



**HAL**  
open science

# Comportement des traceurs fluorescents et phénomènes de dispersion : application à l'étude d'aquifères fissurés

Laure Sommeria

► **To cite this version:**

Laure Sommeria. Comportement des traceurs fluorescents et phénomènes de dispersion : application à l'étude d'aquifères fissurés. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1986. Français. NNT: . tel-00785509

**HAL Id: tel-00785509**

**<https://theses.hal.science/tel-00785509>**

Submitted on 6 Feb 2013

**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.



SOMMERIA (L.)

EX. n° 1

THÈSE DE DOCTORAT  
DE  
L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE  
DE GRENOBLE

ANNEE : 1986

N° D'ORDRE :

11 JUIN 1986

SPECIALITE : GÉOLOGIE APPLIQUÉE  
OPTION : HYDROGÉOLOGIE

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

par

Laure SOMMERIA

COMPORTEMENT DES TRACEURS FLUORESCENTS  
ET PHENOMENES DE DISPERSION.  
APPLICATION A L'ETUDE D'AQUIFERES FISSURES

Thèse soutenue le 30 AVRIL 1986  
devant la Commission d'examen

27 AOÛT 2003

M. J. SARROT-REYNAULD - Professeur U.S.M.G.	Président
M. J. ROCHAT - Professeur U.S.M.G.	Rapporteur
M. J-C. FOURNEAUX - Maître de Conférence U.S.M.G.	Directeur de thèse
M. Ph. OLIVE - Maître de Conférence PARIS VI	Rapporteur
M. J-L. BARBIER - Ingénieur Géologue - S.C.P.	Invité
M. B. COUTURIER - Ingénieur Géologue - C.N.A.R.B.R.L.	Invité

THÈSE DE DOCTORAT  
DE  
L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE  
DE GRENOBLE

ANNEE : 1986

N° D'ORDRE :

SPECIALITE : GÉOLOGIE APPLIQUÉE  
OPTION : HYDROGÉOLOGIE.

11 JUIN 1986

par  
Laure SOMMERIA

UNIVERSITE DE GRENOBLE 7  
INSTITUT DE GEOLOGIE  
**DOCUMENTATION**  
RUE MAURICE GIGNOUX  
E 38031 GRENOBLE CEDEX  
TEL. (76) 87.46.43

COMPORTEMENT DES TRACEURS FLUORESCENTS  
ET PHENOMENES DE DISPERSION.  
APPLICATION A L'ETUDE D'AQUIFERES FISSURES

Thèse soutenue le 30 AVRIL 1986  
devant la Commission d'examen

110 10075577

M. J. SARROT-REYNAULD - Professeur U.S.M.G.  
M. J. ROCHAT - Professeur U.S.M.G.  
M. J-C. FOURNEAUX - Maître de Conférence U.S.M.G.  
M. Ph. OLIVE - Maître de Conférence PARIS VI  
M. J-L. BARBIER - Ingénieur Géologue - S.C.P.  
M. B. COUTURIER - Ingénieur Géologue - C.N.A.R.B.R.L.

Président  
Rapporteur  
Directeur de thèse  
Rapporteur  
Invité  
Invité

1-2-3

UNIVERSITY OF MICHIGAN  
SERIALS ACQUISITION  
DOCUMENTATION  
SERIALS ACQUISITION  
SERIALS ACQUISITION  
SERIALS ACQUISITION

A toi,

A mes parents,

A mes frères.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidée à le réaliser :

- Monsieur Sarrot-Reynauld qui, après m'avoir subie en D.E.A., a bien voulu m'accueillir au sein de son équipe de recherche pour y préparer cette thèse. Il n'a jamais manqué de me prodiguer ses conseils et je suis heureuse qu'il préside ce jury.

- Monsieur Olive qui a accepté d'être mon rapporteur extérieur et qui s'est déplacé de Thonon.

- Je remercie tout particulièrement Monsieur Rochat qui m'a toujours accueillie dans son laboratoire à bras ouverts depuis plusieurs années et m'a fait partager son enthousiasme et son intérêt pour les traceurs fluorescents et leurs applications. Qu'il trouve ici, ainsi que Mademoiselle Alary et toute l'équipe de chimie analytique et d'hydrologie de la Faculté de Pharmacie, l'assurance de ma plus profonde reconnaissance.

- J'ai plaisir à inviter Messieurs Barbier et Couturier qui se sont intéressés et ont participé à mon travail.

- Je ne saurai jamais assez remercier Monsieur Fourneaux pour ses encouragements, son aide scientifique, son soutien moral tout au long de ces dernières années, et sans qui cette thèse n'aurait pu aboutir.

- Ma reconnaissance s'adresse aussi à mes camarades de l'Institut Dolomieu, actuels ou anciens, en particulier à Pierre Lamy pour son aide sur le terrain, ainsi qu'à Jérôme Biju-Duval.

- Je remercie Madame Rey pour la promptitude et l'adresse avec lesquelles elle a assuré la frappe de ce mémoire.

- Enfin, que mon frère Joël trouve ici le fruit de ses heures de patience à m'expliquer les équations depuis ma plus tendre enfance et que mes parents y voient le résultat de leur tendresse et de leur appui depuis toujours.

