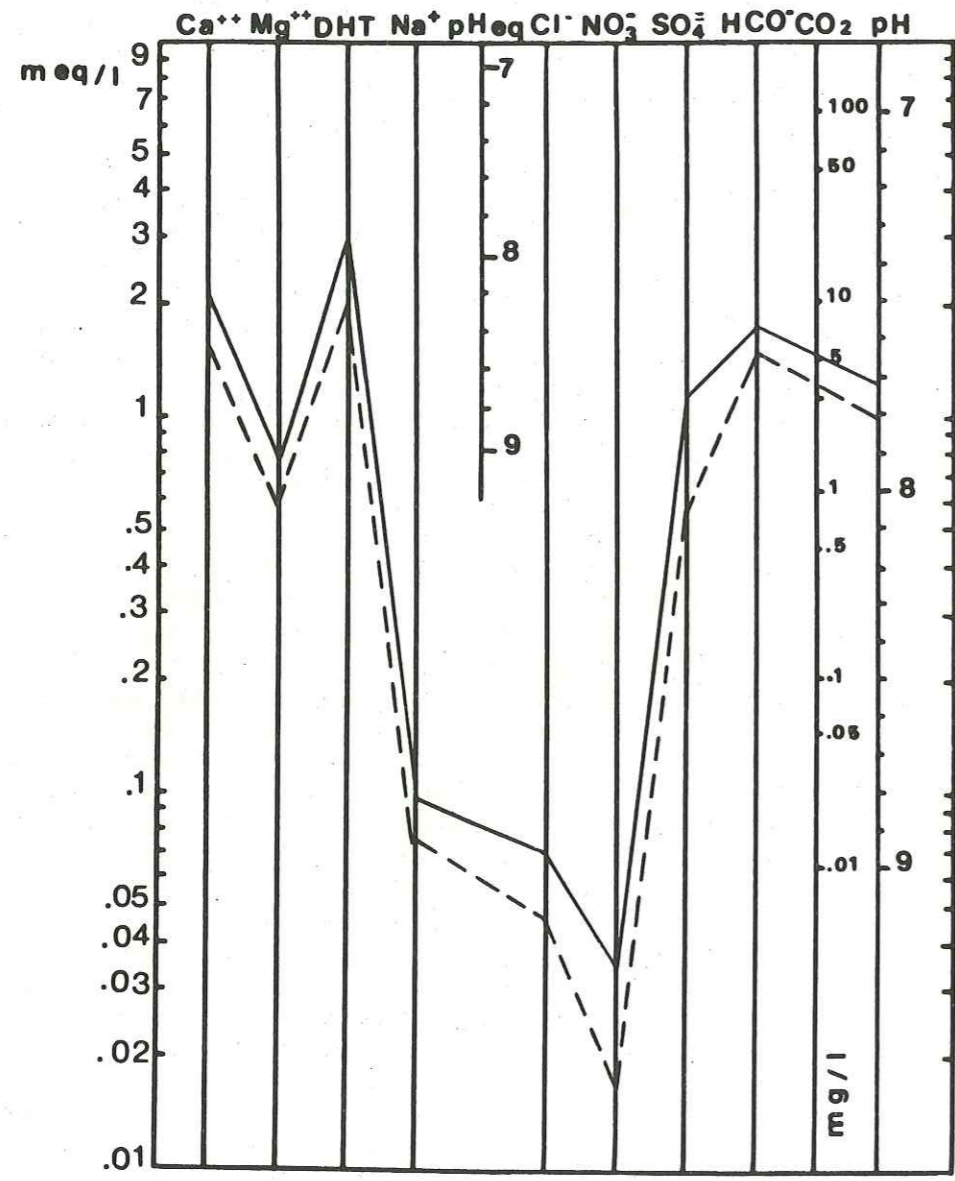
. Du point de vue de l'hygiéniste, les eaux du puits (1) présentent des caractéristiques physico-chimiques appréciables pour des eaux d'alimentation. Ainsi, la dureté moyenne de ces eaux, variant de 13,6 à 16,0 degrés hydrotimétriques français, est bien inférieure à la valeur maximum admise de 30 degrés ; elle est optimum. Les travaux récents des hygiénistes (O.M.S., E. GIROULT - 1977, A.F.E.E. - 1981) ont mis en évidence les effets néfastes des eaux peu minéralisées, à la dureté inférieure à 6 degrés ; des rapprochements ont été, en effet, établis entre la consommation des eaux douces, les maladies cardio-vasculaires et la mortalité infantile (J. COTTET - B. NINARD - 1977). La faible teneur en nitrates des eaux de la nappe de Jouchy (2,2 mg/l de NO_3^- en moyenne dans les eaux du puits 1) leur confère une qualité devenue de plus en plus rare. En effet, les taux de nitrates des eaux de nappes souterraines n'ont cessé d'augmenter en France, au cours des dix dernières années (J. CHRETIEN et Coll. 1977 - J.Y. CAOUS et M. VIENNE - 1977, M. BOUCETTA - 1977, A. LANDREAU et L. MONITION - 1981...). Cet enrichissement est la conséquence de l'augmentation générale de la pollution azotée au-delà des possibilités de transformation dans les milieux naturels ; il est lié notamment, à l'utilisation, mal contrôlée, des engrais chimiques azotés dans les régions où l'agriculture est intensive, mais aussi aux rejets liquides industriels ou urbains dans les eaux superficielles.

La présence des nitrates dans les eaux distribuées, à des teneurs élevées, a des effets toxiques graves, notamment pour les nourrissons de moins de 3 mois (chez qui elle engendre la méthémoglobinémie), mais également pour les adultes (chez qui elle provoque la formation de nitrosamines aux propriétés cancérigènes, dans l'appareil digestif).

Bien qu'aucune limite de concentration n'ait été fixée en France, pour les eaux d'adduction collective (circulaire du 15 mars 1962), une teneur supérieure à 10 mg/l d'azote (soit 44 mg/l de NO_3^-) est reconnue comme ayant des effets néfastes sur la santé.

Ces effets peuvent apparaître à des doses plus faibles car l'eau n'est pas la seule source de nitrates absorbés par l'organisme ;

(1) voir : qualité bactériologique des eaux du puits I de Jouchy en annexe III.-



Puits 1 : $\frac{n SO_4^-}{n HCO_3^-} = 0,64$; $\frac{n Mg^{++}}{n Ca^{++}} = 0,35$
 Romanche : " = 0,405 ; " = 0,36

Figure 62 - Diagramme semi-logarithmique, représentatif de la minéralisation des eaux du puits 1 et de la Romanche prélevée face à Jouchy - (moyennes annuelles).-

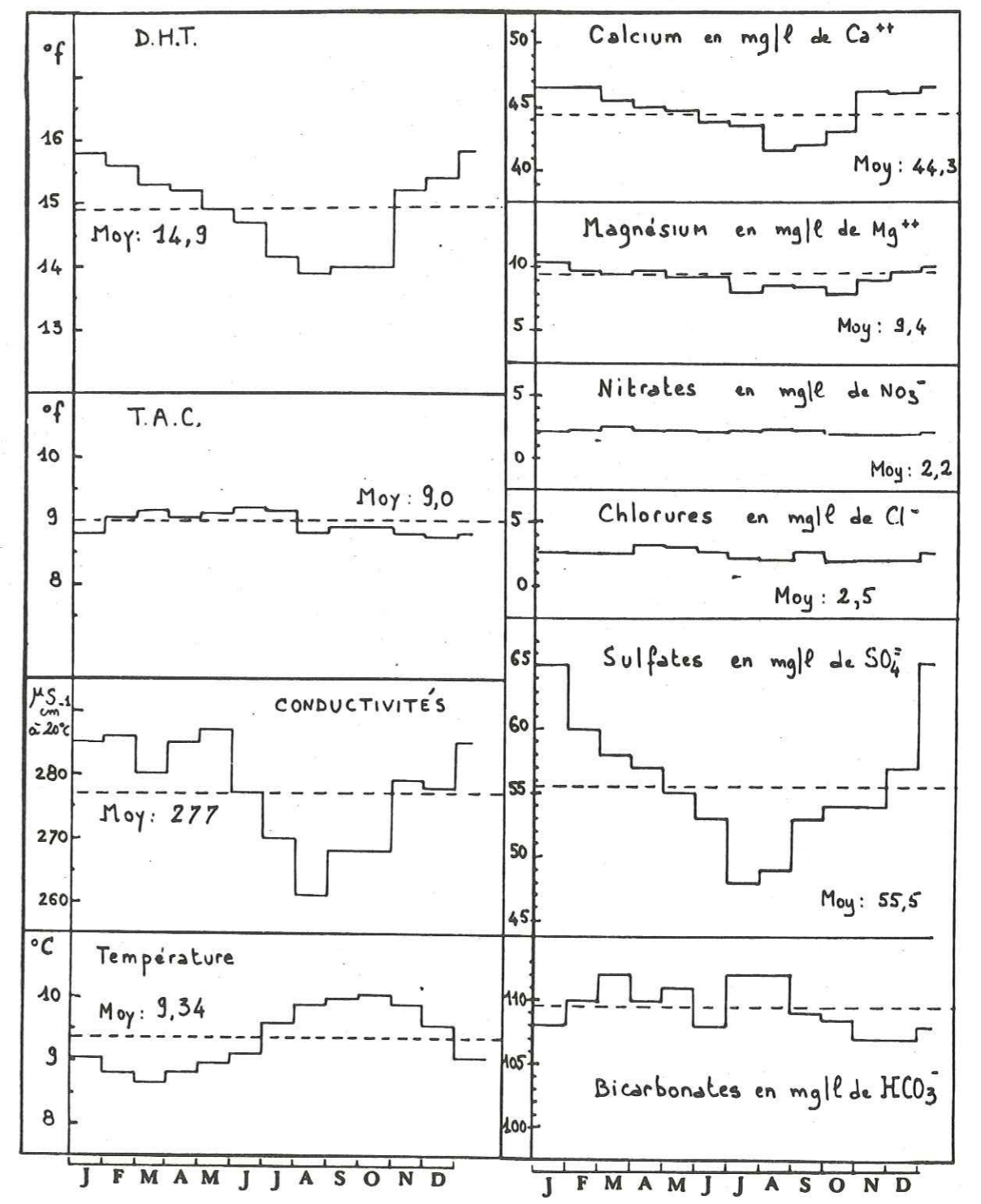


Figure 63 - Variations saisonnières des caractéristiques physico-chimiques des eaux du puits I de Jouchy - (moyennes établies à partir de 92 analyses - 1978 à 1980).-

C'est pourquoi, la directive du Conseil des Communautés Européennes (C.C.E.) du 15 juillet 1980, qui fixe à 50 mg/l de NO₃⁻ la concentration maximum admissible, dans les eaux potables, conseille de ne pas dépasser celle de 25 mg/l. Loin d'atteindre ces valeurs, les faibles teneurs en nitrates constituent une des garanties de potabilité des eaux du puits de Jouchy.

La faible teneur en chlorures (2,5 mg/l de Cl⁻ en moyenne) s'explique par la nature géologique des terrains traversés ; la stabilité de cette teneur témoigne de l'inexistence de pollution locale ; ceci est confirmé également par l'absence, dans les eaux du puits, d'autres substances pouvant être l'indice d'une activité biologique ou d'une dégradation organique (nitrites, ammoniacque, matières organiques...).

La fraîcheur des eaux est appréciable ; la température relevée à 20 m de profondeur dans le puits varie de 8,5°C à 10,3°C (Figures 63 et 64). La faible température des eaux souterraines est incontestablement un facteur limitant du développement bactérien.

L'absence d'éléments minéraux, métalliques, toxiques ou indésirables, assure aux eaux pompées les qualités requises pour l'alimentation, tant du point de vue de la réglementation française que des directives de la Communauté Européenne (C.C.E. - 15.07.1980).

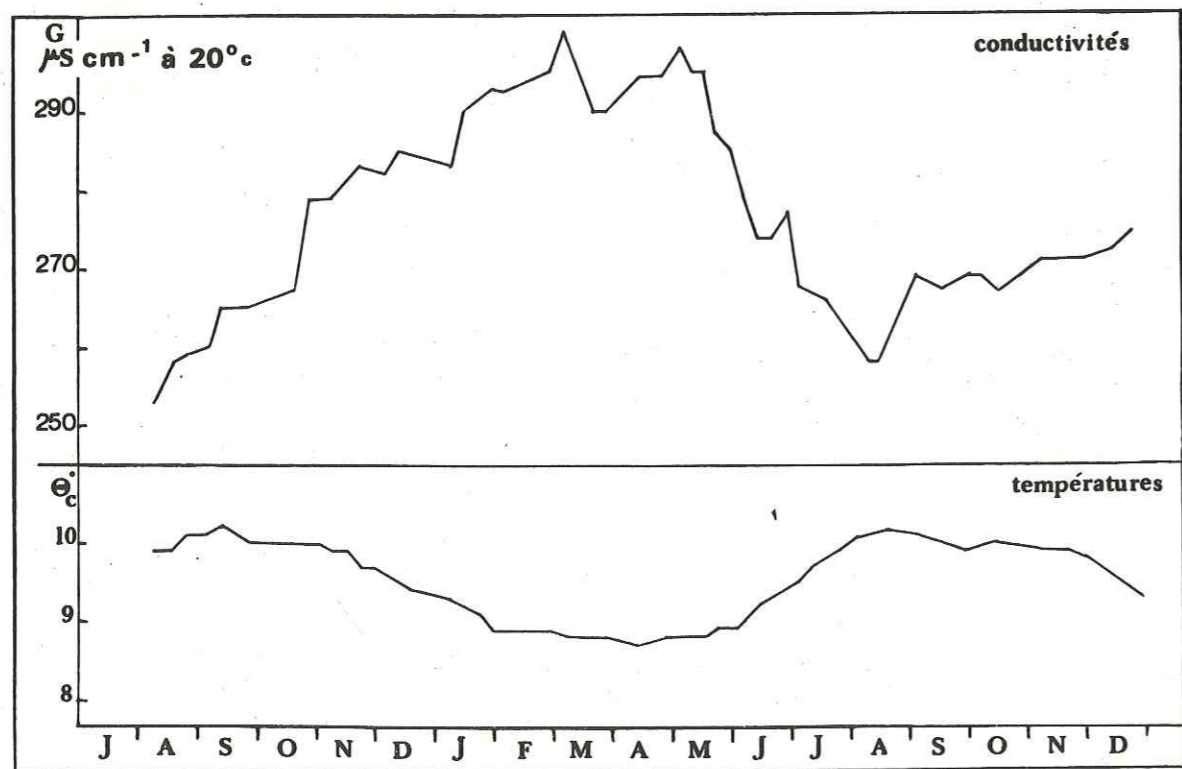


Figure 64 - Variations saisonnières des conductivités et des températures des eaux du puits I de Jouchy au cours d'une année hydrologique (1978-79).-

	CLASSES					Action de l'élévation de la température	Remarques
Oxygène dissous mg/l Corrosion Inhibition	O ₂ < 5 C. acide I. contrariée		5 < O ₂ < 8 C. rapide I. se fait si la vitesse est petite		OS O ₂ > 8 C. rapide I. se fait mais corrosion localisée	Classe 0 → 0 Classe 0 → OS	
	Minéralisation Résistivité ohm.cm à 20°C Corrosion Inhibition	I R > 6 000 C. lente I. rare	II 2000 < R < 6000 C. lente I. lente mais favorable	III 1300 < R < 2000 C. rapide I. contrariée	IV 850 < R < 1300 C. très rapide I. se fait mal.	V R < 850 C. très rapide I. négligé fait pas	Corrosion plus rapide Classe I → II → III....
Différence ionique S = a ⁻ c ⁺ en m.mole/l Ca disponible	+ S > 0 TAC - TCa > 0		0 S = 0 TAC = TCa		- S < 0 TCa + S/2 < TAC	Inhibition plus rapide	
	Dureté calcique TCa en me/l Inhibition	1 0 < TCa < 2 I. difficile	2 2 < TCa < 4 I. possible	3 4 < TCa < 6 I. rapide ou entartrage ou effet Evans	4 6 < TCa < 8 Entartrage ou effet Evans	5 TCa > 8 Effet Evans	Classe 1 → 2 → 3...
Acidité pH	a 0 < pH < 5		n 5 < pH < 9		b 9 < pH < 14	mêmes résultats à chaud	
	I. et entartrage impossibles		I. et entartrage possibles				

Tableau 45 - Classification des eaux d'après R. GIRARD (1973).-

Du point de vue pratique, l'examen des résultats d'analyses physico-chimiques permet de prévoir, avec une bonne approximation, le comportement probable de l'eau examinée, vis-à-vis des matériaux des canalisations du réseau de distribution. Depuis les travaux de J. TILLMANS (1912 à 1931), de W.F. LANGELIER (1936 à 1946), de C.P. HOOVER (1938), de J. HALLOPEAU (1949) sur l'agressivité, de nombreuses études ont été réalisées, comme celles de R. GIRARD (1967-1968-1970-1973), G. NOISETTE in M. NEVEUX (1968), J. GREFFARD (1970), L. LEGRAND et G. POIRIER (1972 et 1976) etc. Ces dernières permettent d'examiner la possibilité naturelle des eaux de créer une inhibition à la corrosion et l'intervention de différents paramètres comme la salinité, la température... La composition de l'eau intervient en effet, non seulement dans les possibilités "d'attaque", mais aussi par son pouvoir de protection, assuré par les produits qu'elle est capable de déposer : oxydes de fer, carbonates de calcium, etc. Ainsi, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau du puits 1 permettent de la ranger dans la "classe III" de la classification de G. NOISETTE dont les caractéristiques sont les suivantes :

- . dureté : de 14 à 35 degrés hydrotimétriques français,
- . résistivité : de 2 000 à 4 000 ohm.cm à 20°C,
- . teneur en oxygène : de 6 à 9 mg/l,
- . pH : proche de 7 ou au-dessus de la neutralité,
- . minéralisation : essentiellement bicarbonatée et calcique.

D'après G. NOISETTE, ces eaux sont habituellement sans action sur les matériaux des canalisations.

La méthode, plus récente, de R. GIRARD (1973) a le mérite d'examiner, en plus des critères choisis par G. NOISETTE, la possibilité naturelle de l'eau de créer une inhibition calcaire, ainsi que l'action séparée de différents paramètres (oxygène dissous, résistivité, déséquilibre de la balance ionique, dureté calcique, acidité...) et de leur variation en fonction de la température (Tableau 45).

Selon R. GIRARD, l'eau du puits 1 de Jouchy peut être rangée dans la classe : Q II - 2 n, ce qui conduit au diagnostic suivant :

- . phénomènes d'enrouillement rapides avec formation de produits ferriques favorables à l'inhibition,
- . phénomènes électrochimiques lents, favorables à l'inhibition calcaire,
- . inhibition calcaire possible, mais lente, qui peut être contrariée quand la teneur en calcium est inférieure à 2 me/l (teneur moyenne = 2,21 me/l).

Nous pouvons donc conclure, d'après ce qui précède, que l'eau du puits n'est pas susceptible de provoquer des corrosions importantes ; mais en cours d'exploitation, si la vitesse des eaux est trop grande, pour favoriser l'inhibition calcaire des canalisations métalliques neuves, des phénomènes de corrosion électrolytiques ponctuels peuvent se produire.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
pH Moyenne : 7,72	7,7	7,7	7,75	7,75	7,7	7,8	7,65	7,8	7,8	7,75	7,6	7,6
Température en °C 123 relevés Moyenne : 9,34	9,04	8,82	8,66	8,81	8,94	9,07	9,59	9,87	9,98	10,03	9,87	9,55
Conductivité en µS.cm ⁻¹ à 20°C Moyenne : 277	285	286	280	285	287	277	270	261	268	268	279	278
D.H.T. en °F Moyenne : 14,9	15,8	15,6	15,3	15,2	14,9	14,7	14,15	13,9	14,0	14,0	15,2	15,4
T.A.C. en °F Moyenne : 8,97	8,82	9,05	9,15	9,02	9,11	9,18	9,15	8,82	8,9	8,89	8,8	8,75
Bicarbonates en mg/l HCO ₃ ⁻ Moyenne : 109,5	108	110	112	110	111	108	108	112	109	108,5	107	107
Sulfates en mg/l de SO ₄ ⁼ Moyenne : 55,5	65	60	58	57	55	53	48	49	53	54	54	57
Chlorures en mg/l de Cl Moyenne : 2,5	2,7	2,6	2,6	3,2	3,1	2,7	2,2	2,1	2,65	2,0	2,1	2,1
Nitrates en mg/l de NO ₃ ⁻ Moyenne : 2,2	2,1	2,2	2,55	2,4	2,3	2,1	2,2	2,35	2,25	2,0	1,9	1,94

Tableau 47 - Moyenne mensuelle des principales caractéristiques physico-chimiques des eaux du puits 1, au cours des années 1978 - 1979 et 1980 (92 analyses).-

La présence de fer à des teneurs non négligeables dans l'eau du puits 1 est probablement liée à ce caractère corrosif, fugitif ; elle est apparue en novembre 1972 après une longue période de plusieurs années pendant laquelle les analyses n'ont pu révéler des taux de fer supérieurs au seuil analytique de 0,015 mg/l. Le fer est réapparu sous forme de traces au cours des hivers 1974, 1976 et 1979 (0,1 à 0,3 mg/l) et a disparu au cours des étés des mêmes années avec les hautes eaux. En dehors de l'augmentation de la turbidité, la présence du fer ne s'accompagne pas d'autre changement conséquent dans la qualité de l'eau. Il arrive que dans les distributions d'eau, on voit apparaître épisodiquement, de petites quantités de fer ; elles ne justifient ni traitement de deferrisation, ni intervention contre la corrosion, étant donné que les taux enregistrés ne présentent pas un caractère toxique ou définitif.

Stabilité de la minéralisation et variations saisonnières,

Il est remarquable de constater que la minéralisation des eaux du puits 1, notée sur les bulletins d'analyses, effectuées lors des premiers pompages, est comparable à celle que l'on peut actuellement enregistrer, à la même saison, après plus de 10 ans d'exploitation de la nappe (Tableau 46).

Date	Conductivité μS.cm ⁻¹ à 20°C	D.H.T. Degrés français	T.A.C. mg/l	SO ₄ ⁼ mg/l	Date	Conductivité μS.cm ⁻¹ à 20°C	D.H.T. Degrés français	T.A.C. mg/l	SO ₄ ⁼ mg/l
22 mai 65	278	14,5	9,75	48	16 mai 78	279	15,0	9,85	52
24 mai 66	263	14,5	9,5	48	13 juin 78	262	14,8	9,65	48
5 juil. 67	260	14,6	9,0	47	20 juin 78	260	14,4	9,3	46
10 oct. 67	262	14,0	8,9	48	18 oct. 78	267	14,0	9,45	46,5
29 mars 68	272	15,6	9,4	55	14 mars 78	272	15,6	9,6	54

Tableau 46 - Comparaison des principales caractéristiques chimiques des eaux du puits de Jouchy de 1965 à 1978.-

Les caractéristiques hydrochimiques des eaux du puits 1 de Jouchy sont donc très stables ; on enregistre toutefois des variations saisonnières de l'ensemble de la minéralisation, qui portent plus particulièrement sur le taux du sulfate de calcium et par conséquent sur le degré hydrotimétrique et la conductivité (Figures 63 - 64, Tableau 47).

Les minéralisations les plus accentuées sont enregistrées en hiver et au printemps (novembre à mai), les moins accentuées, au cours des mois d'été (juin à octobre). Ceci nous conduit à faire une constatation importante : les eaux du puits présentent des variations hydrochimiques saisonnières comparables à celles des eaux de la Romanche (Figure 57, page 163).

Ainsi, au printemps, à la diminution spectaculaire de la minéralisation des eaux de la rivière, due à l'apport des eaux de fonte des neiges, correspond progressivement une diminution de la minéralisation des eaux du puits. De la même façon, lors de la décrue automnale et hivernale de la Romanche, l'augmentation de la minéralisation des eaux de la rivière se traduit par une augmentation progressive de la minéralisation des eaux du puits, plusieurs semaines plus tard. Les variations, que subit la minéralisation des eaux de la Romanche, sont transmises avec retard et atténuation à celles du puits. La nappe est le siège d'une régulation dans le temps et dans l'espace, dont nous examinerons les processus et les conséquences dans les chapitres suivants.

L'établissement des bilans hydrogéologiques nous a permis de conclure que les infiltrations en provenance de la Romanche constituaient le terme le plus important du point de vue quantitatif. Elles sont également les plus influentes sur les caractéristiques et la minéralisation totale des eaux du puits. Ceci confirme, s'il le fallait encore, l'influence favorable de ces infiltrations pour le maintien des qualités des eaux du puits, assurées par le renouvellement des eaux de la nappe à partir de celles de la rivière. Ceci confirme également que, dans les conditions d'alimentation et d'exploitation actuelles, la vulnérabilité de la nappe est liée à celle de la rivière.

II-3 - DATATION DES EAUX DE LA NAPPE A L'AIDE D'UN ISOTOPE NATUREL,
LE TRITIUM

Afin de confirmer que les variations saisonnières hydrochimiques constatées intéressent l'ensemble de l'aquifère, une datation des eaux de la nappe était nécessaire.

II-3-1 - Le tritium dans les eaux naturelles

(^3_1H , période : 12,26 ans)

A la suite des travaux de F. BEGEMANN et W.F. LIBBY (1957), E. ERIKSSON (1958), K.O. MÜNNICK et Coll. (1967), le tritium s'est révélé être un des meilleurs traceurs spécifiques connus en hydrologie. Faisant partie intégrante de la molécule d'eau, il se déplace, en effet, à la même vitesse que l'ensemble de l'aquifère. De plus, sa production naturelle est, depuis les essais thermonucléaires mondiaux, masquée par sa production artificielle. On a pu enregistrer de très fortes augmentations d'activité de cet isotope, à la suite des explosions à l'air libre, lors des essais nucléaires mondiaux, entre les années 1958 et 1963.

A la fin des essais nucléaires de 1963 et à la suite des accords soviéto-américains pour ne procéder qu'à des essais souterrains, quelques pics d'activité dus aux essais chinois et français ont encore été enregistrés dans l'atmosphère.

On assiste donc, actuellement, dans les eaux de pluie, à une décroissance de type climatique, qui s'est superposée à la décroissance radio-active normale du tritium.

Nous savons, grâce aux travaux de S. et J. SARROT-REYNAULD (1977) que les eaux de la Romanche ont des teneurs en tritium comparables à celles des eaux de précipitations dans les Alpes, comme le montre le *tableau 48*.

Taux de tritium en U.T. *		
Années	Précipitations à Thonon (Haute-Savoie) (Moyenne annuelle)	Eaux de la Romanche
1970	189	
1971	227	216 le 6.09.71
1972	144	147 le 30.05.72
1973	126	89 le 5.06.73
1974	113	104 le 7.06.74
1975	153	125 le 6/06/75
1976	124	93 le 9.06.76
1977	95	

* une unité tritium (U.T.) correspond à un atome de tritium pour 10^{18} atomes de l'hydrogène normal.

Tableau 48 - Comparaison des taux du tritium dans les eaux de précipitations à Thonon (Haute-Savoie), dans les eaux de la Romanche au cours des années 1970 à 1977.-

II-3-2 - Examen des résultats des analyses du tritium effectuées sur les eaux souterraines de la nappe de Jouchy

Des échantillons d'eau ont été prélevés avant et après les premières crues de printemps (février à juin 1978) dans la Romanche, dans le ruisseau de Laffrey bordant le champ de captage, dans le puits 1 actuellement exploité, dans des piézomètres d'observation.

Rappelons que le captage (puits 1 de Jouchy) est profond de 30 m et crépiné de - 14 à - 30 m ; que le piézomètre P VII 2, situé dans la zone d'infiltration préférentielle des eaux de la rivière, en amont de la plaine de Jouchy, est profond de 9,5 m ; que le piézomètre P IV 1, situé en bordure des rives face au puits, est profond de 8 m ; que le sondage F 12 permet d'effectuer des prélèvements par pompage à différentes profondeurs dans les alluvions grâce à ses zones crépinées :

- . de - 4,5 à - 30,5 m
- . de - 40,0 à - 45,0 m
- . de - 49,0 à - 54,0 m de profondeur.

L'examen des résultats d'analyses (1) (*Tableau 49*) permet de faire une première constatation ; elle concerne la datation des eaux de la nappe. On ne peut noter la présence d'eaux souterraines très anciennes, antérieure aux essais nucléaires mondiaux, dont le taux de tritium serait nul.

Dates	28.II.78	7.III.78	18.IV.78	16.V.78	30.V.78	6.VI.78	13.VI.78
Tritium (^3H) en unités U.T.							
Romanches	97 ± 7	96 ± 7		84 ± 6	83 ± 6	82 ± 6	61 ± 5
Puits 1		100 ± 7	97 ± 7				82 ± 6
Piézomètres P VII 2							59 ± 5
P IV 1							72 ± 5
Sondage F 12							
- 4,5 à - 30,5 m						96 ± 7	
- 40 à - 45 m						103 ± 7	
- 49 à - 54 m						115 ± 8	
Ruisseau de Laffrey			129 ± 9				

Tableau 49 - Résultats des analyses du tritium des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy.-

(1) Les analyses de tritium ont été effectuées au laboratoire du Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les-Bains (Haute-Savoie) grâce aux crédits alloués par le Ministère de la Culture et de l'Environnement, en 1978.-

On ne note pas, non plus, la présence d'eaux datant de plus de 5 années dont le taux de tritium serait proche ou supérieur à 150 U.T., si l'on se reporte aux mesures déjà effectuées dans la Romanche depuis 1971 et dans les eaux de pluie à Thonon.

Les eaux de la nappe sont donc des eaux récentes. La nappe constitue un ensemble homogène dont toutes les zones (zones géographiques, zones profondes ou superficielles) sont concernées par les mouvements hydrodynamiques et par conséquent par le renouvellement des eaux.

Il est difficile de conclure sur l'origine des eaux prélevées dans la nappe, au seul examen de ces quelques analyses ; on peut faire cependant quelques remarques :

- 1) du mois de mars au mois de juin 1978, les eaux de la Romanche, prélevées face à Jouchy présentent des taux de tritium diminuant de 97 ± 7 à 61 ± 5 U.T. Les hautes eaux de la rivière (mai-juin 1978) présentent des taux de tritium plus faibles de quelques dizaines d'unités que les basses eaux (février-mars 1978). Cette diminution est vraisemblablement liée à l'arrivée dans la rivière des eaux, plus récentes, de la fonte des neiges de l'hiver 1977-78 et des pluies du printemps, qui grossissent les débits de la rivière.
- 2) les taux de tritium des eaux du captage suivent une évolution comparable à celle des eaux de la Romanche. On enregistre également dans le puits 1 une diminution des taux, du mois de mars (100 U.T.) ou avril (97 U.T.) au mois de juin (82 U.T.). Le 18 avril et le 13 juin 1978, les taux de tritium des eaux du puits sont tout à fait comparables à ceux enregistrés dans la rivière quelques semaines auparavant (Tableau 50).

Dates	28.2.78	7.3.78	18.4.78	16.5.78	30.5.78	6.6.78	13.6.78
Taux de H* en U.T.							
Romanche	97	96		84	83	82	61
Puits 1 (Jouchy)		100	97				82

Tableau 49 bis - Evolution des taux du tritium des eaux de la Romanche et du puits 1, en 1978.-

Ceci s'explique, si, comme le montrent aussi les variations saisonnières de la minéralisation (Figure 57, page 163) les eaux infiltrées en provenance de la Romanche, à l'amont de la plaine, les plus abondantes, parviennent dans la zone du captage avec quelques semaines de retard, ou encore si, elles se mélangent avec les eaux des apports souterrains (de la nappe de l'Ile Falcon) elles-mêmes en provenance de la rivière.

- 3) A une date donnée, on enregistre des différences des taux du tritium des eaux, suivant les points de prélèvements.

. le 6 juin 1978

dans le sondage F 12, les teneurs en tritium augmentent légèrement avec la profondeur. Comme l'étude hydrogéologique nous l'a montré, la granulométrie et la perméabilité des couches d'alluvions diminuent avec la profondeur. Il n'est donc pas étonnant que les eaux souterraines, les plus profondes, mettent plus de temps à se renouveler et que l'on observe un léger gradient dans les teneurs du tritium depuis les zones les plus superficielles (- 4,5 à - 30,5 m) jusqu'aux zones les plus profondes (- 49 à - 54 m). Mais on peut constater que les variations des teneurs en tritium sont faibles (5 à 6 U.T. pour 10 mètres de profondeur en moyenne) ; ceci confirme bien qu'il n'existe pas de zones profondes de la nappe où l'écoulement se ferait mal ou très lentement.

. le 13 juin 1978

le taux de tritium des eaux du piézomètre P VII 2 (59 U.T.) est tout à fait comparable à celui des eaux de la Romanche (61 U.T.). Ceci n'est pas étonnant, puisque ce piézomètre est situé dans la zone d'infiltration préférentielle des eaux de la rivière. Le taux de tritium des eaux du piézomètre P IV 1, situé en bordure des rives, est légèrement plus élevé (72 U.T.). On pourrait supposer, que le taux du tritium de la Romanche, diminuant progressivement entre le 6 juin (82 U.T.) et le 13 juin (61 U.T.), les eaux du piézomètre P IV 1 proviennent d'infiltrations de la rivière réalisées à l'amont de la plaine, entre ces deux dates et parvenues en P IV 1, le 13.

Mais il est plus vraisemblable que, comme le montrent les enregistrements des résistivités de cette époque (chapitre III-1-4-2), les eaux de ce piézomètre sont issues d'un mélange des eaux de la nappe qui circulent depuis les zones d'infiltration préférentielle, de l'amont vers l'aval, d'une part, et des eaux qui s'infiltrent à travers les rives au droit du piézomètre, d'autre part.

Ceci explique la valeur du taux de tritium de 72 U.T., intermédiaire entre celle du puits (82 U.T.) situé dans la même zone géographique et celle de la Romanche (61 U.T.), le même jour. A cette profondeur et à cette date, les eaux du piézomètre P IV 1, proviendraient, pour une part, des eaux déjà infiltrées dans la nappe et, pour une autre part égale, des nouvelles infiltrations à travers les rives.

- 4) Le taux du tritium des eaux du ruisseau de Laffrey, prélevées le 18 avril 1978, est plus élevé que celui des eaux de la Romanche prélevées à la même époque. Il se rapproche de celui des eaux de pluies des années 1973 ou 1976. Ceci s'explique sans doute parce que les eaux de pluies les plus récentes se mélangent dans les lacs à des eaux, plus anciennes, y ayant séjourné ; il en résulte que, les eaux du ruisseau sont plus anciennes que celles de la nappe. On ne retrouve pas dans le puits des teneurs en tritium de cet ordre (1).

Comme nous le verrons, au chapitre IV, les eaux du ruisseau, qui se sont infiltrées dans la nappe, au cours du printemps 1978, ne parviennent pas jusqu'aux zones crépinées du puits.

En résumé, ces analyses confirment que les eaux de la nappe, même les plus profondes (- 50 m) sont des eaux récentes. Les eaux infiltrées, en provenance de la Romanche parviennent dans la zone du captage quelques semaines après leur infiltration.

Les réserves de la nappe les plus profondes sont les plus anciennes, mais la nappe peut être considérée comme un ensemble homogène, concerné par les mêmes mouvements hydrodynamiques.

(1) Les piézomètres F 12, P IV 1 et P VII 2, sont situés à l'amont du ruisseau de Laffrey et ne peuvent donc pas être influencés par lui.-

III - ETUDE DES PROCESSUS HYDROCHIMIQUES MIS EN JEU

L'accentuation de la minéralisation des eaux au cours du cheminement souterrain est le phénomène hydrochimique le plus souvent constaté dans les nappes souterraines (H. SCHOELLER - 1948, M. SCHOELLER - 1963 - 1972 - 1975..., J. BARDY - 1977, etc.). Il concerne un ou plusieurs éléments chimiques, ou l'ensemble de la minéralisation. Il peut être accompagné ou non d'autres phénomènes modificateurs comme l'échange des bases, la réduction des sels oxydés...

En ce qui concerne la nappe de Jouchy, nous avons vu que le phénomène de concentration des eaux est le plus évident ; si l'augmentation de la minéralisation des eaux après leur infiltration se traduit essentiellement par une "accentuation" des teneurs en éléments chimiques existant dans les eaux de la rivière (Figure 53 - page 159), sans apport d'éléments nouveaux, elle n'a pas la même amplitude et la même vitesse suivant l'élément considéré (bicarbonates, sulfates, calcium, magnésium, chlorures, etc...). C'est par une étude approfondie des processus hydrochimiques mis en jeu, que nous essayerons d'expliquer les différences constatées et de choisir l'élément naturel le plus représentatif du phénomène modificateur général.

Plusieurs hypothèses concernant les processus hydrochimiques de l'accentuation de la minéralisation des eaux, après leur infiltration dans la nappe, peuvent être émises.

PREMIERE HYPOTHESE (Chapitre III-1-1)

La concentration des eaux se fait par évaporation des eaux après leur infiltration.

DEUXIEME HYPOTHESE (Chapitre III-1-2)

L'acquisition de la minéralisation des eaux se fait au contact des sables alluvionnaires qui sont susceptibles de libérer leurs sels minéraux, par attaque, par dissolution, au cours de réactions biochimiques, etc.

TROISIEME HYPOTHESE (Chapitre III-1-3)

L'augmentation de la minéralisation est le résultat du mélange des eaux infiltrées avec celles, plus minéralisées des réserves de la nappe ou des apports souterrains.

QUATRIEME HYPOTHESE (Chapitre III-1-4)

Elle concerne le siège de la concentration : l'acquisition de la minéralisation se fait à l'occasion de l'infiltration des eaux dans certaines couches alluvionnaires (zone non saturée ou zone profonde) au cours des mouvements hydrodynamiques de la nappe.

J'examinerai, dans ce chapitre, chacune des hypothèses et par une interprétation synthétique, j'essayerai d'expliquer l'ensemble des phénomènes.

==:==:==:==:==

III-1 - ETUDE GENERALE DES PHENOMENES D'"ACCENTUATION" DE LA MINERALISATION DES EAUX DE LA NAPPE

III-1-1 - Première hypothèse : concentration des eaux infiltrées par évaporation

L'évaporation peut jouer un rôle dans la concentration des eaux infiltrées à deux niveaux :

- . au niveau de la zone saturée de la nappe,
- . au niveau de la zone non saturée de la nappe.

Au niveau de la zone saturée de la nappe :

Comme je l'ai dit en étudiant les facteurs climatiques (chapitre II-2 - 1ère partie), la zone saturée de la nappe de Jouchy est à l'abri de toute évaporation de type climatérique et par conséquent à l'abri de toute concentration, telle qu'on peut en constater dans les régions au climat aride.

Au niveau de la zone non saturée de la nappe :

En raison de leur agressivité, les eaux des précipitations, riches en CO₂, sont susceptibles de mettre en solution des sels minéraux au cours de leur infiltration ; l'évapotranspiration peut concentrer encore ces solutions. Cet enrichissement des eaux de pluies dans les premiers mètres de leur infiltration peut jouer un rôle déterminant dans les bilans hydrochimiques des nappes souterraines, dont l'alimentation est essentiellement due aux apports des précipitations directes. Nous avons vu, qu'en ce qui concerne la nappe de Jouchy, l'apport direct des pluies (précipitation efficace) est négligeable par rapport aux autres termes du bilan ; en moyenne, l'apport des pluies représente, annuellement, 1 % des infiltrations nouvelles dans la plaine de Jouchy. Cependant, de nombreuses expériences, effectuées in situ ou sur des modèles au laboratoire, ont mis en évidence que la partie supérieure de la zone non saturée, passe progressivement de la fonction d'accumulation à la fonction de transmission. Des précipitations discontinues, provoquent comme des "coups de boutoir", sensibles sur l'avancée du front d'humidité, quand la teneur en eau est faible ; quand l'humidité devient élevée, tout se passe comme s'il s'agissait d'une alimentation continue. Dans la plaine de Jouchy, pour saturer la zone non saturée, qui varie de 2 à 4 m d'épaisseur suivant les saisons et les points considérés (Figure 65), des pluies continues très importantes, sont nécessaires. Ainsi, considérons une surface de 1 m² de la plaine où l'épaisseur de la zone non saturée varie de 2 à 4 m.

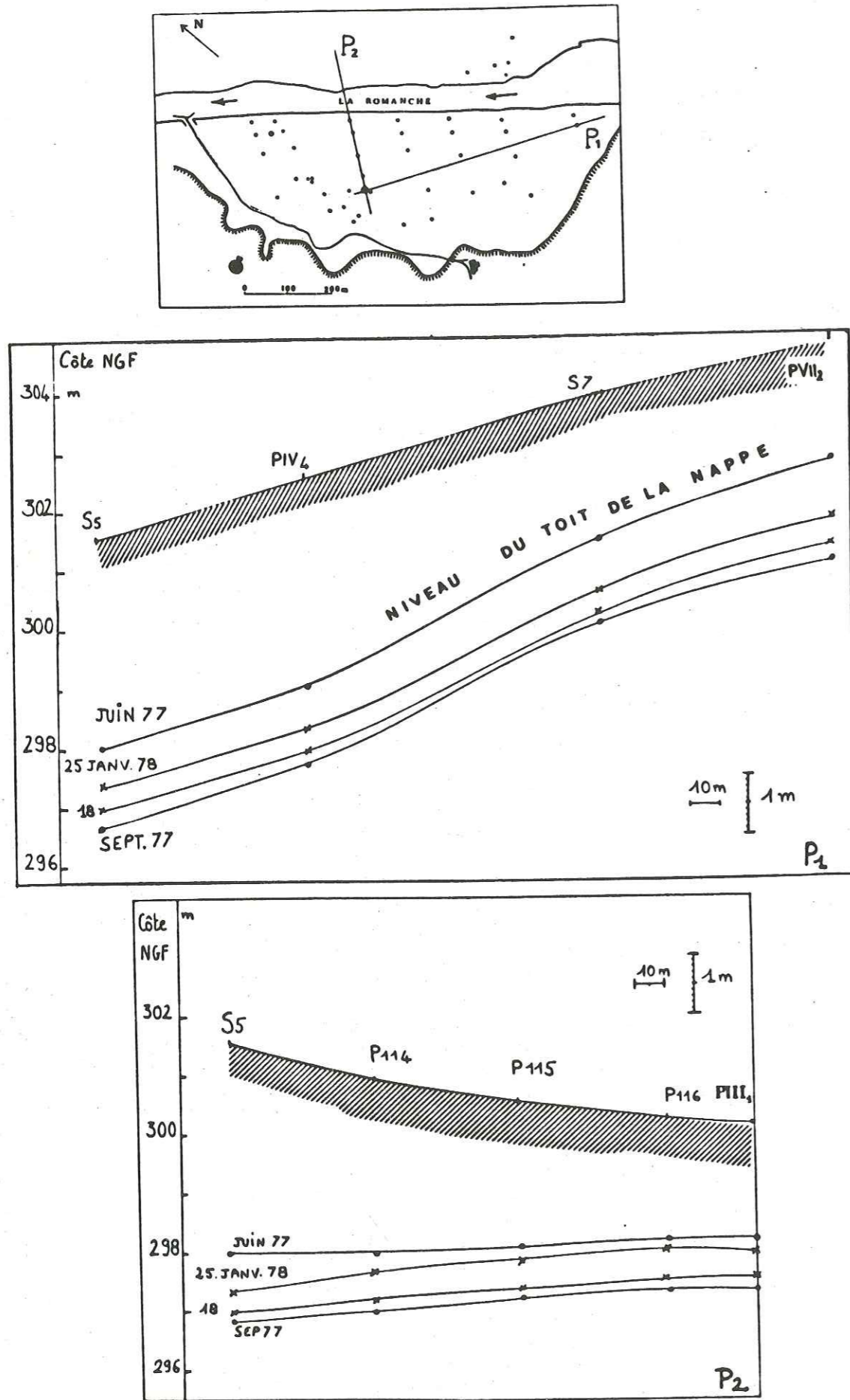


Figure 65 - Schémas représentatifs des zones non saturées de la plaine de Jouchy, selon deux profils P1 et P2.-

En hiver, alors que l'humidité de l'air est proche de 100 % et que la température de l'air est inférieure à 5°C, l'évapotranspiration est faible et l'épaisseur de la zone non saturée est maximum (4 m). Compte tenu du coefficient d'emménagement de 15 %, 0,6 m³ d'eau seront nécessaires pour saturer les 4 m³ d'alluvions, soit 600 l/m² ou 600 mm de pluies continues. De telles circonstances ne se sont pas produites au cours des années 1978 à 1981. En été, en automne ou au printemps, bien que l'épaisseur de la zone non saturée soit réduite, l'évapotranspiration n'est plus négligeable (voir tableau 15 - page 64) et les possibilités de concentration des eaux dans la couche alluvionnaire superficielle ne sont plus improbables.

Les eaux des précipitations, quand elles peuvent s'infiltrer jusqu'à la nappe, peuvent donc contribuer à augmenter la minéralisation des eaux souterraines. Les eaux qui s'infiltrent dans le lit mineur ou les berges de la Romanche, peuvent elles aussi, faire l'objet d'une concentration quand la rivière se retire et que l'évapotranspiration est effective (à la fin de l'été, en août ou septembre, notamment). Les sels minéraux des eaux infiltrées peuvent ainsi précipiter dans les sables alluvionnaires de la zone non saturée et être remis en solution lors de l'infiltration suivante. On ne saurait négliger ces apports du point de vue qualitatif. En effet, les expériences que j'ai pu effectuer au laboratoire (voir chapitre III-1-2) ont montré qu'au cours d'infiltrations successives, les eaux pouvaient s'enrichir d'autant plus que la période séparant deux percolations, était longue. A l'occasion de pluies séparées par des périodes sèches, ou à l'occasion des premières infiltrations du printemps, les eaux "concentrées" qui rejoignent la nappe, peuvent contribuer à augmenter sensiblement la minéralisation des eaux souterraines.

III-1-2 - Deuxième hypothèse : acquisition de la minéralisation des eaux de la nappe au contact des sables alluvionnaires - Etude générale du phénomène au laboratoire : essais de percolation

Le principe des essais consiste à faire s'écouler gravitairement de l'eau à travers une colonne de sables et à analyser l'eau recueillie.

Protocole : Les essais ont été effectués sur des sables recueillis en janvier 1977, en bordure des rives de la Romanche (rive gauche, face à Jouchy). Ces sables ont fait l'objet de l'analyse granulométrique dont les résultats sont transcrits dans le chapitre I-5-2ème partie).

Pour les faire sécher, on les a étalés sur du papier filtre à la température du laboratoire. Les tubes à essais utilisés sont en plastique (P.V.C.). Ils ont 65 mm de diamètre intérieur et 370 mm de hauteur. Ils sont maintenus verticalement par des pinces sur une potence de laboratoire. Ils sont munis à l'extrémité inférieure d'une gaze hydrophile, lavée à l'eau distillée puis séchée ; cette gaze est destinée à retenir les sables qui y sont introduits. Les tubes contiennent 1,2 litre de sables (soit environ 1 600 g).

J'ai fait percoler, à travers ces échantillons de sables, de l'eau (eau initiale) de manière à ce que la quantité d'eau surnageante soit constante au cours de l'expérience et ne dépasse pas 1 cm de hauteur ; tous les essais ont été faits à la pression et à la température du laboratoire (pression atmosphérique à 21°C ± 1). Les eaux initiales sont des eaux de pluies, des eaux de rivières ou des eaux de la nappe, conservées à la température du laboratoire.

Par un essai préalable, avec une même eau initiale, j'ai vérifié que les résultats obtenus avec les sables recueillis en janvier 1977, étaient comparables à ceux obtenus avec des sables recueillis en juin 1977.

Première expérience :

Un litre de chacune des eaux initiales provenant de 4 origines différentes (eaux de pluie, de la Romanche, du ruisseau du Lac Mort, du puits 1 de Jouchy) est versé sur une même quantité de sables secs (1,2 l) contenue dans 4 tubes à essais. Dans les conditions de l'expérience précédemment décrites, 500 ml d'eau initiale sont nécessaires pour "mouiller" les sables ; on recueille donc 500 ml d'eau gravitaire qui s'écoulent à l'extrémité inférieure de chaque tube et sur lesquels on effectue des analyses physico-chimiques. On constate, que l'eau recueillie est toujours plus minéralisée que l'eau initiale. L'augmentation de la minéralisation totale est liée à celles de tous les éléments chimiques analysés. On enregistre, en effet, une augmentation de la concentration des cations (calcium, magnésium) et des anions (bicarbonates, sulfates, nitrates, chlorures).

EAU	Eau de pluie (Jouchy)		Romanche		Ruisseau du Lac Mort		Puits 1 Jouchy	
	initiale	recueillie	initiale	recueillie	initiale	recueillie	initiale	recueillie
Conductivité $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 20°C	30	216	185	246	202	280	285	320
pH	5,6	7,5	8,05	7,5	7,35	7,5	7,65	7,85
D.H.T. en ° f.	0,8	11,0	10,2	13,4	10,7	14,2	15,3	17,8
T.A.C. en ° f.	0,5	5,5	7,5	7,9	9,35	9,7	9,3	9,7
Bicarbonates mg/l H CO_3^- ..	6,0	67	91,5	96	114	118	113	118
Sulfates mg/l $\text{SO}_4^{=}$	3,5	47	25	53	20	47	54	72
Nitrates mg/l NO_3^-	1,0	4,0	1,2	3,1	1,5	3,4	1,8	3,5
Chlorures mg/l Cl^-	0,5	2,5	1,0	2,1	1,6	3,8	2,2	3,8
Calcium mg/l Ca^{++}	2	35,5	32	42	33	44	48	52
Magnésium mg/l Mg^{++}	0,7	5,3	5,3	7,3	6,1	7,9	8,3	10,8

Tableau 50 - Résultats des analyses des eaux recueillies au cours des essais de percolation, sur les sables alluvionnaires.-

Comme nous pouvions nous y attendre, les résultats obtenus diffèrent selon l'origine des eaux initiales et dépendent des caractéristiques physico-chimiques de ces dernières.

Ainsi, l'agressivité de l'eau de pluie est très favorable à l'attaque et la mise en solution des bicarbonates et des sulfates alcalino-terreux. Le pH des eaux recueillies tend vers le pH d'équilibre (le pH de l'eau de la Romanche, plutôt incrustante, s'abaisse, le pH des eaux du puits ou du ruisseau du Lac Mort, plutôt agressives, s'élève).

Mais, les conditions d'expérience au laboratoire (taux des gaz dissous, température, pression, etc.) étant très différentes de celles observées dans la nappe, nous envisagerons une autre méthode d'étude des équilibres calco-carboniques dans le chapitre III-2-1, fondée sur l'examen des résultats d'analyses des eaux de la nappe.

x
x x
x x

La mise en solution de certains ions participe plus largement que d'autres, à l'augmentation de la minéralisation totale des eaux, au contact des sables alluvionnaires.

Pour mettre en évidence ce phénomène, j'ai utilisé la méthode américaine (in J. RODIER 1978) selon laquelle, la conductivité théorique totale d'une eau, peut être reconstituée à partir de l'addition des conductivités théoriques attribuables à chacun des ions en présence. Ces dernières sont calculées à partir des conductivités spécifiques des ions, exprimées en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ par me/l ou mg/l, à une température donnée.

J'ai ensuite calculé le pourcentage d'augmentation attribuable à chacun des ions, dans l'augmentation de la conductivité théorique. Ainsi, en examinant les résultats de l'essai effectué avec l'eau de la Romanche, comme eau initiale (Tableau 51) on vérifie que l'augmentation de la conductivité totale théorique est imputable pour 82 % à celle de la conductivité théorique attribuable aux ions sulfates (51 %) et calcium (31 %).

Les mêmes conclusions peuvent être émises en ce qui concerne les essais effectués avec les trois autres eaux initiales (eau de pluie, eau du ruisseau du Lac Mort, eau du puits 1).

	Conductivité spécifique $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}/\text{mg/l}$ à 20°C	Conductivité théorique G des ions		ΔG $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	ΔG théorique des ions ΔG théorique totale en %
		eau initiale	eau recueillie		
Bicarbonates HCO_3^-	0,645	59	62	3	3,9
Sulfates $\text{SO}_4^{=}$	1,39	34,7	73,6	38,9	51
Nitrates NO_3^-	1,037	1,24	3,2	1,96	2,6
Chlorures Cl^-	1,93	1,93	4,05	2,12	2,8
Calcium Ca^{++}	2,345	75	98,5	23,5	31
Magnésium Mg^{++}	3,445	18,3	25	6,7	8,8
Conductivité théorique		190	266	76	
Conductivité mesurée (sans dilution)		185	256	71	

Tableau 51 - Calcul des conductivités théoriques des eaux recueillies au cours des essais de percolation sur les sables alluvionnaires.--

Dans une autre série d'expériences, on a recueilli, au fur et à mesure de l'écoulement, à l'extrémité inférieure du tube, sans s'interrompre, des fractions de 50 ml d'eau gravitaire.

J'ai effectué des mesures ou des analyses sur chaque fraction recueillie et j'ai cessé d'ajouter l'eau initiale, au sommet du tube, quand les caractéristiques physico-chimiques étudiées devenaient constantes. On peut constater, alors, que la quantité d'eau recueillie est égale à la quantité d'eau initiale diminuée de celle nécessaire à "mouiller" les sables (soit 500 ml pour les sables séchés au laboratoire).

. Deuxième expérience : (figure 66)

J'ai fait s'écouler des eaux de la Romanche prélevées à trois dates différentes, à travers la même quantité de sables (1,2 l) contenue dans trois tubes différents A, B et C.

Sur le tube A,

de l'eau de la Romanche prélevée le 12.VI.77, dont la conductivité s'élève à $150 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 20°C,

Sur le tube B,

de l'eau de la Romanche prélevée le 28.IX.78, dont la conductivité s'élève à $185 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 20°C,

Sur le tube C,

de l'eau de la Romanche, prélevée le 20.I.77, dont la conductivité s'élève à $235 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 20°C.

J'ai ensuite effectué une mesure de conductivité sur chaque fraction de 50 ml d'eau recueillie. J'ai porté sur les figures, en abscisse, les résultats obtenus pour chacune des fractions recueillies dont le numéro d'ordre a été porté en ordonnée.

On constate que, pour chacun des trois essais, ce sont les premières fractions de 50 ml d'eau recueillie qui présentent les conductivités (donc les minéralisations totales) les plus élevées. Au fur et à mesure de l'expérience, la conductivité diminue et tend vers celle de l'eau initiale sans l'atteindre.

Pour le même rang des fractions recueillies (1e, 2e, 3e, etc.) la conductivité des eaux est d'autant plus élevée que celle de l'eau initiale l'est.

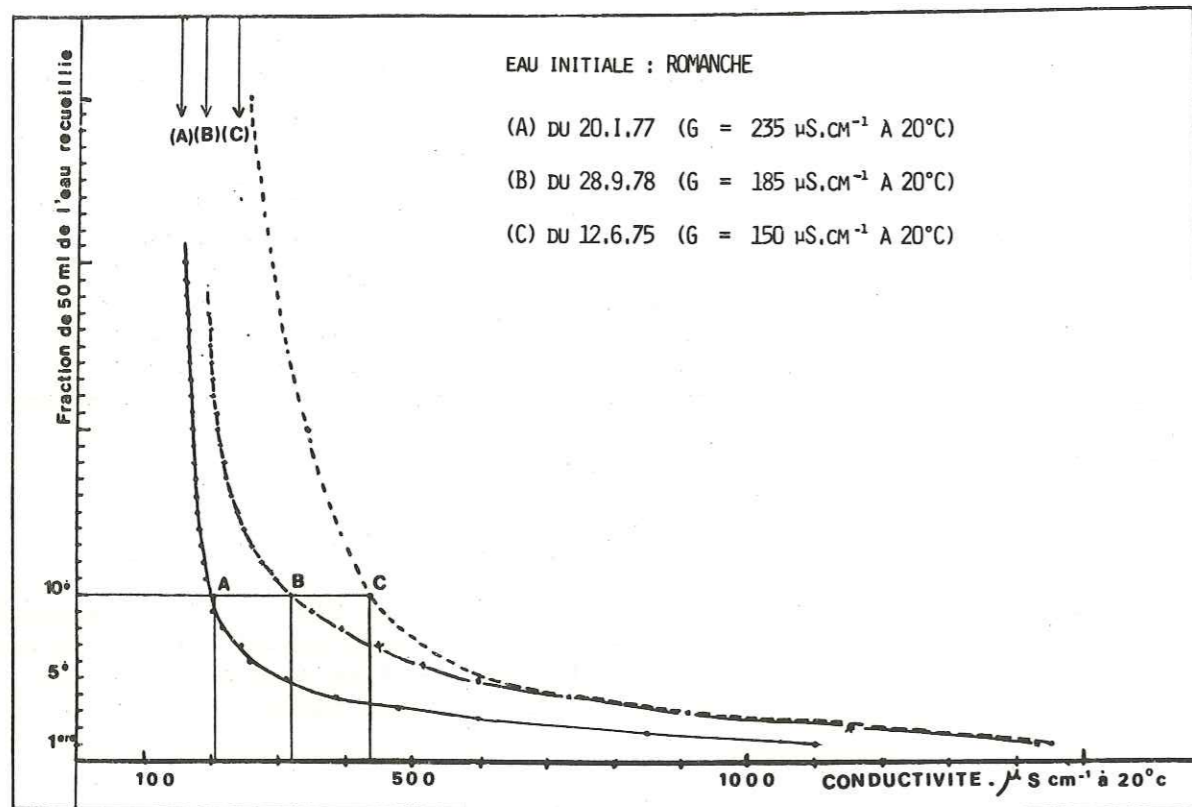


Figure 66

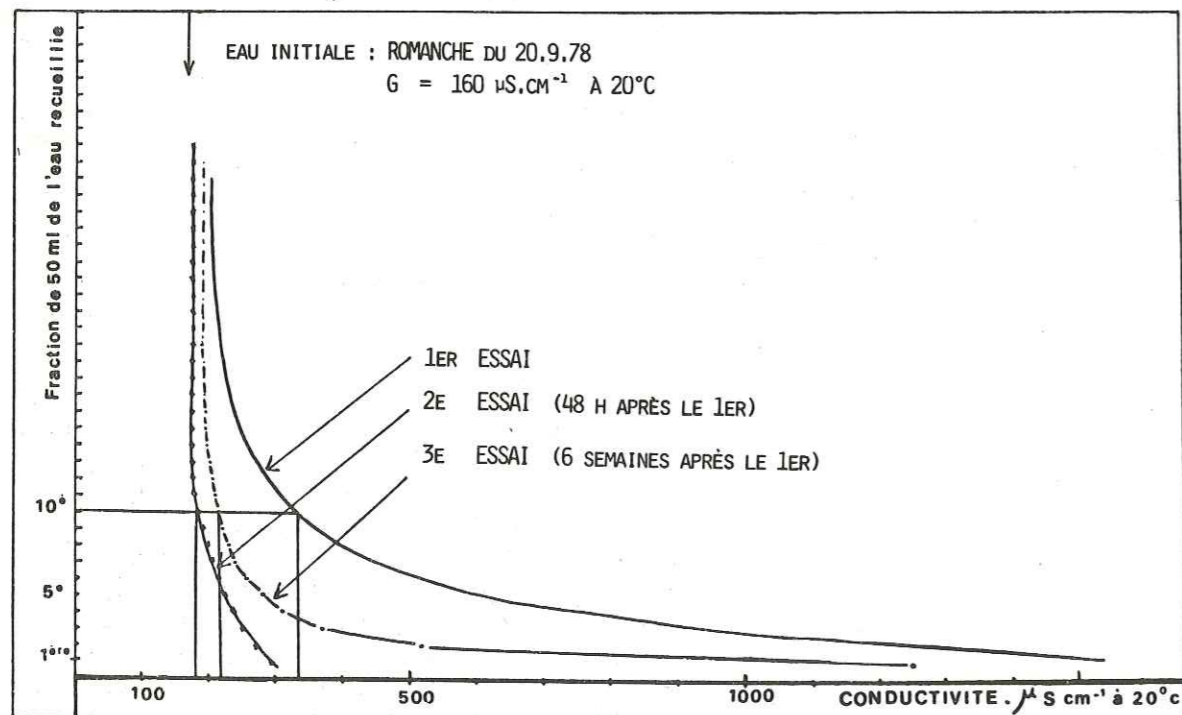


Figure 67

Conductivité des fractions d'eau recueillies au cours des expériences de percolation sur les sables alluvionnaires.-

Figure 66 : avec des eaux initiales différentes (deuxième expérience)
Figure 67 : avec une même eau initiale, plusieurs essais de suite sur les mêmes sables (troisième expérience).-

Ainsi par exemple, les 10e fractions d'eau recueillie, à l'extrémité des tubes A, B et C, ont des conductivités d'autant plus élevées que l'eau initiale est minéralisée (Tableau 52).

Tube	Conductivité de l'eau initiale en $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C	Conductivité des 10e fractions recueillies en $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C
A	150	205
B	185	320
C	235	435

Tableau 52 - Conductivité des eaux initiales et des eaux recueillies au cours de la deuxième expérience de percolation sur les sables alluvionnaires.-

Troisième expérience : (Figure 67)

J'ai fait passer sur les sables contenus dans un tube à essais, la même eau initiale, plusieurs fois, en respectant un temps de pause entre deux essais. Deux litres d'eau sont ainsi versés à chaque essai. Pour cette expérience, j'ai utilisé l'eau de la Romanche prélevée le 20 septembre 1978, dont la conductivité s'élève à 160 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C. J'ai vérifié avant chaque essai, que la conductivité de cette eau était restée constante dans les conditions du laboratoire.

Au cours du premier essai (1er jour), 500 ml d'eau initiale sont nécessaires pour "mouiller" les sables et pour que l'on puisse recueillir la première fraction de 50 ml. Comme dans la deuxième expérience, la conductivité des eaux des fractions de 50 ml, diminue au fur et à mesure de l'essai. Quand les deux litres d'eau sont versés, la conductivité de l'eau recueillie, devenue constante, s'élève à 190 $\mu\text{S.cm}^{-1}$.

Le tube étant resté en place, à la température du laboratoire j'ai renouvelé l'expérience 48 h après, avec la même eau initiale (Romanche du 20.IX.78). On constate que 360 ml d'eau sont nécessaires pour "mouiller" les sables et pour recueillir la première fraction d'eau gravitaire.

Celle-ci présente une conductivité ($300 \mu\text{S.cm}^{-1}$) plus élevée que celle de l'eau initiale ($160 \mu\text{S.cm}^{-1}$) mais nettement moins élevée que celle de la première fraction de 50 ml du premier jour ($1\ 530 \mu\text{S.cm}^{-1}$).

- Le tube étant laissé en place, j'ai renouvelé une troisième fois l'expérience, 6 semaines après le premier jour. On constate que 460 ml d'eau initiale sont alors nécessaires pour "mouiller" les sables et pour recueillir la première fraction d'eau gravitaire.

Pour un même rang de récolte des fractions de 50 ml d'eau gravitaire, la conductivité des eaux (donc leur minéralisation) est d'autant plus élevée que le temps de pause est plus long entre deux essais (Tableau 53).

Conductivité en $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C	Eau initiale (Romanche du 20.IX.78)	Fraction de 50 ml d'eau gravitaire recueillie					
		5e fraction de 50 ml			10e fraction de 50 ml		
		1er jour	48 h après	6 semaines après	1er jour	48 h après	6 semaines après
160	610	220	300	345	180	220	

Tableau 53 - Conductivité des eaux recueillies au cours de la troisième expérience de percolation sur les sables alluvionnaires.-

x
x x x
x x x

Ces trois expériences nous montrent que :

- la minéralisation des eaux augmente après leur passage à travers une colonne de sables alluvionnaires ;
- la minéralisation et les caractéristiques des eaux recueillies dépendent de celles des eaux initiales. En ce qui concerne les eaux examinées, on constate que, plus la minéralisation de l'eau initiale est élevée, plus celle de l'eau recueillie l'est ;
- la quantité des sels minéraux mis en solution dépend du degré d'humidité des sables alluvionnaires ; plus les sables sont desséchés, plus la minéralisation totale des eaux recueillies est élevée.

Pour expliquer les phénomènes constatés on peut émettre l'hypothèse que les eaux initiales épuisent les sables au cours d'un essai et que l'on recueille, lors du suivant, la quantité de sels dissous contenue dans l'eau retenue sur la colonne après évaporation. Or, je montrerai par une nouvelle série d'expériences, exposées dans le chapitre consacré à l'hydrochimie des sulfates, que la quantité de sels dissous, recueillis, quand on renouvelle les essais sur un même tube laissé en place (3ème expérience), est supérieure à celle contenue dans les 500 ml d'eau retenue au cours de l'essai précédent. On est, dès lors, obligé d'admettre que les sables sont susceptibles de livrer, eux-mêmes, les quantités de sels mis en solution lors de l'expérience. Comme dans la plupart des cas quand on cherche à recréer des modèles réduits au laboratoire, les conditions de l'expérience sont très différentes des conditions naturelles. En effet, au cours de ces essais, les conditions d'aération, de pression, de température, de porosité, d'écoulement, ainsi que les dimensions adoptées ne sont pas comparables à celles de la nappe étudiée. Les résultats expérimentaux doivent donc être utilisés avec prudence. Pour pallier ces inconvénients, certains chercheurs ont fait des expériences sur des lysimètres de grandes dimensions, en recréant des conditions plus proches des conditions naturelles (M. SCHOELLER - 1963, E. SIWERTZ - 1973). La plaine de Jouchy, bien délimitée, de faible superficie, est elle-même à cet égard, un champ d'expériences valables ; mais afin de ne pas introduire d'éléments étrangers dans la nappe en exploitation, j'ai cherché à utiliser seulement les résultats d'analyses des eaux naturelles pour étudier les processus d'acquisition de la minéralisation. Les essais au laboratoire m'ont servi uniquement à vérifier que cette acquisition pouvait se faire au contact des sables alluvionnaires.

III-1-3 - Troisième hypothèse : mélange des eaux infiltrées avec des eaux souterraines plus minéralisées

L'étude hydrogéologique de la nappe nous a montré que la perméabilité des couches alluvionnaires les plus superficielles était supérieure à celle des couches les plus profondes. Elle dépasse 4.10^{-3} m/s à moins de 30 m de profondeur d'après les essais LEFRANC, sur l'ensemble de la nappe. Ce n'est qu'au delà de 30 m, alors que la proportion des sables dépasse 50 % que la perméabilité diminue nettement et atteint 10^{-4} m/s. Malgré l'existence de cette zonalité verticale des perméabilités, l'absence d'horizon imperméable étendu explique que l'écoulement de la nappe de Jouchy est un mouvement hydrodynamique d'ensemble, qui intéresse toutes les couches alluvionnaires, comme le confirme les essais de datation des eaux de la nappe par le tritium.

Le mélange des eaux de la nappe d'origines différentes est donc possible ; ainsi, les eaux des apports souterrains en provenance de la nappe de l'Ile Falcon, peuvent se mélanger avec celles nouvellement infiltrées en provenance de la Romanche ou des versants. Les mélanges sont favorisés par les mouvements hydrodynamiques créés artificiellement, comme par exemple les pompages.

Dans la zone amont de la plaine, en toutes saisons, là où se fait l'essentiel des infiltrations en provenance de la Romanche, on peut constater que les eaux profondes prélevées dans le piézomètre S 8 de - 25 à - 30 m, sont toujours plus minéralisées que celles prélevées dans les couches superficielles de la nappe, à moins de 9 m de profondeur dans le piézomètre P VII 2, distant du premier de 14 m environ.

Cette zonalité hydrochimique verticale s'explique par l'origine même des eaux, les unes provenant des infiltrations de la Romanche, les autres des apports souterrains. Plus à l'aval, elle s'estompe ; ainsi, les eaux prélevées dans le puits 1 (zone crépinée de - 14 m à - 30 m) ont des minéralisations comparables en toutes saisons à celles prélevées dans les piézomètres les plus proches (P 112, S 17, etc.) dont la profondeur ne dépasse pas 10 m. On serait tenté d'attribuer au seul mélange des eaux, favorisé par les pompages du puits, l'absence de zonalité hydrochimique verticale ; mais dans cette hypothèse, la minéralisation des eaux résultant du mélange devrait être la moyenne pondérée entre celle des eaux infiltrées à la minéralisation faible ($130 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} < G < 240 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) et celle des eaux des apports souterrains à la minéralisation moyenne ($250 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} < G < 300 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$).

Or, on peut constater que les eaux prélevées dans la région du puits 1 (piézomètre S 5), en basses eaux, ont des minéralisations proches de celles des eaux des zones profondes de l'amont (piézomètre S 8) ; mais elles sont plus minéralisées en hautes eaux (Figure 68).

Ces constatations confirment que l'augmentation de la minéralisation au cours du cheminement souterrain ne peut être attribuée au seul mélange des eaux dans la nappe ; elle fait intervenir aussi d'autres processus hydrochimiques comme celui de l'acquisition des sels minéraux au contact des sables alluvionnaires, que nous avons envisagé dans le chapitre précédent.

J'étudierai les possibilités du mélange des eaux à partir des résultats d'analyses effectuées, dans le chapitre III-2-1-3.

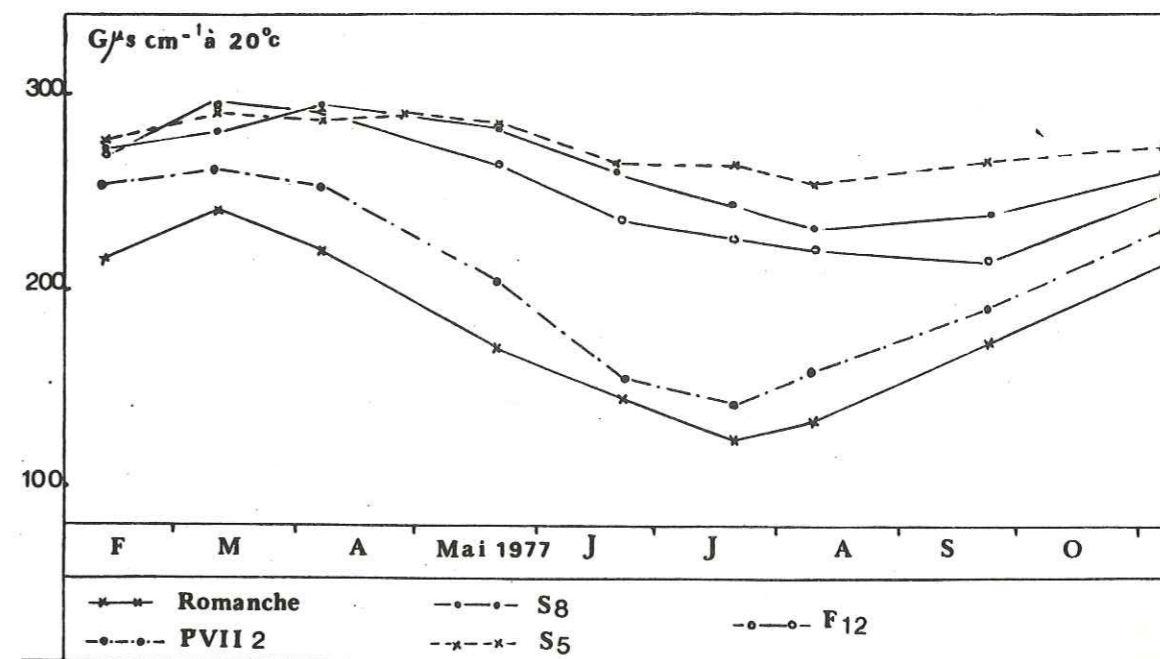


Figure 68 - Variations saisonnières des conductivités des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy en 1977.-

III-1-4 - Quatrième hypothèse : l'acquisition de la minéralisation se fait notamment dans la zone non saturée de la nappe : mise en évidence in situ par des enregistrements continus de la résistivité des eaux

Pour mettre en évidence l'acquisition de la minéralisation des eaux infiltrées au contact des sables alluvionnaires de la zone non saturée de la nappe, des appareils enregistreurs des résistivités et des températures (1) ont été installés.

. Un premier appareil permet d'enregistrer les résistivités et les températures des eaux de la Romanche à l'amont immédiat de la plaine de Jouchy et du piézomètre S 8.

Les capteurs sont plongés à 2 m au-dessous du zéro d'une échelle limnimétrique, installée sur la rive. Un limnigraphe (TELEMNIP-NEYRPIC) permet d'enregistrer parallèlement les variations du niveau de la rivière (voir chapitre II-3 - 1ère partie - page 72).

(1) Ces appareils enregistreurs permettent d'effectuer une mesure de résistivité et de température tous les quarts d'heure et conserver les résultats sur cassettes magnétiques. Ils sont décrits dans l'annexe IV.

- Un deuxième appareil permet d'enregistrer les résistivités et les températures des eaux de la nappe dans la zone d'infiltration préférentielle. Les capteurs sont plongés dans le piézomètre P VII 2 (Figure 25 - page 82) à 5 m de profondeur. Rappelons que c'est dans ce piézomètre que sont enregistrés les plus forts battements du toit de la nappe et les plus grandes variations hydrochimiques au cours d'une année hydrologique. Il est muni d'un limnigraphe enregistreur (marque : OTT, type R 16).
- Un troisième appareil permet d'enregistrer les résistivités et les températures des eaux de la nappe en bordure des rives de la Romanche, face au puits 1, actuellement exploité. Les capteurs sont plongés dans le piézomètre P IV 1, à 5 m de profondeur ; il est situé à 100 m d'un autre piézomètre P III 1, muni d'un limnigraphe enregistreur (marque OTT, type R 16).

III-1-4-1 - DANS la ZONE d'INFILTRATION PREFERENTIELLE
(piézomètre P VII 2) à l'AMONT de la PLAINE

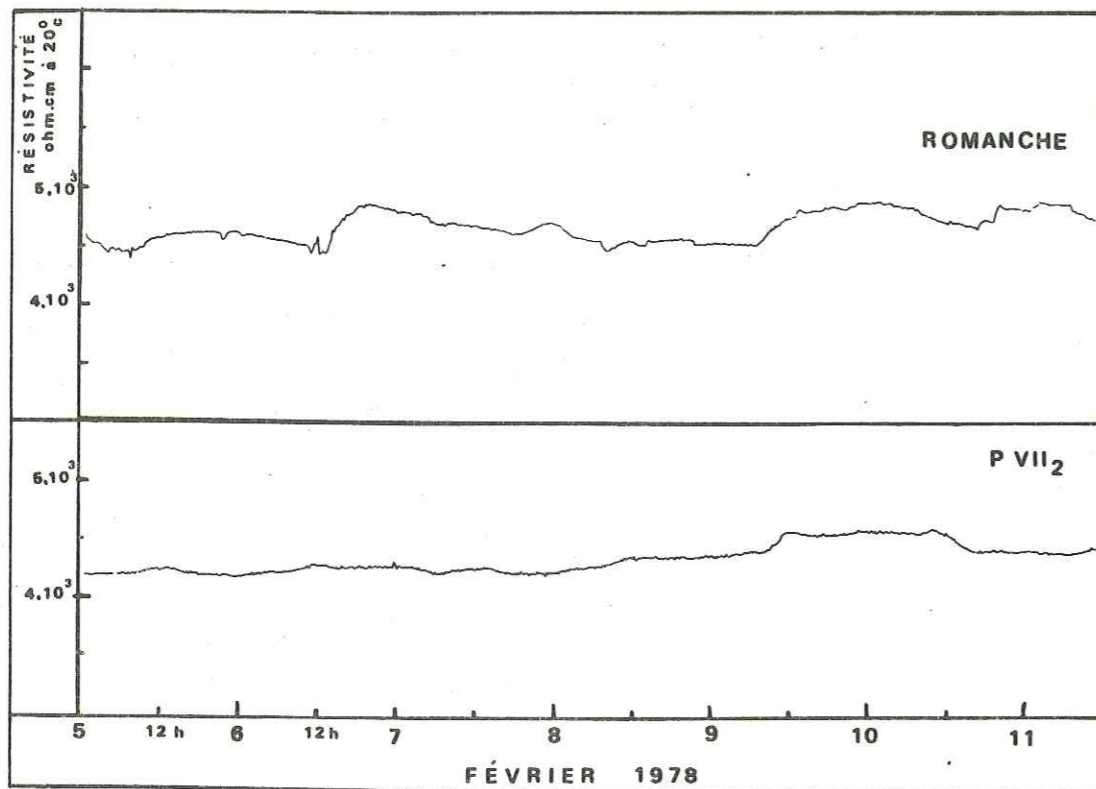


Figure 69 - Enregistrements des résistivités des eaux de la Romanche et du piézomètre P VII 2, en basses eaux.-

- En basses eaux, lors de l'étiage de la Romanche, les variations des niveaux de la rivière et de la nappe sont faibles. Les eaux d'infiltration circulent dans les couches alluvionnaires déjà saturées ; ainsi, en février 78 (Figure 69) et en janvier 79 (Figure 70) les niveaux de la nappe, mesurés dans le piézomètre P VII 2 sont restés constants.

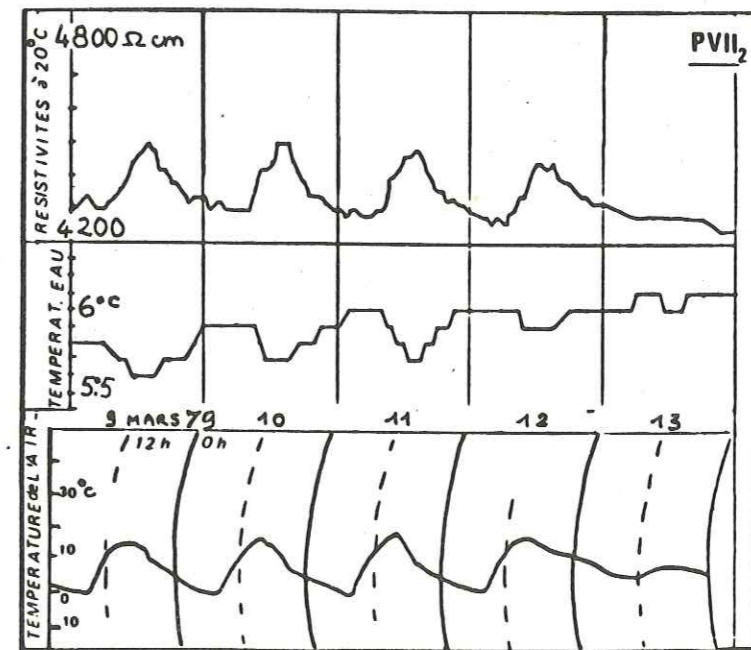
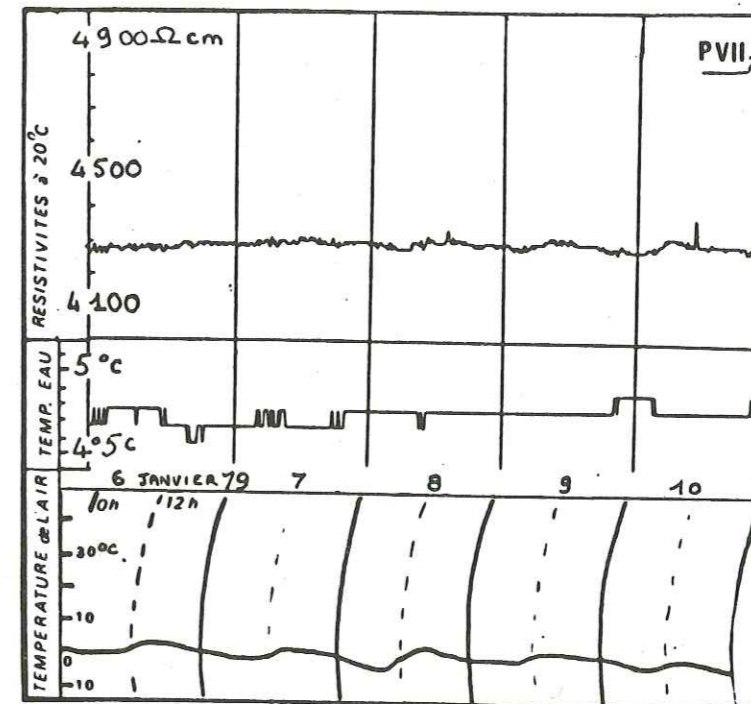
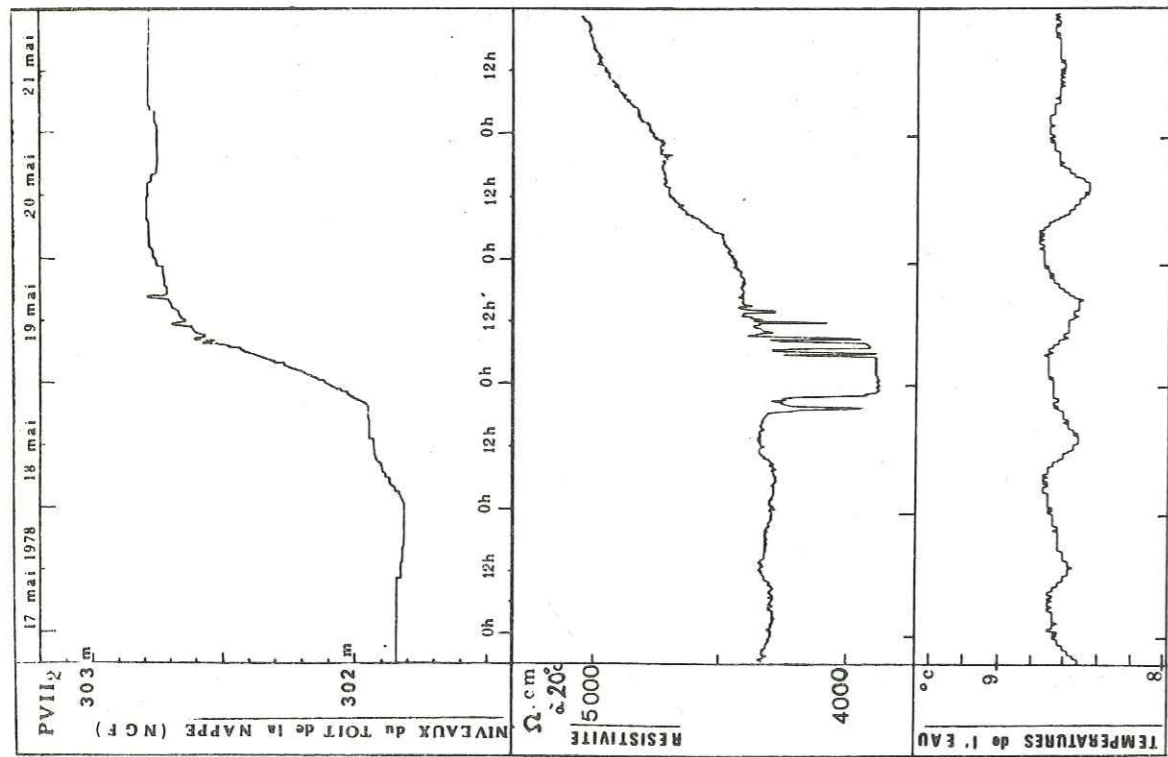
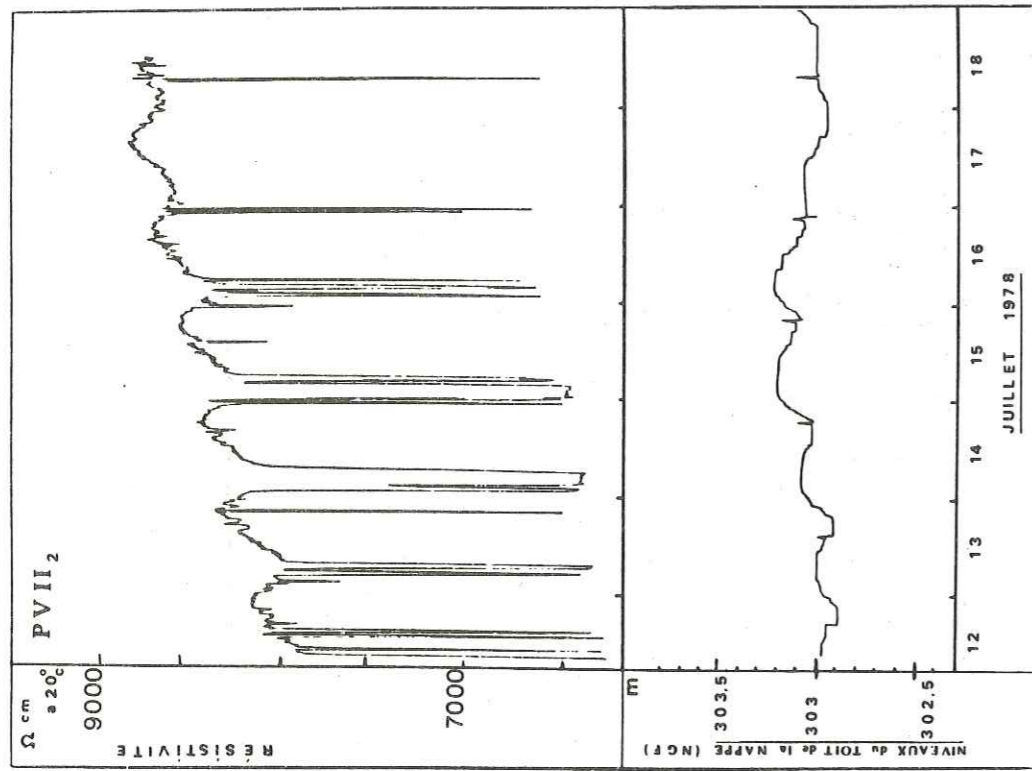


Figure 70 - Enregistrements des résistivités des eaux du piézomètre P VII 2 et des températures, en basses et moyennes eaux.-
N.B.
Voir aussi en annexe V, d'autres enregistrements des températures des eaux.-



Enregistrements des niveaux du toit de la nappe, des résistivités et des températures des eaux, dans la zone d'infiltration préférentielle,

Figure 71 : à l'occasion d'une crue subite de la Romanche.-



Enregistrements des niveaux du toit de la nappe, des résistivités et des températures des eaux, dans la zone d'infiltration préférentielle, Figure 72 : lors de la recharge de la nappe en hautes eaux.-

Aux faibles variations de la minéralisation de la rivière, correspondent des variations atténuées de la minéralisation du P VII 2.

. *En moyennes eaux*, en période non pluvieuse, les niveaux de la Romanche et de la nappe sont peu variables car seul le débit réservé, grossi de quelques apports du bassin versant intermédiaire, transite dans la rivière. Les eaux d'infiltration circulent dans les couches alluvionnaires déjà saturées. Au début du printemps, les variations diurnes de la résistivité de la rivière sont plus nettes et plus régulières ; quand les variations de la température atmosphérique sont bien marquées au cours de la journée, la fonte partielle des neiges abondantes dans le bassin versant, entraîne une dilution des eaux de la rivière (Figure 70) ; les eaux de la nappe subissent des variations diurnes liées à celles de la Romanche.

. *En hautes eaux*, au printemps et en été, lors des variations de débit plus importantes de la Romanche, l'abondance et la turbulence des eaux provoquent un autocurage du lit et des rives et permettent des infiltrations à travers les zones non saturées donc un relèvement conséquent du niveau du toit de la nappe souterraine. Ces recharges de la nappe peuvent apparaître isolément, à l'occasion d'une crue subite de la rivière due à la fonte des neiges (19 mai 1978 - Figure 71), ou d'un orage d'été (8 août 1979 - Figure 73).

Les enregistrements des résistivités (Figures 71 - 72 - 73) montrent que les eaux transitant à travers le piézomètre P VII 2, subissent alors deux types d'influences :

- . d'une part, leur minéralisation varie comme celle de la Romanche ;
- . d'autre part, elles subissent une "bouffée" de minéralisation chaque fois que les niveaux du toit de la nappe s'élèvent et qu'elles pénètrent dans les zones antérieurement non saturées.

Lorsque les niveaux du toit de la nappe se stabilisent, elles ne subissent plus que la première influence, celles des variations de la Romanche. Ainsi, au mois de mai 1978, (Figure 71) après la "bouffée" de minéralisation du 18 et du 19 mai, due à la remontée du niveau du toit de la nappe, les niveaux s'étant stabilisés, la résistivité des eaux du piézomètre P VII 2 augmente progressivement à partir du 20 mai, comme celle de la Romanche (à la faveur des dilutions par les eaux de fonte des neiges).

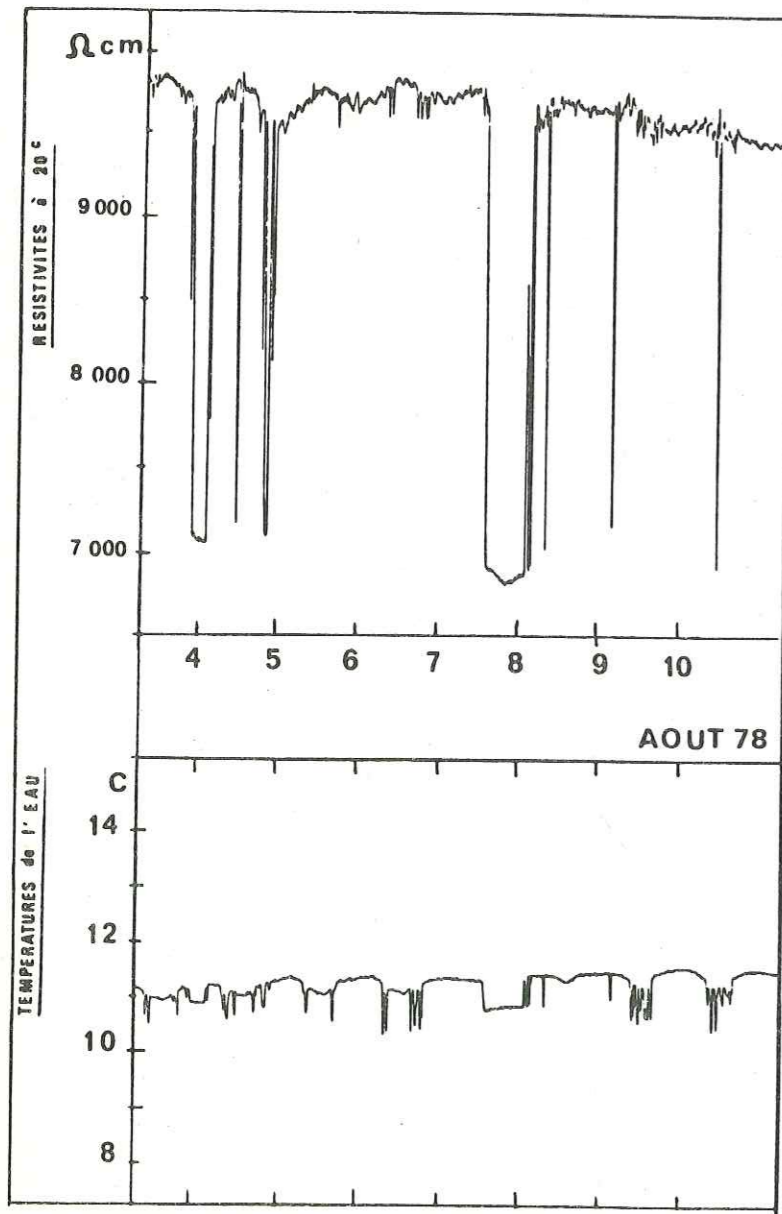
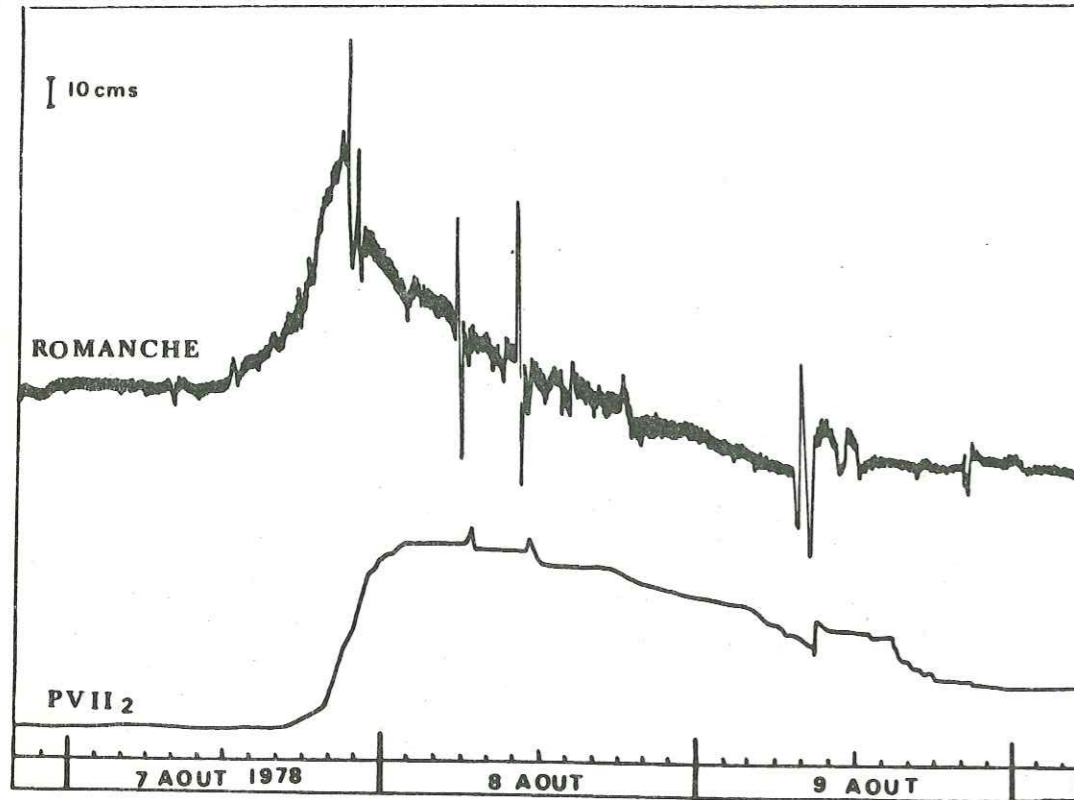


Figure 73 - Enregistrements des variations de niveaux de la Romanche et du toit de la nappe, des résistivités et des températures des eaux dans la zone d'infiltration préférentielle à l'occasion d'un orage d'été (7-8 août 1978).-

En juin et en juillet, lors des hautes eaux de la Romanche, les "bouffées" de minéralisation sont plus fréquentes (Figure 72). On peut être surpris par l'importance et le caractère fugitif des variations de résistivités enregistrées.

Ainsi, aux mois de juillet et août 1978 (Figures 72 et 73) les résistivités varient en moins d'un quart d'heure de 9 800 ohm.cm à 7 000 ohm.cm à 20°C. Ces variations correspondent à des augmentations de la minéralisation totale que l'on peut chiffrer à partir des formules classiques, liant la minéralisation totale à la résistivité (d'après DOROSCHEWSKI in R. GIRARD - 1973 et in J. RODIER - 1978).

$$\text{Minéralisation totale en mg/l} = \frac{750\ 000}{\text{résistivité en ohm.cm à } 20^{\circ}\text{C}}$$

Ainsi, la minéralisation totale d'une eau de résistivité égale à 9 800 ohm.cm peut être évaluée à 76 mg/l, celle égale à 7 000 ohm.cm à 107 mg/l.

L'acquisition ainsi réalisée est donc approximativement de 30 mg/l. En comparant ces résultats à ceux des analyses effectuées d'une part, et à ceux obtenus lors des essais de percolation sur les sables alluvionnaires d'autre part, je peux affirmer que ces variations sont très plausibles étant donné le pouvoir d'acquisition des eaux d'infiltration, lors du lessivage des terrains alluvionnaires non saturés. Cette remarque confirme la grande sensibilité de la méthode d'enregistrement employée.

Ces phénomènes n'ont pu être mis en évidence lors des prélèvements ponctuels effectués ; seuls des enregistrements continus permettent de les saisir.

Cette fugacité est due au milieu particulier que constitue le piézomètre lui-même, situé dans les zones d'infiltration rapide. Dans la zone du puits, les variations de résistivité sont beaucoup plus lentes, le mélange des eaux permettant l'intégration des phénomènes.

En période pluvieuse, la plupart du temps, l'infiltration directe des eaux de pluies (mouvement descendant de la précipitation efficace) coïncide avec les infiltrations nouvelles à l'amont de la plaine en provenance de la Romanche (mouvement dans le sens de l'écoulement de la nappe). Ces dernières infiltrations sont occasionnées par l'augmentation du débit de la rivière.

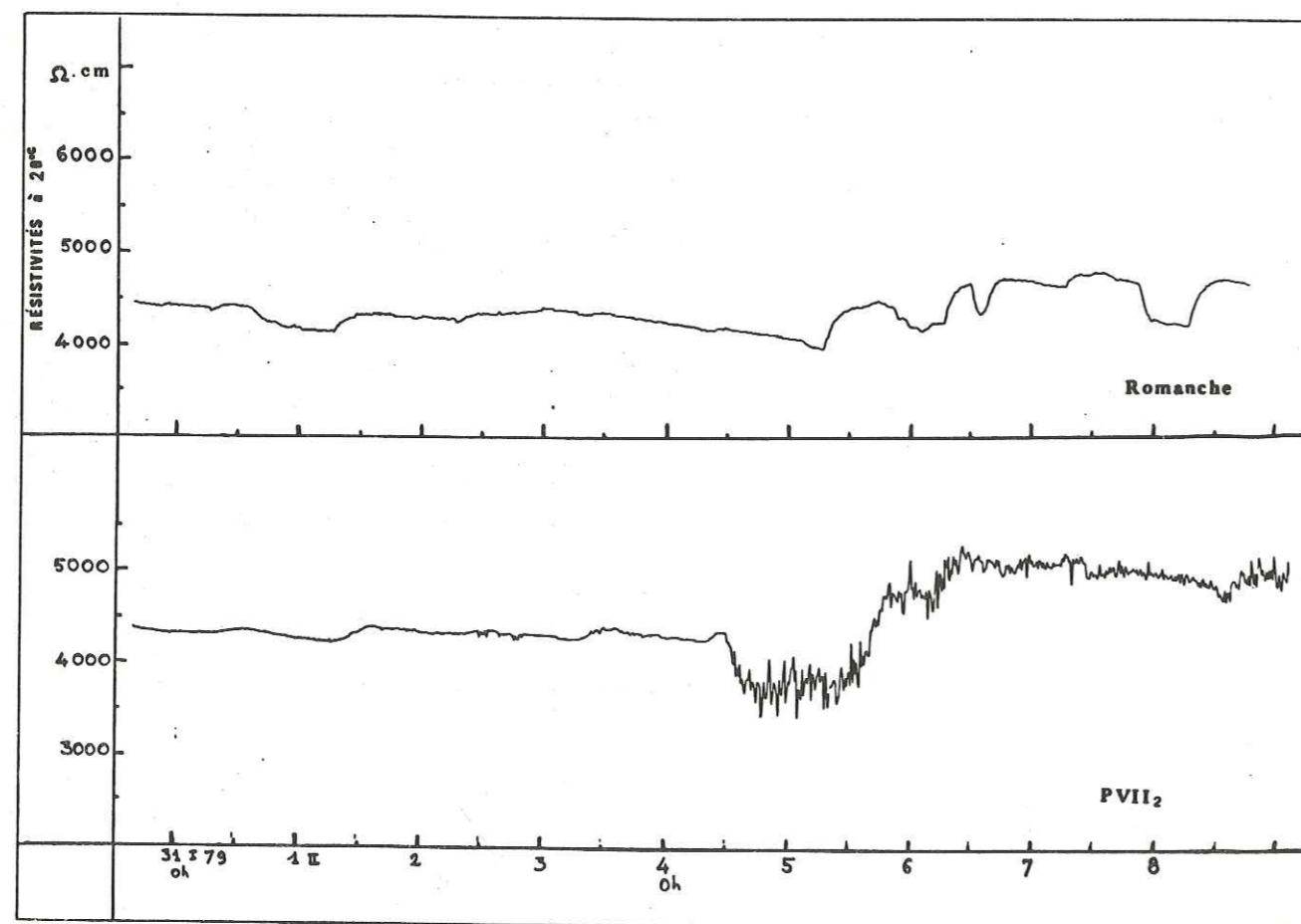
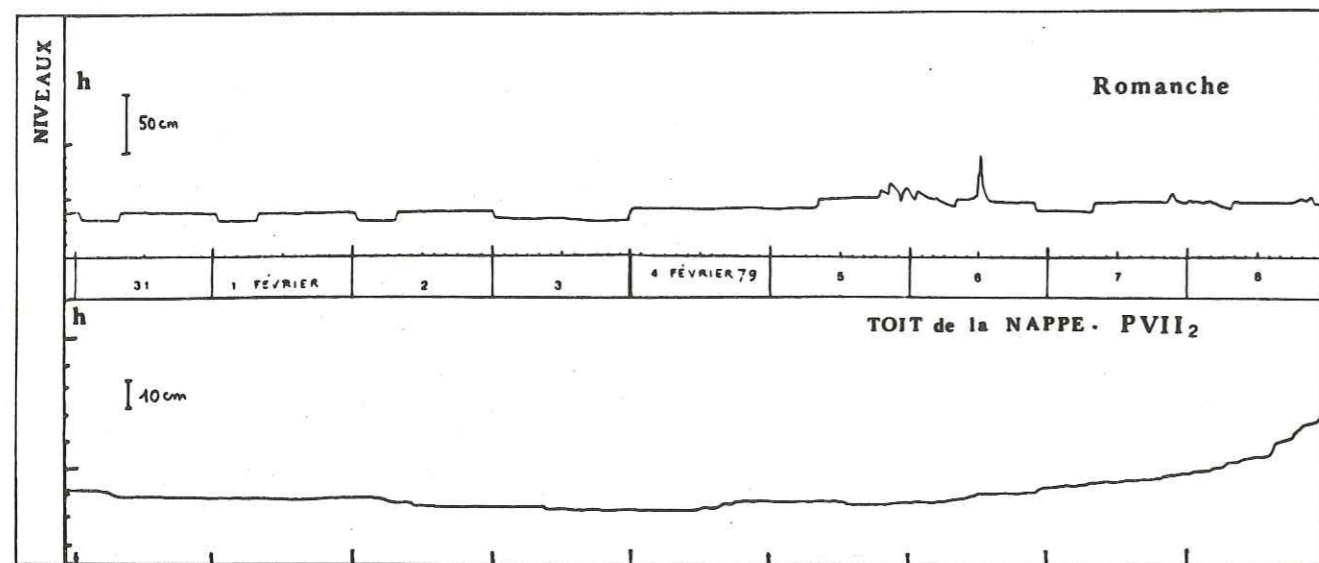


Figure 74 - Enregistrements des niveaux et des résistivités des eaux de la Romanche et du piézomètre P VII 2, du 31 janvier au 8 février 1979.-

Les deux phénomènes entraînent simultanément une remontée du niveau du toit de la nappe, mesurée dans les piézomètres (remontée du niveau de l'eau "libre"). Il est alors difficile d'attribuer à l'un ou à l'autre phénomène les variations de la minéralisation enregistrées dans le piézomètre.

Mais en hiver, les débits de la Romanche sont faibles (1 à 2 m³/s) et leurs augmentations au cours des épisodes pluvieux ne sont pas suffisantes pour décolmater son lit et provoquer de nouvelles infiltrations. Les eaux des pluies s'infiltrent dans les zones aérées de la nappe, de haut en bas.

Ainsi, les pluies de la fin janvier et du début février 1979 (Tableau 54) n'ont pas été suffisantes pour augmenter sensiblement ni le débit de la Romanche, ni les niveaux du toit de la nappe, les premiers jours de l'épisode pluvieux. Ce n'est qu'à la fin de l'après-midi du 5 février que les niveaux de la Romanche face à Jouchy, et que ceux du toit de la nappe, s'élèvent progressivement. Or, dès l'après-midi du 4 février, on enregistre, dans le piézomètre P VII 2, une nette baisse des résistivités de l'eau, suivie de variations plus fréquentes (Figure 74).

En pénétrant dans les zones aérées du sol et du sous-sol, les eaux de pluies se sont chargées en sels minéraux au contact des sables alluvionnaires. Avant de rejoindre la nappe sous-jacente et d'élever ainsi son niveau hydrostatique, des échanges physico-chimiques sont possibles par l'intermédiaire des franges capillaires qui sont en liaison continue avec les zones saturées.

Si les pluies se poursuivent, comme ce fut le cas au début du mois de février 1979, les eaux de pluies qui s'infiltrent dans les zones déjà "mouillées" ne se chargent plus en sels minéraux et l'on peut constater sur les enregistrements que la résistivité des eaux s'élève de nouveau. Les variations que l'on peut encore enregistrer à partir du 6 février sont vraisemblablement dues à la double alimentation de la nappe par les eaux des pluies et les eaux infiltrées à partir de la rivière.

En résumé, l'enregistrement de la résistivité permet de mettre en évidence, l'avancée du front d'humidité dû aux pluies, insuffisante pour élever le niveau du toit de la nappe.

Dates	Précipitations à Jouchy mm de pluie	Débit de la Romanche au Champeau (d'après D.T.G.) m ³ /s	Débit de la Romanche à Jouchy (calculé) m ³ /s
21 janvier 79	0,0	12	1,3
22 " "	0,6	12,6	1,4
23 " "	2,6	13,2	1,4
24 " "	0,9	13,5	1,4
25 " "	0,0	13,2	1,4
26 " "	0,9	12,9	1,4
27 " "	10	14,4	1,5
28 " "	20,3	26,4	2,3
29 " "	0,2	20,2	1,9
30 " "	4,8	16,3	1,6
31 " "	3,0	14,9	1,5
1er février 79	3,5	14,4	1,5
2 " "	2,9	15,5	1,6
3 " "	0,0	14,9	1,5
4 " "	7,8	14,1	1,4
5 " "	9,9	20,1	1,9
6 " "	7,3	20,8	1,9
7 " "	7,1	21,9	2,0
8 " "	8	21,9	2,0
9 " "	3,2	21,9	2,0
10 " "	7,5	29,6	2,6

Tableau 54 - Précipitations à Jouchy et débits de la Romanche au Champeau et face à Jouchy du 21 janvier au 10 février 1979.-

III-1-4-2 - LE LONG des RIVES de la ROMANCHE

(piézomètre P IV 1)

Comme nous l'avons vu, de l'importance des phénomènes de colmatage et de décolmatage du lit et des rives de la rivière, dépendent les possibilités d'infiltration des eaux dans la nappe par les rives.

. Lors de la décrue de la rivière, et de la baisse du niveau de la nappe qui en résulte, les matières en suspension les plus fines ne sont pas entraînées par le courant ; elles se déposent et participent ainsi au colmatage du lit et des rives. La nappe s'écoule alors dans le même sens que la rivière ; son drainage est impossible, la rivière étant perchée au-dessus de la nappe (Figure 32 - page 102).

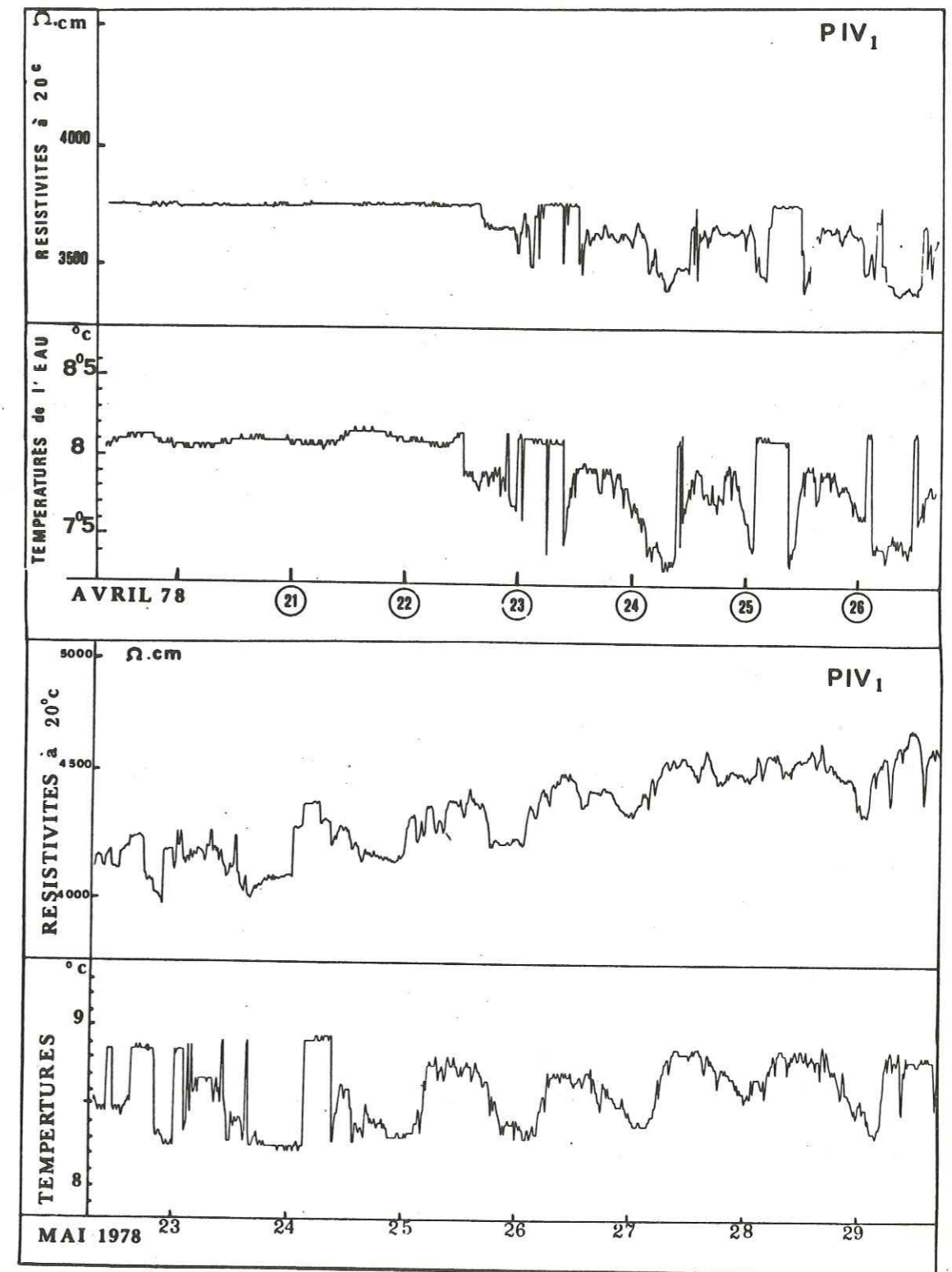


Figure 75 - Enregistrements des résistivités et des températures des eaux du piézomètre P IV 1, en bordures des rives de la Romanche, au printemps 1978.-

En basses eaux, les minéralisations totales des eaux des piézomètres les plus proches des rives (P IV 1) sont supérieures ou égales à celles des piézomètres suivants (P IV 3) (Figure 54 - page 160) ; les résistivités et les températures enregistrées restent très stables (Figure 75).

Lors des premières augmentations de débit de la rivière, au printemps, la turbulence des eaux favorise le décolmatage du lit de la rivière et les infiltrations vers la nappe. Ce phénomène n'a rien de progressif. L'appareil enregistreur des températures et des résistivités installé sur le P IV 1, a permis de mettre en évidence le moment précis où il a débuté (Figure 75) au printemps 1978. Ainsi, jusqu'au 22 avril 1978, les résistivités des eaux du piézomètre P IV 1 étaient stables, inférieures à celles de la Romanche qui subissait pour sa part, des variations importantes dans sa minéralisation depuis plus d'un mois. Le 23 avril, les températures et les résistivités des eaux du P IV 1 subissent des variations fréquentes et désordonnées dues à l'infiltration des eaux de la Romanche.

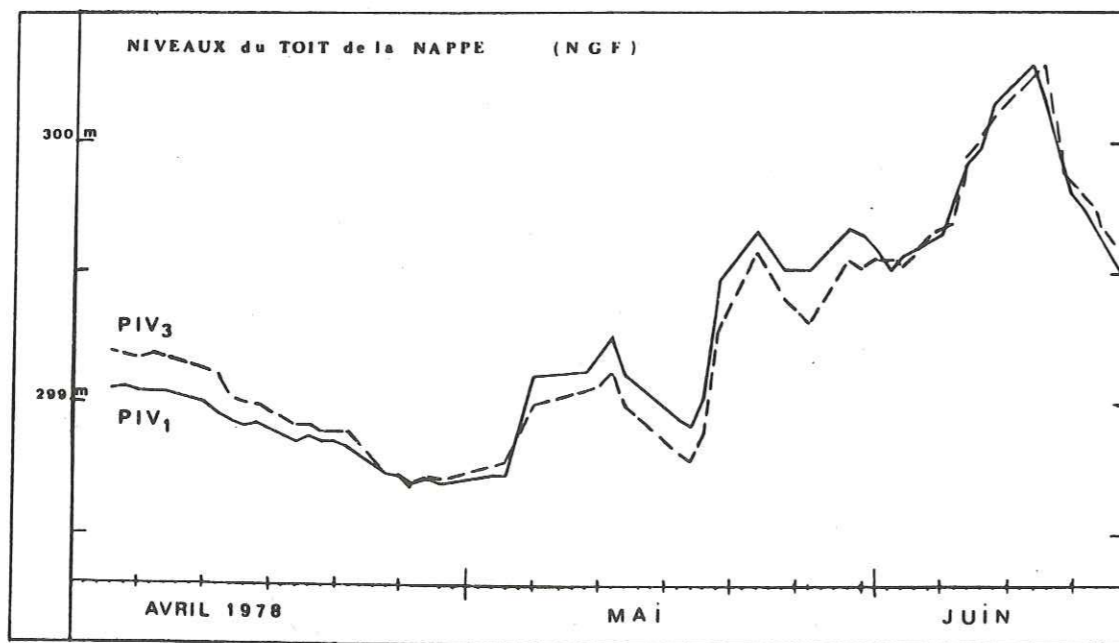


Figure 76 - Inversion des gradients hydrauliques de la nappe, le long des rives de la Romanche, due au décolmatage des berges, au printemps.-

L'examen des niveaux piézométriques (Figure 76) des piézomètres P IV 1 et P IV 3 montre une inversion des gradients hydrauliques orientés du P IV 3 vers le P IV 1 jusqu'au 22 avril et du P IV 1 vers le P IV 3 à partir du 24 avril.

Cette constatation ne permet pas d'interpréter l'origine du phénomène. L'examen des variations des résistivités des eaux, au contraire, permet d'attribuer au décolmatage des rives et à la pénétration des eaux d'infiltration l'instabilité des valeurs de la résistivité et de la température due aux battements des eaux dans les zones non saturées des rives.

Ajoutons que la possibilité de mélange des eaux infiltrées le long des rives et des eaux de la nappe ou la possibilité d'écoulement de ces eaux vers le puits, dépend, d'une part, de l'étendue de la zone d'appel du puits (et par conséquent des débits pompés) et d'autre part, de la bonne réalimentation naturelle ou induite par l'amont de la nappe.

Lors des hautes eaux, les rives étant décolmatées, les infiltrations vers la nappe deviennent régulières et la minéralisation des eaux souterraines subit des variations comparables à celles des eaux de la rivière avec retard et atténuation (Figure 75).

x
x x
x x

En résumé :

La fréquence des mesures et la grande précision des appareils d'enregistrement de résistivité ont permis d'une part, de suivre les infiltrations régulières de la Romanche dans la zone saturée de la nappe, et d'autre part, de mettre en évidence celles qui pénètrent dans la zone non saturée. Ces dernières engendrent des "bouffées" de minéralisation comparables à celles constatées lors des essais de percolation sur les sables alluvionnaires, au laboratoire. Les zones nouvellement lessivées se saturent à leur tour et sont le siège ou non d'infiltrations régulières ; le phénomène d'acquisition s'atténue alors et les variations hydrochimiques des eaux de la nappe suivent celles des eaux infiltrées. Elles jouent un rôle important dans l'acquisition de la minéralisation des eaux au cours du cheminement souterrain notamment lors d'une brusque recharge de la nappe, lors du décolmatage du lit ou des rives de la Romanche, lors de l'avancée du front d'humidité due aux pluies.

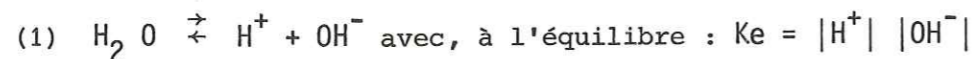
III-2 - L'EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE

Parmi les gaz atmosphériques les plus solubles, susceptibles d'être dissous dans les eaux (gaz carbonique, hydrogène sulfuré, ammoniac, oxygène...), le gaz carbonique occupe une place prépondérante dans la constitution chimique des eaux naturelles. En effet, son hydratation engendre de l'acide carbonique selon l'équation équilibrée :

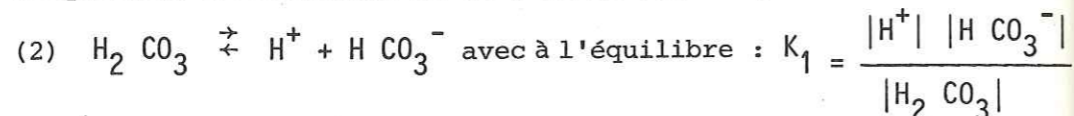


et lui confère une acidité nette. Celle-ci lui permet d'attaquer les roches alcalino-terreuses (calcaires, dolomies, etc.) et d'augmenter leur solubilité. La dissociation de l'acide carbonique formé et celle de l'eau en milieu calcaire, aboutissent à des états d'équilibre conformément à la loi d'action masse :

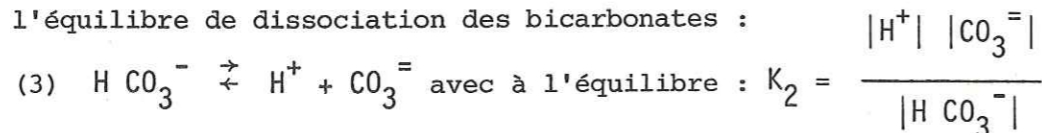
. l'équilibre de dissociation de l'eau :



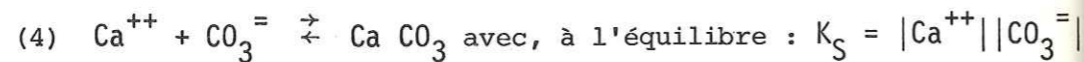
. l'équilibre de dissociation de l'acide carbonique :



. l'équilibre de dissociation des bicarbonates :



. en milieu calcaire, la dissociation du carbonate de calcium aboutit à l'équilibre :



Pour des raisons pratiques, en chimie classique, les valeurs des constantes K sont remplacées par celles de leur cologarithme décimal, telles que :

$$pK = -\log K$$

Les constantes pK_e , pK_1 , pK_2 , pK_S , varient en fonction de la température et de la salinité de l'eau.

. Les constantes pK sont données dans les recueils de constantes physiques à une température donnée et sont applicables aux eaux de minéralisation théoriquement nulle. Ainsi, pour les températures de 0°, 10° ou 20°C les valeurs des constantes pK sont :

	pK_e	pK_1	pK_2	pK_S
à 0°C ..	14,94	6,58	10,63	8,02
à 10°C ..	14,53	6,48	10,49	8,15
à 20°C ..	14,17	6,40	10,38	8,28

. A une température donnée, dans une solution aqueuse dont la minéralisation n'est pas nulle, la loi d'action de masse s'applique aux "activités" des ions et non pas à leurs concentrations.

Pour pouvoir utiliser les concentrations (accessibles aux mesures), il faut corriger les constantes pK en fonction de la force ionique μ de l'eau, qui régit les produits de solubilité des sels en fonction de la salinité (ou de la présence des autres sels).

La force ionique μ , est calculée par la relation de LEWIS et RANDALL (1921, in R. GIRARD - 1960) :

$$\mu = \frac{1}{2} \sum C_n v_n^2$$

où : C est la concentration des ions présents exprimée en mole/litre,

v est leur valence,

μ est exprimée en mole/litre.

Pour étudier les eaux naturelles, qui sont peu minéralisées, on utilise, de préférence, la millimole/litre comme unité, en introduisant les coefficients correspondants.

Ainsi :

Si C_1 est la somme des concentrations des ions de valence 1

C_2 est la somme des concentrations des ions de valence 2

C_3 est la somme des concentrations des ions de valence 3...

$$10^3 \mu = \frac{1}{2} (C_1 + 4 C_2 + 9 C_3 \dots)$$

C_1, C_2, C_3 , étant exprimées en m.mole/l.

Le terme correctif ϵ , fonction de la force ionique, applicable aux constantes d'équilibre est selon LARSON et BUSWELL (in GIRARD - 1960) :

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\mu}}{1 + 1,4\sqrt{\mu}}$$

On utilise les constantes pK' corrigées, telles que :

$$pK'_1 = pK_1 - \epsilon$$

$$pK'_2 = pK_2 - 2 \epsilon$$

$$pK'_e = pK_e - \epsilon$$

$$pK'_S = pK_S - 4 \epsilon$$

Les résultats des analyses d'eaux permettent de calculer la force ionique et les constantes de l'équilibre à la température de l'eau.

L'alcalinité des eaux est souvent exprimée par le titre alcalimétrique complet (T.A.C.) et par le titre alcalimétrique (T.A.). Par définition :

$$\text{T.A.C. (en m.mole/l)} = |\text{H CO}_3^-| + 2 |\text{CO}_3^{=}| + |\text{OH}^-|$$

$$\text{T.A. (en m.mole/l)} = |\text{CO}_3^{=}| + |\text{OH}^-|$$

Dans le cas des eaux naturelles, dont le pH est compris entre 4,5 et 8,3, le T.A.C. n'est pas négligeable alors que le T.A. l'est (c'est-à-dire que $|\text{CO}_3^{=}|$ et $|\text{OH}^-|$ le sont).

$$\text{Dans ce cas : T.A.C.} = |\text{H CO}_3^-|$$

On peut alors calculer l'acide carbonique équilibrant présent, connaissant K'_1 et le pH :

$$\text{H}_2 \text{CO}_3 = \frac{|\text{H}^+| |\text{H CO}_3^-|}{K'_1}$$

Si le pH dépasse 8,3 sans atteindre 10,6 :

$|\text{H}_2 \text{CO}_3|$ et $|\text{OH}^-|$ sont négligeables et :

$$\text{T.A.} = |\text{CO}_3^{=}|$$

$$\text{T.A.C.} = |\text{H CO}_3^-| + 2 |\text{CO}_3^{=}| = |\text{H CO}_3^-| + 2 \text{T.A.}$$

Connaissant les constantes d'équilibre K'_1 , K'_2 et K'_S et la concentration en $|\text{H CO}_3^-|$, il est possible de prévoir l'action de l'eau vis-à-vis du calcaire, Ca CO_3 .

En effet, à l'équilibre calco-carbonique, la composition de l'eau satisfait à la relation :

$$|\text{Ca}^{++}| + |\text{CO}_3^{=}| = K'_S$$

ce qui implique :

$$|\text{H}^+| = \frac{K'_2}{K'_S} |\text{Ca}^{++}| |\text{H CO}_3^-|$$

et

$$|\text{H}_2 \text{CO}_3| = \frac{K'_2}{K'_1 K'_S} |\text{Ca}^{++}| |\text{H CO}_3^-|^2$$

. Si l'eau est agressive (c'est-à-dire qu'elle est capable d'attaquer le "calcaire", Ca CO_3) :

$$|\text{Ca}^{++}| + |\text{CO}_3^{=}| < K'_S$$

et

$$|\text{H}^+| < \frac{K'_2}{K'_S} |\text{Ca}^{++}| |\text{H CO}_3^-|$$

$$|\text{H}_2 \text{CO}_3| < \frac{K'_2}{K'_1 K'_S} |\text{Ca}^{++}| |\text{H CO}_3^-|^2$$

. Si l'eau est incrustante (c'est-à-dire qu'elle est capable de déposer Ca CO_3) :

$$|\text{Ca}^{++}| + |\text{CO}_3^{=}| > K'_S$$

et

$$|\text{H}^+| > \frac{K'_2}{K'_S} |\text{Ca}^{++}| |\text{H CO}_3^-|$$

$$|\text{H}_2 \text{CO}_3| > \frac{K'_2}{K'_1 K'_S} |\text{Ca}^{++}| |\text{H CO}_3^-|^2$$

III-2-1 - La méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER

Les phénomènes physico-chimiques relatifs à l'agressivité des eaux vis-à-vis du calcaire, ont fait l'objet d'études théoriques, puis d'applications pratiques, depuis de nombreuses années (J. TILLMANS - O. HEUNBLEIN - 1912, W.F. LANGELEIR - 1936, C.P. HOOVER - 1938, J. HALLOPEAU-1949, ...). Ces études se sont heurtées au fait que l'eau est un ensemble de solutions complexes en état d'équilibre instable, sous l'influence de paramètres physico-chimiques divers (température, pression, départ des gaz, dissolution des sels...).

Les auteurs ont été conduits à faire des hypothèses simplificatrices qui rendent les méthodes applicables à quelques cas limités.

Les méthodes de calcul des équilibres calco-carboniques, les plus récentes (R. GIRARD - 1973, J. GREFFARD - 1970, L. LEGRAND et G. POIRIER - 1972, 1976, 1980) sont plus rigoureuses.

Elles ont montré l'impossibilité de faire figurer une fois pour toutes, la représentation d'une eau, nécessairement en évolution, et ont permis d'étudier les phénomènes dans leur globalité en tenant compte des différents paramètres influant sur la composition hydrochimique.

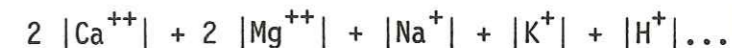
R. GIRARD, dès 1967, a proposé l'utilisation d'abaques qui, en tenant compte de l'ensemble de la minéralisation d'une eau, permet de déterminer rapidement la concentration en acide carbonique équilibrant et le pH d'équilibre à la température d'utilisation de l'eau.

L'intérêt de la méthode, proposée par L. LEGRAND et G. POIRIER, basée elle aussi, sur les relations de thermodynamique et de cinétique de la dissociation de l'eau et du carbonate de calcium en solution, est de proposer un graphique de la courbe d'équilibre de l'eau analysée en tenant compte de tous les sels à une température donnée.

La théorie de cette méthode est exposée dans les ouvrages qui lui sont consacrés (1972 - 1976 - 1980). Son originalité réside dans le classement des éléments ioniques figurant dans le bulletin d'analyse :

- . en éléments "fondamentaux" de l'équilibre calco-carbonique (reliés entre eux par la loi d'action de masse selon les relations (1), (2), (3) et (4))
- . en éléments "caractéristiques" reliés aux précédents par la relation de neutralité électrique et la force ionique.

La relation de neutralité électrique :

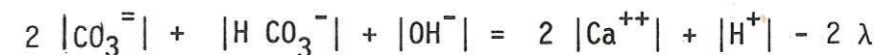


peut s'écrire sous forme condensée si :

N : Somme des anions caractéristiques

P : Somme des cations caractéristiques

$$\text{et } \lambda = \frac{N - P}{2}$$



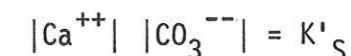
Dans cette relation condensée n'apparaissent que les ions fondamentaux et le facteur λ .

Il en résulte, que connaissant la température et la concentration en ions caractéristiques, il est possible de représenter les eaux sur un graphique à deux dimensions, les concentrations en éléments fondamentaux étant les seules variables.

Parmi les coordonnées du graphique que l'on peut choisir, L. LEGRAND et G. POIRIER ont adopté le couple suivant :

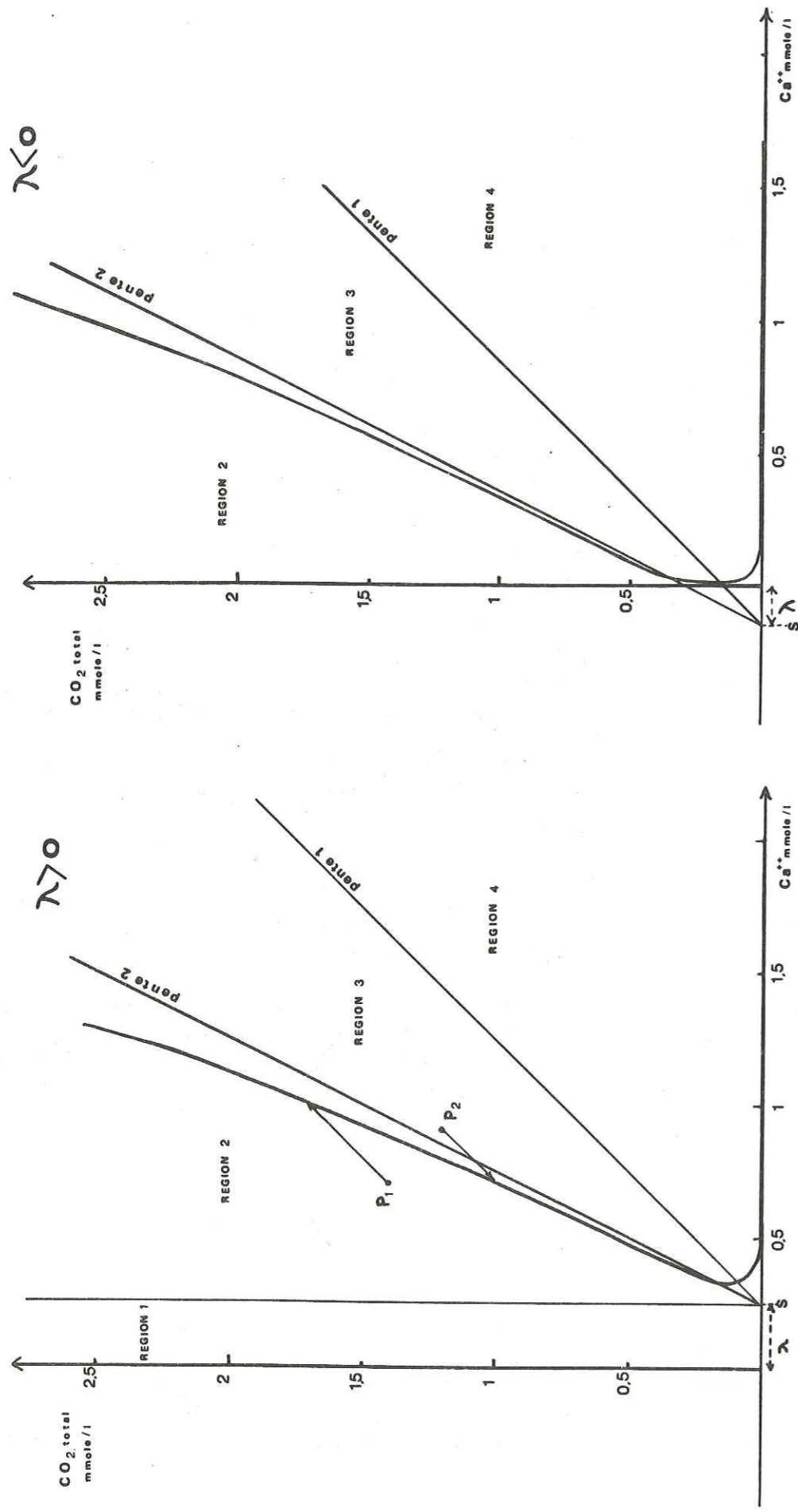
- . en ordonnée, le CO_2 total, somme des concentrations des trois éléments fondamentaux : $|H_2CO_3| + |HCO_3^{-}| + |CO_3^{--}|$
- . en abscisse, la concentration en calcium, $|Ca^{++}|$, autre élément fondamental.

La courbe d'équilibre calco-carbonique d'une eau de salinité connue, étudiée à une température donnée, est déterminée par l'ensemble des points représentatifs des eaux en équilibre avec le carbonate de calcium solide, c'est-à-dire des eaux dont les concentrations en ions Ca^{++} et CO_3^{--} vérifient la relation :



Cette courbe est tracée point par point, pour chaque concentration de calcium.

La figure 77 montre l'allure générale des courbes. Dans le système de coordonnées adopté par L. LEGRAND et G. POIRIER, la courbe d'équilibre comprend deux branches. L'une représente une fonction du CO_2 total croissant avec $|Ca^{++}|$, qui se développe principalement au-dessus de la demi-droite de pente 2, issue du point S, d'abscisse λ et d'ordonnée nulle, pour laquelle :



Figures 77 - Courbes d'équilibre calco-carbonique établies selon la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER, pour $\lambda > 0$ ou $\lambda < 0$.

P1 eau agressive
P2 eau incrustante.-

$$CO_2 \text{ total} = 2 (|Ca^{++}| - \lambda)$$

et

$$pH = \frac{pK'_1 + pK'_2}{2}$$

L'autre représente une fonction du CO₂ total décroissant lorsque |Ca⁺⁺| augmente ; elle se confond rapidement avec l'axe des abscisses. Quand |Ca⁺⁺| atteint sa valeur minimum, les deux branches de la courbe se raccordent en un point, situé sur la demi-droite de pente 1, issue de S.

Une eau agressive est une eau dont le produit |Ca⁺⁺| |CO₃⁻| est inférieur à K'_s, c'est-à-dire que le produit de solubilité du carbonate de calcium n'est pas atteint. A son contact, elle est donc capable de le dissoudre. Sur le graphique, le point, P₁, représentatif d'une telle eau, est situé à gauche de la courbe d'équilibre. Au cours de l'évolution, l'augmentation de la concentration en ion calcium est égal à l'augmentation du CO₂ total, puisqu'à tout atome de carbone correspond un nombre égal de calcium. Il en résulte que le point représentatif de l'eau se déplace sur la demi-droite ascendante de pente 1, issue de P₁ (Figure 77). L'eau cessera d'être agressive quand son point représentatif se situera sur la courbe d'équilibre.

Une eau incrustante est une eau dont le produit |Ca⁺⁺| |CO₃⁻| est supérieur à K'_s, c'est-à-dire que le produit de solubilité du carbonate de calcium est dépassé. Elle est susceptible de produire un précipité de carbonate de calcium solide. Le point P₂, représentatif d'une telle eau est situé, à droite de la courbe d'équilibre. Au cours de l'évolution, le point représentatif de l'eau se déplace sur la demi-droite descendante de pente 1, issue de P₂. L'eau cessera d'être incrustante quand son point représentatif se situera sur la courbe d'équilibre.

Ce graphique permet de suivre l'évolution d'une eau de salinité constante au contact du calcaire. Si la salinité de l'eau change, la nouvelle courbe d'équilibre permet de suivre sur le graphique son évolution.

La méthode s'applique plus particulièrement aux eaux naturelles ; elles ne contiennent pas d'électrolytes faibles, autres que l'acide carbonique et l'eau, d'ions complexes, et hydroxydes, d'ions peroxydés ; elles présentent une minéralisation suffisamment faible (inférieure à 1,5 g/l) pour que l'on puisse assimiler les concentrations et les activités des ions ; elles subissent une pression voisine de la pression atmosphérique. Les eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy correspondent bien à ces hypothèses restrictives.

III-2-2 - Le programme TIESANAL (1977)

La méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER est à la fois, rigoureuse et précise pour estimer le pouvoir agressif ou inscrustant d'une eau à partir des résultats de son analyse. Elle peut rendre aussi de grands services dans le choix et l'application d'un traitement correctif des eaux.

J'ai appliqué cette méthode aux résultats des analyses des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy afin d'étudier les processus hydrochimiques mis en jeu dans l'équilibre calco-carbonique.

La mise en application de la méthode nécessite un certain nombre de mesures effectuées sur place, dans les conditions naturelles (température, pH, T.A.C., T.A. ...) et une bonne précision des résultats. Cette dernière exigence m'a amenée à perfectionner un certain nombre de méthodes d'analyses (Voir annexe I).

Comme l'écrit G. BOUSQUET en 1978, bien que les calculs proposés soient longs, ils peuvent être actuellement rapidement résolus, grâce à l'établissement de programmes simples, à l'aide de mini-programmateurs possédant une vingtaine de mémoires et 200 lignes de programmation.

Profitant de l'installation d'un terminal I.B.M. au S.I.E.R.G., il m'a été possible de faire établir un programme permettant de traiter rapidement les résultats d'analyses des eaux à partir de la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER.

Le programme TIESANAL (1) permet d'enregistrer sur "disquette", pour chaque analyse, un certain nombre de données résultant de l'analyse de l'eau :

- des données dites "obligatoires",

mesurées sur place (température, pH, T.A., T.A.C.) et mesurées au laboratoire (résistivité, D.H.T., taux du calcium, du magnésium, du sodium, du potassium, des sulfates, des chlorures, des nitrates).

(1) Je tiens à remercier Mme E. FIRMIN, stagiaire à I.B.M. (Grenoble), pour son efficace collaboration dans l'établissement du programme TIESANAL.-

- des données dites "facultatives",

qui concernent tous les ions pouvant intervenir éventuellement dans le bilan ionique d'une eau : d'autres anions (phosphates, fluorures, silicates, etc.) d'autres cations (fer, aluminium, manganèse, etc.).

Afin de rentabiliser le programme établi, nous avons veillé à introduire directement lors de la collecte des données, les résultats bruts des analyses effectuées au laboratoire ou sur place (chute de burette, mesure de la résistivité non corrigée, etc...) excluant ainsi tout calcul préalable que le programme pouvait résoudre.

Le traitement permet de faire apparaître sur les "listing" finaux, grâce à des sous-programmes utilisables séparément : (1)

- d'une part, les résultats tels qu'ils figureront sur les bulletins d'analyse, conformément aux recommandations de l'A.F.N.O.R. (N.T. 90 000), donnant à la fois des précisions sur les conditions de prélèvement, les caractéristiques organoleptiques et physiques et les résultats en mg/l et en me/l qui permettent d'effectuer le bilan ionique ;
- d'autre part, les constantes d'équilibre et les données nécessaires à l'application de la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER : les concentrations en m.mole/l, la force ionique des eaux (μ total), le facteur $\lambda = \left(\frac{N-P}{2}\right)$, les pK des réactions mises en jeu, le taux du CO_2 total et du H_2CO_3 équilibrant, et ces mêmes constantes pour différentes valeurs du calcium.

(1) Voir annexe II : "Listings" du programme TIESANAL.-

III-2-3 - Applications de la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER et du programme TIESANAL aux eaux de la nappe souterraine de Jouchy

III-2-3-1 - les ELEMENTS CARACTERISTIQUES : ETUDE du FACTEUR λ et de la POSITION du POINT S

La valeur du facteur $\lambda = \left(\frac{N-P}{2}\right)$ détermine la position du point S à partir duquel est issue la droite de pente 2 sur laquelle s'appuie la courbe d'équilibre calco-carbonique de l'eau étudiée. Elle n'est fonction que des éléments "caractéristiques" ; elle peut être négative (si $N > P$), positive (si $N < P$) ou nulle. Quand $\lambda = 0$, les ions caractéristiques s'équilibrent entre eux, par exemple :



Quand $\lambda < 0$, les cations caractéristiques équilibrent des anions fondamentaux ; par exemple : l'eau a dissous du bicarbonate de magnésium...

Quand $\lambda > 0$, les anions caractéristiques équilibrent partiellement le calcium ; par exemple : l'eau a dissous des nitrates ou des sulfates de calcium.

Donc, le facteur λ est d'autant plus élevé que l'eau acquiert des sels de calcium autres que les bicarbonates ou les carbonates, notamment des sulfates.

Les eaux de la Romanche présentent, en toutes saisons, des valeurs de λ proches de 0 (très légèrement négatives ou très légèrement positives), c'est-à-dire, que les anions caractéristiques (sulfates, nitrates, chlorures...) équilibrent presque exclusivement les cations caractéristiques présents (magnésium, sodium, potassium...).

La stabilité du facteur λ de la Romanche autour de la valeur 0, peut s'expliquer par le fait que l'anhydride carbonique dissous dans les eaux au contact avec l'atmosphère tend à s'équilibrer avec celui de l'air. Pour parvenir à cet équilibre, que les eaux soient agressives ou incrustantes, que λ soit positif ou négatif, la concentration en calcium reste constante ou diminue ; elle n'augmente dans aucun cas (L. LEGRAND et G. POIRIER - 1972) ; l'anhydride carbonique s'échappe ou s'équilibre avec le calcium présent (dans le cas des eaux très incrustantes). L'eau a donc tendance, dans ces conditions, à ne dissoudre, éventuellement que des sels d'ions caractéristiques s'équilibrant entre eux.

Les variations saisonnières du facteur λ de la Romanche ne dépassent pas l'erreur absolue que l'on peut faire sur une telle mesure. Il est donc difficile de les étudier et on peut les considérer comme négligeables.

Les eaux de la nappe présentent des λ qui varient comme la minéralisation totale des eaux. Ainsi, pour un point donné, λ est plus élevé en basses eaux qu'en hautes eaux (Figure 78) ; λ est d'autant plus élevé que l'on s'éloigne de la zone d'infiltration préférentielle. Ceci nous conduit à constater que l'acquisition des sels composés d'anions caractéristiques et de calcium, notamment des sulfates, se fait préférentiellement à celle des autres cations, notamment du magnésium, au cours du cheminement souterrain.

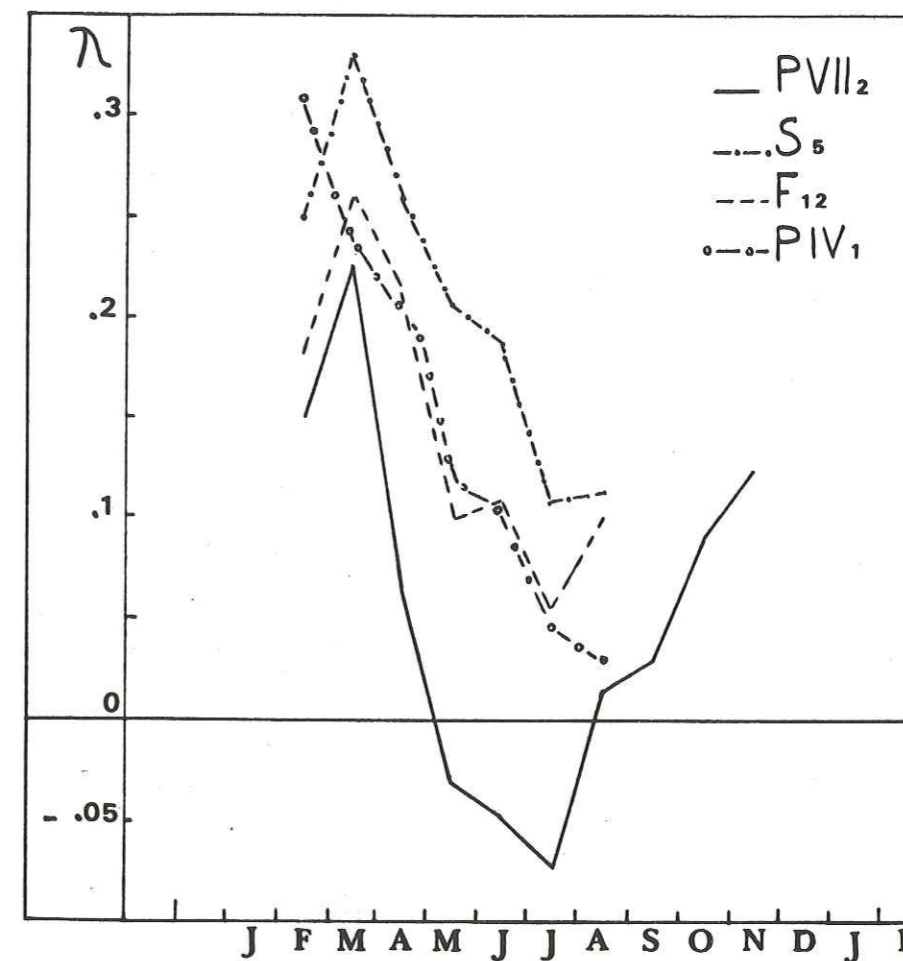


Figure 78 - Evolution du facteur λ des eaux de la nappe de Jouchy au cours de l'année 1977.-

III-2-3-2 - SITUATION des POINTS REPRESENTATIFS des EAUX ETUDIEES sur les GRAPHIQUES de L. LEGRAND et G. POIRIER

1er remarque :

Les points représentatifs des eaux de la Romanche et de la nappe se situent dans les régions 2 et 3 du graphique de L. LEGRAND et G. POIRIER (Figure 79).

Cela signifie que les ions H^+ et OH^- sont négligeables et que seuls les ions Ca^{++} , HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$ et le H_2CO_3 , interviennent dans l'équilibre calco-carbonique.

2ème remarque :

Les distances des points représentatifs des eaux à la droite de pente 2 issue du point S, sont faibles, les points se situant de part et d'autre de la droite.

Cela signifie que les teneurs en $\text{CO}_3^{=}$ et H_2CO_3 sont faibles par rapport à celles en Ca^{++} et en HCO_3^- .

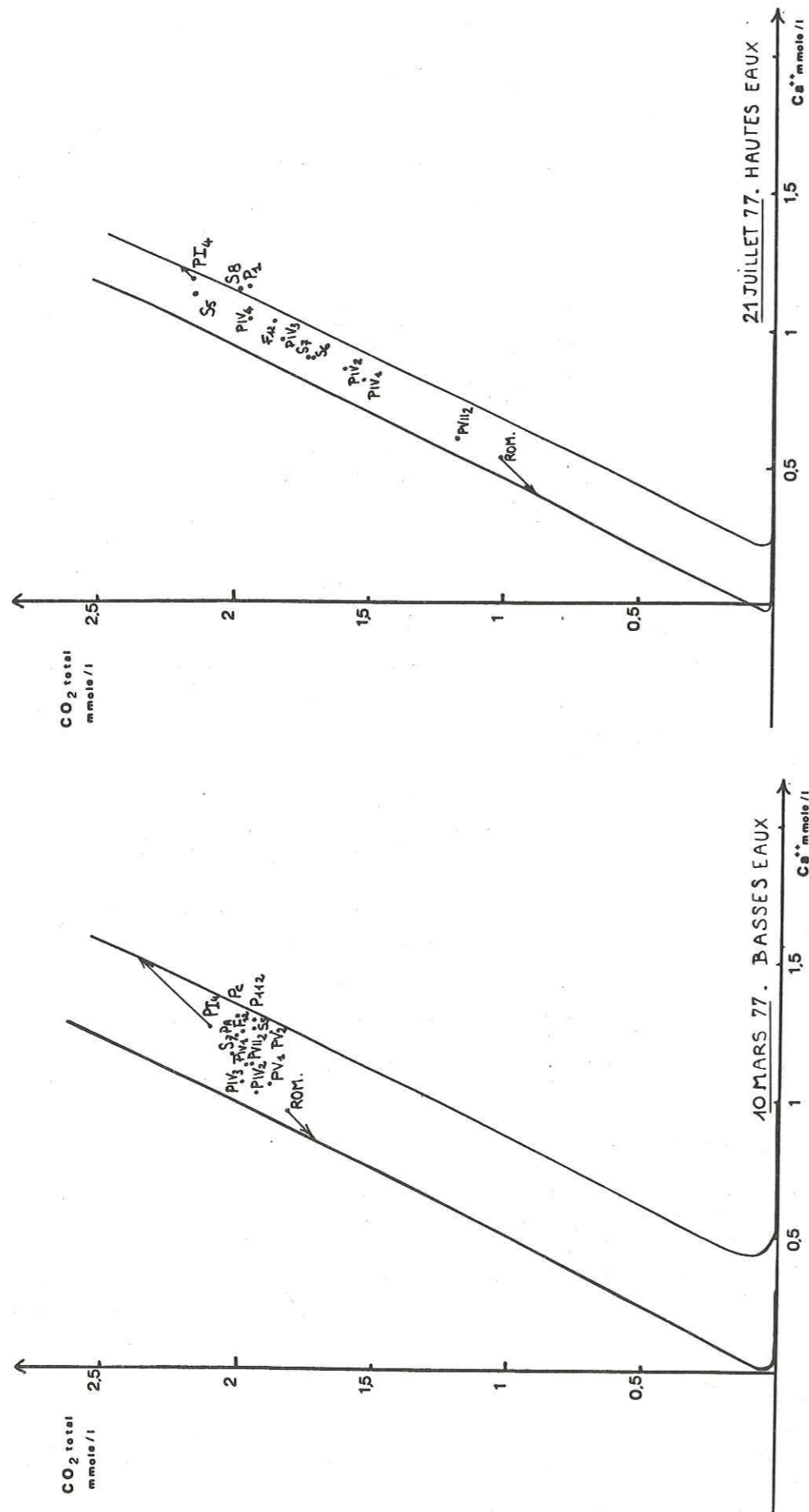


Figure 79 - Situation des points représentatifs des eaux de la Romanche et de la nappe sur les graphiques de L. LEGRAND et G. POIRIER.

3ème remarque :

La minéralisation totale des eaux étant faible et le taux du calcium dépassant rarement 1,5 m.mole/l, les points représentatifs des eaux se situent dans la partie inférieure du graphique de L. LEGRAND et G. POIRIER, là où la courbe d'équilibre s'écarte peu de la droite de pente 2.

Cela signifie qu'à l'équilibre, les eaux contiennent essentiellement les ions HCO_3^- et Ca^{++} .

4ème remarque :

Plus la minéralisation totale des eaux augmente, plus les points représentatifs se situent dans la partie supérieure du graphique. Cela signifie que le taux des ions fondamentaux, notamment le HCO_3^- et le Ca^{++} augmente avec la minéralisation totale.

III-2-3-3 - POUVOIR AGRESSIF ou POUVOIR INCRUSTANT des EAUX de la ROMANCHE et de la NAPPE

D'une façon générale, les points représentatifs des eaux de la Romanche et de la nappe s'écartent peu de leur courbe d'équilibre calco-carbonique. Ceci est probablement dû à leur capacité de dissoudre (ou de déposer) du carbonate de calcium au contact avec les sables alluvionnaires riches en calcite. Cependant, on peut constater que les eaux de la Romanche et les eaux de la nappe prélevées dans la zone d'infiltration préférentielle (P VII 2, S 7, F 12...) sont plutôt incrustantes ; les eaux perdent progressivement leur pouvoir incrustant au cours du cheminement souterrain jusqu'à devenir inertes ou même légèrement agressives (figure 80) au "cœur" de la nappe.

III-2-3-4 - EVOLUTION de l'EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE des EAUX de la NAPPE

Dans la Romanche, les eaux agressives comme celles des eaux de fonte des neiges ou des pluies, perdent rapidement leur agressivité au contact de l'atmosphère et des sables alluvionnaires riches en calcite ; elles ont tendance à s'appauvrir en H_2CO_3 pour atteindre leur équilibre ou devenir incrustantes.

Théoriquement, plusieurs phénomènes permettent à une eau légèrement incrustante, dont le point représentatif est situé dans la zone 3 du graphique (1), d'atteindre son équilibre :

- . elle peut précipiter du CaCO_3 ,
- . elle peut dissoudre d'autres sels de calcium afin d'élever la valeur de λ et de déplacer vers la droite la courbe d'équilibre.

(1) Dans cette région 3 du graphique : H_2CO_3 , H^+ et OH^- sont négligeables, les anions carbonates et bicarbonates sont essentiels.

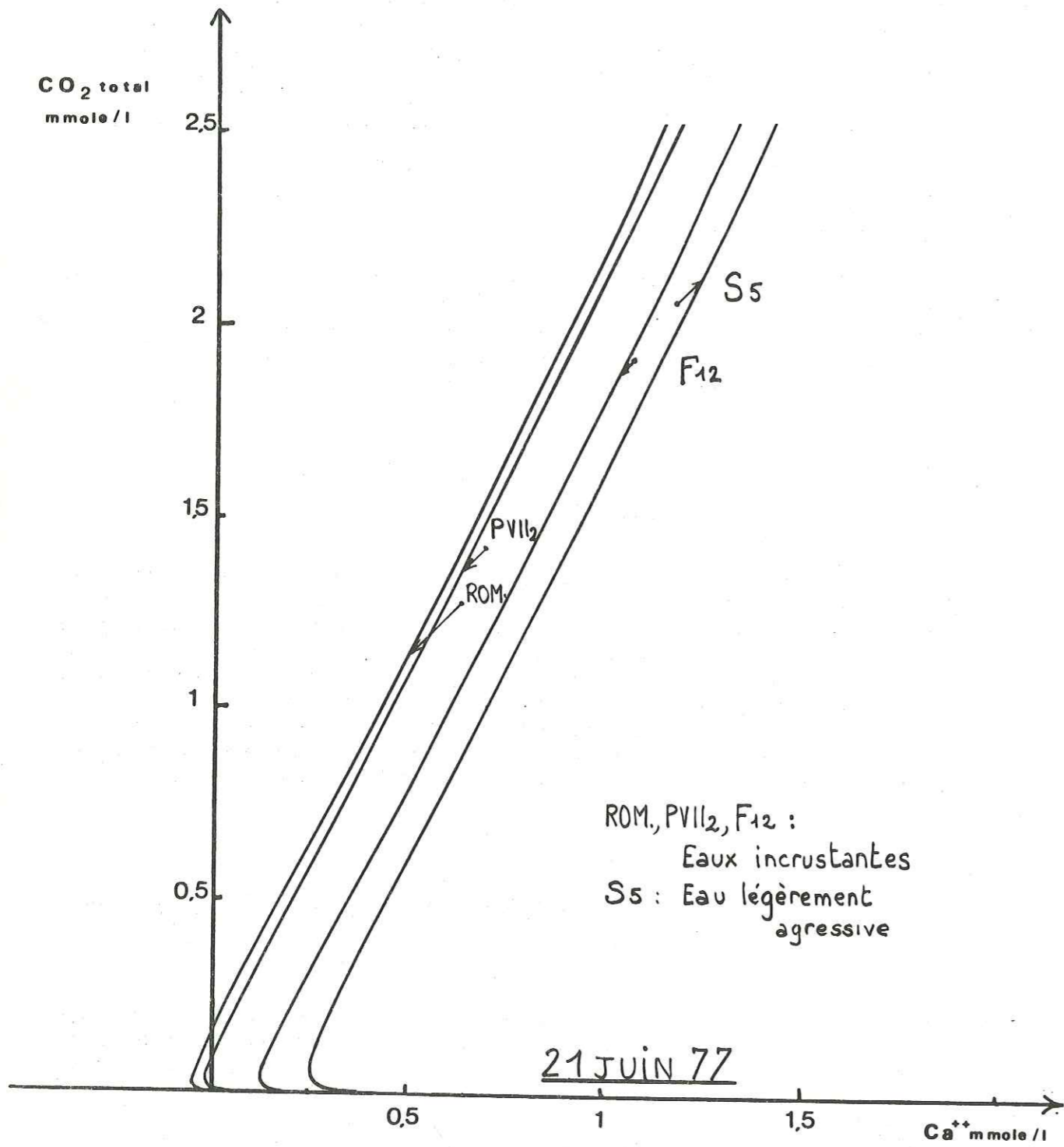


Figure 80 - Pouvoir agressif ou pouvoir incrustant des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy, le 21 juin 1977.-

Si l'eau précipitait du Ca CO₃, les taux du CO₂ total et du calcium diminueraient, ce qui est contraire à ce que nous avons constaté. D'après les résultats d'analyse, les eaux acquièrent à la fois du CO₂ total (notamment sous la forme de bicarbonates de calcium) et des sels de calcium puisque λ augmente au cours du cheminement souterrain. Examinons l'exemple des eaux de la Romanche et de la nappe prélevées le 21 juin 1977 (Figure 80) pour expliquer le phénomène.

Le graphique établi, montre que le pouvoir incrustant des eaux diminue de l'amont vers le "cœur" de la nappe. L'augmentation des sels de calcium (notamment des sulfates) déplace la courbe d'équilibre vers la droite ; l'eau a alors tendance à s'équilibrer sans que son taux de CO₂ total change ; mais, toujours bien aérées les eaux ont tendance à libérer du H₂ CO₃ pour s'équilibrer avec l'atmosphère ; celui-ci ne peut plus s'échapper comme dans la rivière et au contact de l'eau et des sables alluvionnaires riches en calcite, il permet de mettre en solution le carbonate de calcium. Ce double mécanisme se répétant au cours du cheminement souterrain permet d'atteindre progressivement l'inertie puis une légère agression des eaux ; il favorise éventuellement la mise en solution des autres ions.

III-2-3-5 - MELANGE des EAUX dans la NAPPE SOUTERRAINE

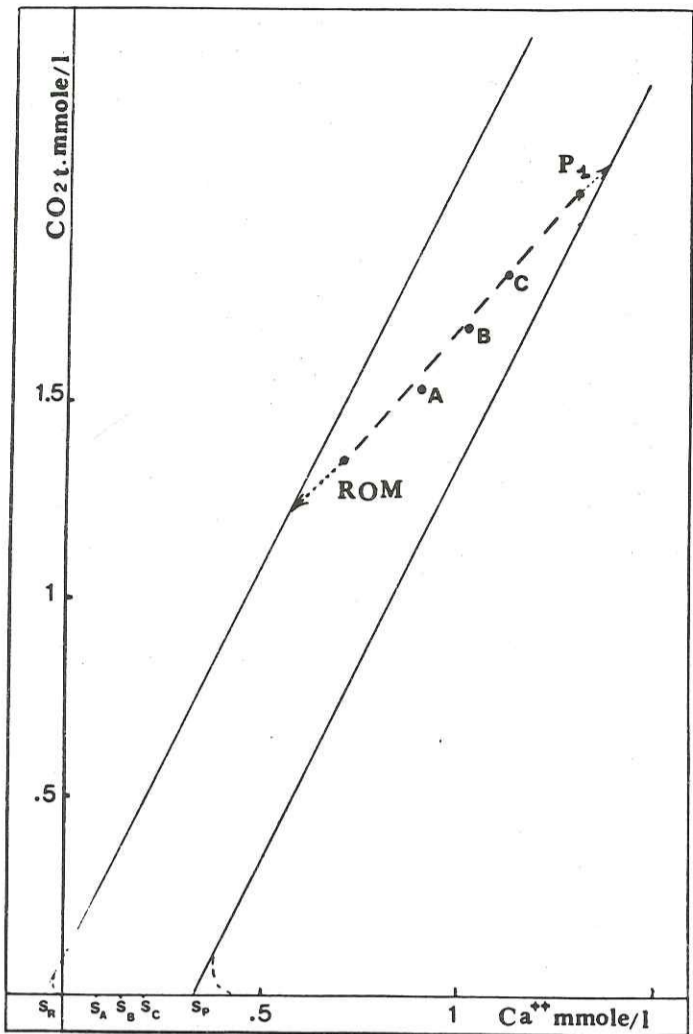
Selon L. LEGRAND et G. POIRIER,

Le point représentatif M d'une eau E correspondant au mélange des deux eaux E₁ et E₂ de composition différente, est le barycentre des points M₁ et M₂ représentatifs des eaux E₁ et E₂ ; S est le barycentre des points S₁ et S₂ ; μ est la moyenne pondérée des forces ioniques μ₁ et μ₂, etc.

Pour vérifier ce phénomène, j'ai étudié au laboratoire, le mélange de deux eaux aux minéralisations assez différentes pour que leurs points figuratifs apparaissent nettement sur le graphique.

JUIN 1977	Romanche	Puits	Mélange A : Valeurs 1/3 Puits : théori- 2/3 Romanche:ques	Mélange B : Valeurs 1/2 Puits : théori- 1/2 Romanche:ques	Mélange C : Valeurs 1/3 Romanche: théori- 2/3 Puits : ques
Ca ⁺⁺	0,7	1,3	0,9	1,0	1,1
CO ₂ total	1,35	2,03	1,53	1,69	1,80
μ	3,34	5,45	4,04	4,395	4,75
λ	- 0,05	0,33	0,08	0,14	0,204

Tableau 55 - Comparaison des caractéristiques des eaux de la Romanche, du puits 1 et de leurs mélanges effectués au laboratoire.-



Etude des mélanges des eaux par la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER -
 Figure 81 - Points représentatifs des eaux de la Manche, du puits et de leurs mélanges.-

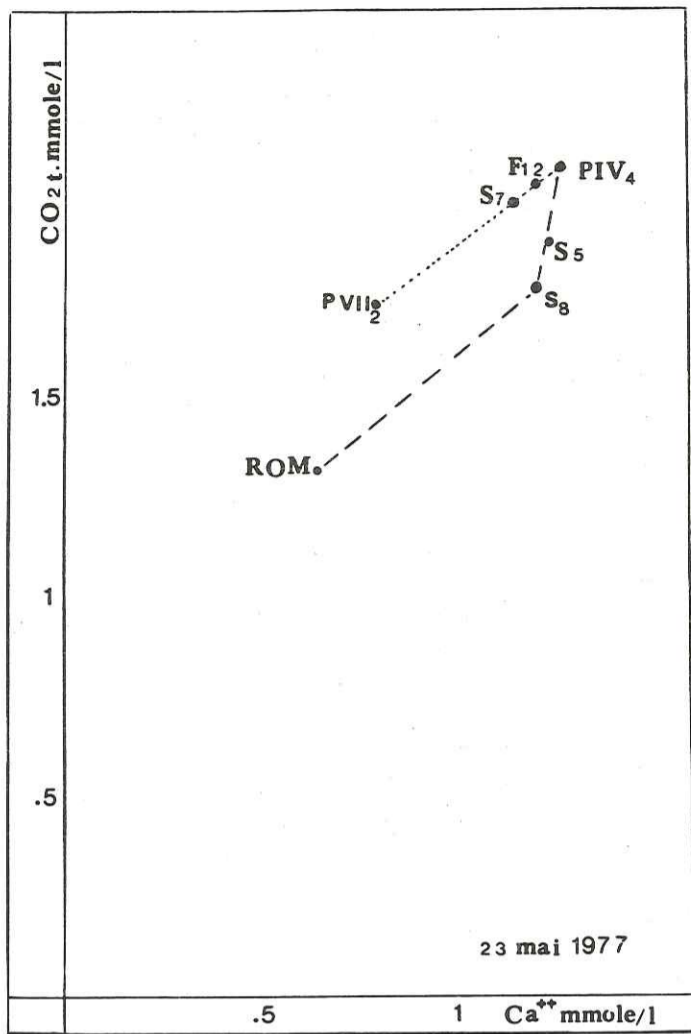
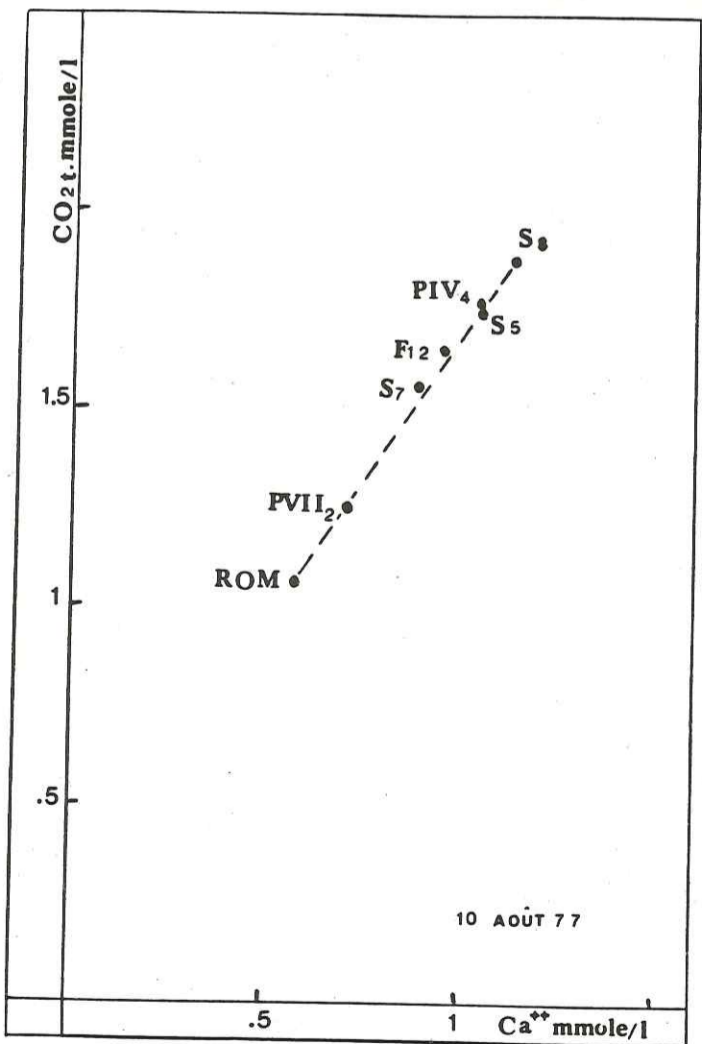


Figure 82 - Points représentatifs des eaux de la Manche, des piézomètres P VII 2, S 7, F 12, P IV 4, et S 5 lors de la recharge de la nappe au printemps.-



Etude des mélanges des eaux par la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER -
 Points représentatifs des eaux de la Manche, des piézomètres P VII 2, S 7, F 12, P IV 4 et S 5 -
 Figure 83 - Lors d'une décrue post-estivale.-

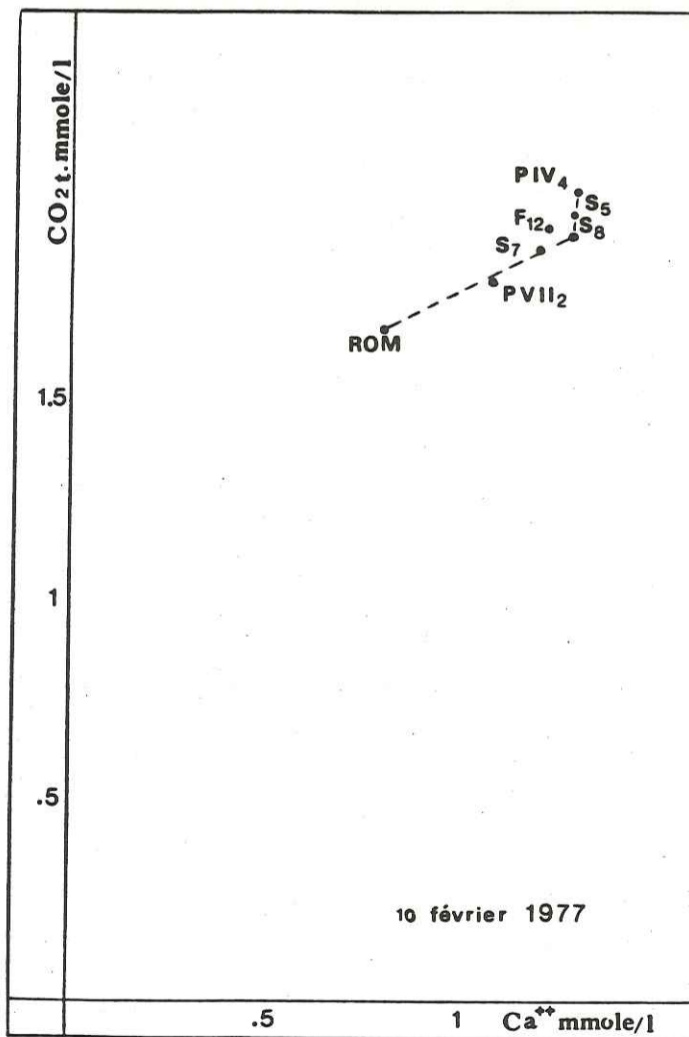


Figure 84 - en basses eaux.-

Les points représentatifs des mélanges se placent sur la droite joignant les points représentatifs des eaux du puits et de la Romanche. Le mélange concerne l'ensemble des éléments chimiques caractéristiques ou fondamentaux (Figure 81 et Tableau 55).

Dans la nappe, le mélange des eaux se fait en présence des sables alluvionnaires ; les phénomènes de mélange peuvent être accompagnés ou non par ceux de mise en solution. Plaçons nous dans le cas le plus fréquent, où les eaux infiltrées viennent se mélanger à des eaux de plus forte minéralisation (eaux de la nappe profonde par exemple). Si les phénomènes de mélange sont prépondérants sur ceux de mise en solution dans les sables alluvionnaires, les points représentatifs des eaux issues du mélange se placeront sur une droite joignant le point représentatif de l'eau de la Romanche et celui de l'eau souterraine, et dériveront les uns des autres dans le sens de l'écoulement des eaux. Dans le cas où les phénomènes de mise en solution sont prépondérants sur ceux de mélange, ils ne se placeront pas sur cette droite.

Ainsi, sur le graphique établi à partir des résultats d'analyses des eaux prélevées lors d'une recharge rapide de la nappe au printemps 1977 (Figure 82), on peut vérifier que les points représentatifs des eaux des piézomètres P VII 2, S 7, F 12, P IV 4, ne se situent pas sur la droite joignant les points représentatifs de la Romanche et de la nappe profonde (S 8) ; elles ne sont pas issues du simple mélange des eaux de la rivière et de la nappe profonde. En pénétrant dans les zones desséchées de la nappe (Figure 85), les eaux de la Romanche ont acquis un excès de minéralisation par rapport à ce mélange. Par contre, le point représentatif des eaux du piézomètre S 5, proche du puits, se situe sur la droite joignant les points représentatifs des eaux de la nappe superficielle (P IV 4) et des eaux de la nappe profonde (S 8). Dans la zone du puits, le mélange des eaux se fait bien.

Au mois d'août de la même année, les points représentatifs des eaux prélevées dans les mêmes piézomètres sont situés sur la droite joignant les points représentatifs des eaux de la Romanche et ceux de la nappe profonde (Figure 83). En cette période de décrue post-estivale, sans pluie, les eaux pénétrant dans les zones de la nappe déjà saturées (Figure 85) acquièrent peu de minéralisation et les phénomènes de mélange sont prépondérants sur les phénomènes d'acquisition.

Pour que les phénomènes de mélange apparaissent nettement sur le graphique il faut que les caractéristiques ou les minéralisations totales des eaux mélangées soient bien différentes. Dans la nappe de Jouchy, les eaux d'infiltration et celles de la nappe font partie de la même famille hydrochimique ; leur minéralisation totale n'est vraiment différente qu'en hautes eaux. En basses eaux, la minéralisation totale des eaux d'infiltration qui est proche de celle de la nappe profonde, varie peu en pénétrant dans les couches alluvionnaires déjà saturées ou en se mélangeant aux eaux profondes (Figure 84).

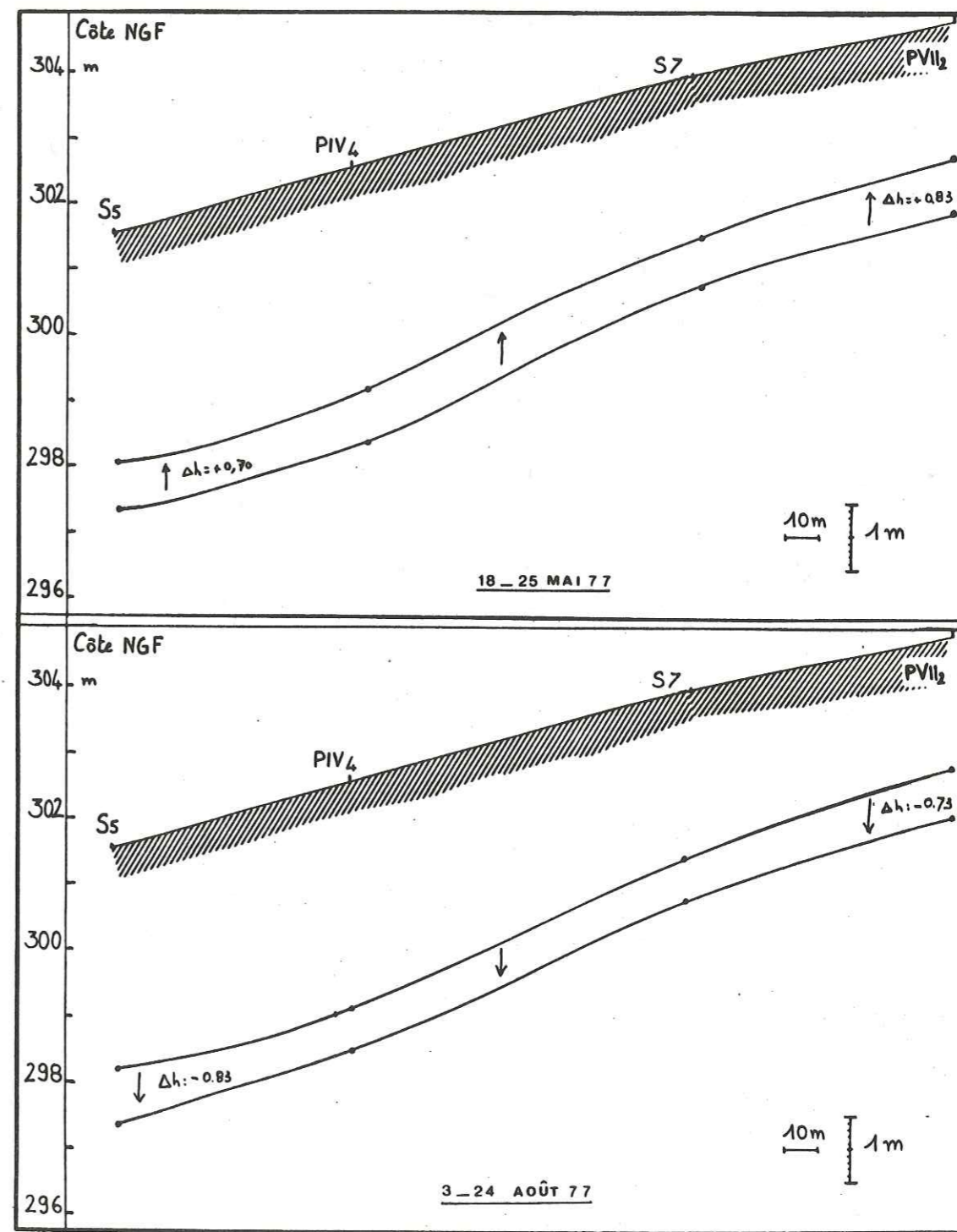


Figure 85 - Variations des niveaux du toit de la nappe de Jouchy lors d'une recharge au printemps (18-25 mai 1977) et lors d'une décrue post-estivale (3-24 août 1977).-

III-3 - MISE EN SOLUTION DES SULFATES

Nous avons déjà constaté que le taux des sulfates des eaux infiltrées dans la nappe augmentait au cours du cheminement souterrain (chapitre II-1).

La méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER, par l'étude du facteur λ , a permis de mettre en évidence le phénomène et de constater que l'acquisition des sulfates de calcium se faisait préférentiellement à celle des sulfates des autres cations. Les essais de percolation, effectués au laboratoire permettent de mettre en évidence eux aussi, que la mise en solution des sulfates de calcium participe largement à l'augmentation de la minéralisation totale des eaux au contact des sables alluvionnaires.

Une première explication du phénomène nous a été donnée par la possibilité de mélange des eaux d'infiltration (eaux de la Romanche essentiellement) avec les eaux plus séléniteuses des apports souterrains en provenance des nappes situées à l'amont. Mais pour expliquer que cette acquisition se produit avant même tout mélange des eaux dans la nappe, d'autres processus pourront être évoqués.

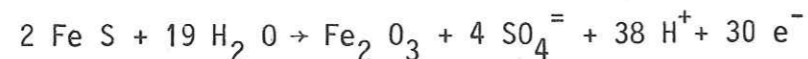
Il est admis que la mise en solution des sulfates dans les eaux des terrains sédimentaires est le résultat :

- 1) de la dissolution des évaporites (gypse : $\text{Ca SO}_4, 2 \text{ H}_2\text{O}$)

La solubilité du sulfate de calcium est de l'ordre de 2 g/l (2,016 g/l à 18°C). Cette solubilité augmente avec la concentration en d'autres sels. Elle atteint 7,3 g/l (à 20°C) dans une solution de Na Cl à 130 g/l ; elle augmente également avec la température.

La solubilité du sulfate de magnésium est beaucoup plus grande (355 g/l à 20°C). Les évaporites contiennent toujours une proportion plus ou moins grande de Mg SO_4 ; c'est pourquoi, dans les eaux séléniteuses, quand la saturation en sulfate de calcium est atteinte, on peut voir augmenter encore le taux de sulfates en corrélation avec celui du magnésium.

- 2) de l'oxydation des pyrites, en présence d'eau :



L'oxydation des sulfures est une réaction très lente en l'absence de bactéries spécifiques à la température du sol et du sous-sol. Les bactéries du groupe *Thiooxydans* accélèrent la réaction.

Comme le signale H. SCHOELLER (1962), ... "il suffit d'une très petite quantité de sels solubles dans la roche ou d'une très petite quantité d'éléments chimiquement attaqués par l'eau pour donner une concentration relativement élevée".

Ainsi, considérons 1 m³ de sables de densité voisine de 2 et d'une porosité de 15 %. Ce volume contient 150 litres d'eau et 850 litres de sables. Pour que l'eau atteigne la saturation en sulfate de calcium, voisine de 2 g/l, elle doit en dissoudre 300 g, dans le volume considéré. Or, 850 litres de sables pèsent environ 2 550 Kg. Il suffit donc que ce volume de sable contienne une quantité de sulfates correspondant à 0,01 % de sa masse, pour que l'eau se sature en sulfate de calcium.

Les phénomènes d'enrichissement des eaux, au cours du cheminement souterrain ont surpris depuis longtemps les hydrogéochimistes. Ainsi, A.N. HERMAN, notait en 1971 que, ... "le plus difficile est de savoir pour quelles raisons, les eaux hydrocarbonatées se transforment, suivant la profondeur, en eaux sulfatées, puis en eaux chlorurées, avec augmentation de la concentration en sels, jusqu'à former des saumures. Il est important de souligner que ces changements sont observables dans la plupart des bassins contenant des eaux souterraines et ne dépendent pas des roches environnantes".

Pour expliquer ce phénomène, il évoque divers processus, tels que la redistribution des sels entre les roches et les eaux souterraines par dissolution et adsorption.

Pour sa part, R.M. GARRELS (1976) attribue aux sulfates "retenus" dans le sous-sol, 80 % ou plus des sulfates dissous ensuite dans les eaux superficielles ou souterraines.

Les phénomènes d'adsorption et de désorption de substances minérales (électrolytiques ou non), sur les sables alluvionnaires ont été étudiées au laboratoire par W.W. WOOD (1978). En faisant percoler des solutions de sulfate de sodium ($\text{Na}_2 \text{ SO}_4$) titrées, sur des sables délavés de l'aquifère de l'Ogallala (Texas, Nouveau Mexique, U.S.A.), il a pu constater, en analysant les eaux gravitaires :

- 1) que les quantités de sulfates adsorbés sont d'autant plus grandes que le diamètre des sables est plus petit ;
- 2) que les quantités de sulfates adsorbés dépendent plus de la granulométrie que de la composition minérale des sables. En effet, en remplaçant dans la colonne expérimentale, les sables par des billes de verre de même calibre, il a obtenu des pourcentages d'adsorption des sulfates, comparables ;
- 3) que les phénomènes d'adsorption sont réversibles mais que la "désorption" est un phénomène lent, qui dépend plus des conditions physico-chimiques de l'expérience (pression, température, environnement chimique...). Ainsi, il a pu mettre en évidence, que la présence des phosphates favorise la désorption et qu'au contraire, la présence d'hydroxyde de fer et des pH supérieurs à 8, la ralentissent.

Diverses autres expériences ont montré que la simple infiltration des eaux à travers les sables alluvionnaires ne suffit pas à dissoudre les sulfates qui y sont adsorbés.

Essais par agitation avec de l'eau distillée			
Date des essais	Quantité d'eau ajoutée	Conc. en SO ₄ de l'eau surnageante mg/l	Quantité de sulfates dissous exprimée en % du poids total
Echantillon de 22,133 g	100 ml	25	2,5
de 23.III.81	100 ml	10	1,0
de 1.IV.81	100 ml	3	0,3
sables de 5.VI.81	100 ml	6	0,6
secs de 7.VII.81	100 ml	4,5	0,45
Total	100 ml	2,5	0,25
			5,1
Fraction 0,315 > d > 0,25 mm :	50 ml	36	1,8
de 29,49 g de sables de 10.VII.81	50 ml	19	0,95
secs	50 ml	19	0,95
Total	50 ml	12	0,6
			0,3
			4,6
Fraction 0,25 > d > 0,20 mm :	50 ml	27	1,35
de 18,19 g de sables de 10.VII.81	50 ml	12	0,6
secs	50 ml	9	0,45
Total	50 ml	9	0,45
			0,3
			3,15
Fraction 0,20 > d > 0,16 mm :	50 ml	22,5	1,12
de 11,17 g de sables de 10.VII.81	50 ml	8	0,4
secs	50 ml	5,5	0,28
Total	50 ml	4,5	0,22
			0,12
			2,14

Tableau 56

Essais par percolation sur colonne de sables			
Date des essais	Quantité d'eau distillée ajoutée	Quantité gravitaire recueillie	Quantité de sulfates dissous exprimée en % du poids total
Echantillon de 1 200 g	2 650	2 250	56
de 9.I.80	1 750	1 400	82
de 17.III.80	825	475	39
sables secs de 5.VI.80	2 000	1 600	27
de 20.VI.80	2 000	1 700	15
de 20.VII.80	2 000	1 850	14
Total	10 019	8 325	233
			0,0275
Echantillon de 1 600 g	1 850	1 350	169
de 23.XI.78	1 950	1 600	13
de 8.I.79	1 000	500	51
de 14.V.79	1 500	1 000	42
sables secs de 25.V.79	2 350	1 950	14
de 6.VII.79	2 000	1 500	44
Total	10 021	7 350	333
			0,029

Tableau 57

Essais d'épuisement des sulfates des sables alluvionnaires.

III-3-1 - Acquisition des sulfates au contact des sables alluvionnaires

III-3-1-1 - QUANTITE de SULFATES SOLUBLES CONTENUE dans les SABLES

L'analyse semi-quantitative par diffraction aux rayons X des sables alluvionnaires, recueillis sur les berges de la Romanche (chapitre I-5 - 2ème partie), n'a pas permis de mettre en évidence la présence d'évaporites ou de pyrites à des taux supérieurs à 1 % du poids total ; mais, nous avons vu qu'une quantité 100 fois plus petite suffirait à expliquer la saturation des eaux en sulfate de calcium.

Afin d'évaluer la quantité de sulfates solubles contenus dans les sables, les expériences suivantes ont été réalisées :

les fractions calibrées de sables prélevés en janvier 1977, qui ont fait l'objet de l'analyse granulométrique (chapitre I-5) et des essais de percolation (chapitre III-1-2) ont été agitées avec de l'eau distillée dépourvue de sulfates (agitation magnétique, pendant 1 heure). Après décantation de 24 H, on a recueilli et analysé l'eau surnageante puis on a fait sécher ces mêmes fractions de sables à 100°C ; on a recommencé l'opération plusieurs fois de suite, jusqu'à ce que le taux de sulfates de l'eau surnageante soit constant et proche de la limite de détection de la méthode de dosage.

On a également cherché à épuiser une colonne de sables avec de l'eau distillée conformément au protocole des essais décrits au chapitre III-1-2-1.

Le déroulement des essais et les résultats obtenus sont portés dans les tableaux 56 et 57.

Par leurs expériences sur les sables de l'aquifère du Val de Clywd (Angleterre) provenant des dépôts permo-triasiques, glaciaires, lacustres et fluviatiles, composés de plagioclase, de feldspath K, de calcite et de dolomite, et ne contenant pas plus de 0,5 % de soufre, D.A. SPEARS et M.J. REEVES (1975) ont vérifié que seuls les sulfates, parmi les autres ions analysés, sont plus concentrés dans les eaux résiduelles des sables que dans les eaux de la nappe qui en sont issues. Selon ces auteurs, en dehors des phénomènes simples de mise en solution des sulfates à partir des dissolutions des évaporites ou à partir de l'oxydation des pyrites, la présence des sulfates dans les eaux souterraines des nappes alluviales, peut être le résultat de phénomènes complexes d'adsorption ou de rétention, puis de désorption ou d'entraînement des ions sulfates sur les sables alluvionnaires.

Pour savoir si de tels processus sont possibles et quelles en sont les conditions à Jouchy, les mesures et les expériences exposées dans les chapitres suivants ont été effectuées.

On peut constater que les quantités de sulfates, mises en solution au cours des expériences ne dépassent pas 0,03 % du poids total des sables utilisés.

Nous ne sommes pas sûrs d'avoir ainsi mis en solution, sous forme de sulfates, la totalité du soufre contenue dans les sables, mais les résultats obtenus suffisent largement à expliquer les concentrations relativement élevées des eaux infiltrées. En effet, en appliquant à une "tranche" de nappe, les pourcentages de sulfates mis en solution après épuisement des sables au laboratoire, on peut constater que les concentrations en sulfates des eaux souterraines sont faibles par rapport à celles susceptibles d'être dissoutes.

Ainsi, considérons un volume de 100 m³ de sables correspondant à une "tranche" de nappe de 1 m d'épaisseur et de 100 m² de section. Ce volume comprend 85 000 litres de sables et 15 000 litres d'eau, compte tenu du coefficient d'emmagasinement de 15 %. D'après nos expériences, 1 litre de sables secs pèse environ 1 350 g et contient 0,03 % de sulfates de calcium.

Le "potentiel" de sulfates contenus dans les sables s'élève donc à :

$$\frac{85\ 000 \times 1\ 350 \times 0,03}{100} = 34\ 425\ \text{g}$$

Si cette quantité se dissolvait totalement dans les 15 000 litres d'eau présents, la concentration en sulfates s'élèverait à 2,3 g/l*. Les eaux de la nappe ont des concentrations 50 fois plus faibles. Une simple infiltration n'est donc pas suffisante pour dissoudre la totalité des sels présents.

Les traces de gypse issues par érosion du petit bassin versant de la plaine de Jouchy, justifient à elles seules, l'existence de telles proportions de soufre.

Ces expériences effectuées dans des conditions très différentes de celles existantes "in situ", ne permettent pas de déterminer quelles espèces chimiques du soufre sont présentes dans les phases solide ou aqueuse, mais les résultats obtenus suffisent largement à expliquer les concentrations relativement élevées des eaux de la nappe, analysées.

La réserve des espèces du soufre retenues dans les sables de la nappe de Jouchy, est, au regard de ces résultats, pratiquement inépuisable ; elle l'est d'autant plus que les eaux d'infiltration, notamment celles de la Romanche, contiennent elles-mêmes des sulfates (dont les concentrations atteignent 50 mg/l en basses eaux) susceptibles de la renouveler par adsorption.

* 2,3 g/l de l'ion SO₄⁼.

III-3-1-2 - QUELQUES OBSERVATIONS sur les CONDITIONS PHYSICO-CHIMIQUES de la MISE en SOLUTION des SULFATES

Comme W.W. WOOD avait pu le constater et d'après les résultats des expériences effectuées, la mise en solution des sulfates dans les eaux dépend de la granulométrie ; en effet, plus le diamètre des sables est petit, plus les quantités relatives de sulfates dissoutes sont grandes (Tableau 56). Selon W.W. WOOD, cette observation s'explique parce que les phénomènes de sorption (adsorption et désorption) dépendent de la surface efficace (ou spécifique) de l'adsorbant. J. ROCHON (1978) estime, pour sa part, à quelques dizaines, voire quelques centaines de m² par gramme, la surface efficace d'un adsorbant poreux. Si la sorption est le phénomène physique mis en jeu dans la nappe de Jouchy, il explique la grande quantité de sels retenus sur les sables.

Il est bon de rappeler que les conditions d'expériences au laboratoire sont différentes de celles qui entrent en jeu "in situ". Sans doute de nombreux facteurs physico-chimiques ou biochimiques conditionnent ces phénomènes. Parmi eux, nous avons pu observer que le degré d'humidité des sables joue un rôle déterminant. Lors de la troisième expérience décrite dans le chapitre III-1-2, un bilan des sulfates, mis en solution au cours des percolations successives, a été réalisé (Tableau 58)

	1er jour	48 h après	6 semaines après
a : quantité d'eau initiale versée (Romanche à 23 mg/l de SO ₄ ⁼) en ml ..	2 000	2 000	2 000
b : quantité d'eau recueillie en ml ..	1 500	1 640	1 540
c : nombre de fractions de 50 ml ..	30	33	31
d : quantité totale de sulfates dissous en mg de SO ₄ ⁼ ..	205	48	78
e : quantité de sulfates contenue dans le même volume d'eau initiale en mg de SO ₄ ⁼ ..	34,5	38	36
d-e : excès de sulfates dissous en mg de SO ₄ ⁼ ..	170,5	10	42
soit en % : $\frac{100(d-e)}{d}$..	83 %	21 %	54 %

Tableau 58 - Bilan hydrochimique des sulfates mis en solution lors des essais de percolation sur les sables alluvionnaires.-

On observe que l'excès de sulfates mis en solution est d'autant plus important que la période entre deux percolations est plus grande (Figure 86) ; par conséquent, plus les sables sont secs, plus la mise en solution des sulfates est effective.

III-3-2 - Origine géologique des sulfates des eaux de la Romanche et de la nappe - Analyses isotopiques du soufre des eaux naturelles

La proportion entre l'isotope lourd ³⁴S et l'isotope léger ³²S du soufre est utilisé en géologie comme paramètre génétique des dérivés soufrés. Elle permet, en effet, de préciser l'origine de l'ion sulfate présent dans les eaux, par l'étude de l'évolution de la teneur isotopique du soufre des terrains géologiques connus et des ions sulfates mis en solution. Elle est exprimée par la relation générale appliquée au cas du soufre, en référence à l'abondance isotopique d'un étalon, la troïlite du Canyon Diablo, dont le rapport :

$$R_{st} = \frac{{}^{32}S}{{}^{34}S} = 22,2$$

$$\delta \text{ } ^{34}\text{S} \text{ ‰} = \frac{R \text{ échantillon} - R_{st}}{R_{st}} \cdot 10^3$$

$$\text{ou } R = \frac{\text{Abondance de l'isotope lourd } ^{34}\text{S}}{\text{Abondance de l'isotope léger } ^{32}\text{S}}$$

Le soufre des météorites a été choisi comme référence à cause de la constance de sa composition. Il est possible d'attribuer une origine géologique aux sulfates des eaux naturelles quand leur genèse est issue d'une réaction chimique intervenant sans nouveau fractionnement isotopique.

Ainsi, comme la mise en solution des sulfates à partir des évaporites naturelles ($\text{Ca SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4$) se fait sans fractionnement, les sulfates issues des terrains triasiques ont des $\delta \text{ } ^{34}\text{S}$ proches de ceux du gypse (+ 16 ‰).

La réaction géologiquement la plus importante est la réduction des sulfates où l'hydrogène sulfuré formé (et les sulfures qui précipitent) sont appauvris en ³⁴S tandis que le sulfate restant, s'enrichit par effet de bilan. Ainsi, les pyrites naturelles ont des $\delta \text{ } ^{34}\text{S}$ faiblement positifs ou mêmes négatifs ; les sulfates des eaux issues des terrains pyriteux, par oxydation secondaire, présentent eux-aussi des $\delta \text{ } ^{34}\text{S}$ faiblement positifs ou négatifs.

Dans les terrains sédimentaires, on peut observer la première phase du fractionnement isotopique lors de la réduction bactérienne des sulfates. La forme réduite, insoluble, s'appauvrit tandis que la forme oxydée restante s'enrichit en ³⁴S, par effet de bilan.

Cette dernière est susceptible de passer facilement en solution dans les eaux, car, comme le signale G. PILOT (traduit par R. LETOLLE - 1975), l'expérience montre la tendance de l'isotope lourd ³⁴S, à former des composés oxydés où la liaison ionique est la plus solide et la plus soluble, au détriment des formes réduites.

Les analyses effectuées par B. BOSCH et ses collaborateurs en 1972, sur les roches présentes dans les formations géologiques de la région grenobloise ont permis d'attribuer au gypse du trias un $\delta \text{ } ^{34}\text{S}$ de + 16 ‰ et aux formations pyriteuses des valeurs positives de l'ordre de + 3 ‰. Selon G. BERGER et ses collaborateurs (1977), les eaux des précipitations ont des $\delta \text{ } ^{34}\text{S}$ compris entre - 1,4 et + 3 ‰. La neige prélevée par D. JAMIER (1975) dans le massif du Trient (Haute-Savoie) en 1974, présentait des $\delta \text{ } ^{34}\text{S}$ de + 3,6 ‰.

Des analyses isotopiques du soufre (1) ont été effectuées sur les eaux de la Romanche avant et après les premières crues du printemps 1978 et sur les eaux du puits 1, des piézomètres P VII 2, P IV 1 et F 12 à différentes profondeurs (Tableau 59). Pour connaître les caractéristiques de ces piézomètres on se reportera au chapitre II-3-1 consacré aux analyses du tritium.

Echantillons	$\delta \text{ } ^{34}\text{S}$ en ‰ à $\pm 0,2$ ‰	Concentration en SO_4 mg/l
Romanche, face à Jouchy		
7.03.78	+ 3,8	34
13.06.78	+ 0,8	17
Puits 1 de Jouchy		
7.03.78	+ 8,3	53
13.06.78	+ 8,1	46
Piézomètres		
P VII 2 13.06.78	+ 1,6	19
P IV 1 13.06.78	+ 6,3	32
F 12 (-4 à -30,5 m) 6.06.78	+ 6,3	46
F 12 (-40 à -45 m) 6.06.78	+ 6,8	50
F 12 (-49 à -54 m) 6.06.78	+ 6,8	44

Tableau 59 - Résultats des analyses isotopiques du soufre (³⁴S) des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy.-

(1) Analyses effectuées par le laboratoire de l'Université de PARIS VI, grâce aux crédits alloués par le Ministère de l'Environnement.-

Les résultats des analyses effectuées permettent de faire plusieurs constatations :

- 1) Les $\delta^{34}\text{S}$ de la Romanche sont positifs, mais faibles, notamment au printemps (+ 0,8 ‰ en juin 1978). Les eaux qui circulent dans la rivière sont essentiellement des eaux de fonte des neiges du bassin versant dont le δ est comparable à celui des précipitations. A cette saison, les taux de sulfates des eaux de la Romanche sont compris entre 10 et 20 mg/l (17 mg/l le 13/06/78). L'augmentation du $\delta^{34}\text{S}$ des eaux de la Romanche en basses eaux (+ 3,8 ‰ en mars 1978) correspond à celle du taux des sulfates (34 mg/l le 7/03/78). Elle est sans doute à attribuer au drainage des eaux de surface ou souterraines enrichies en sulfates triasiques qui viennent grossir les débits de la Romanche en cette saison.
- 2) Les eaux de la nappe ont des $\delta^{34}\text{S}$ plus élevés atteignant + 8 ‰ dans le puits. De l'amont de la plaine (P VII 2) vers le captage (F 12, puits 1), au cours du cheminement souterrain, on enregistre une augmentation du taux des sulfates dissous et un enrichissement en isotope lourd (Tableau 59). Cet enrichissement signifie que les sulfates mis en solution ne proviennent pas d'une oxydation des pyrites naturelles. Les valeurs positives du $\delta^{34}\text{S}$, inférieures à + 10 ‰, pourraient être attribuées, comme le fait G. BERGER (1977), à une pollution due aux sulfates des engrais, dont la composition isotopique moyenne est de + 8 ‰ ; mais dans le cas de la nappe de Jouchy, cette dernière hypothèse peut être écartée, d'une part, parce qu'aucun engrais n'est utilisé sur la plaine, et d'autre part, parce que les eaux de la Romanche qui reflètent la composition isotopique des eaux superficielles du bassin versant, ont un δ bien inférieur à + 8 ‰. Les $\delta^{34}\text{S}$ des eaux de la nappe sont partout inférieurs à ceux des terrains gypseux de la région dont le δ est de l'ordre de 16 ‰ (B. BOSCH et coll. 1972).

- Pour Ph. OLIVE (1), l'enrichissement en soufre lourd des eaux de la nappe de Jouchy, qui s'accompagne d'une augmentation de la concentration en sulfates, peut être attribué au mélange des eaux superficielles de la Romanche (pour lesquelles $\delta^{34}\text{S}$ varie de + 0,8 ‰ à + 3,8 ‰ et la concentration en $\text{SO}_4^{=}$, C, varie de 17 à 34 mg/l) et des eaux issues des gypses triasiques (pour lesquelles : $\delta^{34}\text{S} = + 16$ ‰ serait atteint pour une concentration C supérieure à 90 mg/l).

(1) Je remercie M. Philippe OLIVE du Centre de Recherches Géodynamiques (Université Pierre et Marie Curie - 74203 THONON-les-BAINS) d'avoir bien voulu m'aider à interpréter ces analyses isotopiques.-

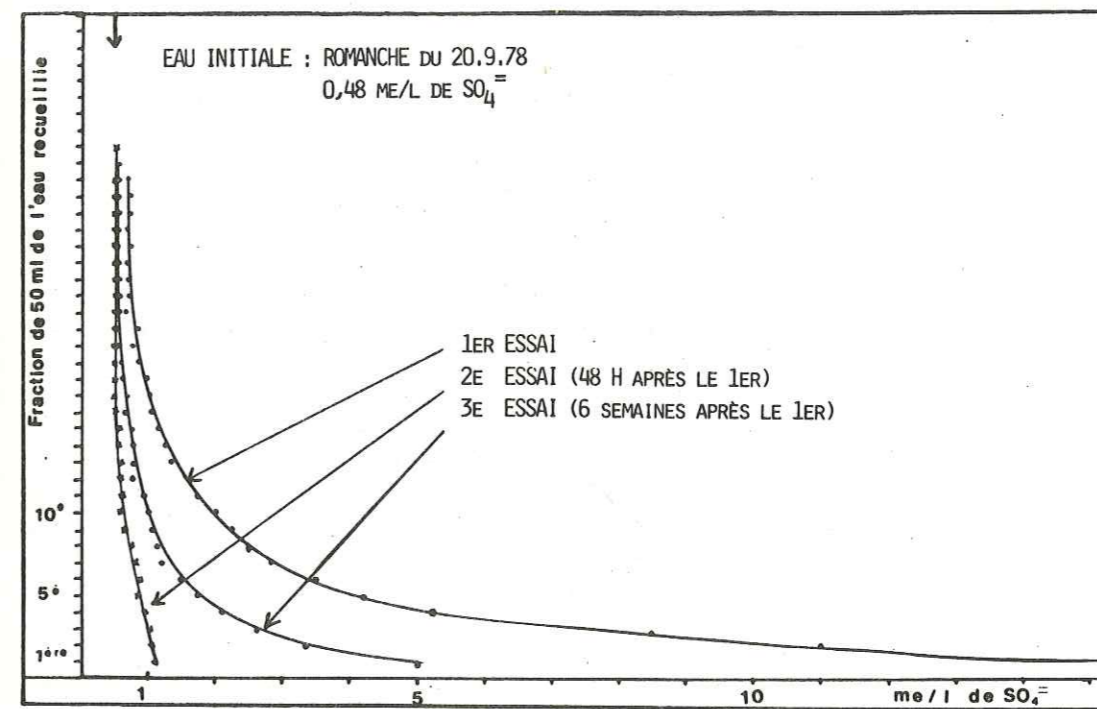


Figure 86 - Taux des sulfates des fractions d'eau recueillies au cours des expériences de percolation (trois essais successifs sur la même colonne de sables).-

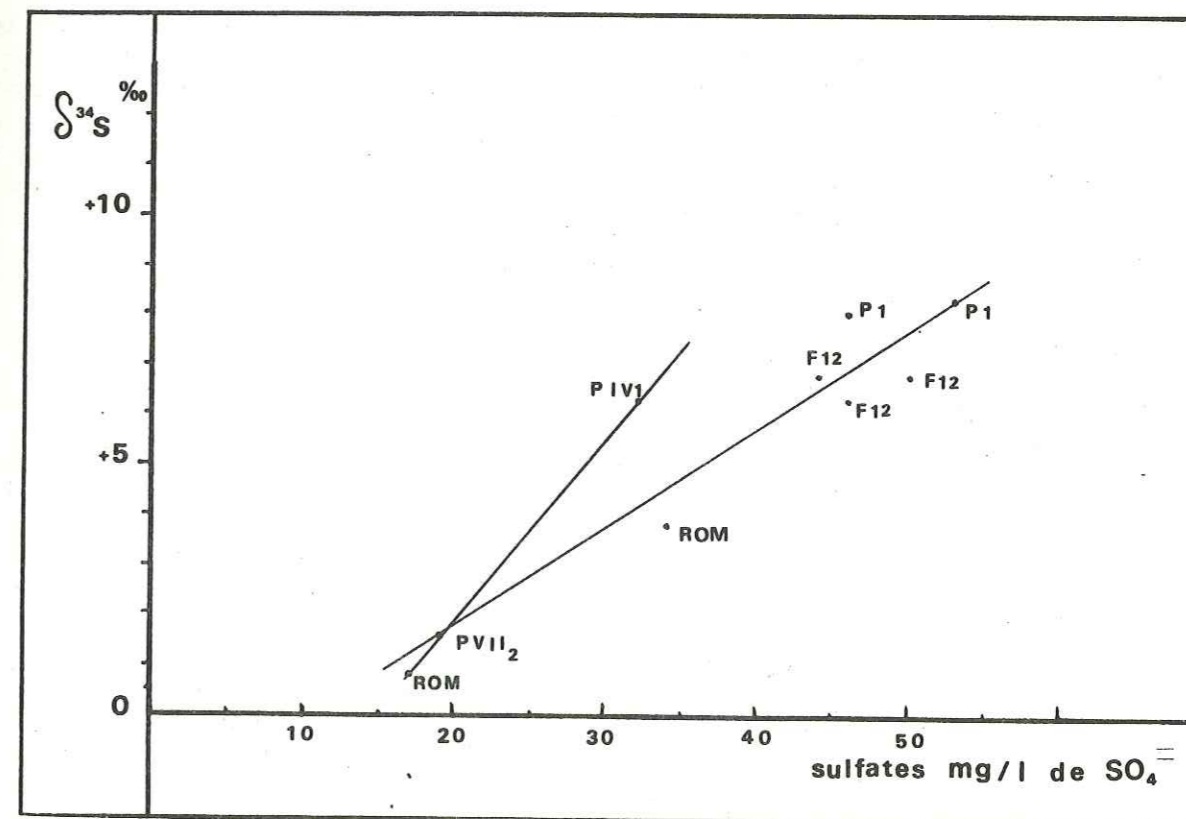


Figure 87 - Relation entre le $\delta^{34}\text{S}$ et le taux des sulfates des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy.-

Les résultats des 9 analyses effectuées permettent de lier la concentration des sulfates (C, exprimée en mg/l) à celui du $\delta^{34}\text{S}$ par une relation linéaire (Figure 87)

$$\delta^{34}\text{S} = 0,2 \text{ C} - 2 \text{ ‰}$$

L'analyse isotopique d'une eau souterraine, prélevée à Jouchy ou à l'Ile Falcon, dont la concentration en sulfates dépasserait 90 mg/l devrait confirmer cette conclusion. Malheureusement, pour notre expérience (mais heureusement pour la qualité des eaux), aucune eau prélevée dans la nappe ne présente des concentrations supérieures à 72 mg/l. On ne peut que supposer qu'au delà de 90 mg/l, le $\delta^{34}\text{S}$ ‰ des eaux est égal à + 16 ‰ et reste constant (asymptote de la courbe de relation).

- On peut également remarquer que les eaux de la Romanche, prélevées le 7 mars 1978, et celles du piézomètre P IV 1, prélevées le 13 juin 1978, présentent des concentrations en ions sulfates voisines (32 et 34 mg/l) mais des $\delta^{34}\text{S}$ bien différents (+ 3,8 ‰ et + 6,3 ‰).

Nous avons vu dans les chapitres précédents que, lors des recharges de la nappe du printemps à travers les berges et le lit de la rivière, la mise en solution des sulfates était effective dès les premiers mètres de l'infiltration. Au cours de cette recharge l'enrichissement en isotope lourd est encore plus important que par le simple mélange des eaux en profondeur. On peut, en effet tracer une droite passant par les points représentatifs des eaux prélevées le 13 juin 1978, celles de la Romanche et celles des piézomètres P VII 2, (zone d'infiltration préférentielle) et P IV 1 (bord des rives) concernés par cette recharge.

Cette droite correspond à la relation :

$$\delta^{34}\text{S} = 0,37 \text{ C} - 5,5 \text{ ‰}$$

Pour C = 46 mg/l, $\delta^{34}\text{S} = + 11,5 \text{ ‰}$;

or, on peut constater que le $\delta^{34}\text{S}$ des eaux des puits, prélevées le 13 juin 1978, est bien inférieur et s'élève à + 8,1 ‰.

Le mélange des eaux nouvellement infiltrées lors de la recharge de la nappe et des eaux profondes permet donc d'atténuer cet enrichissement ;

Le $\delta^{34}\text{S}$ des eaux les plus profondes (F 12) s'élève en effet à + 6,8 ‰ (le 6 juin 1978) pour la même concentration en sulfates. On peut calculer approximativement la répartition des apports des zones profondes et de ceux des zones superficielles dans le mélange des eaux pompées, le 13 juin :

$$\begin{aligned} \text{Si, } x + y &= 100 \quad \text{et} \\ 6,8 x + 11,5 y &= 8,1 \times 100 \end{aligned}$$

72 % des sulfates du puits proviendraient des apports souterrains et 28 % des infiltrations nouvelles, le 13 juin 1978 (hautes eaux).

En basses eaux, ces proportions sont certainement différentes quand les infiltrations ont lieu dans les zones déjà saturées de la nappe.

Qu'elle se passe par mélange avec les eaux des apports souterrains ou par acquisition au contact des sables alluvionnaires, l'augmentation de la concentration en sulfates, au cours du cheminement souterrain, s'accompagne d'un enrichissement en soufre lourd que l'on peut attribuer essentiellement aux gypses triasiques mis en solution.

L'enrichissement en soufre lourd des eaux dans les couches superficielles de la nappe peut être également la conséquence de l'activité réductrice des bactéries sulfito-réductrices.

- Comme nous l'avons vu, dans les terrains sédimentaires, l'activité bactérienne peut se traduire par un fractionnement isotopique lors de la réduction partielle des sulfates retenus par les sables ; les dérivés soufrés réduits, les plus légers sont peu solubles ; les formes oxydées restantes, les plus lourdes, et les plus solubles, peuvent occasionner un enrichissement des eaux souterraines en ^{34}S lors d'une infiltration.

Les bactéries du groupe Desulfovibrio sont des germes anaérobies facultatifs ; ils résistent à l'aération mais leur activité est plus importante dans les zones à faible teneur en oxygène ; ils existent en abondance dans les rivières et les sols. Leur présence est fréquemment relevée dans les eaux de la Romanche. Ainsi, 57 analyses bactériologiques ont été effectuées par le laboratoire de La Tronche, sur des eaux de la rivière prélevées en rive gauche, face à Jouchy, du mois de janvier 1977 au mois d'avril 1981 ; 54 d'entre elles révèlent la présence de Clostridium sulfito-réducteurs, 34 à des taux compris entre 10 et 50 germes pour 100 ml d'eau, 16 à des taux compris entre 50 et 200 germes pour 100 ml d'eau, et 4 à des taux compris entre 200 et 400 germes pour 100 ml d'eau. L'absence totale de ces germes dans les eaux souterraines de la nappe montre qu'ils sont retenus sur les sables des alluvions par filtration naturelle.

L'enrichissement des eaux en soufre lourd, dû à l'activité bactérienne lors des infiltrations à travers les rives n'est donc pas impossible, mais les quelques analyses et expériences effectuées ne me permettent pas d'être plus affirmative à ce sujet.

III-3-3 - Discussion des résultats concernant l'hydrochimie des sulfates

Un bilan chimique des sulfates peut être établi à partir des concentrations moyennes annuelles des eaux des différents termes du bilan hydrogéologique.

Termes du bilan annuel	débits m ³ /s	Volume annuel m ³	Concentration moyenne annuelle en g/m ³ de SO ₄ ⁼	Quantités totales de sulfates dis- soutes en tonnes	
apports {	Q ₁ : apports souterrains	0,237	7,47.10 ⁶	50	373
	I : infiltrations				
	. Romanche	1,308	41,25.10 ⁶	29	1 196
	. Apports des versants	0,060	1,89.10 ⁶	20	37,8
	. Pluies	0,012	0,38.10 ⁶	5	1,9
Total ...	<u>1,617</u>	<u>51.10⁶</u>		<u>1 609</u>	
nappe {	J : eaux du puits 1	0,320	10,09.10 ⁶	55,5	560
	S : sources	0,980	30,90.10 ⁶	53	1 638
	Q ₂ : départs souterrains	0,317	10,0.10 ⁶	53	530
	Total ...	<u>1,617</u>	<u>51.10⁶</u>		<u>2 728</u>

Tableau 60 - Bilan chimique des sulfates des eaux de la nappe de Jouchy.-

On constate que 2 728 - 1 609 = 1 119 tonnes/an de sulfates (1) sont mis en solution dans les eaux de la nappe, ce qui correspond à une acquisition supplémentaire moyenne de 22 mg/l. La mise en solution des sulfates dans les eaux souterraines est le résultat de plusieurs processus hydrochimiques que l'interprétation des mesures et des expériences effectuées, permet d'expliquer.

Les quantités de dérivés soufrés, contenues dans les sables et solubles sous forme de sulfates s'élèvent à environ 0,03 % du poids total des sables, mais cette faible quantité est suffisante pour expliquer les concentrations observées dans les eaux souterraines. Cependant, une seule infiltration ne suffit pas pour dissoudre jusqu'à la saturation, les dérivés soufrés sous forme de sulfates ; la désorption des sulfates dépend des conditions physico-chimiques du milieu.

La mise en solution des sulfates est plus importante quand les eaux d'infiltration viennent au contact des sables desséchés (par écoulement gravitaire puis évaporation). On assiste vraisemblablement à une concentration progressive des sulfates dans l'eau de rétention ; à saturation, ils précipitent et enrichissent ainsi le stock des sulfates contenus dans les sables. Mais, une partie seulement de ces sulfates est mise en solution lors de l'infiltration suivante.

Les analyses isotopiques du soufre des eaux souterraines révèlent, en effet, un enrichissement en isotope lourd, dû vraisemblablement à un enrichissement en sulfates triasiques. Il résulte aussi de ces expériences que la concentration en sulfates des eaux d'infiltration joue un rôle important dans celle des eaux souterraines. En effet, la concentration des eaux souterraines dépend directement de celle des eaux infiltrées et ces dernières participent au renouvellement du stock des dérivés soufrés retenus dans les sables alluvionnaires.

(1) p. 244 : 1 119 tonnes d'ion sulfate, SO₄⁼, correspondent à 1 585 tonnes de sulfate de calcium, SO₄ Ca.-

III-4 - ESSAI D'INTERPRETATION SYNTHETIQUE

Par l'examen des résultats d'analyses des eaux et par l'étude des processus hydrochimiques mis en jeu, nous avons vérifié que les eaux de la rivière et de la nappe faisaient partie d'une même famille hydrochimique, que les variations de la minéralisation des eaux souterraines étaient liées à l'alimentation de la nappe et aux mouvements hydrodynamiques qu'elle subit.

En chaque point de la nappe, la minéralisation des eaux dépend :

- . de la minéralisation des eaux d'infiltration (eaux de la Romanche, eaux des apports des versants, eaux des pluies et des ruissellements...) et de leurs variations,
- . des mouvements hydrodynamiques de la nappe, du maintien des infiltrations dans les zones saturées ou au contraire, de leur pénétration dans les zones antérieurement non-saturées (battements du toit de la nappe), des mélanges favorisés par les pompages.

Au cours des cinq années d'observation (1975-1980), j'ai pu constater que, dans les conditions actuelles de l'alimentation, de l'écoulement, de l'exploitation de la nappe, les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines restent constantes et que leur minéralisation, en un point et un moment donnés, est la traduction de l'influence des différents paramètres mis en jeu ; ceux-ci se renouvellent dans des conditions semblables, d'une année hydrologique à l'autre, et permettent le maintien des caractéristiques et de la minéralisation totale des eaux souterraines.

Suivant les années, il est évident que l'on peut enregistrer, aux mêmes saisons, des différences sensibles des niveaux du toit de la nappe ; mais en moyenne, après les crues et les décrues successives, les niveaux et les réserves restent les mêmes, les apports compensant les départs.

A l'échelle de l'année, le bilan hydrogéologique est donc équilibré. A partir des différents termes de ce bilan, on peut établir un bilan hydrochimique (Tableau 61). On constate que celui-ci n'est pas équilibré ; les eaux acquièrent un excès de minéralisation au cours du cheminement souterrain, de l'ordre de 40 mg/l, ce qui correspond pour le débit de la nappe de 1 617 l/s, à environ 2 040 tonnes de matières dissoutes par an (dont 78 % peuvent être attribués aux sulfates de calcium (1)).

En fait, l'acquisition de la minéralisation des eaux dans la nappe se fait essentiellement dans les zones où les battements sont les plus grands : zones de mélanges et zones d'infiltration préférentielles.

Elle concerne donc la zone proche du puits et la zone amont de la plaine.

(1) L'application de la formule de DOROSCHEWSKI rend naturellement ce calcul très approximatif.-

	Termes du bilan	Débits l/s	Conductivité moyenne G en $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C	Minéralisation: totale : mg/l: G x 0,75 *
apports	Q ₁ : apports souterrains ..	237	280	203 ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) 152
	I : infiltrations			
	. Romanche	1 308	193	
	. Apports des versants	60	149	
	. Pluies	12	négligeable	
Nappe	J : eaux du puits 1	320	277	255 ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) 191
	S : sources	980	250	
	Q ₂ : départs souterrains ..	317	250	

(* d'après DOROSCHEWSKI in J. RODIER, 1978)

Tableau 61 - Bilan hydrochimique annuel de la nappe de Jouchy.-

J'ai essayé de résumer, dans le tableau 62 et les figures 88, les phénomènes qui ont lieu dans la zone amont de la plaine de Jouchy en rive gauche, et en direction du puits.

La minéralisation totale des eaux du puits, exprimée par la conductivité, est liée à celle de la Romanche, et aux possibilités d'acquisition dans la zone non saturée.

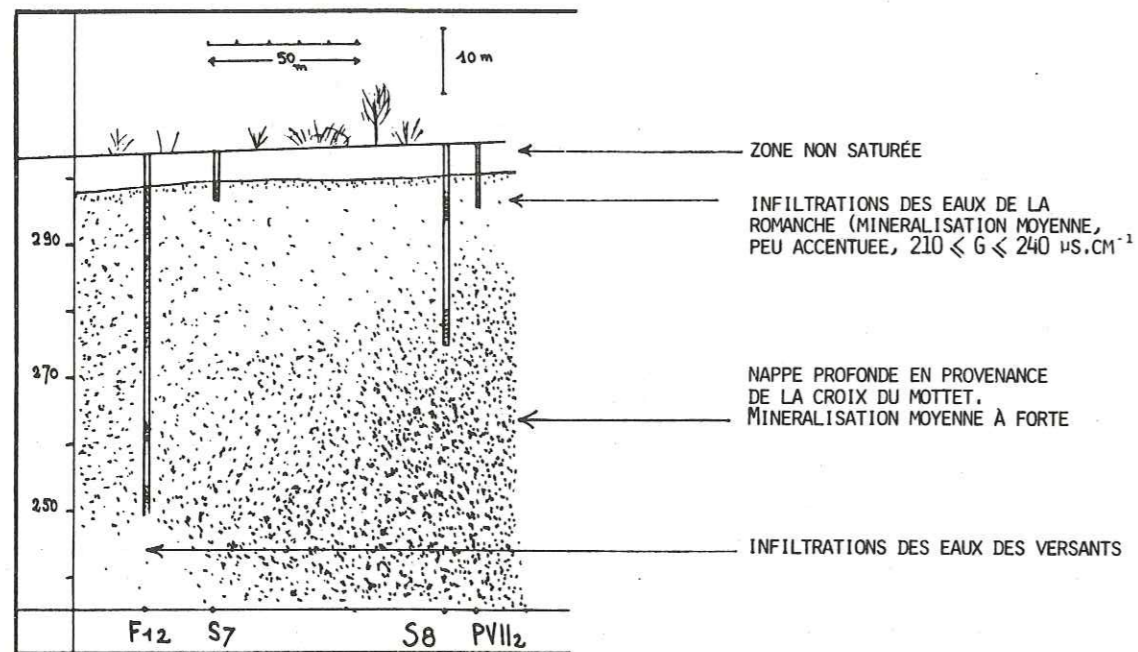
Ainsi, en hautes eaux (fin mai, juin, juillet...) les eaux en provenance de la Romanche, qui constituent l'essentiel des infiltrations, sont peu minéralisées, mais elles sont capables de se concentrer au cours du cheminement souterrain en pénétrant dans les zones non saturées de la nappe ou en se mélangeant avec les eaux profondes.

En basses eaux (novembre à avril), la minéralisation des eaux de la Romanche s'accroît, mais leur infiltration dans les zones déjà saturées de la nappe et leur mélange avec les eaux profondes, permet le maintien ou une faible augmentation de cette minéralisation. Lors de la décrue post-estivale (août, septembre, octobre...) la minéralisation totale des eaux de la Romanche est faible ou peu accentuée ; leur infiltration dans les zones déjà saturées de la nappe favorise le maintien de la minéralisation moyenne des eaux souterraines. Ce n'est qu'à l'occasion des pluies orageuses et automnales, qui entraînent une augmentation du débit de la rivière, que les eaux d'infiltration pénètrent dans les zones non saturées et que les eaux souterraines subissent une accentuation de leur minéralisation.

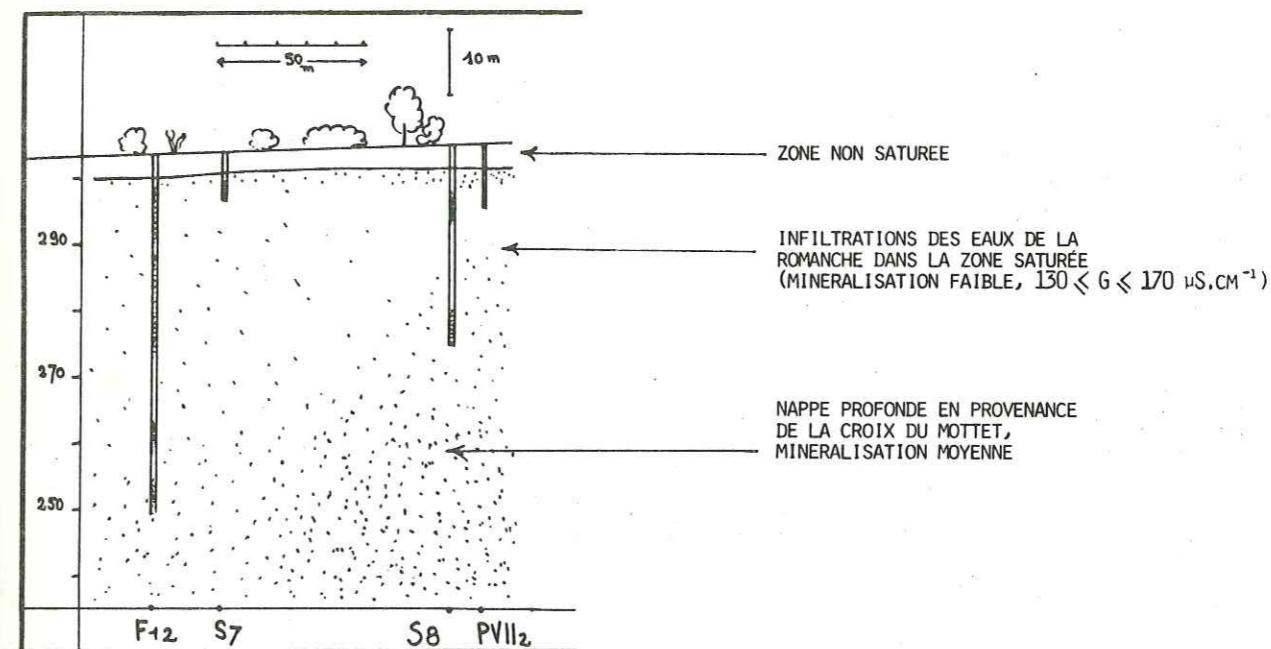
Ces variations saisonnières de l'alimentation constituent une coïncidence heureuse qui permet la stabilité hydrochimique des eaux souterraines exploitables.

On vérifie ainsi que, les variations saisonnières des débits et de la minéralisation des eaux de la Romanche - dont les infiltrations constituent l'essentiel de l'alimentation de la nappe - sont propices, d'une part, au maintien des réserves exploitables de la nappe, et d'autre part, au maintien des caractéristiques hydrochimiques et de la minéralisation des eaux souterraines.

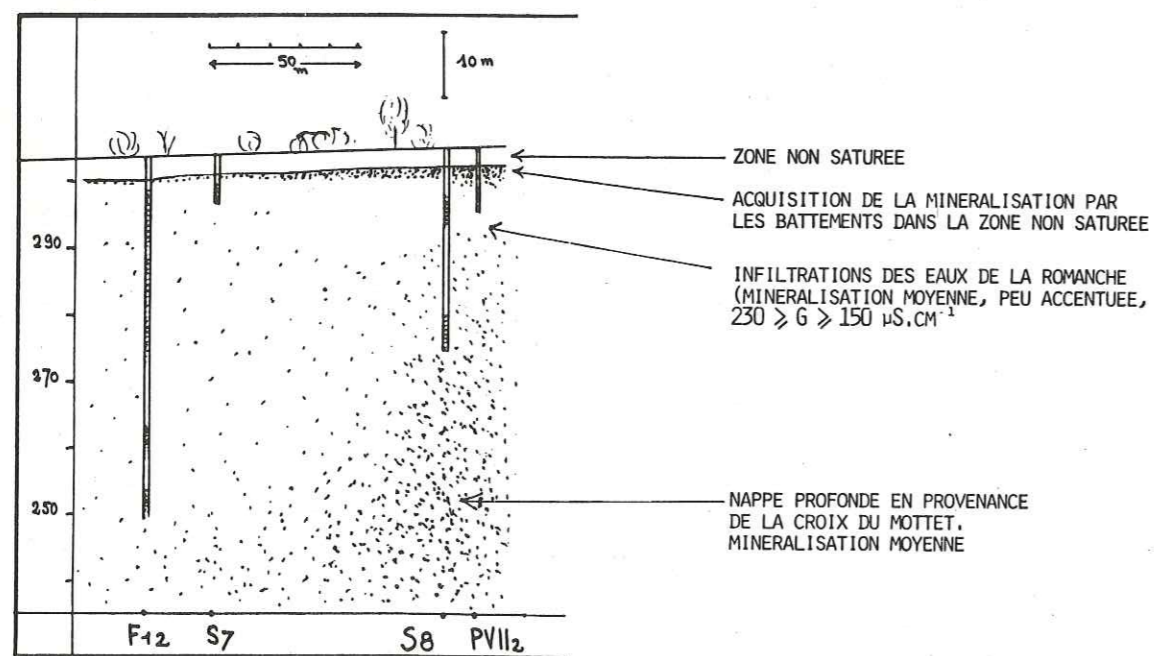
Toute variation hydrochimique, non interprétable à la lumière des données actuelles, est donc l'indice d'un changement quantitatif ou qualitatif dans l'alimentation et l'écoulement de la rivière et par conséquent de la nappe souterraine.



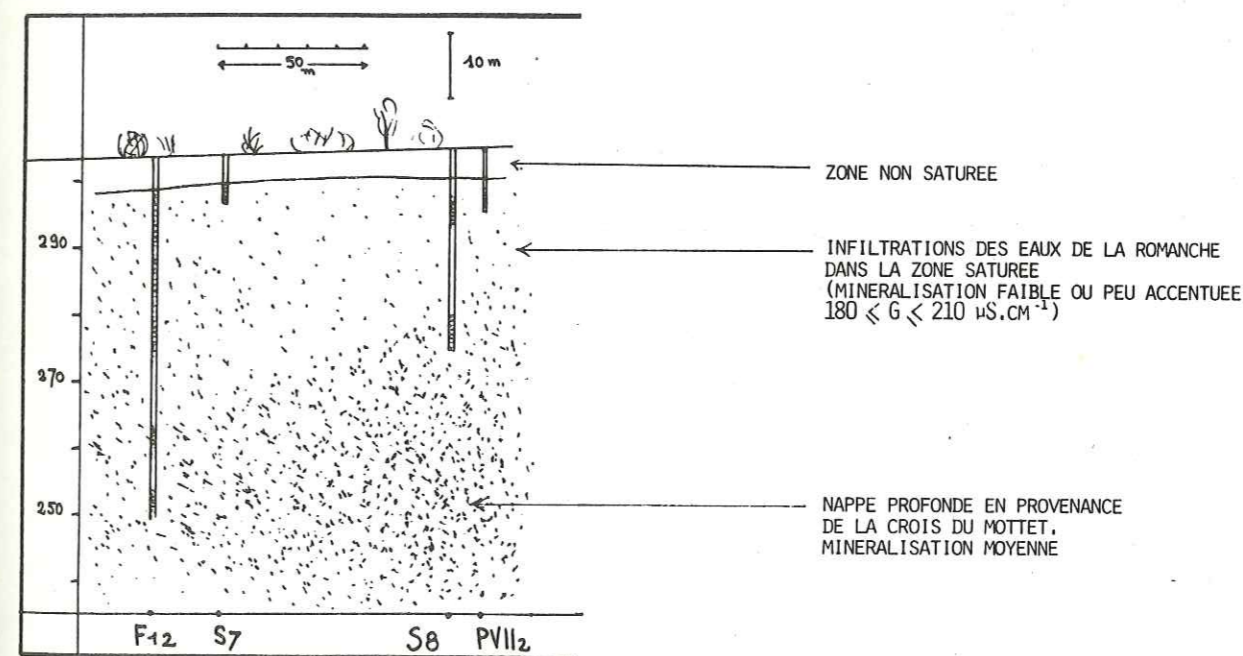
BASSES EAUX DE LA ROMANCHE
 DECEMBRE - JANVIER - FEVRIER - MARS
 MINÉRALISATION MOYENNE DES EAUX DU PUIITS ($275 \leq G \leq 290 \mu S.CM^{-1}$)



HAUTES EAUX DE LA ROMANCHE
 JUILLET - AOÛT - SEPTEMBRE
 MINÉRALISATION MOYENNE DES EAUX DU PUIITS ($270 \geq G \geq 260 \mu S.CM^{-1}$)



MOYENNES EAUX DE LA ROMANCHE
 AVRIL - MAI - JUIN ET AUTOMNE AVEC PLUIES
 MINÉRALISATION MOYENNE DES EAUX DU PUIITS, $290 \geq G \geq 270 \mu S.CM^{-1}$



MOYENNES EAUX DE LA ROMANCHE
 OCTOBRE - NOVEMBRE (SANS PLUIE)
 MINÉRALISATION MOYENNE DES EAUX DU PUIITS ($270 \leq G \leq 280 \mu S.CM^{-1}$)

Figure 88 - Schémas d'interprétation des variations de la minéralisation des saisons,

eaux de la nappe dans la zone d'infiltration préférentielle, au cours des différentes d'une année hydrologique.-

IV - MESURES ET APPLICATIONS

	ROMANCHE		NAPPE AMONT		PUITS 1		
	(1) Débits moyens m ³ /s	GR (2) Conductivité en $\mu S \cdot cm^{-1}$ à 20°C	MR (4) Minéralisation totale mg/l	(5) Rabattements de la nappe en m	GP (3) Conductivité en $\mu S \cdot cm^{-1}$ à 20°C	MP (4) Minéralisation totale mg/l	MP - MR = Acquisition totale de la minéralisation mg/l
DECEMBRE	2,2	217	163		278	208,5	45,5
JANVIER	1,8	228	171	+ 0,10	285	214	43
FEVRIER	1,65	240	180		286	214,5	34,5
MARS	2,3	238	178,5		280	210	31,5
AVRIL	5,1	228	171	+ 0,64	285	214	43
MAI	25,8	186	139,5	+ 0,44	287	215	76
JUIN	48	152	114	+ 0,13	277	208	94
JUILLET	39,4	136	102	- 0,69	270	202,5	100,5
AOUT	15,2	138	103,5	- 0,37	261	196	92
SEPTEMBRE	2,55	164	123	- 0,15	268	201	78
OCTOBRE	2,2	184	138	- 0,06	268	201	63
NOVEMBRE	2,5	210	157,5		279	209	52
Moyenne annuelle	12,4	193	145	+ 1,34 - 1,34 = 0	277	208	63

voir tableaux : (1) 19 page 76 - (2) 37 page 140 - (3) 47 page 177 - (4) d'après DOROSCHEWSKI : M mg/l = G $\mu S \cdot cm^{-1}$ x 0,75
(5) moyenne mensuelle des rabattements en S 8, d'après les relevés hebdomadaires (1971-1979).

Tableau 62 - Variations de la minéralisation des eaux dans la zone amont de la plaine et dans celle proche du puits, au cours d'une année hydrologique.

Pour appliquer notre connaissance des caractéristiques hydrochimiques des eaux du secteur de Jouchy, à une surveillance prolongée de la nappe, le besoin d'une méthodologie nouvelle s'est fait sentir. Cette méthodologie doit permettre, à partir d'un minimum de résultats ou de données :

- de suivre rapidement ou de prévoir à brève échéance, l'évolution de la qualité des eaux, lors des mouvements hydrodynamiques de l'aquifère, dans les conditions d'exploitation et d'alimentation actuelles ;
- d'envisager une protection efficace des eaux souterraines, dans des conditions nouvelles ou exceptionnelles, d'ordre climatique (sécheresse...) ou d'ordre hydraulique (changement dans le régime de la Romanche, colmatage du lit de la rivière, réalimentation de la nappe...).

Déjà, dans le chapitre II-1, j'ai indiqué que, l'examen des résultats d'analyses m'a conduit à choisir un certain nombre de piézomètres dont l'analyse hydrochimique est significative d'une "zone" géographique de la nappe. Nous avons vu, que certaines caractéristiques des eaux (résistivité ou conductivité, dureté totale, taux des sulfates...) sont particulièrement significatives de leur évolution au cours du cheminement souterrain. Dans ce chapitre, je proposerai l'emploi de formules mathématiques permettant de calculer ces caractéristiques significatives à partir de mesures faites sur le terrain et une méthode graphique permettant de suivre leur évolution.

IV-1 - CONDUCTIBILITE DES ELECTROLYTES ; RECHERCHE D'UNE RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE ET LES AUTRES CARACTERISTIQUES DES EAUX DE LA NAPPE DE JOUCHY

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les eaux de la nappe constituent un ensemble homogène du point de vue hydrochimique. Cette particularité m'autorise à utiliser des formules simplifiées pour réduire le nombre des analyses utiles à l'interprétation. Les analyses mettant en oeuvre des méthodes physiques sont les plus facilement mesurables sur le terrain et souvent les plus fiables. Ainsi, la résistivité des eaux (ou la conductivité) peut être connue rapidement avec une bonne précision, grâce aux appareils enregistreurs décrits dans l'annexe IV ; Nous en avons vu une première application dans le chapitre III-1-4.

Certains auteurs, préconisent l'emploi de formules simplifiées, liant la résistivité des eaux à certains termes de la composition chimique. Ces formules, sont valables pour un certain type d'eaux, dans une gamme de valeurs restreintes ; leur utilisation n'est donc pas universelle.

Je me propose de les comparer à celles que l'on peut établir à partir d'une étude statistique des résultats des analyses des eaux de la nappe de Jouchy.

IV-1-1 - Expression de la teneur des sulfates et des valeurs des caractéristiques des eaux étudiées : sulfates, force ionique et concentration en métaux alcalino-terreux

La force ionique d'une solution saturée caractérise l'intensité des forces interioniques. Celles-ci dépendent des concentrations respectives des divers ions présents en solution.

La force ionique d'une eau est définie par l'ensemble de son contenu chimique.

Elle est égale à :

$$\mu \text{ en m.mole/l} = 1/2 \sum C_n Z_n^2$$

où $C_1, C_2 \dots C_n$ sont les concentrations millimolaires des divers ions en solution,

$Z_1, Z_2 \dots Z_n$ sont leur charge respective.

Dans les eaux qui nous intéressent, les nitrates, les chlorures, les cations alcalins, Na^+ et K^+ , ont des teneurs négligeables par rapport à celles des autres ions majeurs : les sulfates, les bicarbonates et les cations alcalino-terreux, Ca^{++} et Mg^{++} .

En effet :

- . les nitrates sont présents à des taux de l'ordre de 1 à 3 mg/l, soit 0,016 à 0,048 m.mole par litre,
- . les chlorures sont présents à des taux de l'ordre de 0,5 à 3 mg/l, soit 0,014 à 0,085 m.mole par litre,
- . le sodium et le potassium sont présents à des taux de l'ordre de 0,3 à 1,3 mg/l, soit 0,013 à 0,056 m.mole par litre.

Leur demie somme correspond donc à une force ionique partielle de 0,0215 m.mole/l à 0,095 m.mole/l, c'est-à-dire à 1 ou 2 % de la force ionique totale qui varie de 2 à 6 m.mole/l.

Nous pouvons donc écrire pour simplifier : (note 1)

$$(1) \quad \mu = 1/2 \sum |HCO_3^-| + 4 |SO_4^{=}| + 4 |Ca^{++}| + 4 |Mg^{++}|$$

De même, en vertu de la loi de neutralité électrique nous pouvons écrire :

$$(Mg^{++}) + (Ca^{++}) = (SO_4^{=}) + (HCO_3^-)$$

ou

$$2 |Mg^{++}| + 2 |Ca^{++}| = 2 |SO_4^{=}| + |HCO_3^-|$$

(1) Dans tout ce chapitre, les concentrations exprimées entre crochets $| |$ correspondent aux millimoles/litre, les concentrations exprimées entre parenthèses $()$ correspondent aux milliéquivalents/litre. Selon son intérêt dans la démonstration, l'une ou l'autre expression sera utilisée.-

Si l'on pose :

$$(Me^{++}) = (Mg^{++}) + (Ca^{++})$$

$$|Me^{++}| = |Mg^{++}| + |Ca^{++}|$$

on peut écrire :

$$2 |Me^{++}| = 2 |SO_4^{=}| + |HCO_3^-|$$

$$\text{ou (2) } |Me^{++}| = |SO_4^{=}| + |HCO_3^-|/2$$

soit en reportant dans (1)

$$(3) \quad \mu = 4 |SO_4^{=}| + 3/2 |HCO_3^-|$$

La relation (1) peut encore s'écrire :

$$\mu = |HCO_3^-|/2 + 2 |SO_4^{=}| + 2 |Me^{++}| =$$

$$\mu = |HCO_3^-|/2 + |SO_4^{=}| + |SO_4^{=}| + 2 |Me^{++}|$$

$$\text{ou } \mu = 3 |Me^{++}| + |SO_4^{=}|$$

$$\text{et (4) } \begin{array}{l} |SO_4^{=}| = \mu - 3 |Me^{++}| \\ \text{m.mole/l} \qquad \qquad \text{m.mole/l} \end{array}$$

On retrouve, dans l'ouvrage de J. HISSEL (1975) la même relation, sous la forme :

$$10 \mu = 4 \text{ T.H.} - \text{T.A.C.}$$

m.mole/l T.H. et T.A.C. étant exprimés en degrés français, on peut écrire cette formule :

$$10 \mu = 3 \text{ T.H.} + (\text{T.H.} - \text{T.A.C.})$$

or (T.H. - T.A.C.) représente la dureté sulfatée, dans les eaux qui nous intéressent, exprimée en degrés français ; 1 degré français (1°f) = 1/5 meq et dans le cas des ions divalents, 1°f = 1/10 m.mole, donc :

$$\text{T.H.} - \text{T.A.C.} = 10 |SO_4^{=}|$$

Le T.H. représente la dureté totale calcique et magnésienne ;

Le T.A.C. représente la dureté due aux bicarbonates, on peut donc écrire :

$$10 \mu = 30 |\text{Me}^{++}| + 10 |\text{SO}_4^{=}|$$

ou

$$\mu = 3 |\text{Me}^{++}| + |\text{SO}_4^{=}|$$

et $|\text{SO}_4^{=}| = \mu - 3 |\text{Me}^{++}|$

IV-1-2 - Relation expérimentale entre la conductivité d'une eau et sa force ionique

Les forces interioniques abaissent la conductibilité électrique des solutions ; la "force ionique" caractérise l'intensité de ces forces ; on peut donc établir une relation linéaire entre la valeur de la force ionique et celle de la conductivité G. La moyenne arithmétique du rapport :

G ($\mu\text{S.cm}^{-1}$ à 20°C) portant sur 484 analyses est égale à 52,15 ou μ (m.mole/l)

$$(5) \quad \mu = \frac{G (\mu\text{S.cm}^{-1} \text{ à } 20^\circ\text{C})}{52,15}$$

médiane des mesures : 52
mode ou dominante : 52
écart type s : 2,12

On a 95 % de chances pour que le facteur liant la conductivité et la force ionique soit compris entre 48 et 56, on a 68 % de chances pour qu'il soit compris entre 50 et 54,3 (figure 89).

W.F. LANGELIER (in G. CHARLOT - 1966, R. GIRARD - 1967, J. HISSEL - 1975...) préconise l'emploi de la formule :

$$\mu \text{ m.mole/l} = \frac{16\,500}{R (\text{ohm.cm}) \text{ à } 18^\circ\text{C}} \text{ soit } \frac{15\,774}{R (\text{ohm.cm}) \text{ à } 20^\circ\text{C}}$$

ou $\mu = \frac{G \mu\text{S.cm}^{-1} \text{ à } 20^\circ\text{C}}{63,4}$

Cette formule n'est pas applicable aux eaux de Jouchy puisque aucun coefficient calculé à partir de 484 analyses, ne dépasse la valeur de 58 (Figure 89).

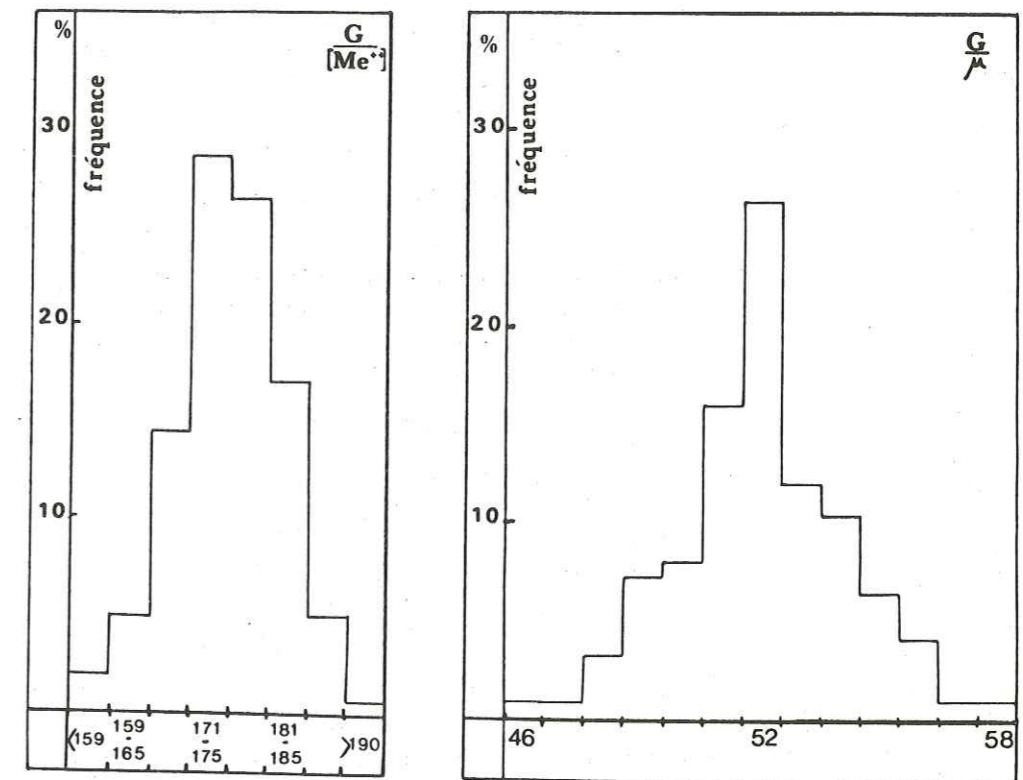


Figure 89 - Histogrammes des rapports $G/|\text{Me}^{++}|$ et G/μ des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy.

IV-1-3 - Relation expérimentale entre la conductivité d'une eau et sa teneur en métaux alcalino-terreux : $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} = \text{Me}^{++}$

Dans le cas général, en raison de la diminution du degré de dissociation ionique des sels avec l'augmentation de leur concentration, la conductivité d'une eau n'est pas liée par une relation linéaire à cette concentration. Les eaux étudiées étant peu minéralisées, faisant partie d'une même famille hydrochimique et leur minéralisation totale se situant dans une plage relativement restreinte, nous pouvons estimer qu'elles échappent aux considérations générales et que la concentration en métaux est liée par une relation linéaire à la conductivité.

La moyenne arithmétique du rapport $G/|\text{Me}^{++}|$ calculée à partir de 482 analyses = 175,2, donc :

$$|\text{Me}^{++}| = \frac{G (\mu\text{S.cm}^{-1} \text{ à } 20^\circ\text{C})}{175,2} \quad (6)$$

médiane des mesures : 175
mode ou dominante : 174
écart type s : 5

On a 95 % de chances pour que $G/|\text{Me}^{++}|$ soit compris entre 165 et 185, on a 68 % de chances pour qu'il soit compris entre 170 et 180 (Figure 89).

Comme l'indique J. RODIER (1978), "la conductivité des cations et celle des anions ne présentent en général pas une grande différence". On peut donc estimer que la conductivité des cations est égale à la demi-conductivité de l'eau.

$$G \text{ totale} = 2 G \text{ (cations)}$$

Dans le cas des eaux essentiellement calciques et magnésiennes, la conductivité due aux cations non alcalino-terreux peut être négligée, donc :

$$G \text{ totale} = 2 G \text{ (Ca + Mg)}$$

Théoriquement, selon la méthode de calcul américaine (in J. RODIER) la conductivité spécifique du calcium = $46,9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}/\text{me}/1$ à 20°C et celle du magnésium = $42 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}/\text{me}/1$, donc :

$$G \text{ totale} = 2 \times |46,9 (\text{Ca}^{++}) + 42 (\text{Mg}^{++})|$$

Comme le magnésium représente en moyenne 26 % et le calcium 74 % des métaux (d'après la relation $\frac{r \text{ Mg}}{r \text{ Ca}}$), on peut écrire :

$$G \text{ totale} (\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \text{ à } 20^\circ\text{C}) = 2 \times 45,63 (\text{Me}^{++}) = 182,5 |\text{Me}^{++}|$$

L. LEGRAND et G. POIRIER (1976) ainsi que R. GIRARD (1967), préconisent l'emploi de la relation :

$$R \text{ (ohm}\cdot\text{cm)} \text{ à } 25^\circ\text{C} = \frac{12\ 000}{2 |\text{Me}^{++}|} \text{ soit à } 20^\circ\text{C} : R \text{ (ohm}\cdot\text{cm)} = \frac{13\ 300}{2 |\text{Me}^{++}|}$$

$$\text{ou encore } G (\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \text{ à } 20^\circ\text{C}) = \frac{2 \cdot 10^6 |\text{Me}^{++}|}{13\ 300} = 150 |\text{Me}^{++}|$$

Cette formule s'applique aux eaux essentiellement bicarbonatées, calciques et magnésiennes (eaux du karst par exemple). Pour tenir compte de la présence des autres sels, les auteurs préconisent d'autres formules.

Ainsi, R. GIRARD (1973) emploie la formule :

$$R \text{ (ohm}\cdot\text{cm)} \text{ à } 18^\circ\text{C} = \frac{11\ 500}{2 |\text{Me}^{++}|} \text{ soit à } 20^\circ\text{C} : R \text{ (ohm}\cdot\text{cm)} = \frac{11\ 000}{2 |\text{Me}^{++}|}$$

$$\text{ou encore } G = 182 |\text{Me}^{++}|$$

R. GIRARD et G. POIRIER (1968) emploient également la formule :

$$R \text{ à } 20^\circ\text{C} = \frac{11\ 111}{2 |\text{Me}^{++}|} \text{ ou encore } G \text{ à } 20^\circ\text{C} = 180 |\text{Me}^{++}|$$

Ces relations théoriques sont identiques à celle que l'on peut calculer d'après les résultats expérimentaux (formule 6) à 4 % près.

IV-1-4 - Relation expérimentale entre la conductivité d'une eau et sa teneur en sulfates

En utilisant les relations expérimentales (5) et (6) et la formule (4), on obtient :

$$\frac{|\text{SO}_4^{=}|}{\text{m}\cdot\text{mole}/1} = \frac{G}{52,15} - 3 \frac{G}{175,2} = 0,002053 G$$

$$(7) \frac{|\text{SO}_4^{=}|}{\text{m}\cdot\text{mole}/1} = 2,053 \cdot 10^{-3} G \quad (\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \text{ à } 20^\circ\text{C})$$

Si l'on admet que la conductivité des eaux de Jouchy, est liée par une relation linéaire à la force ionique μ et à la teneur en métaux alcalino-terreux $|\text{Me}^{++}|$, la relation entre μ et (Me^{++}) devrait l'être également.

Mais, dans une solution de sulfates de calcium et de magnésium :

$$\mu = 1/2 \sum 4 |\text{SO}_4^{=}| + 4 |\text{Me}^{++}| \text{ or dans ce cas } |\text{SO}_4^{=}| = |\text{Me}^{++}|$$

$$\text{donc } \mu = 4 |\text{Me}^{++}|$$

et dans une solution de bicarbonates de calcium et de magnésium :

$$\mu = 1/2 \sum |\text{H CO}_3^-| + 4 |\text{Me}^{++}| \text{ or dans ce cas } 2 |\text{Me}^{++}| = |\text{H CO}_3^-|$$

$$\text{donc } \mu = 3 |\text{Me}^{++}|$$

Cette dernière relation a été appliquée notamment pour les eaux karstiques par J.J. MISEREZ (1973) ;

elle est proche de celle employée par D. JAMIER (1975) :

$$\mu = 3,4 |\text{Me}^{++}| + 0,218$$

R. GIRARD (1973) préconise l'emploi de la formule :

$$\mu = 1,375 (\text{Me}^{++}) \text{ ou}$$

$$\mu = 2,75 |\text{Me}^{++}|$$

Cette dernière formule peut s'appliquer aux eaux qui contiennent des métaux alcalins Na^+ et K^+ en quantité non négligeable, mais elle n'est pas applicable aux eaux étudiées dont μ varie de $|\text{Me}^{++}|$ à $4 |\text{Me}^{++}|$.

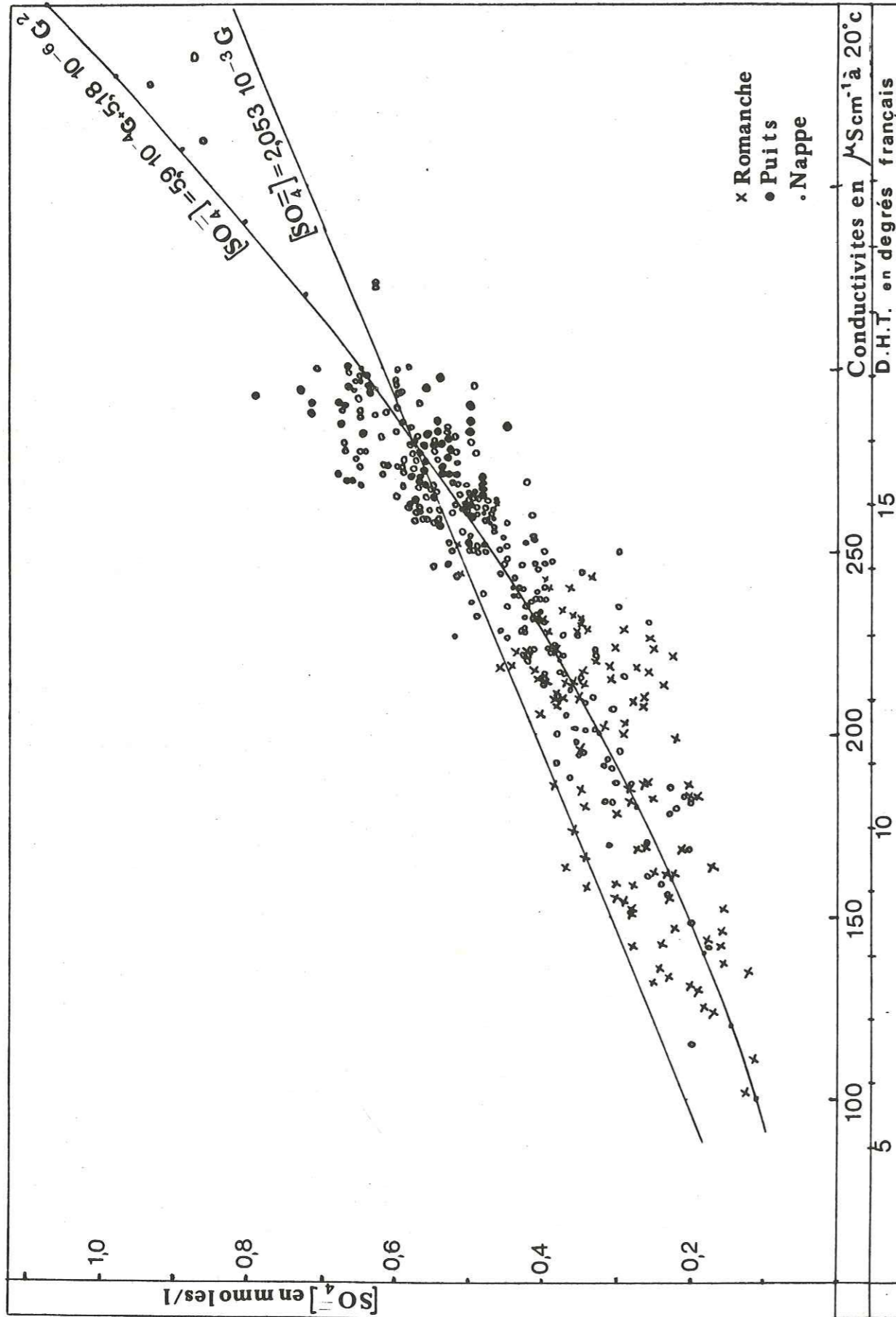


Figure 90 - Courbes de relation caractéristique liant le taux des sulfates et la conductivité des eaux.

Cependant, en admettant avec R. GIRARD que :

$$G = 63,4 \mu \text{ et que } \mu = 2,75 |Me^{++}| \text{ on trouve :}$$

$$G = 174,35 |Me^{++}|$$

Cette relation est proche de celle que j'ai adoptée d'après les résultats expérimentaux (formule 6).

Quand le taux des sulfates de Ca^{++} et de Mg^{++} augmente, μ varie de de 3 $|Me^{++}|$ (cas d'une solution de bicarbonates) à 4 $|Me^{++}|$ (cas d'une solution de sulfates).

D'après les valeurs expérimentales :

$$\mu = K |Me^{++}| = \frac{175,2}{52,15} |Me^{++}| = 3,36 |Me^{++}|$$

et comme :

$$SO_4^{=} = \mu - 3 |Me^{++}|$$

$$|SO_4^{=} = 0,36 |Me^{++}|$$

La formule (7) est donc applicable sans erreur quand les sulfates représentent 36 % du taux des anions ou des métaux en m.mole/l ou en meq/l, les valences des métaux et des sulfates étant identiques.

Ces pourcentages sont proches de ceux que l'on rencontre dans les eaux de la nappe (voir annexe II : analyse du puits du 10 août 1977) pour lesquelles la formule (7) s'applique avec satisfaction puisque le taux de sulfates calculé (0,532 m.mole /l) est très comparable à celui mesuré (0,526 m.mole /l), la force ionique calculée (4,97 m.mole /l) très comparable à la force ionique mesurée (5,12 m.mole/l), le taux des métaux alcalino-terreux calculé (1,48 m.mole/l) très proche du taux mesuré (1,5 m.mole/l).

Par contre, quand le pourcentage des sulfates est inférieur à 36 % (cas des eaux de la Romanche du 10 août 1977, par exemple), leur taux, calculé par la formule (7), est trop fort ; au contraire, quand le pourcentage des sulfates est supérieur à 36 %, cas des eaux du puits en basses eaux, leur taux calculé par la formule (7) est trop faible.

La dispersion des points représentatifs des eaux autour de la droite correspondant à la formule (7) apparaît sur la courbe de la figure 90.

Pour tenir compte de la variation du pourcentage des sulfates, on doit introduire un terme correctif qui dépend de la minéralisation totale (donc de G), tel que si :

$$\mu = \alpha G$$

$$|\text{Me}^{++}| = \beta G$$

$$\frac{\mu}{|\text{Me}^{++}|} = \frac{\alpha}{\beta} = K + K_1 G \quad (\text{terme correctif})$$

$$\mu = (K + K_1 G) |\text{Me}^{++}|$$

et comme $|\text{SO}_4^{=}| = \mu - 3 |\text{Me}^{++}|$

$$|\text{SO}_4^{=}| = (K + K_1 G) |\text{Me}^{++}| - 3 |\text{Me}^{++}| = (K + K_1 G - 3) |\text{Me}^{++}|$$

$$|\text{SO}_4^{=}| = (K + K_1 G - 3) \beta G$$

$$|\text{SO}_4^{=}| = (K - 3) \beta G + K_1 \beta G^2$$

La relation liant le taux des sulfates et la conductivité est de la forme :

$$|\text{SO}_4^{=}| = AG + BG^2$$

L'application de la méthode des moindres carrés appliquée à 480 résultats expérimentaux permet d'écrire :

$$A = 5,9 \cdot 10^{-4}$$

$$B = 5,18 \cdot 10^{-6}$$

d'où

$$(8) \quad \boxed{|\text{SO}_4^{=}| = 5,9 \cdot 10^{-4} G + 5,18 \cdot 10^{-6} G^2 \text{ m.mole/l}}$$

Cette formule appliquée aux eaux analysées permet d'obtenir les taux de sulfates des eaux de la nappe et du puits de Jouchy avec un pourcentage d'erreur de 5 % par rapport aux mesures, ce qui correspond à une bonne approximation, puisque la précision de la méthode de dosage employée n'est pas supérieure à 5 % (voir annexe I). Par contre, la formule appliquée aux eaux de la Romanche permet d'obtenir les taux de sulfates avec un pourcentage d'erreur de 15 % par rapport aux mesures.

La dispersion des résultats, pour les plus faibles valeurs de G et de $\text{SO}_4^{=}$, apparaît sur la courbe expérimentale (Figure 90). Cette dispersion peut s'expliquer, car les eaux de la Romanche subissent des influences différentes dans leur composition et n'obéissent pas systématiquement à cette loi applicable à l'ensemble du secteur de Jouchy.

Ainsi, comme nous l'avons vu, la Romanche subit notamment en basses eaux, une influence prédominante des eaux du Lac Mort à l'amont du secteur. De plus, les possibilités d'erreurs sur les mesures de la conductivité et du taux des sulfates sont plus importantes pour les faibles valeurs.

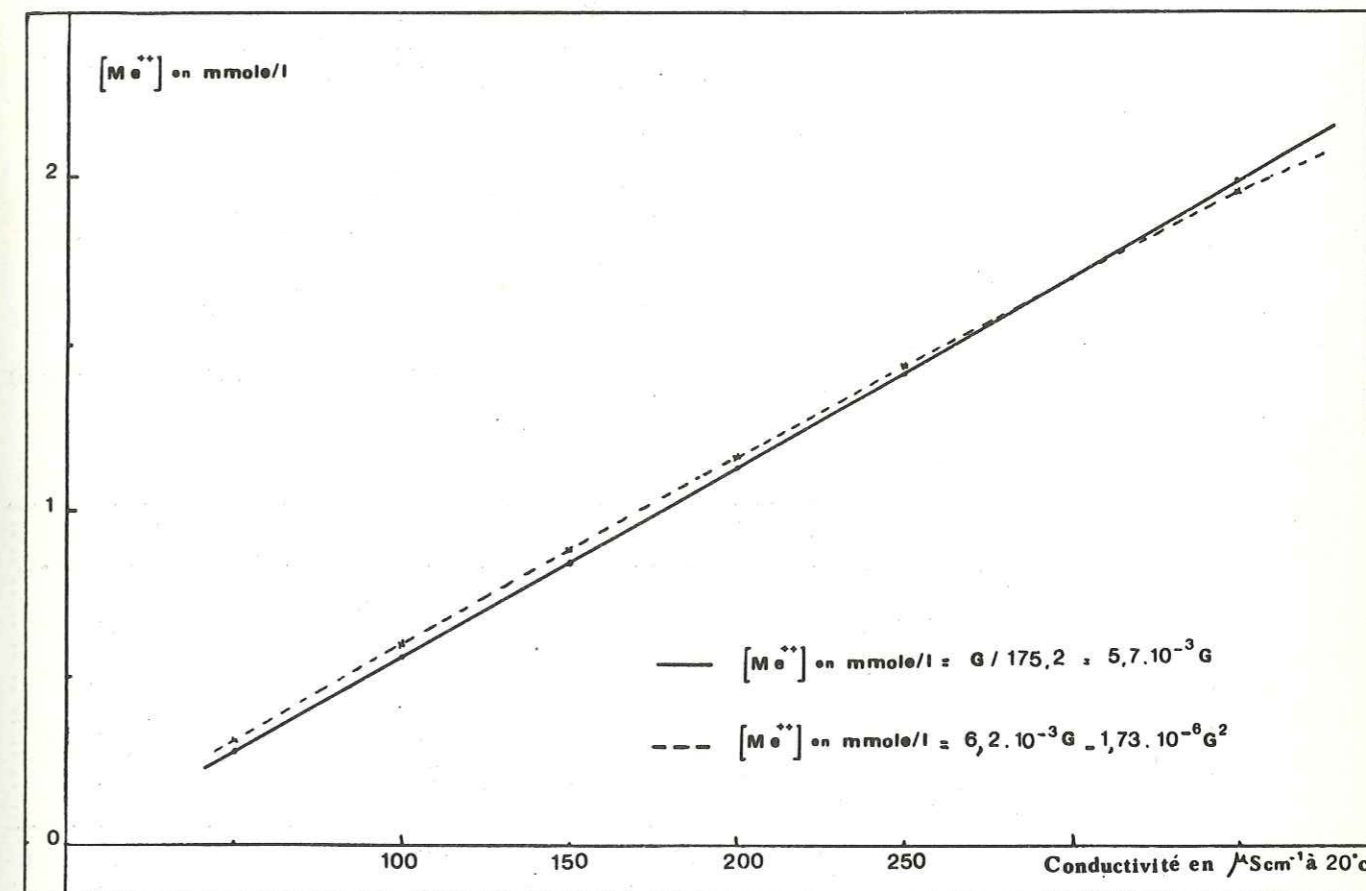


Figure 91 - Courbes de relation caractéristique liant le taux des métaux alcalino-terreux et la conductivité des eaux.-

Les formules (5) et (8) permettent de corriger éventuellement la relation linéaire (6) reliant la conductivité et le taux des métaux.

En effet, si : $|\text{SO}_4^{=}| = \mu - 3 |\text{Me}^{++}|$

on peut écrire, d'après (5) et (8) :

$$5,9 \cdot 10^{-4} G + 5,18 \cdot 10^{-6} G^2 = \frac{G}{52,15} - 3 |\text{Me}^{++}|$$

$$\text{donc : } |\text{Me}^{++}| = 6,2 \cdot 10^{-3} G - 1,73 \cdot 10^{-6} G^2 \quad (9)$$

On vérifie aussi que le facteur du terme en G^2 est très petit par rapport à celui du terme en G et que la courbe représentative de cette relation s'écarte peu de la droite représentative de la relation (6) (Figure 91).

J'admettrai donc comme juste la relation linéaire (6), la plus simple.

La formule (9) permet de calculer le pourcentage des métaux alcalino-terreux présents dans les eaux sous la forme de sulfates.

En effet, si : $\mu = \frac{G}{52,15} = K |Me^{++}|$

$$K = \frac{G}{52,15 |Me^{++}|} = \frac{G}{52,15 (6,2 \cdot 10^{-3} G - 1,73 \cdot 10^{-6} G^2)}$$

$$K = \frac{1}{0,323 - 9 \cdot 10^{-5} G}$$

$$|SO_4^{=}| = \mu - 3 |Me^{++}| = (K - 3) |Me^{++}| \quad (\text{Tableau 63})$$

(K varie de 3 à 4, comme je l'ai démontré plus haut).

G en $\mu S \cdot cm^{-1}$ à 20°C	K	K - 3
100	3,185	0,185
150	3,23	0,23
200	3,28	0,28
250	3,33	0,33
300	3,38	0,38
350	3,43	0,43

Tableau 63 - Variation du coefficient, K, liant le taux des métaux alcalino-terreux et la force ionique, en fonction de la conductivité.

On vérifie ainsi que le pourcentage des sulfates augmente avec la minéralisation totale et que la relation (7) est valable pour une conductivité de 282 $\mu S \cdot cm^{-1}$ à 20°C.

Les formules (6) et (8) permettent de lier le taux des sulfates à celui des métaux ou à la dureté (exprimée en degrés français).

$$|SO_4^{=}| = 0,103 |Me^{++}| + 0,159 |Me^{++}|^2 \quad (10)$$

m.mole/l

ou $|SO_4^{=}| = 1,03 \cdot 10^{-2} \text{ D.H.T.} + 1,59 \cdot 10^{-3} (\text{D.H.T.})^2$
m.mole/l

EN RESUME, les caractéristiques de la famille hydrochimique des eaux du secteur de Jouchy, essentiellement bicarbonatées, sulfatées, calciques et magnésiennes, sont définies par les relations fondamentales :

$$\mu = \frac{G}{52,15} \quad (5)$$

$$|Me^{++}| = \frac{G}{175,2} \quad (6)$$

$$|SO_4^{=}| = 5,9 \cdot 10^{-4} G + 5,18 \cdot 10^{-6} G^2 \quad (8)$$

$$|SO_4^{=}| = 0,103 |Me^{++}| + 0,159 |Me^{++}|^2 \quad (10)$$

où μ , $|Me^{++}|$ et $|SO_4^{=}|$ sont exprimés en m.mole/litre et G est exprimé en $\mu S \cdot cm^{-1}$ à 20°C.

IV-2 - APPLICATIONS

L'utilisation des relations (5), (6), (8) ou (10) permet de vérifier rapidement que l'eau prélevée dans la nappe souterraine appartient ou non à la famille hydrochimique du secteur de Jouchy. Ainsi, la mesure de la résistivité (faite éventuellement sur place) et l'analyse des sulfates, permettent de suivre rapidement l'évolution des eaux et l'amplitude des variations de la minéralisation totale, sur la courbe :

$$|\text{SO}_4^-| = (f) G \quad (\text{Figure } 90)$$

Dans les conditions actuelles d'écoulement et d'alimentation de la nappe par la Romanche, les relations caractéristiques se vérifient pour toutes les eaux prélevées dans la nappe et leurs points représentatifs se placent sur la courbe de relation $|\text{SO}_4^-| = (f) G$.

On peut ainsi suivre facilement les variations hydrochimiques saisonnières dans un piézomètre (P VII 2, F 12... *Figures 92*) ou les variations hydrochimiques dans le sens de l'écoulement souterrain, lors de l'alimentation de la nappe, en hautes ou en basses eaux (*Figures 93*). Réciproquement, quand les points représentatifs des eaux ne se placent pas sur la courbe, un changement qualitatif est intervenu. Ce changement ne peut être interprété par un des phénomènes précédemment décrits (infiltrations en provenance de la Romanche, variations saisonnières, accentuation de la minéralisation au cours du cheminement souterrain...). Il traduit l'influence d'infiltrations particulières qui ont eu lieu à la faveur de mouvements hydrodynamiques exceptionnels.

Nous en verrons quelques exemples.

IV-2-1 - Mise en évidence de l'infiltration des eaux du ruisseau de Laffrey dans la nappe souterraine à la suite de la crue du printemps 1978

Comme je l'ai écrit dans le chapitre I-6, les eaux du ruisseau de Laffrey reçoivent les rejets des villages riverains de lacs.

Elles présentent une pollution organique et une contamination bactériologique importantes, notamment en périodes de vacances scolaires, au cours desquelles la population riveraine décuple. La proximité du ruisseau et du champ de captage de Jouchy a occasionné une surveillance particulière ; les eaux de la nappe prélevées dans les piézomètres les plus proches du ruisseau ont fait l'objet d'analyses régulières. Comme nous l'avons vu, les eaux du ruisseau présentent des caractéristiques hydrochimiques différentes de celles des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy. Ce sont des eaux à la minéralisation totale moyenne, essentiellement bicarbonatées, calciques et magnésiennes (*Figure 49 - page 152*).

Leur taux de bicarbonates, de nitrates, de chlorures, sont nettement plus élevés et leur taux de sulfates plus faibles que ceux des eaux de la nappe dans ce secteur. Ces caractéristiques ne permettent pas de vérifier les relations fondamentales (5), (6), (8) et (10) applicables au secteur de Jouchy (*Figures 94*).

Habituellement, le ruisseau de Laffrey étant colmaté et son débit étant suffisamment faible, ses infiltrations, dans la nappe souterraine, sont négligeables et n'ont pas d'incidence sur l'hydrochimie des eaux de la nappe. Les eaux des piézomètres de surveillance (Pd, Pa, Pb, Pc, PI4) présentent des caractéristiques proches de celles des eaux de la nappe ; elles permettent de vérifier les relations (5), (6), (8) et (10) (*Figures 93 et 94*).

A la fin du mois de février 1978, après une période d'enneigement exceptionnelle, les pluies et le dégel ont provoqué une élévation rapide des niveaux des lacs. Les vannes de l'usine du lac Laffrey ont été entièrement ouvertes pour permettre à leur trop-plein de s'écouler. Le débit des eaux a été tel, que le ruisseau a débordé de son lit. Selon les riverains, les premiers flots très boueux, d'aspect "sale" ont inondé les terrains situés à l'amont de la petite route menant à l'usine E.D.F. de Jouchy, dès le vendredi 24 février (renseignement recueilli sur place).

Entre le 22 février et le 7 mars, les infiltrations en provenance de la Romanche, dans les zones d'infiltration préférentielle, situées à l'amont de la plaine, ont été réduites (battements du niveau du toit de la nappe inférieurs à 30 cm), celles en provenance des versants étaient plus importantes (battements de l'ordre de 60 cm) ; dans la zone proche du ruisseau les battements ont dépassé 1 mètre (*Figure 95*).

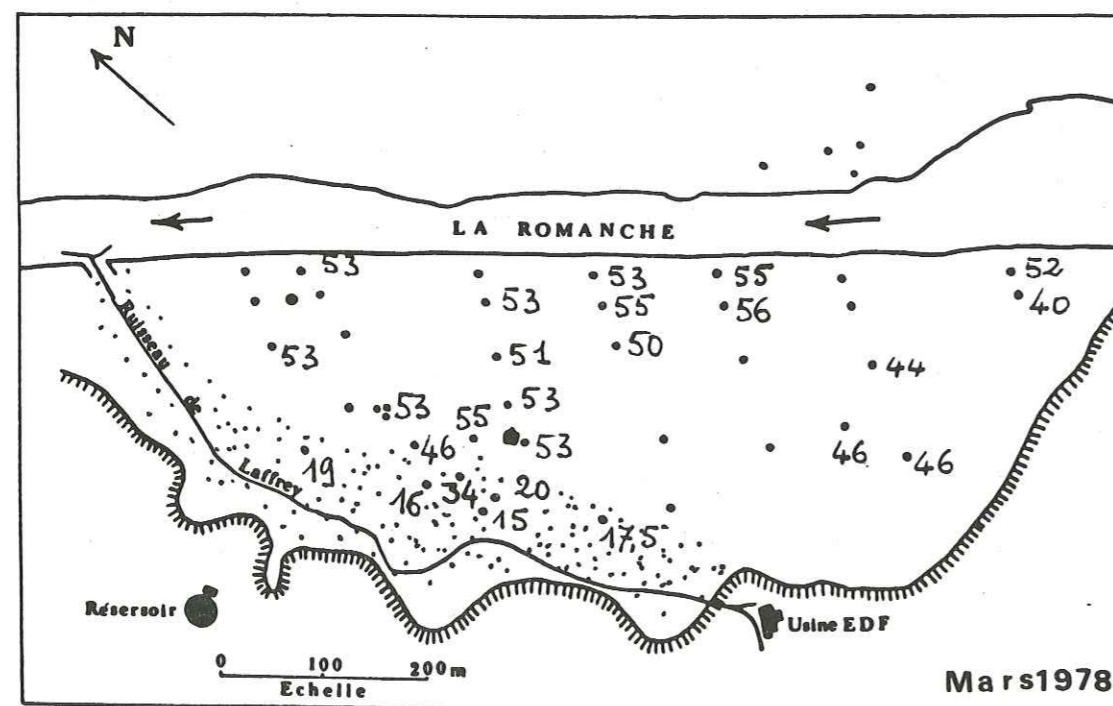
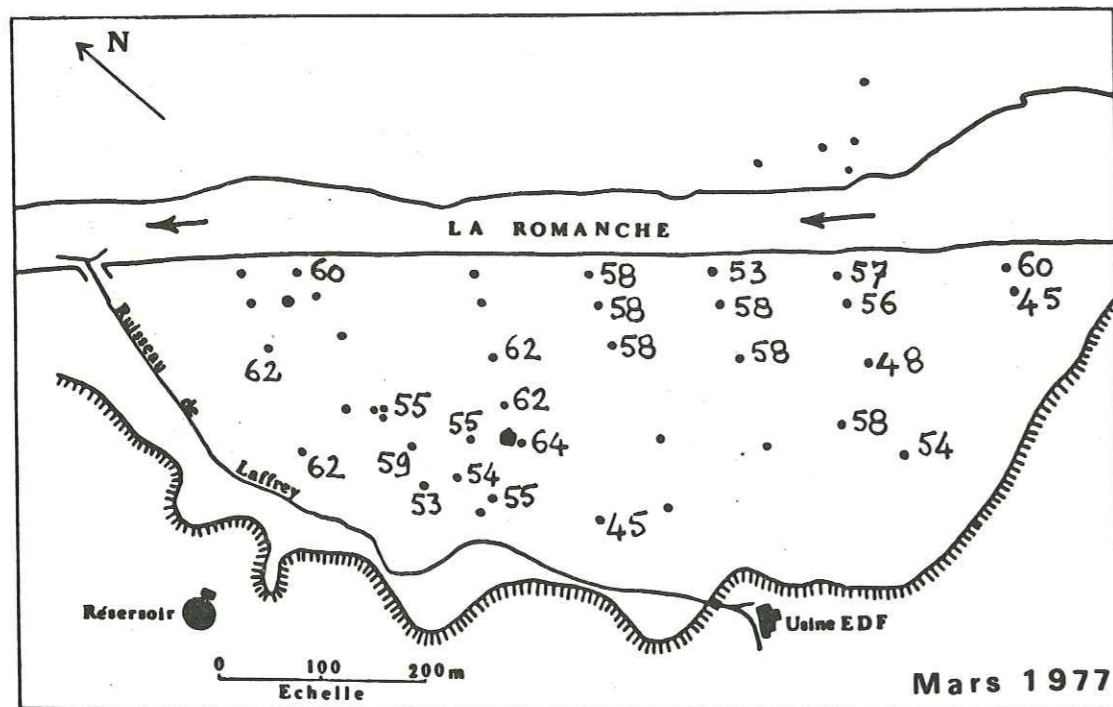
L'hydrochimie permet d'attribuer aux infiltrations en provenance du ruisseau de Laffrey cette élévation des niveaux du toit de la nappe et de les localiser (*Figure 96*).

En effet, les caractéristiques des eaux des piézomètres ont changé et ont été influencées par celles des eaux du ruisseau.

Ainsi, le taux des bicarbonates des eaux de la nappe, habituellement peu différent de 110 mg/l s'est élevé jusqu'à 170 mg/l (PI4, le 7 mars) ; le taux des chlorures, habituellement de l'ordre de 1 à 2,5 mg/l s'est élevé jusqu'à 7,7 mg/l (PI4 le 7 mars) ; le taux des nitrates, habituellement de l'ordre de 2 mg/l s'est élevé jusqu'à 15 mg/l (Pd, le 7 mars). Par contre, le taux des sulfates, habituellement de l'ordre de 50 mg/l s'est abaissé jusqu'à 15 mg/l (Pd, le 7 mars) (*Figures 96 et 97*).

Les analyses des eaux des piézomètres Pa, Pb, Pc, Pd, PI4 et S 17, ne permettent pas de vérifier les relations (5), (6), (8) ou (10). Les points représentatifs des eaux de ces piézomètres s'écartent de la courbe caractéristique $|\text{SO}_4^-| = (f) G$ (*Figure 94*).

Au début du mois de mars 1978, l'obstruction des brèches des rives du ruisseau a permis de limiter l'inondation des terrains et des vergers riverains ; cependant, les analyses effectuées jusqu'en juin 1978, permettent d'affirmer que l'infiltration s'est prolongée plus d'un mois et demi après les premières inondations, le ruisseau étant décolmaté.



Zones de mélange et d'infiltration des eaux du ruisseau.

• 50 Taux des sulfates en mg/l.

Figure 96 - Cartes de la plaine de Jouchy montrant l'évolution du taux des sulfates des eaux de la nappe au mois de mars 1978, lors de l'infiltration des eaux du ruisseau de Laffrey.-

Les prélèvements du mois d'août 1978 permettent de constater le rétablissement de la situation antérieure (Figure 97)

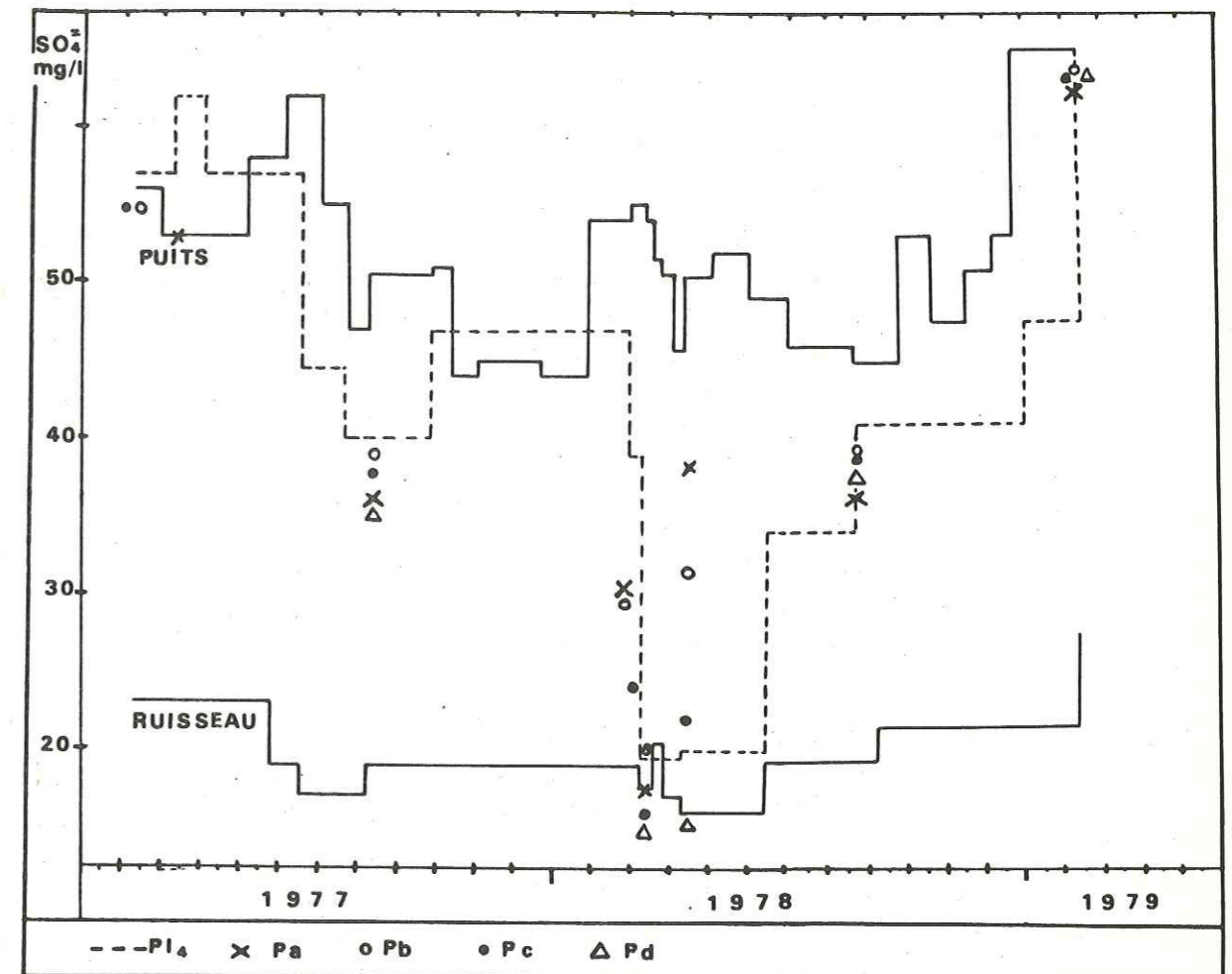


Figure 97 - Variations du taux des sulfates des eaux du ruisseau de Laffrey, du puits et des piézomètres Pa, Pb, Pc, Pd et P14, au cours des années 1977-1978 et 1979.-

Les analyses hebdomadaires et les enregistrements continus de la résistivité des eaux du puits 1, ont permis de vérifier le maintien de ses caractéristiques et de sa qualité bactériologique. Le puits semble, en effet, bien protégé des infiltrations en provenance du ruisseau dans les conditions d'alimentation actuelles de la nappe :

- 1) par le sens favorable de l'écoulement des eaux infiltrées en provenance du ruisseau vers l'aval du puits,
- 2) par le mélange, dans la nappe, des eaux du ruisseau et de celles en provenance de la Romanche.

IV-2-2 - Mise en évidence des infiltrations des eaux de la cascade de Jouchy dans les couches profondes de la nappe

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents,

- . la cascade de Jouchy constitue l'apport essentiel des versants dans la plaine de Jouchy, en rive gauche (chapitre II-3-2 - 1ère partie),
- . son débit est lié à la pluviométrie,
- . ses eaux s'infiltrent entièrement dans les alluvions puisqu'aucun ruisseau superficiel n'apparaît à l'aval du petit cône de déjection qu'elle forme au flanc du coteau,
- . ses eaux sont peu minéralisées, essentiellement bicarbonatées, sulfatées, calciques et magnésiennes, dépourvues de nitrates, de chlorures, etc. (chapitre I-6 - 2ème partie).

Bien que ces caractéristiques soient comparables à celles des eaux du secteur de Jouchy, les relations caractéristiques (5), (6), (8) et (10) ne se vérifient pas.

En effet, le taux des sulfates, les rapports G/Me et G/μ sont supérieurs à ceux que l'on peut calculer à partir de ces formules.

Les méthodes d'interprétation statistique appliquées aux petites séries de mesures (F. DUGAIN, C. MICHAUT - 1974) permettent de calculer les rapports G/Me et G/μ des eaux de la cascade et de les comparer à ceux, caractéristiques du secteur de Jouchy (Tableau 64).

	Conductivité G en μS.cm ⁻¹ à 20°C	G/ Me ⁺⁺	G/μ	SO ₄ ⁼ mesuré en m.mole/l	SO ₄ ⁼ calculé
Eaux du secteur de Jouchy		175,2 ± 5	52,1 ± 2,1		5,910 ⁻⁴ G + 5,1810 ⁻⁶ G ²
Eaux de la cascade		181,2 ± 5,7	54,5 ± 1,2		
Hautes eaux juillet 77					
S 6	216	174	52,6	0,375	0,369
S 6 P	261	176	52,3	0,51	0,507
Moyennes eaux Avril 77					
S 6	275	172	51,9	0,57	0,554
S 6 P	180	180	54,8	0,615	0,540

Tableau 64 - Comparaison des caractéristiques des eaux du secteur de Jouchy et des eaux de la cascade, en hautes et moyennes eaux.-

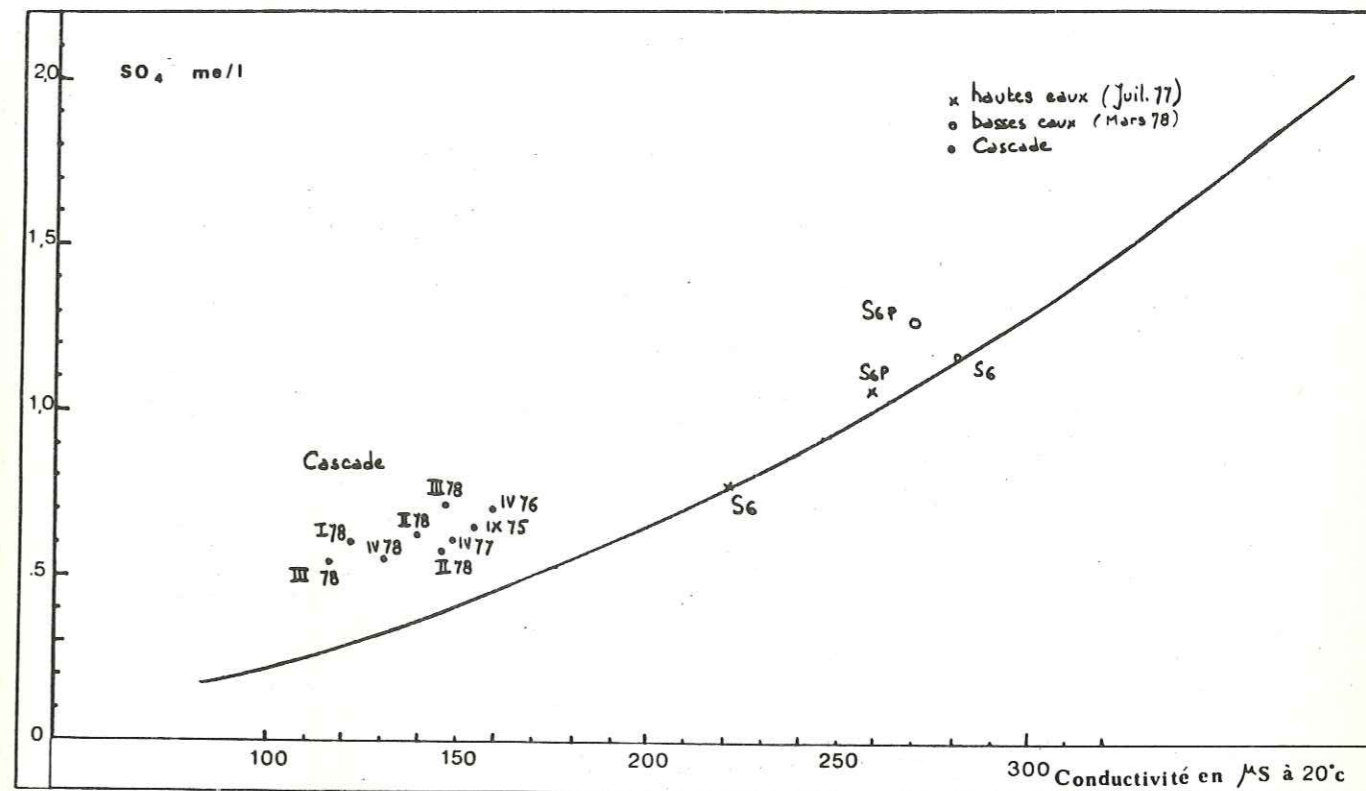
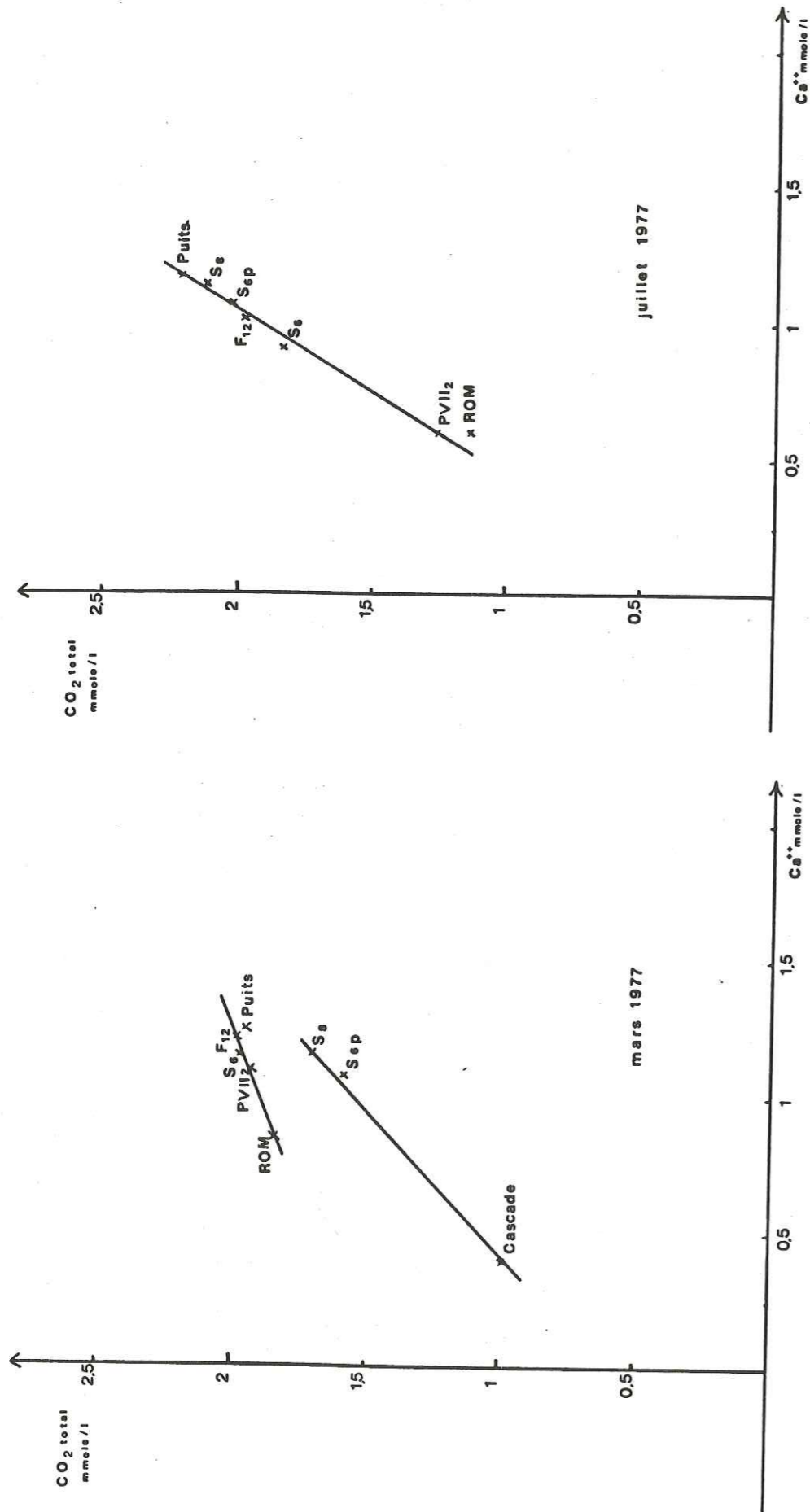


Figure 98 - Points représentatifs des eaux du piézomètre S 6, proche de la cascade de Jouchy.-

Le piézomètre S 6, le plus proche du cône de déjection de la cascade est équipé de 2 tubes crépinés à des profondeurs différentes (de - 10 à - 15 m pour le tube extérieur, de - 25 à - 30 m pour le tube intérieur). La géomorphologie des couches alluvionnaires y est peu différente (blocs, galets, sables grossiers de - 10 à - 15 m ; galets, graviers et sables de - 25 à - 30 m).

En hautes eaux, alors que la cascade s'est tarie, on peut observer que les caractéristiques hydrochimiques des eaux prélevées dans les deux tubes sont comparables. Leurs points représentatifs se placent sur la courbe caractéristique $|SO_4^{=}| = (f) G$ (figure 98) ; leur minéralisation s'accroît avec la profondeur. Cette accentuation est imputable à l'influence de l'apport des infiltrations en provenance de la Romanche dans les couches les plus superficielles et à celle des apports souterrains dans les couches les plus profondes.

Ainsi, sur le diagramme CO₂ total - |Ca⁺⁺| du mois de juillet 1977 les points figuratifs des eaux des piézomètres S6, S6 P, P VII 2, F 12, S8... (Figure 99) se placent sur une droite. Les eaux des piézomètres S6 et S6 P sont issues du mélange des eaux infiltrées (P VII 2) en provenance de la Romanche et des eaux des apports souterrains (S 8) ; elles ne subissent pas l'influence des eaux des versants.



Figures 99 - Points représentatifs des eaux de la Romanche, de la cascade, du puits, du puits et des piézomètres S8, S6, F 12 et P VII 2, en basses et hautes eaux (mars et juillet 1977).-

En basses eaux, au contraire, alors que le débit de la cascade n'est plus négligeable, les caractéristiques des eaux du S6 P changent. Seul le point représentatif des eaux du S 6 se place sur la courbe caractéristique $|SO_4^{=}| = (f) G$, celui des eaux du S6 P s'en écarte. Ainsi, sur le diagramme CO_2 total - $|Ca^{++}|$ du mois de mars 1977, les points figuratifs des piézomètres S6 P, S8 et de la cascade se placent sur une droite différente de celle qui joint les points représentatifs des eaux des couches superficielles de la nappe (Romanche, P VII 2, S6...).

Les eaux du piézomètre S6 P sont issues du mélange des eaux profondes et de celles de la cascade et sont influencées par les caractéristiques de cette dernière.

Les variations hydrochimiques observables dans les piézomètres profonds du F 12, sont plus difficilement interprétables du fait de l'éloignement du sondage de la cascade d'une part, et de l'étendue de la zone crépinée du premier tube (- 4 m à - 30 m), d'autre part.

Nous pouvons conclure que les eaux de la cascade de Jouchy s'infiltrèrent en rejoignant les couches profondes de la nappe en suivant vraisemblablement la pente du rocher du côté.

CONCLUSIONS et PROLONGEMENTS

Il est évident que la validité de ces interventions, basée sur l'expérience et l'instinct, il est bien évident que l'hydrogène est un gaz à l'heure actuelle, de nombreux moyens techniques et scientifiques, et qui permettent une évaluation appropriée des papiers hydroxydés. Cette évaluation, surtout lorsque les résultats de ce type de papier sont très complexes, peut être difficile.

Il est évident que la production de ces papiers hydroxydés à plus longue durée, les hydroxydés ont fait appel à différentes méthodes, pour obtenir des papiers hydroxydés d'une qualité à un niveau hydroxydés plus élevé.

Les résultats de l'analyse ont été rendus en France, de grande valeur, dans la question de la production de ces papiers hydroxydés (J.P. SARTRE - 1971, SARTRE et al. 1971, SARTRE et al. 1971, SARTRE - 1971, SARTRE - 1971).

Il y a-t-il un fond de l'eau ?
Il y a-t-il un fond de l'eau ?
Il y a-t-il un fond de l'eau ?
Il y a-t-il un fond de l'eau ?

Colloque LARA (1971).

... Si la ville avait des ruisseaux
Tous les vauriens seraient marins...
Si la ville avait des ruisseaux
Toutes les portes seraient des ports
De port en porte
On irait n'importe où
De porte en port
Mais après tout

... Qu'y-a-t-il au fond de l'eau
Il n'y a rien que de l'eau
Mais qu'y-a-t-il au fond de l'eau
Il y a de l'or au fond de l'eau...

Catherine LARA (1972).-

Il y a seulement une cinquantaine d'années, les moyens d'appréciation de la quantité des eaux souterraines exploitables, faisaient appel à des sciences dites "naturelles", quelque peu "occultes". Encore récemment, l'intervention des sourciers n'était pas exceptionnelle, quand il s'agissait de déterminer l'emplacement du captage d'une source potentielle. Sans remettre en cause la validité de ces interventions, basées sur l'empirisme et l'intuition, il est bien évident que l'hydrogéologue dispose, à l'heure actuelle, de nombreux moyens techniques et scientifiques, qui lui permettent une connaissance approfondie des nappes souterraines. Mais cette connaissance, souvent acquise lors du projet de captage, ne peut être considérée comme définitive.

Afin de prévoir le comportement des nappes souterraines à plus longue échéance, les hydrogéologues ont fait appel à différentes méthodes, pour établir des modèles, susceptibles d'être utilisés à un moment hydrodynamique donné.

Les modèles de simulation ont déjà rendu en France, de grands services dans la gestion et la protection des eaux souterraines (J.P. SAUTY - 1971, M. BONNET et J.P. SAUTY - 1975, R. STALENG - 1976, D. ROUSSELOT - 1977...).

Par exemple, le modèle mathématique de la nappe de la craie de la vallée de l'Eure a été établi, en 1977, après une première étude hydrogéologique, pour déterminer les nouvelles possibilités d'alimentation en eau potable de la Ville Nouvelle de Vaudreuil, en expansion ; il répond aux préoccupations des services publics, chargés de la gestion des eaux souterraines. Les rapports, faits à son sujet (M. LEPILLER et coll. - 1977, F. LELONG et coll. 1978...) illustrent les services rendus par le modèle mathématique. L'étude de l'évolution de la qualité chimique de l'Eure, puis celle des relations entre la rivière et sa nappe ont abouti à :

- . la mise en place d'un contrôle des pollutions éventuelles de la rivière, permettant, d'une part, une meilleure détermination des périmètres de protection et d'autre part, un plan d'intervention d'urgence,
- . l'optimisation des captages en tenant compte des contraintes techniques et d'urbanisme.

Nombreuses sont encore les difficultés rencontrées dans l'établissement d'une part, et l'application, d'autre part, des modèles mathématiques (P. PRUDHOMME et coll. - 1967).

Quelque soit le type des modèles adoptés, quelque soit leur qualité, les prévisions qu'ils fournissent sont entachées d'incertitudes.

G. DE MARSILY (1977) distingue :

- . les incertitudes liées à la nature climatique de l'environnement,
- . les incertitudes liées à la méconnaissance des mécanismes et des conditions aux limites, que les modèles sont censés représenter.

Dans le cas précis d'un réservoir aquifère, tel que celui d'une nappe souterraine alluviale en exploitation, son écoulement en régime transitoire est lié à des variations naturelles aléatoires. Ce régime est modulé par des conditions nouvelles, qui deviennent permanentes ou non, imposées par les débits de pompes et les aménagements. Souvent, le modèle, établi lors du projet de captage, ne peut plus être utilisé dans les conditions nouvelles. Il faut alors le "recaler", ce qui suppose, à posteriori, une nouvelle étude, souvent coûteuse. Au contraire, les études poursuivies au cours de l'exploitation même, dans des situations variées, permettent de prendre en compte un certain nombre d'incertitudes, sinon leur totalité. L'efficacité des modèles dépend, en effet, de la quantité et de la qualité des informations rassemblées pour les établir.

L'établissement d'un modèle mathématique de la nappe de Jouchy avait été projeté en 1974. Dans son premier rapport, le C.T.G.R.E.F. (1), chargé de cette étude, a noté que : "l'efficacité du modèle dépend en grande partie de la connaissance qu'on a des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe... et des conditions aux limites". Le calcul du régime permanent qui sert à "caler" le modèle, nécessite de "disposer d'une piézométrie réelle, correspondant à un état d'équilibre".

(1) C.T.G.R.E.F. : Centre Technique du Génie Rural des Eaux et Forêts, d'Anthony (Hauts-de-Seine).-

Un certain nombre de données "manquantes" s'est fait sentir, en particulier, les transmissivités de passage des eaux à travers les berges de la Romanche et les niveaux de la rivière. L'établissement définitif du modèle mathématique, nécessitant l'acquisition de données complémentaires, n'a pu encore être réalisé. L'utilité de la mise en oeuvre des "processus d'apprentissage" a été confirmée, en ce qui concerne l'établissement du modèle mathématique de la nappe de Jouchy. La prise en compte des résultats des années d'expériences d'exploitation, contribue à cet apprentissage.

Toute étude continue, menée au cours de l'exploitation de la nappe, réajustée en fonction des conditions, des contraintes, des connaissances et des techniques nouvelles, peut apparaître comme un "luxu" dans un site hydrogéologique reconnu comme favorable, où les essais préalables et l'expérience de 13 années, ont confirmé les possibilités. Mais l'objectif à long terme de telles études est évident ; il s'agit de conserver la ressource mais aussi de sauvegarder la qualité.

x
x x
x x x

Les études hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe souterraine de Jouchy, présentées ici, ont montré que les problèmes quantitatifs et qualitatifs, qui se posent, sont intimement liés. Parmi les informations nécessaires à l'étude d'une nappe souterraine, l'interprétation des résultats d'analyses est encore peu utilisée. Dans les études actuelles, on peut distinguer, deux directions de recherche :

- . l'étude des transferts à l'échelle macroscopique (établissement de bilans chimiques, de modèles mathématiques des transferts...),
- . l'étude des transferts à l'échelle microscopique (échanges entre le sol et l'eau, notamment dans les zones non saturées, physique du sol, chimisme des traceurs...).

Comme le signalait G. VACHAUD en 1977, le passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique doit être riche d'enseignements. En effet, l'examen des résultats d'analyses et des processus hydrochimiques mis en jeu, doit permettre de rendre compte de la qualité des eaux, résultat de l'action de différents et multiples paramètres intervenant sur la nappe.

La présente étude, qui s'appuie sur l'observation des phénomènes en cours d'exploitation, a montré que les conditions actuelles, d'alimentation, d'écoulement et d'exploitation de la nappe, correspondent au maintien de la qualité des eaux distribuées, maintien qui est le résultat des influences réciproques de divers paramètres.

Il s'agit :

- 1) du débit de la Romanche qui transite à l'amont de la plaine, lié au régime nivo-glaciaire de la rivière.
Les débits de la Romanche, grossis de ceux des eaux turbinées du ruisseau du Lac Mort et des apports du bassin versant, assurent toute l'année, l'alimentation de la nappe. Ils assurent également la stabilité des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe souterraine. C'est au cours des mois de hautes eaux (mai à octobre) que la turbulence de la rivière entraîne un décolmatage efficace du lit et des berges et que les infiltrations sont les plus abondantes. C'est également au moment où les infiltrations sont les plus abondantes, que la minéralisation des eaux de la rivière est la plus faible. Cette conjoncture est tout à fait favorable au maintien de la minéralisation moyenne des eaux de la nappe,
- 2) de l'exploitation contrôlée de la nappe par des pompages qui la sollicitent sans l'épuiser et maintiennent la zone d'appel du puits dans la région de la plaine située en rive gauche de la Romanche,
- 3) de l'écoulement des eaux souterraines de l'amont vers l'aval et parallèlement au lit de la rivière.

Tout se passe actuellement comme si une "programmation naturelle" permettait une réalimentation induite de la nappe au moment où elle est le plus sollicitée par les exigences de l'exploitation (à la fin du printemps et en été).

A l'appui de ces constatations, l'étude hydrochimique contribue à définir une méthodologie qui, basée sur l'établissement de relations caractéristiques, permet de mettre en évidence le lieu et l'importance des changements quantitatifs ou qualitatifs intervenus. Car, réci-proquement, tout changement dans les conditions de l'alimentation, de l'exploitation, de l'écoulement de la nappe, doit être envisagé en tenant compte des facteurs qui conditionnent le maintien des quantité et qualité actuelles.

Le problème posé, consiste à définir les conditions d'alimentation de la nappe, ou même de sa réalimentation artificielle, en s'assurant de la perennité des débits exploitables et du maintien de la qualité des eaux souterraines.

Le maintien de la qualité des eaux sous-entend, non seulement le maintien de leur potabilité, définie par les normes officielles, mais aussi, la sauvegarde de leur valeur hygiénique (absence de nitrates, ou d'autres ions indésirables, minéralisation moyenne...).

Du point de vue de l'hygiéniste, en effet, toutes les eaux répondant aux normes des eaux potables ne présentent pas une qualité équivalente. Bien en deça des concentrations maxima acceptables, la présence de certains éléments peut constituer une gêne pour l'utilisateur ou un signe de pollution. Au contraire, une eau totalement dépourvue d'éléments minéraux peut être néfaste pour la santé (eaux douces ou acides) ou être désagréable à boire. Une eau de "bonne qualité" doit donc contenir sans excès un certain nombre d'éléments minéraux.

Leur présence constitue une garantie, à la fois, contre tout effet néfaste pour la santé et contre tout accident qui peut survenir dans les canalisations (corrosion, entartrage).

Afin de conserver la qualité actuelle, reconnue, des eaux de la nappe de Jouchy, la mise en oeuvre d'une modélisation et son utilisation à des fins prévisionnelles, peuvent désormais s'appuyer sur une connaissance des caractéristiques hydrochimiques et de leur évolution, acquise au cours de cette étude.

Une dernière difficulté réside dans l'établissement des conditions aux limites du système qu'il convient de cerner correctement et qui peuvent évoluer prochainement. En effet, les projets de réaménagement du schéma hydraulique de la Romanche et de ses affluents (notamment de l'Eau d'Olle) vont occasionner des changements quantitatifs et qualitatifs, plus ou moins prévisibles.



A l'issue de cette étude, on sait que la protection des eaux de la nappe implique :

- 1) le maintien des infiltrations suffisantes en eau de faible minéralisation, au faible pouvoir agressif et aux caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques conformes aux normes des eaux d'alimentation.
- pour conserver la minéralisation totale moyenne et les caractéristiques physico-chimiques et toxicologiques des eaux souterraines.

L'étude des processus hydrochimiques et les mesures effectuées ont montré que la qualité des eaux souterraines dépend de celle des eaux infiltrées. Ainsi, les infiltrations des eaux de faible minéralisation de la Romanche et du Lac Mort, de la cascade de Jouchy, favorisent le maintien de la qualité intrinsèque des eaux de la nappe. Inversement, les abondantes infiltrations des eaux du ruisseau de Laffrey (printemps 1978) ont provoqué l'augmentation de la dureté, du taux des nitrates, des chlorures... des eaux souterraines.

- pour assurer la recharge de la nappe et pour ne pas exagérer l'épaisseur de la zone non saturée dans laquelle les eaux infiltrées sont susceptibles d'accentuer leur minéralisation comme l'expérience le montre.

A la suite de longues périodes où le niveau du toit de la nappe est resté bas, les eaux souterraines se sont chargées en sels minéraux (notamment en sulfates) lors de la remontée de la nappe. Ainsi, à l'échelle de l'année, l'augmentation du taux des sulfates dans les eaux pompées, a pu être constatée dans les périodes qui ont suivi celles de longue sécheresse (printemps et été 1976, automne et hiver 1978...) ou celles du colmatage du lit et des berges de la rivière (vidange de la retenue du Chambon, lors des hivers 1980 et 1981).

- pour diluer les eaux des apports souterrains profonds, elles-mêmes plus minéralisées que les eaux d'infiltration.

Ainsi, lors des étiages de la rivière, les eaux de la Romanche toujours moins minéralisées que celles des apports souterrains permettent de maintenir la minéralisation totale moyenne des eaux de la nappe.

- 2) de veiller aux conditions d'exploitation de la nappe. Une surexploitation conduirait aux mêmes effets que l'absence d'une alimentation suffisante (solicitation des eaux des réserves profondes, souvent minéralisées, battements des niveaux dans les zones non-saturées favorisant l'accentuation de la minéralisation...).

Dans le cas précis de la nappe de Jouchy, l'exploitation est facilitée par les conditions hydrogéologiques du secteur. L'expérience prouve, en effet que :

- d'une part, les pompages, en favorisant les infiltrations, permettent de renouveler les eaux de la nappe et ainsi de maintenir la qualité des eaux ;
- d'autre part, une réalimentation induite est possible. Ainsi, une remontée spectaculaire des eaux, sur l'ensemble de la nappe a été constatée (dès novembre 1967) lors du curage artificiel du lit de la rivière (A. CHOUREAU, J. DUBUS, J.P. VINTER - 1974).

Des conditions d'alimentation de la nappe dépendent donc celles de son exploitation.

- 3) de maintenir un cheminement souterrain suffisamment long pour assurer l'efficacité du filtre naturel que constituent les alluvions. Malgré la pollution bactériologique de la Romanche et des eaux superficielles qui alimentent la nappe, les eaux pompées ne nécessitent, en effet, aucun traitement de désinfection.

x
x x x
x x x

ANNEXES

ANNEXES

=====
=====
=====

- I - METHODES D'ANALYSES EMPLOYEES AU LABORATOIRE DU S.I.E.R.G.
- II - "LISTINGS" DU PROGRAMME TIESANAL.
- III - QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DU PUIITS DE JOUCHY.
- IV - REALISATION DES APPAREILS ENREGISTREURS DE RESISTIVITE ET DE TEMPERATURE DES EAUX.
- V - RELEVES ET ENREGISTREMENTS DES TEMPERATURES DES EAUX DE LA ROMANCHE ET DE LA NAPPE DE JOUCHY.

ANNEXE I

METHODES D'ANALYSES EMPLOYEES AU LABORATOIRE DU S.I.E.R.G.

Le choix des méthodes a été déterminé par :

- . les moyens matériels et techniques du laboratoire,
- . l'intérêt relatif des critères examinés,
- . la précision des méthodes.

La plupart des méthodes choisies sont celles couramment employées dans les laboratoires spécialisés dans l'analyse des eaux, préconisées par les normes françaises (A.F.N.O.R. 1979) ou les agences de bassin, et figurant dans les recueils d'analyses (A. MORETTE - 1964, G. CHARLOT - 1963 et 1966 - V. ALEXEEV - 1970, A.P.H.A. - 1971, J. RODIER - 1971 et 1978, etc.).

PRELEVEMENTS et ECHANTILLONAGE :

Les prélèvements dans les eaux superficielles ont été faits en bordure des rives. Pour pallier à l'inconvénient des prélèvements ponctuels dans ces milieux soumis à de nombreuses variations, nous avons essayé de multiplier les échantillons pour rendre interprétables les résultats.

Les prélèvements dans les puits de Jouchy ont été faits à un robinet de puisage, installé à la sortie d'une pompe.

Les prélèvements dans les piézomètres ont été faits par pompages, dans la mesure du possible. Nous avons employé : . une pompe motorisée permettant un débit d'exhaure de 5 à 10 l/s dans le cas où des analyses bactériologiques étaient nécessaires,

. une pompe péristatique transportable, manuelle (W.A.B.) ou électrique (COLE-PARMER - Masterflex) permettant un débit d'exhaure de 1 l/mn,

. un conteneur lesté de 1,5 l ou "bombe".

Les piézomètres de la plaine de Jouchy étant tous doublés d'un tube crépiné en P.V.C. et les prélèvements effectués après décolmatage éventuel de la zone crépinée par pompage, les altérations des eaux, dues à la nature du piézomètre, signalées par F. CORDEAU et ses collaborateurs, 1972, ne sont pas à craindre. Des essais le mettant en évidence ont été effectués dès nos premières campagnes de prélèvements.

Certaines analyses ont été faites sur place (résistivité, température, pH, T.A.C., oxygène dissous...).

Dans la mesure du possible, les échantillons ont été analysés dans les 48 heures qui ont suivi les prélèvements.

Les échantillons ont été conservés à basse température (10°C environ, au bas du réfrigérateur) afin de perturber le moins possible l'équilibre calco-carbonique des eaux.

La TEMPERATURE :

- . Expression : degrés Celsius (°C).
- . Appareillage :
 - . dans les eaux superficielles : thermomètre au 1/10 de degré (référence PROLABO 09.637.02),
 - . dans les eaux souterraines et le puits : sondes PONSELLE T.N.S. branchées sur oxythermomètre PONSELLE (Réf. 02.T.st) ou sur appareils enregistreurs sur bandes magnétiques (Annexe IV).

Le pH :

- . Expression : unités pH.
- . Méthode : méthode électrométrique avec électrode de verre selon la norme française : T 90.008 (1953).
- . Appareillage : pHmètre portatif METHROM type 488 d'une précision de $\Delta pH = 0,05$ unités pH, étalonné avec des solutions tampons pH = 7,00 MERCK : Réf. 9887 ; électrodes de verre, INGOLD 9895.

La RESISTIVITE ou la CONDUCTIVITE :

- . Expression : pour la résistivité : R en ohm .cm, à 20°C.
pour la conductivité : G en $\mu S.cm^{-1}$ à 20°C.
- . Méthode : détermination électrique selon la norme française : N.F. 9003 (1977).
- . Appareillage : résistivimètre PHILIPS type PR 9500 avec électrode PHILIPS PW 9510 ou TACUSSEL CM 02.
sondes PONSELLE (réf. C.N.S.F.) branchées sur appareils enregistreurs sur bandes magnétiques (Annexe IV).
- . Précision de la méthode : 2 %.

L'OXYGENE DISSOUS :

- . Expression : mg/l d'oxygène (mg/l d'O₂).
- . Appareillage : oxythermomètre portatif PONSELLE (Réf. 02.T.st).
- . Méthode électrochimique selon normes françaises : N.F.T. 90.106 (1973) et T. 90.032 (1975).
- . Précision : 2,5 %.

Le DEGRE HYDROTOMETRIQUE TOTAL (D.H.T.), les METAUX ALCALINO-TERREUX (le calcium et le magnésium) :

- . Expression : degrés français pour le D.H.T. (°f) (1 degré français = 10 mg de Ca CO₃ = 5 me),
en mg/l ou me/l ou m.mole/l pour le calcium et le magnésium.

- . Méthode de dosage complexométrique selon norme française : N.F.T. 90.003 et dosage du calcium en présence de murexide (A.P.H.A. - 1971, J. RODIER - 1978...).
- . Précision de la méthode : 1 % pour le D.H.T., 5 % pour le calcium et le magnésium.
Lors de son stage au laboratoire du S.I.E.R.G. en septembre et octobre 1979, J. SALINAS a montré que les résultats obtenus par cette méthode de dosage du calcium et du magnésium, sont ceux qui se rapprochent le plus de ceux obtenus par l'absorption atomique.

Les NITRATES :

- . Expression : en mg/l de l'ion NO₃⁻, en me/l ou m.mole/l.
- . Méthode colorimétrique au salicylate de sodium selon la norme française : N.F.T. 90.012 (1975).
- . Précision de la méthode : 1 %.

Les SULFATES :

- . Expression : en mg/l de l'ion SO₄⁼, en me/l ou en m.mole/l.
- A notre connaissance, les nombreuses méthodes expérimentales ou homologuées pour le dosage des sulfates sont toutes basées sur la formation d'un précipité de sulfate de baryum en milieu acide. Ces méthodes consistent à évaluer la quantité de sulfate de baryum formé :
- . soit par gravimétrie selon la norme française : N.F.T. 90.009 (1954),
 - . soit par néphélométrie (A.P.H.A. 1971, J. RODIER - 1978),
 - . soit par dosage en retour du baryum en excès (absorption atomique),
 - . soit par colorimétrie (J.D. ADAMSKI et S.P. VILLARD - 1975).
 - . soit par volumétrie (M. LEPEINTRE et J. RICHARD - 1957).

Toutes ces méthodes ont une précision médiocre de 5 % sur les résultats obtenus, étant donné la difficulté de précipiter complètement le sulfate de baryum. Nous avons adopté la méthode néphélométrique (la plus fidèle et la plus simple) en présence de polyvinyl-pyrrolidone (J. RODIER - 1978).

Les CHLORURES : mise au point d'une micro-méthode colorimétrique au thiocyanate mercurique (1).

Etant donné la valeur maximale acceptable de chlorures dans les eaux destinées à l'alimentation humaine (250 mg/l ou 7 me/l), les méthodes d'analyses conseillées et normalisées de dosage volumétrique après précipitation d'un sel d'argent ou de mercure (N.F.T. 90.0114 - 1952) ont une précision suffisante pour apprécier la potabilité d'une eau.

(1) Je remercie monsieur J. ROCHAT et mademoiselle J. ALARY, professeurs, (Laboratoire de Chimie Pharmaceutique de la Faculté de Pharmacie de Grenoble) pour leurs conseils efficaces dans la mise en oeuvre de cette méthode.

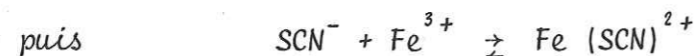
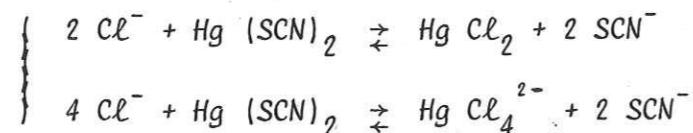
Des méthodes plus récentes utilisant les électrodes spécifiques (J. BUFFLE et coll. - 1974, F. LANCELOT et coll. - 1975) ou la microcoulométrie (A. MONTIEL et J.J. DUPONT - 1974) ont permis une meilleure précision et la solution partielle et complémentaire à l'interférence des ions gênants aux dosages des chlorures. Les études récentes sur les électrodes spécifiques permettent d'espérer, dans un avenir proche, la mesure de concentration en chlorures de l'ordre de 10^{-5} M, soit 0,35 mg/l. Actuellement, la limite de détection de la méthode est de 1,75 mg/l (J. RODIER - 1978).

La détermination précise du taux des chlorures peut être nécessaire dans de nombreux cas. Elle s'applique à l'étude des eaux continentales, peu minéralisées, nombreuses dans notre pays, des eaux de pluies, des eaux adoucies, des milieux biologiques stricts... Elle est, en outre, indispensable pour la détermination de la force ionique dans l'étude des équilibres calco-carboniques. Les chlorures étant particulièrement solubles dans l'eau, la détermination de leur taux et de leur variabilité peut être utilisée en hydrogéologie, comme traceur naturel (M. SCHÖLLER - 1963, 1972) comme témoin d'une pollution saline (L. ZILLIOX et P. MUNTZER - 1971, J. DUPUIS - 1974), comme traceur artificiel (Y. DRUET et J.L. MATHIEU - 1978, M. BONNET et J.P. SAUTY - 1975, Y. COSAN - 1976).

Parmi les méthodes colorimétriques (B.K. AFGHAN et coll. - 1975) la technique officielle préconisée pour le dosage des pesticides organo-chlorés (1968) m'est apparue comme pouvant répondre à nos besoins. Cette méthode a été décrite par H.N. EISHEIMER et R.L. KOCHER aux U.S.A. (1966), par G. CHARLOT (1966) en France.

Elle n'a été appliquée aux eaux qu'en 1956 par D.M. ZALL et ses collaborateurs. Plus récemment, elle a été utilisée pour la mesure des débits par J. RUZICKA (1976).

PRINCIPE : les ions chlorures sont susceptibles de réagir avec le thiocyanate mercurique, libérant l'anion thiocyanate, qui peut alors être dosé spectrophotométriquement sous forme de thiocyanate ferrique :



Bien que le thiocyanate mercurique soit le complexe le plus stable, un équilibre peut s'établir. Les conditions opératoires devront donc viser à déplacer cet équilibre vers la formation de chlorure mercurique, donc de l'anion thiocyanate et à favoriser la stabilité du thiocyanate ferrique.

PARTIE EXPERIMENTALE : l'influence du pH, la nature de l'acide et le rôle du solvant, ont été étudiés successivement.

1) pH et nature de l'acide : (figure 101)

La réaction est favorisée par un milieu nettement acide. H.N. EISHEIMER proposait l'acide nitrique 0,72 N et G. CHARLOT un pH de 1,3. Nos propres essais ont montré qu'un pH de 0 était le plus favorable. Ce milieu très acide, favorise le recul d'ionisation de l'acide thiocyanique (HSCN) ce qui permet un meilleur déplacement de l'équilibre.

Nous avons comparé l'efficacité de divers acides forts : acide sulfurique, nitrique et perchlorique, la figure 101 montre que l'acide perchlorique augmente le rendement de la coloration.

Ceci peut s'expliquer au regard des valeurs des potentiels redox de ces acides :



Le potentiel redox élevé de l'acide perchlorique permet le maintien des ions ferriques sous leur forme oxydée. Cet acide ne renferme en outre aucune impureté réductrice contrairement à l'acide nitrique (vapeurs nitreuses).

2) Rôle du solvant :

L'addition d'un solvant miscible à l'eau et de plus faible constante diélectrique favorise le développement de la coloration en diminuant l'ionisation du chlorure mercurique formé.

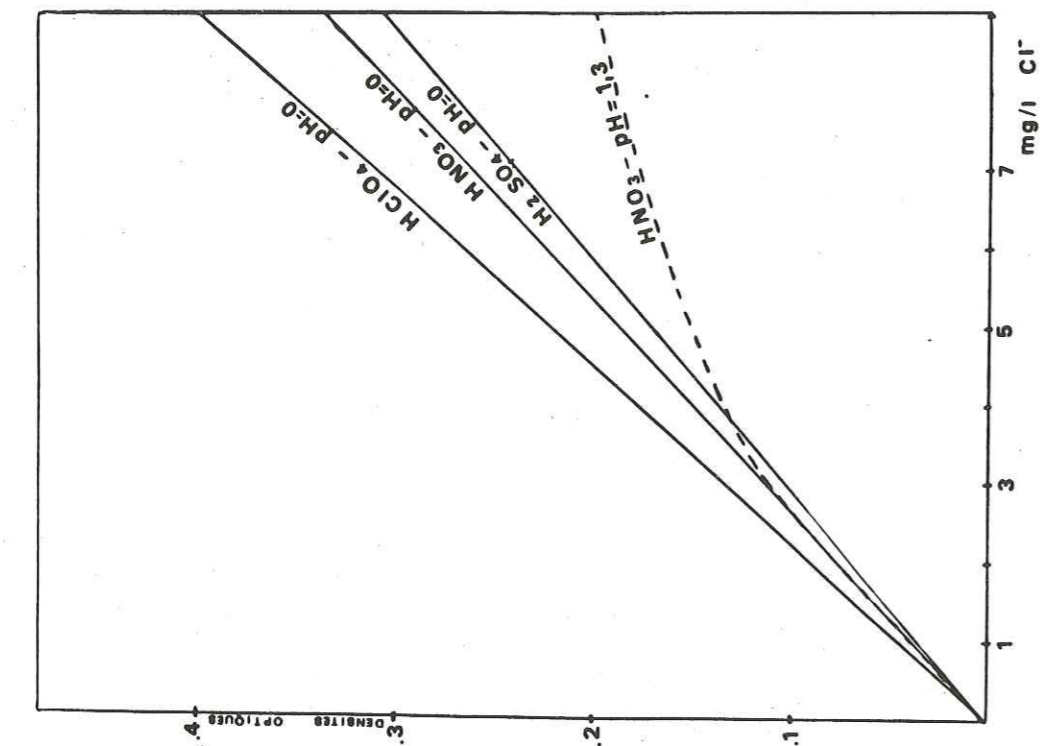
En outre, la dissolution du thiocyanate mercurique dans l'alcool est facilitée par rapport à la dissolution dans l'eau (pour 4,4 ppm de chlorures, l'absorption est de 0,120 en milieu aqueux et de 0,205 en milieu hydroalcoolique).

3) Concentration des réactifs :

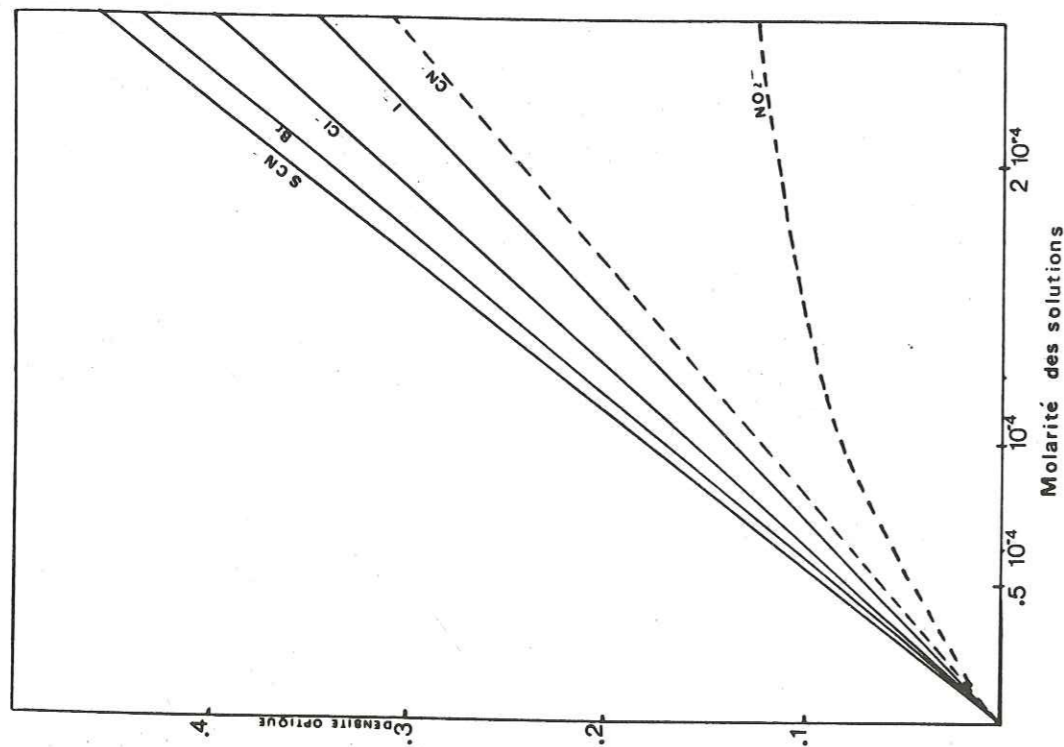
Bien que la concentration en chlorures soit faible dans l'échantillon, il est important d'apporter un excès suffisant de thiocyanate mercurique d'une part, et d'ions ferriques, d'autre part, de façon à déplacer les équilibres mis en jeu.

4) Extraction du complexe ferrique :

Dans le but d'augmenter la sensibilité de la méthode, j'ai tenté d'extraire par un solvant organique, non miscible à l'eau, le complexe ferrique coloré. Ce complexe n'est soluble que dans les solvants polaires, ce qui exige de choisir un alcool non miscible à l'eau. Cependant, les essais avec les alcools amylique, isoamylique et octylique ont montré que le coefficient de partage n'était pas en faveur de la phase organique, donc que l'extraction était incomplète.



Méthode de dosage colorimétrique des chlorures par le thiocyanate mercurique -
Figure 101 - influence du pH et de la nature de l'acide sur le développement de la coloration.



Méthode de dosage colorimétrique des chlorures par le thiocyanate mercurique -
Figure 100 - étude des interférences (ions gênants par excès).

5) Protocole adopté :

- * Réactifs :
 - . Acide perchlorique ($HClO_4$) à 70 %,
 - . Thiocyanate mercurique à 0,20 % dans l'alcool éthylique à 96° = la dissolution est obtenue par chauffage au bain-marie,
 - . Solution perchlorique de sel ferrique :
 - 8 g d'alun ferrique
 - 20 cm³ $HClO_4$ à 70 %
 - 50 cm³ d'eau distillée.
- Chauffage au bain-marie jusqu'à dissolution puis compléter à 100 cm³ avec de l'eau distillée.

* Méthode : A une prise d'essai de 10 cm³ renfermant de 10 à 80 g d'ions Cl^- , on ajoute :

- 2 cm³ d'acide perchlorique à 70 %
- 2,5 cm³ de thiocyanate mercurique
- 2,5 cm³ de solution perchlorique de sel ferrique.

La lecture doit être effectuée à 463 nm, 15 mn après l'addition du dernier réactif. La coloration est stable pendant 1 h et la réponse parfaitement linéaire (Figures 100 et 101).

6) Etude des interférences :

Dans les mêmes conditions d'expériences, un certain nombre d'ions présents dans les eaux, sont susceptibles de gêner le dosage :

- . les thiocyanates (SCN^-) forment des complexes ferriques et donnent des erreurs par excès ;
- . les autres halogénures (bromures Br^- , iodures I^- ...) et les ions qui déplacent les thiocyanates (nitrites NO_2^- , cyanures CN^- ...) donnent des colorations qui s'ajoutent à celle donnée par les chlorures.
Pour une même molarité, ces ions agissent conformément à leur constante de stabilité ;
- . les métaux qui réagissent avec les thiocyanates donnent des erreurs par défaut (l'argent Ag^+ , le cuivre Cu^{2+} , le nickel Ni^{2+} , le plomb Pb^{2+} ...);
- . les ions qui complexent le fer ferrique donnent des erreurs par défaut.

Les courbes d'étalonnage tracées avec les différents ions donnant la même réaction, dans des conditions expérimentales identiques (Figure 100), montrent que la perturbation est bien effective. Pour chacun de ces ions, il a été calculé la concentration limite acceptable dans une eau à analyser au-delà de laquelle les ions deviennent gênants :

- . Bromures 0,56 ppm
- . Iodures 1 ppm
- . Nitrites 1,5 ppm
- . Cyanures 0,22 ppm
- . SCN⁻ 0,38 ppm

Pour les ions pouvant réagir avec SCN⁻, seuls Cu²⁺ et Ni²⁺ sont perturbateurs, mais seulement à partir de la concentration très élevée de 700 ppm.

Enfin, les ions pouvant complexer Fe³⁺ ne sont gênants qu'à partir de concentrations telles qu'elles ne sont jamais rencontrées dans les eaux naturelles (F⁻ = 50 ppm et PO₄³⁻ = 500 ppm) ; de plus, la quantité de Fe³⁺ apportée par le réactif est très supérieure aux besoins de la réaction et une certaine consommation reste donc sans effet. Tous les ions gênants de la réaction, n'interviennent pas ou peu, dans le domaine de l'hydrologie.

=*==*==

Les réactifs étant instables, il est utile de les renouveler rapidement et d'effectuer une courbe d'étalonnage à chaque série de dosages. La courbe d'absorption colorimétrique est linéaire pour les taux compris entre 0 et 20 mg/l d'ion Cl⁻. Cette méthode permet d'apprécier 0,1 mg/l de Cl⁻ ce qui correspond à une précision de 3 % pour un taux de chlorures de 3 mg/l. Elle est fiable et sensible, facilement mise en oeuvre au laboratoire ou automatisable.

Les METAUX ALCALINS : (Na⁺ et K⁺)

Ces dosages ont été confiés au laboratoire des eaux de La Tronche (méthode par photométrie de flamme).

La SILICE :

- . Expression : mg/l de silice (mg/l de Si O₂).
- . Méthode colorimétrique au molybdate d'ammonium (in J. RODIER - 1978).
- . Précision de la méthode : 2 %.

Les ORTHO-PHOSPHATES :

- . Expression : mg/l de l'ion phosphate (mg/l de PO₄⁼).
- . Méthode colorimétrique au molybdate d'ammonium (in J. RODIER - 1978).
- . Précision de la méthode : 4 %.

"L'OXYDABILITE au PERMANGANATE, à CHAUD" ou l'OXYGENE CEDE par le PERMANGANATE de POTASSIUM :

- . Expression : mg/l d'oxygène cédé (mg/l d'O₂).
- . Méthode selon la norme française : N.F.T. 90.018 (janvier 1960).

Les MATIERES en SUSPENSION TOTALES :

- . Expression : mg/l de M.E.S.T.
- . Méthode par filtration sur disque filtrant en fibre de verre, selon la norme française : N.F.T. 90.105 (juin 1978).
- . Précision de la méthode : 1 %.

Le TITRE ALCALIMETRIQUE (T.A.), le TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET (T.A.C.)
les DOSAGES des CARBONATES et des BICARBONATES :

- . Expression : degrés français (pour le T.A. et le T.A.C.).
- . Méthode volumétrique avec indicateurs colorés ou méthode potentiométrique selon la norme française : N.F.T. 90.036.
- . Précision de la méthode : 2 %.

ANNEXE II

"LISTINGS" DU PROGRAMME TIESANAL

La photocopie des "listings" étant de mauvaise qualité, nous avons choisi de reproduire à la machine à écrire, deux d'entre eux, à titre d'exemples.-

S.I.E.R.G. SYNDICAT INTERCOMMUNAL DES EAUX DE LA REGION GRENOBLOISE
86, COURS JEAN JAURES 38130 ECHIROLLES.

ANALYSE DES EAUX : 77 1137

DATE ET HEURE DU PRELEVEMENT : 10 VIII 77 9 H 30

LIEU DU PRELEVEMENT-DENOMINATION DU POINT D'EAU : JOUCHY PUIITS I

CONDITIONS DU PRELEVEMENT : ROBINET LAVABO (POMPE 1)

NIVEAU PIÉZOMETRIQUE OU LIMNIGRAPHIQUE : UNE SEULE POMPE, 297,14 M

CONDITIONS METEOROLOGIQUES : BEAU SEC

TEMPERATURE DE L'AIR : 17°C 5

TEMPERATURE DE L'EAU : 16°C 7

RESISTIVITE EN OHM.CM À 20°C : 3866

CONDUCTIVITE EN MICRO-SIEMENS CM⁻¹ À 20°C : 259 PH MESURE AU LABORATOIRE : 7.65

DHT EN DEGRE FRANCAIS : 15.00
DHT EN ME/L : 3.00
TAC DEGRES FRANCAIS : 9.25
TAC EN ME/L : 1.85
TA DEGRES FRANCAIS : 0.00
TA EN ME/L : 0.00

* ANIONS *

IONS	MG/L	ME/L	MMOLE/L
NO ₃ ⁻	2.10	0.0339	0.0339
CL ⁻	2.00	0.0564	0.0564
SO ₄ ⁼	50.50	1.0514	0.5257
H CO ₃ ⁻	112.85	1.8500	1.8500
CO ₃ ⁼	0.00	0.0000	0.0000
TOTAL		2.9917	

* CATIONS *

IONS	MG/L	ME/L	MMOLE/L
NA ⁺	2.00	0.0870	0.0870
K ⁺	0.50	0.0128	0.0128
CA ⁺⁺	44.82	2.2375	1.1188
MG ⁺⁺	9.24	0.7602	0.3801
TOTAL		3.0975	

SO₄/ANIONS : 35.14 %
H CO₃/ANIONS : 61.84 %

CA/CATIONS : 72.24 %
MG/CATIONS : 24.54 %

COURBES D'EQUILIBRE

SOMME DES ANIONS CARACTERISTIQUES (N) : 1.1417
SOMME DES CATIONS CARACTERISTIQUES (P) : .8600
(N-P)/2 : .1409 ***
MU-C MONOVALENTS : .1901
MU-C DIVALENTS : 3.6232
MU CARACTERISTIQUE : 1.9067
CO₂ TOTAL POUR L'EAU ETUDIEE : 1.8874 ***
PH SATURATION POUR L'EAU ETUDIEE : 8.13

CA ⁺⁺ EN MMOLE/L	.5	1.0	1.5	1.1188
H CO ₃	0.7183	1.7183	2.7183	1.9558
MU FOND.	1.3591	2.8591	4.3591	3.2154
MU TOTAL	3.2658	4.7658	6.2658	5.1221
EPS	0.0529	0.0630	0.0713	0.0651
PK'1	6.4231	6.4130	6.4047	6.4109
PK'2	10.3842	10.3641	10.3475	10.3599
PK'S	7.9393	7.8992	7.8660	7.8908
K'2/K'1 K'S	3.9783	3.9481	3.9232	3.9418
K'2/K'S	- 2.4448	- 2.4649	- 2.4815	- 2.4691
H ₂ CO ₃	0.0025	0.0262	0.0929	0.0374
CO ₂	0.7207	1.7445	2.8112	1.9933
PHS	8.8885	8.2298	7.8672	8.1290

POINT D'INFLEXION DE LA COURBE POUR CA⁺⁺ = 0.19

ANNEXE III

QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX

DU PUIS I DE JOUCHY

En plus des contrôles bactériologiques, quotidiens (1), effectués à la station pompage et dans les réservoirs communaux, sur les eaux distribuées, des analyses de l'eau du puits de Jouchy sont faites régulièrement. Indépendamment des mesures particulières qui ont pu être prises (2), l'eau du puits I de Jouchy est actuellement analysée deux fois par mois. Aucune des analyses effectuées depuis la mise en service du puits, n'a permis de mettre en évidence la présence d'*Escherichia Coli*, seul parmi les bactéries coliformes recherchées à être le témoin des contaminations fécales récentes.

Nous avons eu à déplorer la présence, pendant quelques jours de suite, de *Streptocoques fécaux*, signe d'une contamination fécale "ancienne", à des taux relativement faibles (2 à 5 germes pour 100 ml d'eau), à la suite de travaux dans le puits (remplacement d'une pompe - 1971...) ou d'une forte contamination des eaux de la Romanche (vidange de la retenue du Chambon, 1980...). Ces contaminations ont occasionné le traitement par injection de chlore, quelques jours consécutifs.

L'eau est un milieu vivant présentant un microbisme naturel plus ou moins important. En l'absence des germes tests de contamination fécale, l'accroissement anormal de l'ensemble des micro-organismes présents dans l'eau peut avoir une signification péjorative dans l'estimation de la qualité des eaux. Le nombre des germes totaux du puits I de Jouchy est nul ou très faible, ce qui suppose un gisement aquifère bien protégé. On peut noter que 94 % des recherches faites à 37°C et 64 % des recherches faites à 20°C révèlent moins de 5 germes/ml. Des taux supérieurs à 100 germes/ml ne se sont présentés que 3 fois au cours de la période 1975-1979. Ces derniers résultats peuvent être considérés comme "exceptionnels" puisqu'ils n'ont pas été confirmés par les contrôles effectués les jours suivants.

En bactériologie, quelque soit la qualité d'une eau d'alimentation, la transcription des résultats d'analyses me paraît toujours alarmiste pour le lecteur manquant de points de comparaison.

En 1976, J. VIAL, C. GEOFFRAY, et M. BLANC de l'Institut Pasteur de Lyon, ont publié une étude portant sur 105 eaux des réseaux de la région lyonnaise, pour la plupart des eaux souterraines, d'origine géologique variée.

(1) Ces contrôles sont effectués par le Laboratoire régional agréé de La Tronche - 38700.-

(2) En 1978, par exemple, 144 analyses bactériologiques ont été effectuées à la suite du débordement du ruisseau de Laffrey.-

Les auteurs ont pu noter que 42 % des réseaux présentent des dénombrements bactériens supérieurs à 100/ml à 37°, que 28 % présentent une pollution "forte" (c'est-à-dire que les eaux contiennent plus de 5 germes à signification péjorative certaine -*E. Coli* et *Streptocoques fécaux* - pour 100 ml, dans plus de 11 % des échantillons examinés en un an). Bien que, comme les auteurs le soulignent, la population des échantillons examinés "n'est pas obligatoirement représentative de l'ensemble du territoire national", ces résultats ne font que confirmer, s'il le fallait encore, que la pureté bactériologique des eaux est rare.

L'examen des résultats d'analyses effectuées au cours des dernières années confirme l'excellente qualité bactériologique des eaux du puits de Jouchy. On doit attribuer cette pureté à l'efficacité de la filtration naturelle par les sables aquifères choisis pour y installer les captages.

ANNEXE IV

APPAREILS ENREGISTREURS DES TEMPERATURES
ET DES RESISTIVITES DE L'EAU

Grâce à l'intervention efficace de A. RAMBAUD (Faculté de Pharmacie de Montpellier), à la collaboration technique de J. NOUGUIER qui les a conçus et réalisés (laboratoire d'hydrobiologie marine de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc à Montpellier), grâce au concours financier du S.I.E.R.G., des laboratoires d'Hydrologie des Facultés de Pharmacie de Grenoble et Montpellier, trois appareils de mesures des températures et des résistivités, avec enregistrements sur cassettes magnétiques, ont été mis en place à Jouchy (Chapitre III-1-4 - 2ème partie).

DESCRIPTION des APPAREILS : (A.F. CHOUTEAU, J. NOUGUIER, A. RAMBAUD - 1980)

Les appareils comportent deux parties :

- 1) un centralisateur de mesure permettant la mesure de tensions et l'enregistrement sur cassette magnétique ;
- 2) des circuits analogiques associés à des capteurs permettant l'obtention de tensions analogues au paramètre mesuré.

I - Centralisateur de mesures

Tous les circuits sont réalisés en technologie micro-power (C-MOS)

- le multiplexeur analogique bipolaire permet l'isolement galvanique entre les voies ;
- le convertisseur analogique numérique est un modèle 12 bits binaire pur ;
- l'interface magnétophone réalise la sérialisation des octets à enregistrer et la commande du magnétophone ;
- le magnétophone digital est un modèle de fonctionnement pas à pas, standard, d'enregistrement NRZ-1 ;
- le circuit pilote génère les signaux de synchronisation du système et permet la sélection du nombre de voies enregistrées ainsi que l'intervalle de temps entre les scrutations ;
- l'unité d'affichage permet de contrôler à tout instant la valeur de chaque voie par sélection au moyen d'une roue codeuse.

II - Circuits de mesure des paramètres

Pour la réalisation de cette partie deux problèmes essentiels devaient être résolus :

- en regard de la durée et des conditions climatiques des expériences envisagées, il fallait réaliser des circuits à très faible dérive thermique et à stabilité élevée dans le temps ;
- ces performances devaient être obtenues avec une consommation électrique minimum.

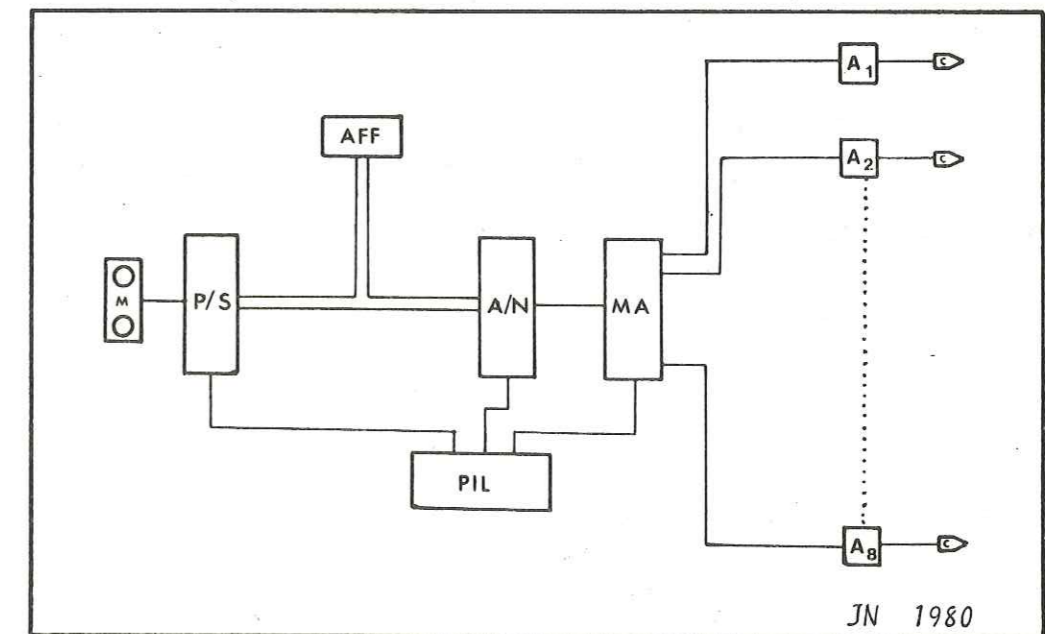
Nous avons répondu à ces problèmes par l'utilisation systématique de composants de très hautes performances ainsi que par l'absence d'amplification en continu.

II-1 - Mesure de la température :

Nous avons choisi la technique de mesure par sonde à résistance de platine standard 100 ohm à 0°C, ce capteur nous ayant déjà donné toutes satisfactions (sonde PONSELLE TNS).
La gamme de mesure est de : 0°C à 40°C.
La précision de : ± 0,02°C.

II-2 - Mesure de la résistivité :

Notre choix s'est porté sur une sonde à deux électrodes de platine (PONSELLE CNSM) ; pour obtenir le maximum de précision nous n'avons pas utilisé la thermistance de compensation de température, toutes les mesures étant ramenées à 20°C lors du traitement par ordinateur.
Nous avons ainsi obtenu une mesure de R_{20} avec une précision de ± 1% pour une gamme de 1 000 ohm à 10 000 ohm .



- | | |
|--|-------------------------------------|
| C : capteurs | P/S : convertisseur parallèle-série |
| A : circuits analogiques | PIL : circuit pilote |
| MA : multiplexeur analogique | AFF : afficheur |
| A/N : convertisseur analogique-numérique | M : magnétophone digital.- |

Figure 102 - Schéma synoptique des appareils enregistreurs de températures et de résistivités des eaux.-

III- Codage et traitement des données

Nous avons adopté pour sa robustesse et son peu de dépendance aux variations de vitesse de la bande magnétique, le standard NRZ-1. De plus, pour nous affranchir d'éventuelles discontinuités dans la séquence d'enregistrement, nous avons enregistré, parallèlement à la mesure, le numéro de la voie ainsi que l'horloge, ce qui nous a permis de replacer les mesures dans le temps. Nous nous distinguons en cela de la majorité des centrales de mesure du commerce, qui enregistrent des séquences chronologiques où l'horloge est implicite, solution peu fiable pour des séries temporelles de longue durée, dans des conditions difficiles.

Le standard NRZ-1 n'étant pas compatible avec l'ordinateur, nous avons réalisé un circuit interface pour introduire les données dans le calculateur local (I.B.M. 370-65).

Ces données sont ensuite traitées puis mises sur disque sous forme de fichier à partir duquel les courbes sont tracées sur table traçante BENSON, les données restant disponibles pour tout traitement ultérieur.

ANNEXE V

RELEVES ET ENREGISTREMENTS DES TEMPERATURES DES EAUX DE LA ROMANCHE ET DE LA NAPPE DE JOUCHY

La température des eaux, caractéristique physique facilement repérable sur le terrain, et enregistrée en même temps que la résistivité, m'est apparue momentanément, pouvoir être un "traceur" valable du cheminement souterrain. En effet, un certain nombre d'observations a pu être fait :

A L'ECHELLE de l'ANNEE :

Les variations saisonnières des températures des eaux, sont d'autant plus importantes que l'on s'éloigne des zones d'infiltration de la Romanche (Figures 103-104-105).

Ainsi, celles du piézomètre P VII 2, situé dans la zone d'infiltration préférentielle suivent celles de la Romanche ; celles du piézomètre P IV 1, proche des rives, sont d'autant plus influencées par celles de la Romanche que les infiltrations le long des rives y sont plus abondantes, au printemps et en été ; celles du puits sont réduites : elles sont transmises au coeur de la nappe avec retard et atténuation.

L'examen des températures relevées à un moment donné, permet de mettre en évidence qu'il existe des gradients de température, des zones d'infiltration de la rivière jusqu'au coeur de la nappe ; ces gradients sont tantôt positifs, tantôt négatifs, suivant les saisons (Figures 104 et 105). En hiver, les eaux de la nappe sont plus "chaudes" que les eaux d'infiltration ; en été, elles sont plus "froides" que ces dernières. Au printemps, et en automne, les températures tendent à s'uniformiser et les échanges thermiques sont réduits. L'allure des cartes isothermes que nous avons pu dresser, est comparable à celle des cartes hydrochimiques (Figures 51 et 52 - pages 156 et 157), mais leur interprétation est compliquée par l'inversion des gradients en cours d'année, alors que les gradients de minéralisation présentent toujours le même sens, celui de l'écoulement de la nappe.

Les variations des températures dans l'espace, apparaissent nettement sur les cartes isothermes de plein hiver ou de plein été (Figure 105), elles sont presque nulles la plupart du temps.

A L'ECHELLE de la JOURNEE :

Les eaux de la Romanche subissent, notamment au cours des journées ensoleillées, des variations de températures pouvant atteindre plusieurs degrés. On pouvait penser que la transmission de ces variations aux eaux de la nappe, permettait de suivre leur cheminement. Or, les températures relevées, toutes les heures, dans les piézomètres les plus proches des rives, ou situés dans les zones d'infiltration préférentielle, ne varient pas de plus de 2/10e de degrés.

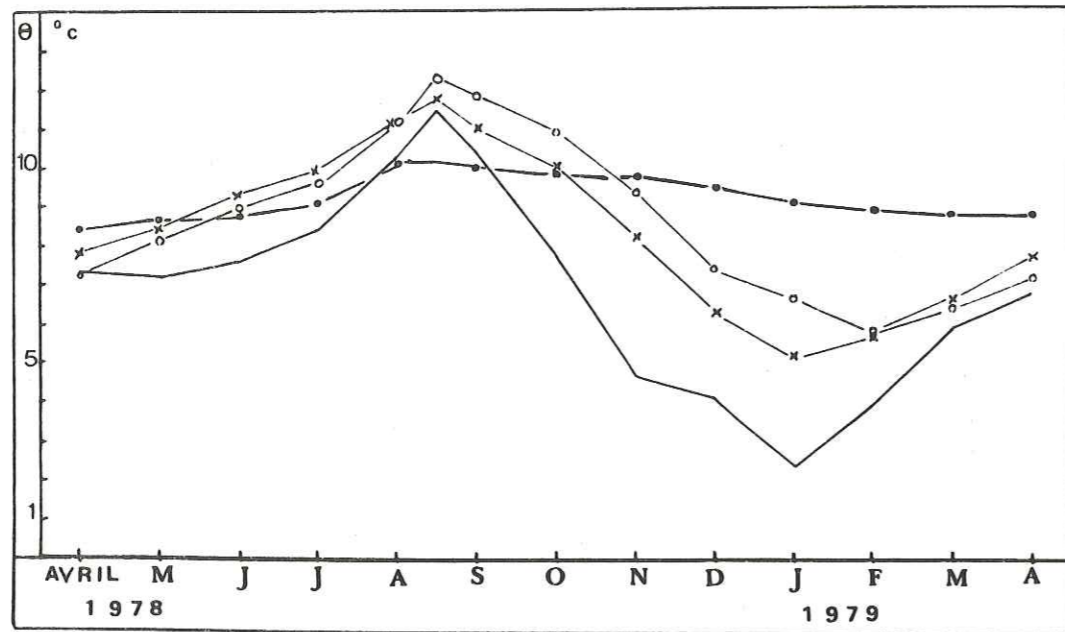


Figure 103 - Moyennes mensuelles des températures relevées à 9 h dans la Romanche, les puits et les piézomètres à Jouchy (année hydrologique 1978-79).-

— Romanche
 • - - - Puits I
 ○ - ○ - Piézomètre P VII 2
 x - x Piézomètre P IV 1

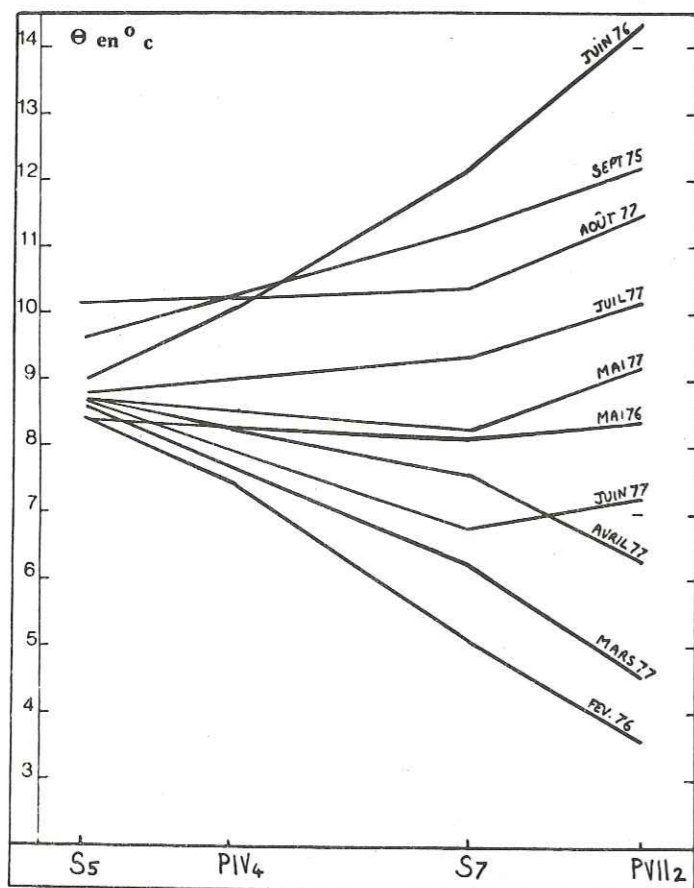


Figure 104 - Gradients des températures relevées dans les eaux de la nappe de Jouchy selon le profil P 2 (P VII 2... S 5).-

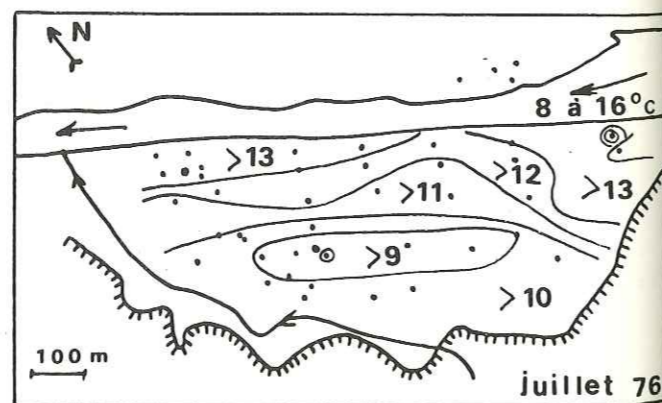
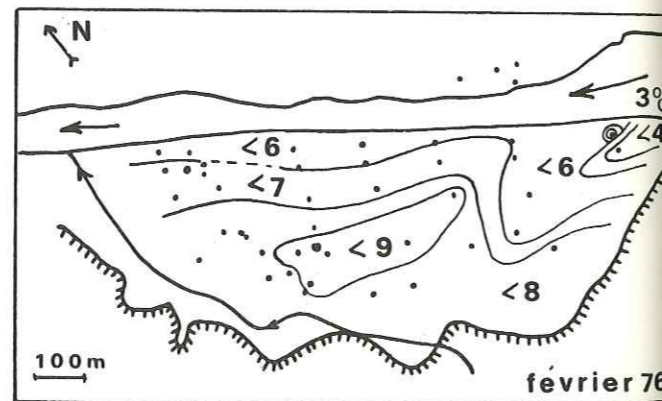
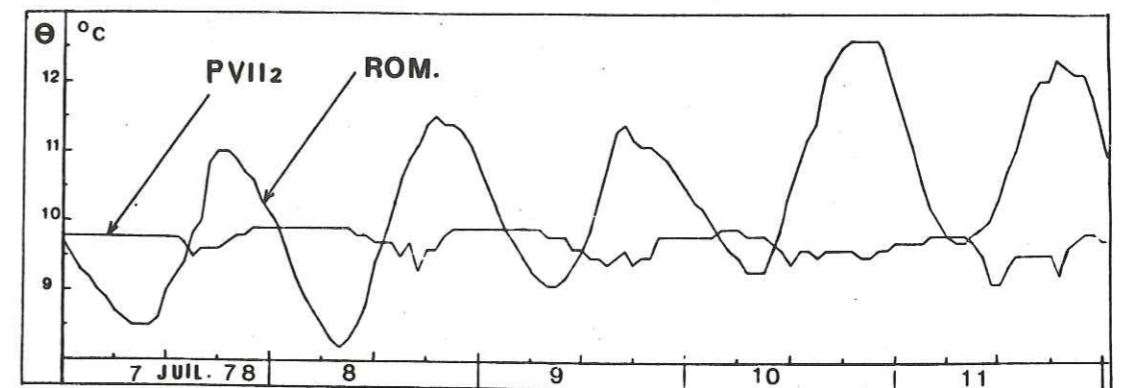
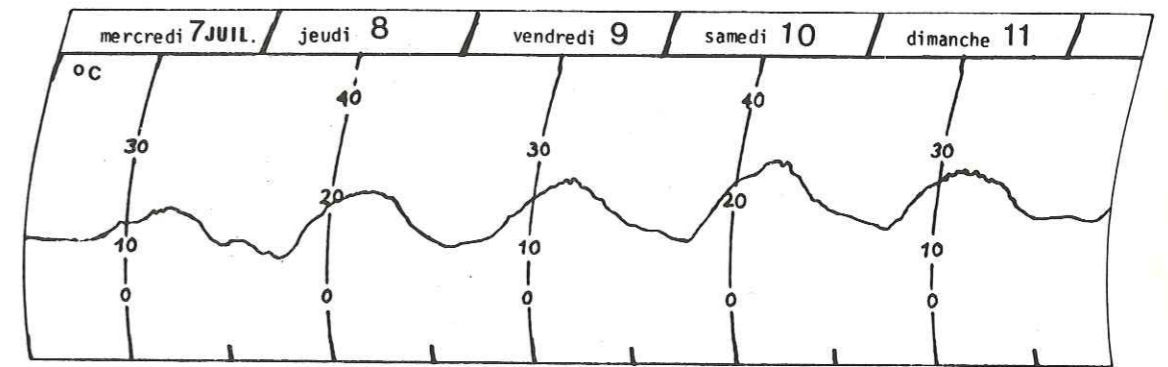


Figure 105 - Isothermes des eaux de la nappe en basses (février 1976) et hautes eaux (juillet 1976) à 6 m au-dessous du toit de la nappe.-

Température atmosphérique



Température des eaux

Figure 106 - Enregistrements des températures de l'air et des eaux de la Romanche et du piézomètre P VII 2, au cours des journées ensoleillées de juillet 1978.-

L'amplitude des variations est plus importante dans le milieu "eau" que dans le milieu "sol + eau" où les échanges sont plus lents. Les enregistrements des températures des eaux des piézomètres P VII 2 et P IV 1, montrent que, même au cours de l'été pendant lequel les variations diurnes sont les plus importantes, les impulsions créées sont rapidement amorties dans le milieu "sol + eau" (Figure 106) que constitue la nappe. Les températures relevées en un point de la nappe sont les résultantes de plusieurs phénomènes influants, dont la signification peut être contradictoire.

VARIATIONS EN PROFONDEUR : (Figure 107)

Dans les piézomètres crépinés à différentes profondeurs nous avons pu faire des relevés de températures grâce à des thermo-sondes PONSELLE T.N.S. Les variations de températures enregistrées dans un même piézomètre sont de l'ordre de 1 à 2°C. Suivant les saisons, les eaux se réchauffent ou au contraire, se refroidissent en profondeur. Ces variations traduisent une stratification des eaux mise en évidence par l'hydrochimie, qui peut être attribuée à la présence de courants d'eau d'origine différente, notamment pour les piézomètres proches des versants (S 6, F 12) ou proches des rives (P I 1, P IV 1...).

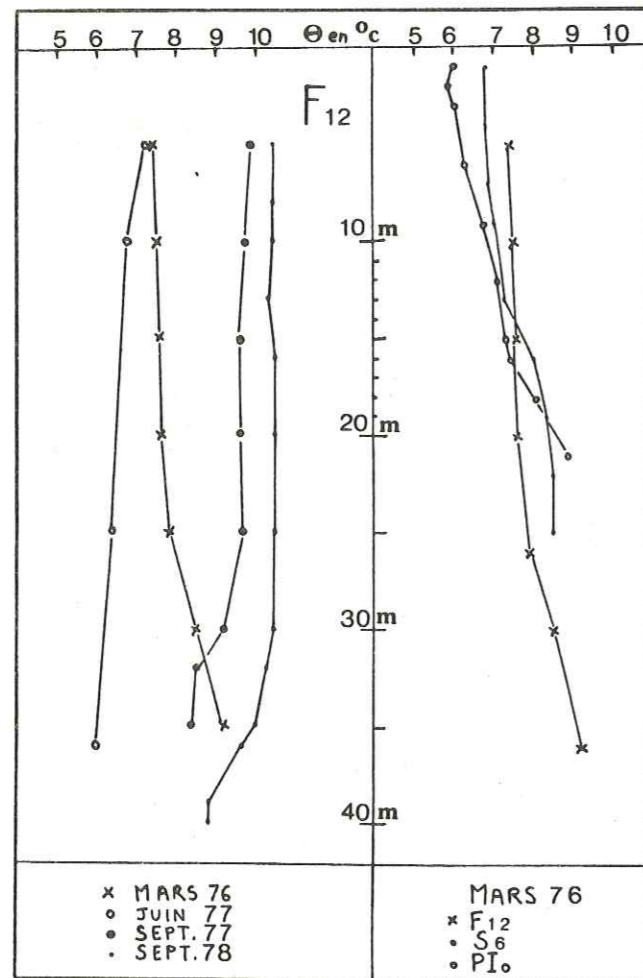


Figure 107 -

Variations des températures des eaux de la nappe en fonction de la profondeur du magasin aquifère.-

Elles peuvent également traduire l'influence de la température atmosphérique et du rayonnement solaire sur les couches les plus superficielles du magasin aquifère.

-*-*-*

Comme d'autres nappes souterraines étudiées par C. THIRRIOT et R. GAUDU - 1975 ; K. CARTWRIGHT - 1974, la nappe de Jouchy est le siège de constants échanges thermiques et est soumise à l'influence de deux facteurs prédominants de l'environnement :

- . la température du sol, du magasin aquifère ;
- . la température des eaux d'infiltration.

Ces deux facteurs influent l'un sur l'autre, et sont soumis à l'action de divers autres paramètres, aux variations rapides et aléatoires, comme la température de l'air, le rayonnement solaire, les débits, les vitesses d'écoulement, le temps de contact des eaux et du sol, etc.

En négligeant le gradient géothermique aux profondeurs de la nappe ici considérées, on peut constater que la température du magasin aquifère subit des variations thermiques dues, notamment, à la température extérieure et au rayonnement solaire, et à des impulsions plus ou moins amorties des eaux infiltrées.

Réciproquement, la température des eaux d'infiltration, qui dépend de leur origine, de leur possibilité de se réchauffer ou de se refroidir lors de leur parcours dans la rivière, varie au contact du sol et du magasin aquifère. Très rapidement, au cours du cheminement souterrain, les échanges thermiques sont atténués dans la nappe et la température du magasin aquifère devient prédominante.

Etant donné les faibles variations de la température enregistrées dans la nappe, les nombreux facteurs contradictoires qui l'influencent (leurs variations), il est très difficile, à mon avis, d'attribuer à une température relevée, une interprétation justifiable. Les enregistrements de résistivité, grâce à leur grande précision, permettent des interprétations beaucoup plus claires.

Cependant, les relevés et les enregistrements de température des eaux de la nappe sont en soi, très intéressants. Les faibles températures relevées dans le puits de Jouchy et leur stabilité, participent au maintien de la bonne qualité des eaux. Elles limitent les réactions biologiques, influent sur les équilibres hydrochimiques en limitant également les dissolutions, comme le décrivent les hydrochimistes (A. HERMAN - 1971, C. THIRRIOT et R. GAUDU - 1975...).

Toute perturbation de l'équilibre thermique actuel pourrait entraîner des changements qualitatifs non négligeables.

ABREVIATIONS

==:==:==:==:==:==:==:==:==:==

A.I.H.	:	Association Internationale des Hydrogéologues.
A.I.H.S.	:	Association Internationale d'Hydrologie Scientifique.
B.R.G.M.	:	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France).
C.E.N.G.	:	Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble (France).
C.E.B.E.D.E.A.U.	:	Centre Belge d'Etude et de Documentation des Eaux (Belgique).
C.N.R.S.	:	Centre National de Recherche Scientifique (France).
C.R.AC.SC.	:	Compte-rendus de l'Académie des Sciences de Paris (France).
D.D.A.	:	Direction Départementale de l'Agriculture.
D.G.R.S.T.	:	Direction Générale à la Recherche Scientifique et Technique (France).
J.A.W.W.A.	:	Journal of American Water Works Association (U.S.A.).
O.M.M.	:	Organisation Météorologique Mondiale.
O.M.S.	:	Organisation Mondiale de la Santé.
R.G.A.	:	Revue de Géographie Alpine (France).
S.G.N.	:	Service Géologique National (France).
TRAV. LAB. GÉOL. (GRENOBLE)	:	Travaux du Laboratoire de Géologie de Grenoble (France).
T.S.M.	:	Techniques et Sciences Municipales (France).
U.G.G.I.	:	Union Générale des Géologues Internationaux.
U.S.M.G.	:	Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

==:==

Ann.	:	Annales.
Bull.	:	Bulletin.
Coll.	:	Colloque.
C.R.	:	Compte-rendus.
Ed.	:	Editions.
Mém.	:	Mémoires
Pub.	:	Publication.
R.S.	:	Résumé scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

==:==:==:==:==:==:==:==:==:==

- ADAMSKI J.M., VILLARD S.P. - (1975) - Application of methyl blue sulphate method to water and wastewater analysis - Analytical chemistry - 1975 - 47 - n° 7 - p. 1191-94.
- AFGHAN B.K., LEUNG R., KULKARNI A.V., RYAN J.F. - (1975) - New automated colorimetric method of the determination of chloride using chromotropic acid - Analytical chemistry - 1975 - 47 - p. 556.
- ALBINET M. - (1977) - Le problème des servitudes liées à la détermination des périmètres de protection des captages d'alimentation en eau potable - Coll. national S.G.N. - B.R.G.M. - Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine - Orléans - mars 1977.
- ALEKINE O.A. - (1953) - Principes d'hydrochimie - Gidrometeoizdat - Leningrad - 1953.
- ALEXEE V. - (1970) - Analyse qualitative - Ed. M.I.R. - Moscou.
- ALLIX A. - (1917) - Vizille et le bassin inférieur de la Romanche - Essai de monographie géographique - Imp. Allier - Grenoble.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - A.P.H.A. - (1971) - Standard methods for the examination of water and wastewater - 13e ed. New-York.
- ANTENNE de MONTAGNE de la METEOROLOGIE NATIONALE à Saint-Martin-d'Hères -
- Aperçu du temps dans le département de l'Isère (publication mensuelle interne) -
- Observations météorologiques dans le département de l'Isère pour l'année... (publication annuelle dans R.G.A.).
- APRAHAMIAN J., CHOUTEAU A.F., FOURNEAUX J.C. - (1972) - Examen des matières en suspension totales de la rivière Isère à Grenoble - IIème Coll. sur la pollution et la protection des eaux de la région Rhône-Alpes - Lyon 1972.
- ARCHIE G.E. - (1942) - The resistivity log as an aid in determining some reservoirs characteristics - Petroleum technology - 1942 - p. 1422.
- ASSOCIATION FRANCAISE pour l'ETUDE des EAUX - A.F.E.E. - (1980) - La dureté de l'Eau - Intérêt économique de l'adoucissement collectif pour l'usager - Etude 1980.
- ASSOCIATION FRANCAISE de NORMALISATION - A.F.N.O.R. - (1979) - Eaux - Méthodes d'essai - Recueil des Normes Françaises - 1ère Edition - 1979.
- ASSOCIATION GENERALE des HYGIENISTES et TECHNICIENS MUNICIPAUX - A.G.H.T.M.) - (1981) - Spécial "Commission de l'Eau" - T.S.M. l'Eau - 1981 - 76 - n° 3 bis.
- ASTRUC A. et M., BEGUIN S., MERICAM P. (1979) - Qualité chimique des eaux de ruissellement d'une ville moyenne - T.S.M. l'Eau - 1979 - 74 - n° 2.
- BARBIER R. - (1948) - Les zones ultradauphinoises et sub-briançonnaises entre l'Arc et l'Isère - Mémoire explicatif - Carte géol. France - 1948.
- BARBIER R. (1963) - La tectonique de la zone ultradauphinoise au N.E. du Pelvoux - Trav. Lab. Géol. Grenoble - 1963 - 39 - p. 239-246.
- BARBIERI A. - (1970) - Etude pétrographique de la partie orientale du massif Ecrins Pelvoux : Les Granites. Aperçu de la géochronométrie du massif - Thèse 3ème cycle 1970 - Grenoble.
- BARFETY J.C., GIDON M., HAUDOUR J., SARROT-REYNAULD J. - (1970) - Nouvelles observations sur les conditions de sédimentation du trias et du lias, du Dôme de la Mure et de la Chaîne de Belledonne méridionale - Géologie alpine - 1970 - 46 - p. 5-16.

- . BARDY J., LAFOND-GRELLETY J., PERE C. - (1977) - Alimentation en eau potable des communes girondines par les nappes de l'éocène - T.S.M. l'Eau - 1977 - 72 - n° 3.
- . BEGEMANN F., LIBBY W.F. - (1957) - Geochemistry cosmo. Acta - 1957 - 12 - p. 277.
- . BERGER G., BOSCH B., DESPREZ N., LETOLLE R., MARCE A., MARIOTTI A., MEGNIEN C. - (1977) - La minéralisation des eaux souterraines de la Beauce et le renouvellement de la nappe - Application des marquages isotopiques (^3H - ^{15}N - ^{34}S) - Coll. Nat. sur la protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine - B.R.G.M. - Orléans - mars 1977.
- . BESANVAL G. - (1970) - Erosion fluviale - Généralités sur les débits solides de charriage - Stage du Ministère de l'Agriculture - Strasbourg - mai 1970.
- . BIJU-DUVAL J. - (1977) - Etude hydrogéologique de la commune de Notre-Dame-de-Mésage - Rapport D.D.A. - Isère - septembre 1977.
- . BOCQUET G. - (1976) - Principales caractéristiques chimiques des eaux de ruissellement dans le bassin de la haute Normandie - R.G.A. - 1976 - 64 - n° 2.
- . BONNET M., SAUTY J.P. - (1975) - Un modèle simplifié pour la simulation des nappes avec intrusion saline - A.I.H.S. - Publication 115 - Actes du coll. de Bratislava - sept. 1975 - p. 45-56.
- . BORDET C. et P. - (1952) - Sur la géologie des massifs des Grandes Rousses et de Belledonne - C.R.Ac.Sc. Paris - 1952 - 234 - p. 1187-88.
- . BORDET C. et P. - (1960-63) - Belledonne, Grandes Rousses, Aiguilles Rouges, Mont-Blanc, quelques données nouvelles sur leurs rapports structuraux - Livre mémoire du professeur P. FALLOT - Mém. société géologie de France - 2 - p. 311-316.
- . BORNUAT M. - (1962) - Etude de la couverture sédimentaire de la bordure sud-ouest du massif des Grandes Rousses au nord de Bourg-d'Oisans (Isère) - Trav. Lab. Géol. - Grenoble - 1962 - 38 - p. 147-203.
- . BOSCH B., CORDEAU J.Y. et F., FOURNEAUX J.C., MARCE A., SARROT-REYNAULD J. - (1972) - Le dosage des isotopes du soufre et la détermination des sulfates dans les eaux. Applications dans les bassins de l'Isère, du Drac et de la Normandie - IIème coll. sur la pollution et la protection des eaux de la région Rhône-Alpes - Lyon 1972.
- . BOUCETTA M. - (1977) - Vulnérabilité de la nappe des calcaires de Beauce à la pollution. Premiers résultats concernant la pollution agricole. Coll. nat. sur la protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine - B.R.G.M. Orléans - mars 1977.
- . BOUSQUET G. - (1978) - Pratique du calcul de l'équilibre calco-carbonique et des traitements correctifs des eaux naturelles - Tribune du C.E.B.E.D.E.A.U. 1978 - 31 - n° 410 - p. 11-26.
- . BUFFIERE J.M. - (1964) - Les formations cristallines et cristallophyliennes du massif du Rochail - Trav. Lab. Géol. Grenoble - 1964 - 40 - p. 45-79.
- . BUFFLE J., LANDRY J.C., HAERDI W. - (1974) - Avantages et limitations des électrodes sélectives dans l'analyse des eaux - T.S.M. l'Eau - 1974 - 69 - n° 11 - p. 547-554.
- . BULTOT F., DUPRIEZ G., BODEUX A. - (1976) - Interception potentielle journalière de la pluie par divers peuplements forestiers - Journal of hydrology - 1976 - 31 - p. 381-392.
- . CAMBEFORT H. - (1963) - Reconnaissance des sols et fondations spéciales - Ed. Eyrolles - Paris.
- . CAOUS J.Y., VIENNE M. - (1977) - Recherche des causes de pollution des captages d'eau potable de la nappe de la craie en Picardie. Coll. nat. sur la protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine - B.R.G.M. Orléans - mars 1977.
- . CARME F. - (1965) - Existence de deux formations détritiques remarquables dans les schistes cristallins antéhouillers du Taillefer - C.R.Ac.Sc. Paris - 1965 - 260 - p. 6656-59.

- . CARME F. - (1970) - Caractères fondamentaux de l'architecture d'ensemble des chaînes de Belledonne et des Aiguilles Rouges - C.R.Ac.Sc. Paris - 1970 - 271 - p. 2232-35.
- . CARTWRIGHT K. - (1974) - Tracing shallows groundwater by soil temperatures - Water resources research - vol. 10 - n° 4 - août 74 - p. 847-855.
- . CASTANY G. voir rapports S.G.N. 1977 et 1979.
- . CHARLOT G. - (1963) - Analyse qualitative et réactions en solution - Ed. Masson - Paris.
- . CHARLOT G. - (1966) - Dosages colorimétriques des éléments minéraux - Ed. Masson - Paris.
- . CHARLOT G. - (1974) - Chimie analytique quantitative - Ed. Masson - Paris.
- . CHOUTEAU A.F., CORTES A., DUBUS J. - (1977) - Evolution des caractéristiques d'une nappe souterraine en cours d'exploitation - Coll. nat. sur la protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine - B.R.G.M. Orléans - mars 1977.
- . CHOUTEAU A.F., DUBUS J., VINTER J.P. - (1974) - Champ de captage de Jouchy - Etude bibliographique, hydrogéologique et hydrochimique - Rapport interne - S.I.E.R.G. - oct. 1974.
- . CHOUTEAU A.F., NOUGUIER J., RAMBAUD A. - (1979) - Réalisation d'enregistrements de températures et de résistivités de l'eau - Applications à l'étude in situ des relations nappe-rivière dans la vallée de la Normandie - T.S.M. l'Eau - 1980 - 75 - n° 8-9 - p. 445-53.
- . CHRETIEN J., MERE C., GRIMAL J.P. de, VIGREUX C. - (1977) - Evolution des teneurs en nitrates dans les eaux d'alimentation du département de l'Yonne - Coll. nat. sur la protection des eaux souterraines - B.R.G.M. Orléans - mars 1977.
- . CLAIR A. - (1974) - Pollution de la nappe aquifère profonde par les chlorures à la suite de la mise en service de l'autoroute A6 dans l'arrière côte de la Côte d'Or - Ann. agron. 1974 - 25 - p. 2-3.
- . CONSTANTINIDIS D., SARROT-REYNAULD J. - (1978) - Comparaison des méthodes de détermination du coefficient d'emmagasinement des nappes aquifères - C.R. 103ème congrès nat. des sociétés savantes Nancy - 1978 - (Sciences) IV - p. 153-164.
- . COMPAGNIE de PROSPECTION GEOPHYSIQUE FRANCAISE - C.P.G.F. - (octobre 1969) - Etude de la confluence Normandie-Eau d'Oille - Document interne S.I.E.R.G.
- . COMPAGNIE de PROSPECTION GEOPHYSIQUE FRANCAISE - C.P.G.F. - (1967) - Vallée de la Normandie entre Vizille et Séchilienne - Rapport hydrogéologique - Document interne S.I.E.R.G.
- . CORDEAU F. et J.Y., MARCE A., OLIVE P., SARROT-REYNAULD J. - (1972) - Modification de la composition chimique des eaux des nappes aux abords des piézomètres en liaison avec leur mise en place - IIème coll. sur la pollution et la protection des eaux de la région Rhône-Alpes - Lyon 1972.
- . COSAN Y. - (1976) - Etude des débits de recyclage de l'eau dans les puits du plateau de Tailles et essai de calcul des perméabilités des roches entourant les puits - Ann. société géologique de Belgique - 1976 - 99 - p. 81-88.
- . COTTET J., NINARD B. - (1977) - Les caractères physico-chimiques de potabilité de l'eau - Revue internationale de Pédiatrie - 1977 - 69 - p. 27-32.
- . COUTAGNE A. - (1942) - Hydrométéorologie des bassins de haute montagne - Société hydrotechnique de France - Grenoble.
- . DEBELMAS J., SARROT-REYNAULD J. - (1960) - Le réseau des failles du massif du Taillefer près de Vizille (Isère) - Trav. Lab. Géol. Grenoble 1960 - 36 - p. 51-58.
- . DEBELMAS J. - (1970) - Alpes, Savoie et Dauphiné - Guides géologiques régionaux - Ed. Masson - Paris.

- . DEBELMAS J., KERCKHOVE C. - (1980) - Les Alpes franco-italiennes - Introduction à la géologie du Sud-Est de la France - Géologie alpine - 1980 - 56 - 26ème congrès géologique international - Paris.
- . DEGAUD E. - (1976) - Schéma hydrographique de la Romanche et de ses affluents - Document interne S.I.E.R.G.
- . DELAQUAIZE B. - (1979) - Etude géologique, hydrogéologique et limnologique dans une région de moyenne montagne : le bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet (Isère) - Thèse doctorat - Hydrogéologie - Grenoble - février 1979.
- . DE MARSILY G. - (1977) - Prévion du comportement des systèmes de ressources en eau. Evolution à long terme des aquifères. Modélisation des systèmes de réservoirs - Compte-rendus des journées "l'Eau, la recherche et l'environnement" - Montpellier - octobre 1977.
- . DONNEY D. - (1960) - Contribution à l'étude de la série cristallophylienne et de la couverture sédimentaire de la Chaîne de Belledonne méridionale (Alpes françaises) - Trav. lab. géol. Grenoble - 1960 - 36 - p. 285-368.
- . DRUET Y., MATHIEU J.L. - (1978) - Contrôle d'une pollution simulée dans une nappe - Coll. d'hydrogéologie de la Craie du bassin de Paris - Rouen - 25-26 mai 1978.
- . DUBUS J. - (1973) - Champ de captage de Jouchy. Bilan de cinq années d'exploitation - Rapport interne S.I.E.R.G. mai 1973.
- . DUBUS J. - (1974) - voir CHOUTEAU A.F. et coll. - Rapport interne S.I.E.R.G. octobre 1974.
- . DUBUS J., CHOUTEAU A.F. - (1975) - Sur l'origine et la qualité des eaux des sources de la Rive, près du Bourg-d'Oisans. Rapport interne S.I.E.R.G.
- . DUGAIN F., MICHAUT C. - (1974) - Méthodes rapides d'interprétation statistiques appliquées aux petites séries de mesures - Revue de l'aluminium - 1974 - n° 427-428.
- . DUPUIS J.D. - (1974) - L'action des fondants chimiques sur les eaux superficielles et souterraines - Compte-rendus du XIIème congrès international de viabilité hivernale - Turin - Oct. 74.
- . EDOUARD J.L. - (1978) - La glaciation du bassin de la Romanche. Contribution à l'étude des fluctuations glaciaires post-wurniennes - Thèse 3ème cycle - Géographie - Grenoble.
- . ELECTRICITE de FRANCE - E.D.F. - Chambéry - (1972) - Bassin du Bucllet - Sondages de reconnaissance.
- . ELSHEIMER H.N., KOCHÉ N. (R.L.) - (1966) - Stability studies on ferric thiocyanate complex as used for determination of micro amounts of chloride - Analytical chemistry - 1966 - 38 - p. 145-147.
- . ERB F. - (1973) - Pollution des eaux de surface dans la région du Nord de la France - Journal de l'Ass. pharmaceutique française pour l'hydrologie - n° 10 - 1973.
- . ERIKSSON - (1958) - Tellus 1958 - 10 - p. 472.
- . FOURNEAUX J.C. - (1976) - Les formations quaternaires de la vallée de l'Isère dans l'ombilic de Grenoble - Géologie alpine - 1976 - 52 - p. 31-72.
- . GAILLARD B. - (1976) - Mesures des débits de la Romanche - Rapport S.A.A.R. - C.E.N.G. - C.E.A.
- . GARRELS R.M. - (1976) - A survey of low temperatures water minerals relations - Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in ground-water - Hydrology int. at. ener. agency - Vienne 1976.
- . GIGNOUX M. - (1947) - Les nappes d'eau souterraines profondes dans les alluvions des vallées alpines ; leur importance pour les aménagements hydro-électriques : R.G.A. - 1947 - 26 p. 1.14.

- . GIGNOUX M., MORET L. - (1940-41-42) - Les conditions géologiques du barrage du Chambon - Romanche - Trav. Lab. Géol. Grenoble - 1940-42 - 23 - p. 6-60.
- . GIGNOUX M., MORET L. - (1952) - Géologie dauphinoise - Ed. Masson - Paris.
- . GIRARD R. - (1960) - Essai de théorie générale des eaux douces - l'Eau - 1960 - 47 - n° 3 et 4.
- . GIRARD R. - (1967) - Méthode d'étude d'une eau naturelle à partir de son analyse - l'Eau - 1967 - 54 - n° 5 et 6.
- . GIRARD R. - (1968) - Influence de la température sur l'agressivité et la corrosion des eaux naturelles - l'Eau - 1968 - 55 - n° 11.
- . GIRARD R., POIRIER G. - (1968) - Action des sols sur les canalisations métalliques in "la corrosion des conduites d'eau et de gaz" - Ed. Eyrolles - Paris 1968.
- . GIRARD R. - (1970) - Modification de la composition des eaux naturelles pendant la corrosion du fer - T.S.M. l'Eau - 1970 - 65 - n° 11 - p. 409-17.
- . GIRARD R. - (1973) - Remarques sur la constitution des eaux naturelles - Tribune du C.E.B.E.D.E.A.U. - juin-juillet 1973 - n° 355-356.
- . GIRAUD P. - (1952) - Les terrains métamorphiques du massif des Grandes Rousses - Bulletin de la société géologique de France - 1952 - 2 - p. 379-402.
- . GIRAUD P., VIVIER G. - (1980) - Les granites des massifs cristallins externes des Alpes françaises - Mémoires du B.R.G.M. - n° 107 - 26ème congrès géologique international - Paris 1980.
- . GIROULT E. - (1977) - Qualité de l'eau de boisson, gage de santé publique - Chronique O.M.S. 1977 - 31 - p. 342-45.
- . GREFFARD J. - (1970) - Equilibres carboniques et corrosion - Bull. B.R.G.M. III-4 - 21 - p. 45-70.
- . HALLOPEAU J. - (1949) - L'acide carbonique dans l'eau - La technique sanitaire et municipale - 1949 - n° 1 - p. 1-11.
- . HERMAN A.N. - (1971) - Hydrogéochimie - Publication C.E.B.E.D.O.C. - Liège - Belgique.
- . HISSEL J. - (1975) - La chimie des eaux ; la pratique du calcul des équilibres - C.E.B.E.D.E.A.U. - 1975 - Ed. Eyrolles - Paris.
- . HOOVER C.P. - (1938) - Practical application of Langelier methods - J.A.W.W.A. - 1938 - 30 - p. 1802.
- . INSTITUT de RECHERCHES en CHIMIE APPLIQUEE - I.R.C.H.A. - (1968) - Détermination gravimétrique des matières en suspension et des matières décantables - Rapport interne I.R.C.H.A.
- . JOURNAL OFFICIEL de la REPUBLIQUE FRANCAISE du 27 mars 1962 et du 13 avril 1962 - Circulaire du 15 mars 1962, relative aux instructions générales concernant les eaux d'alimentation et la glace alimentaire.
- . JOURNAL OFFICIEL de la REPUBLIQUE FRANCAISE du 3 décembre 1968 - p. 11357 - Recherche des pesticides organo-chlorés et bromés.
- . JOURNAL OFFICIEL des COMMUNAUTES EUROPEENNES du 30 août 1980 - Directive du Conseil du 15 juillet 1980, relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine 80-778 - C.E.E.
- . JAMIER D. - (1975) - Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des massifs de l'Arpille et du Mont-Blanc - Thèse de doctorat - Université de Neuchâtel - mars 1975.

- . LANCELOT F., Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne - (1975) - Contrôle et étalonnage aux très basses teneurs des électrodes existantes. Mise au point de nouvelles électrodes. Application au contrôle continu des eaux - Rapport final - Action concertée en chimie analytique - D.G.R.S.T.
- . LANDREAU A., MONITION L. - (1981) - Eaux souterraines, qualité et pollutions - T.S.M. l'Eau - 1981 - 76 - n° 7.
- . LANGELIER W.F. - (1936) - The analytical control of anticorrosion water treatment - J.A.W.W.A. - 1936 - 28 - p. 1500.
- . LANGELIER W.F., LUDWIG H.F. - (1942) - Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters - J.A.W.W.A. - 1942 - 34 - p. 335-352.
- . LANGELIER W.F. - (1946) - Etude de l'indice de saturation - Influence de la température - J.A.W.W.A. - 1946 - 38 - p. 179-189.
- . LEFORT P. - (1971) - Géologie du Haut-Dauphiné - Thèse - C.N.R.S. - Nancy - 1971.
- . LEFORT P., PECHER A. - (1971) - Présentation d'un schéma structural du Haut-Dauphiné cristallin - C.R.A.S. - Sciences - Paris 1971 - 273 - p. 3-5.
- . LEGRAND L., POIRIER G. - (1972) - Théorie des eaux naturelles - Ed. Eyrolles - Paris.
- . LEGRAND L., POIRIER G. - (1976) - Chimie des eaux naturelles - Ed. Eyrolles - Paris.
- . LEGRAND L., LEROY P. - (1981) - Les équilibres carboniques et l'équilibre calco-carbonique dans les eaux naturelles - T.S.M. l'Eau - 1981 - 76 - n° 8-9 - p. 465-476.
- . LEGRAND L., POIRIER G., LEROY P., BASALO C. - (1981) - Les équilibres carboniques et l'équilibre calco-carbonique dans les eaux naturelles - Etude graphique - Utilisation des calculatrices - Ed. Eyrolles - Paris.
- . LEGUY Cl. - (1979) - Application des mesures isotopiques des teneurs en tritium à l'étude des circulations et mélanges des eaux souterraines dans différents milieux poreux - Thèse 3ème cycle - Grenoble - juin 1979.
- . LELONG F., PEAUDECERF P., ROUX J.C., ZUNINO C. - (1978) - Détermination des possibilités d'alimentation en eau potable de la ville nouvelle de Vaudreuil - Coll. d'hydrogéol. de la Craie du bassin de Paris - Rouen - mai 1978.
- . LE PEINTRE M., RICHARD J. - (1957) - Détermination précise des sulfates dans les eaux par volumétrie directe - 1957 - Chimie analytique - 37 - p. 305.
- . LE PILLER M., LORENZI L., LELONG F. - (1977) - Evolution de la qualité chimique des eaux de l'Eure au cours d'un cycle hydrologique annuel. Rapport pour l'établissement public d'aménagement de la ville nouvelle de Vaudreuil - sept. 1977.
- . LEYNAUD G., MONITION L., VACHAUD G. - (1977) - Rapport général sur le thème "Causes externes de pollution" - Coll. national S.G.N./B.R.G.M. - Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine - Orléans - mars 1977.
- . LORY C. - (1894) - Description géologique du Dauphiné (Isère - Drôme - Hautes-Alpes) - Grenoble - 1894.
- . LOUP J. - (1967) - Ecoulement de surface et nappes intra-alluviales dans le bassin de la Romanche - Bull. de la section géographique du comité des travaux historiques et scientifiques du Ministère de l'Education Nationale - 1967 - 80.
- . MARCHAND A. - (1947) - Note sur les nombreuses sources et résurgences de la plaine de Bourg-d'Oisans - Rapport interne, ville de Grenoble - 1947.
- . MARCHAND A. - (1950) - Colmatage du lit de la Romanche - Influence d'une dérivation industrielle sur le régime de la nappe souterraine - Rapport interne, ville de Grenoble - 1950.
- . MARCHAND A. - (1965) - Note sur l'hydrologie des torrents et bassins versants de la rive gauche de la Romanche - Note interne S.I.E.R.G. - mai 1965.

- . MARCHAND A. - (1957) - Les nappes d'eau souterraine des vallées du Drac, de la Romanche et de la Gresse, et l'alimentation en eau potable de la ville de Grenoble - Revue de l'ingénieur - 1957 - n° 3-4.
- . MICHEL R., BERTHET P. - (1958) - Formations cristallophyliennes de la Chaîne de Belledonne dans la vallée de la Romanche - C.R.Ac.Sc. Paris - 1958 - 246 - p. 1888-90.
- . MICHEL R., ROTHE J. - (1959) - Sur la nature et l'épaisseur des alluvions quaternaires dans le bassin de Vizille - Trav. lab. géol. 1959 - 35 - p. 7-14.
- . MICHEL R. - (1961) - Aperçu d'ensemble sur la structure géologique du département de l'Isère dans ses rapports avec l'hydrologie souterraine - R.G.A. - 1961 - 69 - p. 129-142.
- . MISEREZ J.J. - (1973) - Géochimie des eaux du karst jurassien - Thèse de Doctorat - Université de Neuchâtel - oct. 1973.
- . MONTEIL A., DUPONT J.J. - (1974) - Dosage des ions chlorures dans les eaux par micro-coulométrie - Tribune du C.E.B.E.D.E.A.U. - janv. 1974 - 27 - n° 362.
- . MORETTE A. - (1964) - Précis d'hydrologie - Ed. Masson - Paris.
- . MULLER G., FOSTNER V. - (1968) - General relationship between suspended sediments concentration and water discharge in Alpeinrhein - Nature 1968 - 217 - p. 244-47.
- . MUNNICH K.O., ROETHER W., THILO L. - (1967) - Isotopes in hydrology - Vienne - 1967.
- . NEVEUX M. - (1968) - La corrosion des conduites d'eau et de gaz - Ed. Eyrolles - Paris.
- . ORGANISATION MONDIALE de la SANTE - O.M.S. - Bureau régional de l'Europe - (1967) - Eau de boisson et santé - Rapport - Londres - sept. 1977.
- . PARDE M. - (1933) - Fleuves et rivières - Ed. L.A. Colin.
- . PECHER A. - (1970) - Etude pétrographique de la partie orientale du massif des Ecrins-Pelvoux. Le socle ancien - Thèse de 3ème cycle - Grenoble 1970.
- . PERRIAUX J. - (1965) - Analyses granulométriques des alluvions de la plaine de Vizille (non publié).
- . PERSON J. - (1979) - Interventions réglementaires du géologue agréé en vue de la protection des eaux destinées à l'alimentation humaine - Document B.R.G.M. - n° 11 - 1979.
- . PILOT G. - (1975) - Isotopes in geology (traduit par R. LETOLLE) - Ed. Doin - Paris - 1975.
- . PRUDHOMME P., ROGNON P., SOUQUET G. - (1967) - Analyse critique de la validité des études de nappe souterraine à l'aide de modèles - La Houille blanche - 1967 - 2 - p. 163-167.
- . ROBBE D. (1975) - Influence des matières en suspension minérales sur la qualité des eaux de surface - Rapport de recherche des Ponts et Chaussées - 1975 - n° 49.
- . RODIER J. - (1971) (1978) - Analyse chimique et physico-chimique de l'eau - Ed. Dunod - Paris.
- . ROCHON J. - (1978) - Principaux mécanismes physico-chimiques causant la disparition de substances miscibles dans les sous-sols - Bull. B.R.G.M. 1978 - (2) III - 4 - p. 303-309.
- . ROUSSELOT D. - (1976) - Conditions de simulation des cours d'eau à pénétration partielle dans les modèles monocouches - Bull. B.R.G.M. - 1976 (2) III - 3-4.

- ROUSSELOT D. - (1977) - Aéroport de Lyon-Satolas - Etude hydrodynamique du couloir fluvio-glaciaire de Meyzieux en vue de la protection de la qualité des ressources en eau - Simulation des transferts - A.I.H.S. (I.A.S.H.) - Pub. n° 123 - Coll. Amsterdam - oct. 1977.
- RUZICKA J., STEWART J.W.B., ZAGATTO A. - (1976) - Stream sample splitting and its application to the continuous spectrophotometric determination of chloride in brackish waters - *Analytica - Chimica - Acta* 81 - 1976 - p. 387-396.
- SALINAS Y. - (1979) - Analyses physico-chimiques de l'eau et comparaison des méthodes utilisées pour doser les faibles teneurs de magnésium dans l'eau - Rapport de stage U.S.M.G. - Grenoble - sept. oct. 1979.
- SARROT-REYNAULD J. - (1961) - Etude géologique de la couverture mésozoïque et de la tectonique du Dôme de la Mure et des régions annexes - Thèse - Grenoble 1961.
- SARROT-REYNAULD J. - (1963) - Trias du Dôme de la Mure et régions annexes - Coll. du trias français - Montpellier - 1961 - Mém. B.R.G.M. - 1963 - n° 15 - p. 249-257.
- SARROT-REYNAULD J. - (1967) - Conditions de captage et protection des eaux potables dans la région grenobloise - *Revue de l'Institut Pasteur de Lyon* - 1967 - 1 - n° 2.
- SARROT-REYNAULD J. - (1971) - Remarques sur l'hydrogéologie des vallées de l'Isère, du Drac et de la Romanche - *Géologie alpine* - 1971 - 47 - p. 233-240.
- SARROT-REYNAULD S. et J. - (1977) - Alimentation des nappes et mélanges des eaux souterraines : origine des eaux souterraines dans la plaine de Bourg-d'Oisans - Actes du 102ème congrès national des sociétés savantes - Limoges 1977 - Sciences - Fasc. II - p. 203-217.
- SAUTY J.P. - (1971) - Présentation d'un modèle mathématique de la propagation d'un front de pollution dans une nappe d'eau souterraine - *La Houille blanche* - 1971 - 8 - p. 731-735.
- SCHOELLER H. - (1948) - Les modifications de la composition chimique de l'eau dans une même nappe - A.I.H.S. - Assemblée d'Oslo - 1948 - p. 124-144.
- SCHOELLER H. - (1962) - Les eaux souterraines - Ed. Masson - Paris.
- SCHOELLER M. - (1963) - Recherches sur l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines - Thèse Sciences - Bordeaux.
- SCHOELLER M. - (1972) - Essai de datation des eaux des nappes captives au moyen des chlorures - C.R.Ac.Sc. - Série D. - 274 - p. 640-64.
- SCHOELLER M. - (1975) - Les modifications de la concentration chimique des eaux souterraines en fonction de la vitesse de l'écoulement de l'eau et des échanges entre la roche et l'eau - Congrès A.I.H. - Montpellier - sept. 1974 - Mémoires du B.R.G.M. - 1975 - X.
- SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL - S.G.N. -
 - (1977) - Rapport présenté par G. CASTANY - IIe réunion sur les problèmes de l'eau en Europe. U.N.E.S.C.O. - O.M.M. - Bruxelles - sept. 1977.
 - (1979) - Rapport général présenté par G. CASTANY - Les ressources en eau souterraine de la France - Coll. les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France - Nice - octobre 1977 - Bull. B.R.G.M. 1979 - (2) - n° 4.
- SERVICE d'ETUDES des GRANDES FORCES HYDRAULIQUES - S.E.G.F.H. - Région des Alpes - (1905-1912) Ann. du Ministère de l'Agriculture - Fas. 32 tome II - Imprimerie Nationale - 1905-1912.
- SITZMANN P. - (1961) - Les variations récentes des glaciers du bassin de la Romanche - R.G.A. 1961 - XLIX - p. 167-177.
- SIWERTZ E. - (1973) - Etude expérimentale par le tritium et l'oxygène 18 de l'infiltration sur les lysimètres et le bassin de Thonon - Thèse de 3ème cycle - Paris VI - Centre de recherches géodynamiques de Thonon.

- SPEARS D.A. - (1975) - Mineralogy and geochemistry of some quaternary deposits of the vale of York - *Proceedings of the Yorkshire Geological society* - 1975 - 40 - 3 - n° 22 - p. 353-372.
- SPEARS D.A., REEVES M.J. - (1975) - The influence of superficial deposits on ground water quality in the vale of York. *Q. Jl. Engng. Geol.* 1975 - 8 - p. 255-69.
- STALENG R. - (1976) - Applications de modèles, hydrologiques à l'interprétation de données fournies par les compagnies nationales d'aménagement régional - C.R. de contrat D.G.R.S.T. - 7301-199 - sept. 1976.
- TERMIER P. - (1874) - Le massif des Grandes Rousses - Bull. Serv. Carte géol. fr. tome IV.
- THIRRIOT C. - (1973) - Un point de vue de dilettante sur l'évaporation des nappes souterraines - IIème congrès international sur les eaux souterraines Palerme - avril-mai 1973.
- THIRRIOT C., PIZARRO R., RIZK W. - (1973) - Comparaison des effets de l'alimentation superficielle continue ou discontinue sur le mouvement de l'eau vers la nappe - IIème coll. international sur les eaux souterraines Palerme - avril-mai 1973.
- THIRRIOT C. - GAUDU R. - (1975) - Le doublet hydro-thermique dans les nappes souterraines - Bull. B.R.G.M. - 1975 - III - n° 1 - p. 19-24.
- TILLMANS J., HEUBLEIN O. - (1912) - Investigation of the carbone dioxide with attacks calcium Carbonate in natural waters - *Gesundheits Ingenieur* - 1912 - 35 - p. 669.
- THORNTON C.W. - (1954) - The measurement of potential evapotranspiration - J.P. Mather Seebrook - New-Jersey - U.S.A.
- TURC L. - (1951) - Bilan d'eau des sols - Relations précipitations - températures - écoulement - C.R.A.S. - Paris - 1951 - 233 - n° 2.
- VACHAUD G. - (1977) - Processus d'évolution de la qualité des eaux souterraines - C.R. Journées "l'eau, la recherche et l'environnement" - Montpellier - oct. 77.
- VERNET J. - (1964) - La région synclinale de Vaujany - Trav. Lab. Géol. Grenoble - 1964 - 40 - p. 263-274.
- VIAL J., GEOFFRAY C., BLANC M. - (1976) - Dénombrements bactériens et qualité des eaux de consommation - T.S.M. l'Eau - 1976 - 71 - n° 11 - p. 477-486.
- VIALON P. - (1968) - Clivages schisteux et déformations. Répartition et genèse dans le bassin mésozoïque de Bourg-d'Oisans - *Géologie alpine* - 1968 - 44 - p. 354-366.
- VIVIAN R. - (1970-71) - Fiches des glaciers français R.G.A. - tomes LVIII, LIX.
- VIVIAN R. - (1971) - Les variations récentes des glaciers des Alpes françaises - 1900-1970 - R.G.A. - 1971 - tome LIX - 2.
- VIVIAN R. - (1975) - Les glaciers des Alpes occidentales - Ed. Allier - Grenoble.
- ZALL D.M., FISCHER D., GARNER M.Q. - (1956) - Photometric determination of chlorides in water - *Analytical Chemistry* - 1956 - 28 - n° 11 - p. 1665-1668.
- ZILLIOX L., MUNTZER P. - (1971) - L'hydrodynamique du milieu poreux et ses applications à l'étude de la pollution des eaux souterraines par les saumures - Bull. B.R.G.M. - 2ème série - 1971 - n° 1.

PAGE

100

105

110

115

120

125

130

135

140

145

150

155

160

165

170

175

180

185

190

195

200

205

210

215

220

225

230

LISTE des FIGURES

LISTE des TABLEAUX

TABLE des MATIERES

PAGE

100

105

110

115

120

125

130

135

140

145

150

155

160

165

170

175

180

185

190

195

200

205

210

215

220

225

230

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURES</u>	<u>PREMIERE PARTIE</u>	<u>PAGES</u>
1	. Situation géographique de la région étudiée.	10
2	. Schéma hydrographique de la Romanche et de ses affluents.	12
3	. Courbes hypsométriques et fréquence altimétrique dans le bassin versant.	13
4	. Régimes et variations saisonnières des débits moyens mensuels des rivières du bassin versant.	17
5	. Cadre géologique du bassin versant.	20
6	. Profil transversal schématique illustrant le mécanisme de remblaiement des vallées alpines.	25
7	. Schéma hydrographique et géologique de la plaine de Bourg-d'Oisans et de ses bordures.	26
8	. Schéma structural de la vallée de la Romanche entre Bourg-d'Oisans et Vizille.	27
9	. Limites de la plaine alluviale entre Séchilienne et Vizille.	31
10	. Coupe géologique synthétique des terrains de la plaine alluviale de Jouchy.	32
11	. Coupe géologique selon un profil en long de la nappe.	33
12	. Schéma d'interprétation de la formation de l'actuelle structure alluvionnaire des plaines alluviales de la vallée de la Romanche.	36
13	. Emplacement des piézomètres cités et des profils structuraux.	40
14	. Schémas des structures alluvionnaires selon les profils transversaux.	42
15	. Schéma des structures alluvionnaires selon le profil en long.	43
16	. Courbes granulométriques des alluvions des sondages.	45
17	. Moyennes des températures mensuelles enregistrées à Jouchy au cours des années 1978 à 1981.	55
18	. Répartition des moyennes des températures en fonction de l'altitude.	56
19	. Variations des températures maxima mensuelles à Bourg-d'Oisans, Jouchy et Saint-Martin-d'Hères.	57
20	. Répartition des zones d'influence des stations pluviométriques selon THIESSEN.	60
21	. Variations des débits moyens mesurés au Champeau de 1974 à 1981.	68
22	. Participation des apports du Vénéon et de l'Eau d'Olle au débit de la Romanche mesuré au Champeau.	69
23	. Plan de situation des affluents et des aménagements de la rivière, de Bourg-d'Oisans à Vizille.	70
24	. Relation entre les débits moyens journaliers mesurés au Champeau et les niveaux moyens journaliers de la Romanche mesurés à Jouchy.	72
25	. Emplacement des sondages et des piézomètres dans la plaine alluviale.	82

26	. Variations des niveaux du toit de la nappe relevés dans les piézomètres	83
27	. Cartes de battements du toit de la nappe lors d'une recharge de printemps et d'une vidange automnale.	94
28	. Carte isopiézométrique lors d'une recharge de printemps et variations du niveau du toit de la nappe pendant la même période.	96
29	. Carte isopiézométrique lors d'une décrue automnale et variations du niveau du toit de la nappe pendant la même période.	97
30	. Carte izopiézométrique du toit de la nappe souterraine, en hautes eaux.	98
31	. Carte isopiézométrique du toit de la nappe souterraine, en basses eaux.	99
32	. Niveau du fil de l'eau de la Romanche et niveau du toit de la nappe.	102
33	. Schémas représentatifs des modes d'infiltration dans le lit et les berges de la rivière.	103

DEUXIEME PARTIE

34	. Variations de la minéralisation des eaux du Vénéon, de l'amont vers l'aval, en basses eaux.	120
35	. Variations de la minéralisation des eaux du Vénéon, de l'amont vers l'aval, en hautes eaux.	121
36	. Schéma hydrographique de l'Eau d'Olle.	123
37	. Variations de la minéralisation des eaux de l'Eau d'Olle et de ses affluents en aval du pont du Rattier.	123
38	. Variations saisonnières de la minéralisation totale des eaux du Flumet et de l'Eau d'Olle.	128
39	. Variations saisonnières de la minéralisation totale des eaux et des débits de l'Eau d'Olle au Pont de la Pernière.	129
40	. Participation des flux du Vénéon et de l'Eau d'Olle à la minéralisation totale des eaux de la Romanche.	131
41	. Variations saisonnières des conductivités des eaux de la Romanche prélevées à Gavet et face à Jouchy.	134
42	. Variations saisonnières du taux des sulfates des eaux de la Romanche à l'Ile Falcon, à Jouchy et du ruisseau du lac Mort.	135
43	. Variations des taux des sulfates et des bicarbonates de la Romanche de Bourg-d'Oisans à Vizille, en basses eaux.	137
44	. Diagramme semi-logarithmique représentatif de la minéralisation des eaux de la Romanche, prélevées à l'amont immédiat de Jouchy.	138
45	. Variations saisonnières des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la Romanche prélevées à l'amont immédiat de Jouchy.	141
46	. Courbe de relation entre le débit et la conductivité des eaux de la Romanche.	142
47	. Courbe granulométrique des sables alluvionnaires déposés par la Romanche.	144
48	. Taux des M.E.S.T. des eaux de la Romanche et débits (calculés) de la rivière.	150

49	. Diagrammes semi-logarithmiques représentatifs des minéralisations des eaux de la cascade de Jouchy et du ruisseau de Laffrey.	152
	. Cartes des isocones (iso-conductivités) et des isoteneurs en sulfates des eaux de la nappe :	
50	en basses eaux.	154
51	au début des hautes eaux.	156
52	à la fin des hautes eaux.	157
53	. Diagrammes représentatifs de la minéralisation des eaux de la Manche et de 3 piézomètres.	159
54	. Variations des résistivités des eaux des piézomètres selon deux profils en hautes et basses eaux.	160
55	. Carte des isorésistivités des eaux de la nappe. Mise en évidence des gradients chimiques dans le sens de l'écoulement des eaux.	161
56	. Variations saisonnières des résistivités des eaux de la nappe et de la Manche.	162
57	. Variations saisonnières des conductivités des eaux de la Manche, du puits 1 et des piézomètres P VII 2 et P IV 1.	163
58	. Emplacement des piézomètres représentatifs des "zones" de la nappe de Jouchy, utilisées pour l'étude hydrochimique.	166
59	. Diagrammes semi-logarithmiques, représentatifs de la minéralisation des eaux des piézomètres P VII 2 et P IV 1.	167
60	. Diagrammes semi-logarithmiques représentatifs de la minéralisation des eaux des piézomètres P I 4 et S 4.	168
61	. Diagrammes semi-logarithmiques représentatifs de la minéralisation des eaux de la Manche et des piézomètres, en hautes et basses eaux.	169
62	. Diagrammes semi-logarithmiques représentatifs de la minéralisation des eaux du puits 1 et de la Manche.	172
63	. Variations saisonnières des caractéristiques physico-chimiques des eaux du puits 1 de Jouchy.	173
64	. Variations saisonnières des conductivités et des températures des eaux du puits 1 de Jouchy.	174
65	. Schémas représentatifs des zones non saturées de la plaine de Jouchy, selon deux profils P1 et P2.	188
66 et 67	. Conductivité des eaux recueillies au cours des deuxième et troisième expériences de percolation sur les sables alluvionnaires.	194
68	. Variations saisonnières des conductivités des eaux de la Manche et de la nappe.	199
69	. Enregistrements des résistivités des eaux de la Manche et du piézomètre P VII 2.	200
70	. Enregistrements des résistivités des eaux du piézomètre P VII 2 et des températures, en basses et moyennes eaux.	201
71 et 72	. Enregistrements des niveaux du toit de la nappe, des résistivités et des températures des eaux, dans la zone d'infiltration préférentielle.	202
73	. Enregistrements des niveaux de la Manche et du toit de la nappe, des résistivités et des températures des eaux dans la zone d'infiltration préférentielle à l'occasion d'un orage d'été.	204

74	. Enregistrements des niveaux et des résistivités des eaux de la Manche et du piézomètre P VII 2, du 31 janvier au 8 février 1979.	206
75	. Enregistrements des variations des résistivités et des températures des eaux le long des rives de la Manche.	209
76	. Inversion des gradients hydrauliques de la nappe, le long des rives de la Manche due au décolmatage des berges, au printemps.	210
77	. Courbes d'équilibre calco-carbonique établies selon la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER.	218
78	. Evolution du facteur λ des eaux de la nappe, au cours de l'année 1977.	223
79	. Points représentatifs des eaux de la Manche et de la nappe sur les graphiques de L. LEGRAND et G. POIRIER, en hautes et basses eaux.	224
80	. Pouvoir agressif ou pouvoir incrustant des eaux de la Manche et de la nappe.	226
	. Etudes des mélanges des eaux par la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER :	
81	Points représentatifs des eaux de la Manche, du puits et de leurs mélanges.	228
82 } 83 } 84 }	Points représentatifs des eaux de la Manche, des Piézomètres P VII 2, S 7, F 12, P IV 4 et S 5.	228- 229
85	. Variations des niveaux du toit de la nappe de Jouchy lors d'une recharge au printemps et d'une crue post-estivale.	231
86	. Taux des sulfates des fractions d'eau recueillies au cours des expériences de percolation.	241
87	. Relation entre le $\delta^{34}\text{S}$ et le taux des sulfates des eaux de la Manche et de la nappe.	241
88	. Schémas d'interprétation des variations de la minéralisation des eaux de la nappe, dans la zone d'infiltration préférentielle, au cours des différentes saisons d'une année hydrologique.	248- 249
89	. Histogrammes des rapports $G/ \text{Me} $ et G/μ des eaux de la Manche et de la nappe.	255
90	. Courbes de relation caractéristique liant le taux des sulfates et la conductivité des eaux.	258
91	. Courbes de relation caractéristique liant le taux des métaux alcalino-terreux et la conductivité des eaux.	261
92	. Représentation graphique des eaux des piézomètres P VII 2 et F 12.	266
93	. Représentation graphique des eaux de la nappe en hautes et basses eaux.	267
94	. Représentation graphique des eaux des piézomètres proches du ruisseau de Laffrey.	268
95	. Cartes de la plaine de Jouchy mettant en évidence les zones de terrains inondés, les battements du toit de la nappe, en février 1978.	269
96	. Cartes de la plaine de Jouchy montrant l'évolution du taux des sulfates des eaux lors de l'infiltration des eaux du ruisseau de Laffrey.	270
97	. Variations des taux des sulfates des eaux du ruisseau de Laffrey, du puits et des piézomètres voisins.	271

98	. Points représentatifs des eaux du piézomètre S 6, proche de la cascade de Jouchy.	273
99	. Points représentatifs des eaux de la Romanche du puits 1, de la cascade et des piézomètres voisins.	274

ANNEXES

100 }	. Méthode de dosage colorimétrique des chlorures par le thiocyanate mercurique. Etude des interférences et de l'influence du pH ou de la nature de l'acide.
101 }	
102	. Schéma synoptique des appareils enregistreurs de températures et de résistivités des eaux.
103	. Moyennes mensuelles des températures relevées à 9 H dans la Romanche, le puits, les piézomètres, à Jouchy.
104	. Gradients des températures relevées dans les eaux de la nappe.
105	. Isothermes des eaux de la nappe en basses et hautes eaux.
106	. Enregistrements des températures de l'air et des eaux en juillet 1978.
107	. Variations des températures des eaux de la nappe en fonction de la profondeur du magasin aquifère.

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAUX</u>	<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	<u>PAGES</u>
1	. Origine des eaux d'alimentation distribuées en Europe.	4
2	. Schéma de l'étude continue d'une nappe souterraine en exploitation.	7
	<u>PREMIERE PARTIE</u>	
3	. Répartition des altitudes dans le bassin versant de la Romanche.	14
4	. Répartition des surfaces englacées et dénombrement des glaciers dans le bassin versant de la Romanche.	15
5	. Résultats des analyses granulométriques effectuées sur les sondages des plaines alluviales de Jouchy et du Péage-de-Vizille.	44
6	. Equivalence des paramètres physiques de la nappe.	46
7	. Equivalence des paramètres physiques pour les sondages S 6 et S 26.	47
8	. Résultats des essais de pompages effectués - Calcul des coefficients de perméabilité et des coefficients d'emmagasinement.	49
9	. Résultats des calculs du coefficient d'emmagasinement par la méthode d'ARCHIE.	51
10	. Températures enregistrées à la station climatologique de Jouchy, au cours des années 1978 à 1981.	55
11	. Hauteurs mensuelles des précipitations enregistrées à Saint-Martin-d'Hères, à Jouchy, et Bourg-d'Oisans au cours des années 1978 à 1981.	58
12	. Hauteurs des précipitations de quelques stations du bassin de la Romanche.	61
13	. Evapotranspiration et précipitations efficaces annuelles.	62
14	. Comparaison des débits moyens des apports directs des pluies sur la plaine alluviale et des débits pompés à Jouchy.	63
15	. Précipitation efficace mensuelle calculée par la méthode de THORNTHWAITE.	64
16	. Hauteur de la frange capillaire d'une nappe d'après les expériences de A. HAZEN et TSCHEBOTARIOFF.	65
17	. Débits moyens annuels de la Romanche du Lac Chambon à Vizille.	67
18	. Evaluation des débits moyens annuels de la Romanche et des apports du bassin versant entre le Champeau et Jouchy.	75
19	. Evaluation des débits moyens mensuels de la Romanche à l'amont de la plaine de Jouchy.	76
20	. Hauteur annuelle des précipitations tombées sur les versants de la plaine alluviale en 1978-1979 et 1980.	79

21	. Evaluation du débit moyen annuel des apports des versants à la plaine alluviale en 1978-1979-1980.	79
22	. Principales caractéristiques des piézomètres de la rive gauche et de la rive droite.	80
23	. Tableau récapitulatif des calculs des bilans hydrogéologiques.	92
24	. Relevés du niveau du toit de la nappe dans le piézomètre P IV 1.	101

DEUXIEME PARTIE

25	. Classification des eaux naturelles en fonction de leur minéralisation totale.	110
26	. Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux superficielles du bassin de la haute Romanche.	116
27	. Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux du Vénéon, du Plan du Lac à Bourg-d'Oisans.	117
28	. Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux des affluents du Vénéon.	118
29	. Conductivités des eaux du Vénéon, de l'amont vers l'aval, en basses et hautes eaux.	119
30	. Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux de l'Eau d'Olle.	124
31	. Résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux des affluents de l'Eau d'Olle.	125
a et b		126
32	. Conductivité des eaux de la Romanche prélevées à l'amont et à l'aval de sa confluence avec l'Eau d'Olle.	130
33	. Caractéristiques physico-chimiques des eaux des ruisseaux affluents de la Romanche à l'aval de la confluence de l'Eau d'Olle.	132
34	. Conductivité des eaux de la Romanche et des eaux du Lac Mort.	133
35	. Répartition des apports des eaux de la Romanche et des apports du ruisseau du Lac Mort dans le mélange qu'ils constituent face à Jouchy.	135
36	. Conductivité des eaux de la Romanche, de Bourg-d'Oisans à Vizille.	136
37	. Moyenne mensuelle des principales caractéristiques physico-chimiques des eaux de la Romanche, prélevées à l'amont immédiat de la plaine de Jouchy.	140
38	. Analyse granulométrique des sables alluvionnaires recueillis sur les rives de la Romanche.	144
39	. Analyse semi-quantitative, par diffraction aux rayons X des sables alluvionnaires recueillis sur les rives de la Romanche.	145
40	. Pourcentage des matières en suspension organiques dans les matières en suspension totales des eaux de la Romanche.	146
41	. Taux des matières en suspension totales des eaux de la Romanche.	148
42	. Densités des M.E.S.T. des eaux prélevées face à Jouchy.	149

43	. Rapport poids/volume des sables alluvionnaires recueillis face à Jouchy.	149
44	. Exemples d'analyses des eaux de la Romanche, des piézomètres P VII 2 et P IV 1, du puits 1 de Jouchy, prélevées en basses, moyennes ou hautes eaux.	158
45	. Classification des eaux, d'après R. GIRARD.	175
46	. Comparaison des principales caractéristiques chimiques des eaux du puits 1 de Jouchy, de 1965 à 1978.	178
47	. Moyenne mensuelle des principales caractéristiques physico-chimiques des eaux du puits 1.	177
48	. Comparaison du taux du tritium dans les eaux de précipitations à Thonon et dans les eaux de la Romanche, au cours des années 1970 à 1971.	180
49	. Résultats des analyses de tritium des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy.	181
49 b	. Evolution des taux du tritium des eaux de la Romanche et du puits 1 en 1978.	182
50	. Résultats des analyses des eaux recueillies au cours des essais de percolation sur les sables alluvionnaires.	191
51	. Calcul des conductivités théoriques des eaux recueillies au cours des essais de percolation sur les sables alluvionnaires.	192
52	. Conductivités des eaux initiales et des eaux recueillies au cours de la deuxième expérience de percolation sur les sables alluvionnaires.	195
53	. Conductivités des eaux recueillies au cours de la troisième expérience de percolation sur les sables alluvionnaires.	196
54	. Pluviométrie à Jouchy et débits de la Romanche au Champeau et face à Jouchy du 21.01.79 au 10.02.79.	208
55	. Comparaison des caractéristiques des eaux de la Romanche du puits 1 et de leurs mélanges effectués au laboratoire.	227
56 et	. Essais d'épuisement des sulfates des sables alluvionnaires :	
57	56 - par agitation avec de l'eau distillée.	
	57 - par percolation sur colonne de sables.	234
58	. Bilan hydrochimique des sulfates mis en solution lors des essais de percolation sur les sables alluvionnaires.	237
59	. Résultats des analyses isotopiques du soufre (³⁴ S) des eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy.	239
60	. Bilan chimique des sulfates des eaux de la nappe de Jouchy.	244
61	. Bilan hydrochimique annuel de la nappe de Jouchy.	247
62	. Variations de la minéralisation des eaux dans la zone amont de la plaine et dans celle proche du puits, au cours d'une année hydrologique.	250
63	. Variations du coefficient K, liant le taux des métaux alcalino-terreux et la force ionique en fonction de la conductivité.	262
64	. Comparaison des caractéristiques des eaux du secteur de Jouchy avec celles des eaux de la cascade, en hautes et moyennes eaux.	272

I-3-3 - Variations saisonnières de la minéralisation totale et des caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'Eau d'Olle 127

I-4 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DE LA ROMANCHE DANS LE BASSIN INTERMEDIAIRE ENTRE BOURG-D'OISANS ET VIZILLE 130

I-4-1 - A l'amont de la prise d'eau de Gavet 130

I-4-2 - A l'aval de la prise d'eau de Gavet 133

I-5 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DE LA ROMANCHE À L'AMONT IMMEDIAT DE JOUCHY 139

I-5-1 - Caractéristiques physico-chimiques et variations saisonnières 139

I-5-2 - Débit solide de la rivière - Matières en suspension 142

I-5-2-1 - ORIGINE, DIMENSION et NATURE des MATIERES en SUSPENSION 143

I-5-2-2 - TAUX des MATIERES en SUSPENSION 147

I-6 - CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DES APPORTS DU VERSANT OUEST DE LA PLAINE DE JOUCHY 153

Cascade de Jouchy

Ruisseau de Laffrey

II - EXAMEN DES RESULTATS D'ANALYSES DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DE JOUCHY 155

II-1 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE LA NAPPE - VARIATIONS SAISONNIERES ET EVOLUTION AU COURS DU CHEMINEMENT SOUTERRAIN 155

II-2 - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DU PUIS 1 DE JOUCHY - QUALITE HYGIENIQUE - AGRESSIVITE ET POUVOIR CORROSIF - STABILITE, VARIATIONS SAISONNIERES ET VULNERABILITE 171

II-3 - DATATION DES EAUX DE LA NAPPE À L'AIDE D'UN ISOTOPE NATUREL, LE TRITIUM 180

II-3-1 - Le tritium dans les eaux naturelles 180

II-3-2 - Examen des résultats d'analyses du tritium effectuées sur les eaux souterraines de Jouchy 181

III - ETUDE DES PROCESSUS HYDROCHIMIQUES MIS EN JEU 185

III-1 - ETUDE GENERALE DES PHENOMENES D'ACCENTUATION DE LA MINERALISATION DES EAUX DE LA NAPPE 187

III-1-1 - Première hypothèse : concentration des eaux par évaporation 187

III-1-2 - Deuxième hypothèse : acquisition de la minéralisation des eaux au contact des sables alluvionnaires - Etude générale du phénomène au laboratoire - Essais de percolation 189

III-1-3 - Troisième hypothèse : mélange des eaux infiltrées avec des eaux souterraines plus minéralisées 197

III-1-4 - Quatrième hypothèse : l'acquisition de la minéralisation se fait notamment dans la zone non saturée de la nappe : mise en évidence in situ par des enregistrements continus de la résistivité des eaux 199

III-1-4-1 - Dans la ZONE d'INFILTRATION PREFERENTIELLE à l'AMONT de la PLAINE (Piézomètre P VII 2) 200

III-1-4-2 - Le LONG des RIVES de la ROMANCHE (Piézomètre P IV 1) 208

III-2 - L'EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE 212

III-2-1 - La méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER 216

III-2-2 - Le programme TIESANAL 220

III-2-3 - Application de la méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER et du programme TIESANAL aux eaux de la Romanche et de la nappe de Jouchy 222

III-2-3-1 - Les ELEMENTS CARACTERISTIQUES : ETUDE du FACTEUR λ et de la POSITION du POINT S 222

III-2-3-2 - SITUATION des POINTS REPRESENTATIFS des EAUX ETUDIEES sur les GRAPHIQUES de L. LEGRAND et G. POIRIER 223

III-2-3-3 - POUVOIR AGRESSIF ou POUVOIR INCrustANT des EAUX de la ROMANCHE et de la NAPPE 225

III-2-3-4 - EVOLUTION de l'EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE des EAUX 225

III-2-3-5 - MELANGE des EAUX dans la NAPPE SOUTERRAINE 227

III-3 - MISE EN SOLUTION DES SULFATES 232

III-3-1 - Acquisition des sulfates au contact des sables alluvionnaires 235

III-3-1-1 - QUANTITE de SULFATES SOLUBLES CONTENUE dans les SABLES 235

III-3-1-2 - QUELQUES OBSERVATIONS sur les CONDI- TIONS PHYSICO-CHIMIQUES de la MISE en SOLUTION des SULFATES	237
III-3-2 - Origine géologique des sulfates des eaux de la Romanche et de la nappe	238
III-3-3 - Discussion des résultats	244
III-4 - ESSAI D'INTERPRETATION SYNTHETIQUE	246
IV - MESURES ET APPLICATIONS	251
IV-1 - CONDUCTIBILITE DES ELECTROLYTES ; RECHERCHE D'UNE RELA- TION ENTRE LA CONDUCTIVITE ET LES AUTRES CARACTERISTI- QUES DES EAUX DE LA NAPPE DE JOUCHY	251
IV-1-1 - Expression de la teneur en sulfates et des valeurs des caractéristiques des eaux étudiées	252
IV-1-2 - Relation expérimentale entre la conduc- tivité d'une eau et sa force ionique	254
IV-1-3 - Relation expérimentale entre la conduc- tivité d'une eau et sa teneur en métaux alcalino-terreux	255
IV-1-4 - Relation expérimentale entre la conduc- tivité d'une eau et sa teneur en sulfates	257
IV-2 - APPLICATIONS	264
IV-2-1 - Mise en évidence de l'infiltration des eaux du ruisseau de Laffrey dans la nappe souter- raine à la suite de la crue du printemps 1978	264
IV-2-2 - Mise en évidence des infiltrations des eaux de la cascade de Jouchy dans les couches profondes de la nappe	272
CONCLUSIONS ET PROLONGEMENTS	277
ANNEXES	285
I - METHODES D'ANALYSES EMPLOYEES AU LABORATOIRE DU S.I.E.R.G.	287
II - "LISTINGS" DU PROGRAMME TIESANAL	297
III - QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DU PUIITS DE JOUCHY	302
IV - REALISATION DES APPAREILS ENREGISTREURS DE RESISTIVITE ET DE TEMPERATURE DES EAUX	304
V - RELEVES ET ENREGISTREMENTS DES TEMPERATURES DES EAUX DE LA ROMANCHE ET DE LA NAPPE DE JOUCHY	307
BIBLIOGRAPHIE	313

27 SEP. 1982

RESUME

MOTS CLES - ALPES FRANCAISES - VALLEE DE LA ROMANCHE - NAPPE SOUTERRAINE ALLUVIALE - BILANS HYDROGEOLOGIQUES - RELATIONS NAPPE-RIVIERE - HYDROCHIMIE EQUILIBRE CALCO-CARBONIQUE - ENREGISTREMENTS RESISTIVITE - PROTECTION QUALITE EAU.-

Après avoir décrit le cadre géographique et géologique de l'étude, j'ai tout d'abord regroupé les informations utiles à la connaissance de l'unité hydrogéologique que constitue le bassin versant de la Romanche, situé à l'amont de la plaine de Jouchy. J'ai accordé une attention particulière à l'étude du remplissage alluvial quaternaire de la vallée, notamment à l'étude de celui de la plaine de Jouchy, à Saint-Pierre-de-Mésage. Celle-ci, comprise entre deux versants rocheux, est constituée d'une couche d'alluvions gravo-sableuses de 80 à 100 m d'épaisseur, qui repose sur le socle cristallin et dans laquelle circule une puissante nappe souterraine, actuellement exploitée pour l'alimentation en eau potable de la région grenobloise.

Les résultats des essais de pompages effectués m'ont permis de calculer les caractéristiques de la couche supérieure des alluvions, la plus perméable, située à moins de trente mètres de profondeur et dans laquelle s'effectue la majeure partie des échanges (infiltrations, pompages, etc.). Son coefficient de perméabilité est proche de 10^{-2} m/s et la porosité efficace s'élève à 15 %. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par d'autres méthodes classiques en hydrogéologie.

La piézométrie de la nappe, établie à partir des nombreux relevés journaliers ou hebdomadaires, effectués au cours des années d'exploitation, m'a permis de rassembler de nombreuses informations sur les mouvements hydrodynamiques de la nappe.

Ainsi, les bilans hydrogéologiques calculés, mettent en évidence que les infiltrations, dont le débit varie de 800 à 1 600 l/s suivant les saisons, proviennent essentiellement de la Romanche, les apports directs des précipitations et des eaux de ruissellement sur les versants représentant moins de 10 % des infiltrations totales. La zone d'infiltration préférentielle des eaux en provenance de la Romanche, se situe à l'amont de la plaine ; en hautes eaux, les crues de la rivière sont favorables au décolmatage du lit et des berges ; d'autres zones d'infiltration sont alors créées et participent à la recharge de la nappe. Les hautes eaux de la Romanche, au printemps et en été, sont donc tout à fait favorables à la recharge naturelle de la nappe à une saison où elle est le plus sollicitée par les pompages.

C'est au régime nivo-glaciaire de la rivière et grâce aux apports successifs de ses principaux affluents, l'Eau d'Olle et le Vénéon, que ses hautes eaux s'étalent du mois d'avril au mois de septembre. Mais les aménagements hydro-électriques de la vallée réduisent considérablement les débits transitant au droit de la plaine de Jouchy. La mesure des débits, particulièrement intéressante pour la gestion de la nappe souterraine alluviale est rendue difficile par le caractère sinueux de la rivière dans cette portion de son cours. Les débits moyens journaliers ou mensuels sont donc estimés par le calcul. Deux méthodes sont utilisées.

Près de 2 000 eaux, superficielles et souterraines, ont été prélevées dans le bassin versant de la Romanche. Les analyses effectuées permettent d'étudier les caractéristiques physico-chimiques et les variations de la minéralisation totale des eaux, dans le but de préciser leur évolution dans l'espace et dans le temps.

Les eaux souterraines de la nappe de Jouchy constituent un ensemble homogène du point de vue hydrochimique. Ce sont des eaux essentiellement bicarbonatées, sulfatées, calciques et magnésiennes. Bien que leurs caractéristiques essentielles soient comparables à celles de la Romanche, transitant à l'amont de la plaine, les eaux souterraines sont toutes, à un moment donné, plus minéralisées que les eaux de la rivière ; leur minéralisation totale, moyenne ou faible, s'accroît dans le sens de l'écoulement de la nappe et leurs variations saisonnières se manifestent avec d'autant plus de retard et d'atténuation que le point considéré est plus éloigné des zones d'infiltration.

L'interprétation des résultats des analyses physico-chimiques (effectuées depuis 1975) et isotopiques (H, S), s'appuie sur :

- 1) la mise en oeuvre d'expériences faites :
 - . au laboratoire (essais de percolation sur les sables alluvionnaires),
 - . sur le terrain (enregistrements continus des températures et des résistivités des eaux),
- 2) l'application d'une méthode de calcul des équilibres calco-carboniques (méthode de L. LEGRAND et G. POIRIER) et de sa représentation graphique. La mise en oeuvre de cette méthode a nécessité l'établissement du programme TIESANAL qui a permis de traiter plus de 200 analyses d'eaux.

L'étude des processus hydrochimiques mis en jeu a permis d'attribuer définitivement l'augmentation de la minéralisation totale des eaux au cours du cheminement souterrain :

- 1) au mélange des eaux des apports souterrains avec celles infiltrées en provenance de la Romanche ;
- 2) à l'acquisition des sels minéraux, (notamment du sulfate de calcium) au contact des sables alluvionnaires dans les zones non saturées de la nappe. Elle a permis de mettre en évidence que les variations hydrochimiques sont liées aux mouvements hydrodynamiques de la nappe et par conséquent que les problèmes quantitatifs et qualitatifs qui peuvent se poser, sont intimement liés ; ils doivent donc être traités conjointement, pour le maintien des ressources et la conservation de la qualité des eaux.

Les relations entre la conductivité, enregistrée ou facilement mesurable sur le terrain, et les autres caractéristiques physico-chimiques des eaux, établies à partir des résultats des analyses, permettent de mettre en évidence tout changement quantitatif ou qualitatif intervenant sur la nappe, dans les conditions d'alimentation, d'écoulement et d'exploitation actuelles.

Deux exemples d'application de ces relations sont donnés.

UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.43

27 SEP. 1982