---

COMPORTEMENT DES TRACEURS  
FLUORESCENTS ET PHENOMENES DE  
DISPERSION. APPLICATION A L'ETUDE  
D'AQUIFERES FISSURES

---

PREMIÈRE PARTIE : COMPORTEMENT DES TRACEURS  
FLUORESCENTS

INTRODUCTION .....	1
<u>CHAPITRE I : ETUDE DU COMPORTEMENT DE CINQ TRACEURS FLUORESCENTS VIS A VIS DES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DU SOL</u> .....	5
Introduction .....	6
I - <u>Description des expériences et de l'appareillage</u> ...	7
I.1. Les produits	7
I.2. L'appareillage	10
I.3. Mode opératoire	12
II - <u>Les résultats</u> .....	13
II.1. Aspect quantitatif : taux de restitution	13
II.1.1. Colonne de $\text{CaCO}_3$ pur	13
II.1.2. Colonne de $\text{CaCO}_3 + 10\% \text{ SiO}_2$	14
II.1.3. Colonne de $\text{CaCO}_3 + 3\% \text{ argile verte}$	15
II.1.4. Colonne de $\text{CaCO}_3 + 5\% \text{ acide humique}$	15
II.2. Aspect qualitatif : allure des courbes et temps de passage des traceurs fluorescents par rapport au lithium	17
II.2.1. Colonne de $\text{CaCO}_3$ pur	17
II.2.2. Colonne de $\text{CaCO}_3 + 10\% \text{ SiO}_2$	20
II.2.3. Colonne de $\text{CaCO}_3 + 3\% \text{ argile verte}$	22
II.2.4. Colonne de $\text{CaCO}_3 + 5\% \text{ acide humique}$	24
III- <u>Discussion</u> .....	26
IV- <u>Conclusion</u> .....	32

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

27 AOUT 2003

	<u>Pages</u>
<u>CHAPITRE II : TESTS DE PLUSIEURS TRACEURS "IN SITU" SUR DES PORTIONS D'AQUIFERES DE DIMENSIONS RESTREINTES</u> .....	33
Introduction .....	34
I - <u>Les travaux antérieurs</u> .....	34
I.1. Travaux de B. GAILLARD	34
I.2. Travaux de P. CALMELS	35
I.3. Travaux de J. ROCHAT et J-C. FOURNEAUX : le Suran	36
a) <i>Le site</i>	37
b) <i>Les traceurs étudiés</i>	37
c) <i>Opérations sur le terrain</i>	37
d) <i>Résultats</i>	39
e) <i>Discussion</i>	39
II- <u>Les travaux personnels</u> .....	42
II.1. Description du site	42
II.2. Les expériences	43
II.3. Les résultats	45
II.4. Discussion	46
II.4.1. <i>La restitution dans le ruisseau</i>	46
II.4.2. <i>La restitution à la source</i>	46
II.4.3. <i>La restitution globale source + ruisseau</i>	49
III- <u>Conclusions</u> .....	51

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE QUANTITATIVE DES AQUIFÈRES FISSURÉS PAR LA MÉTHODE DES TRAÇAGES

<u>CHAPITRE III : METHODOLOGIE ET EXEMPLES DE TRACAGE EN MILIEU CALCAIRE FISSURE ET EN MILIEU COMPOSITE</u> .....	53
Introduction .....	55
I - <u>Méthodologie</u> .....	55
A) L'Injection : rôle de la surcharge	58
B) Transfert du traceur au sein du milieu fissuré	63
1) <i>Transit dans la zone non saturée</i>	63
2) <i>Transit dans la zone saturée</i>	63
C) Les prélèvements et l'analyse des échantillons	66
D) Analyse du signal de sortie	67
1°) <i>Les concentrations</i>	67
2°) <i>Les taux de restitution</i>	68
3°) <i>Les vitesses</i>	69

	<u>Pages</u>
II - <u>Exemples de multitraçage en milieu calcaire fissuré</u>	71
A) Traçage de l'Ile Crémieu (Isère)	71
B) Traçage de Niort (Deux-Sèvres)	83
C) Traçage de La Roquebrussanne (Var)	97
III - <u>Etude d'aquifères complexes par la méthode des traçages</u>	107
A) Traçage sur le site du Clou (Hte Tarentaise-Isère)	107
B) Traçage des eaux de la doline de la Norma (Savoie)	127
C) <i>Commentaire</i>	136
IV - <u>Conclusion</u> .....	137
<u>CHAPITRE IV : LES PHENOMENES DE DISPERSION</u> .....	138
I - <u>Rappels théoriques sur la dispersion</u> .....	139
II - <u>Proposition d'une détermination de <math>\alpha_L</math> simplifiée</u> ...	142
III - <u>Détermination du nombre de Péclet et de <math>\alpha_L</math> par la méthode graphique de J-P. Sauty (1978)</u> ..	144
IV - <u>Application aux expériences sur colonnes et sur les sites du Suran et de St-Michel des Portes</u> .....	146
1°) <i>Expériences sur colonnes en laboratoire</i>	146
2°) <i>Expériences sur les sites : Suran et St Michel des Portes</i>	147
V - <u>La dispersion en milieu fissuré</u> .....	152
1°) <i>Dispersion transversale (ou latérale)</i>	152
2°) <i>Dispersion longitudinale</i>	154
VI - <u>La dispersion dans les aquifères complexes</u> .....	160
VII - <u>Conclusion</u> .....	163
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u> .....	165

PREMIERE PARTIE

COMPORTEMENT DES TRACEURS FLUORESCENTS

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

Depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle jusque vers les années 50, les traceurs fluorescents ont été utilisés essentiellement par les spéléologues qui essayaient de déterminer des relations entre pertes et résurgences en milieu karstique. Le traceur utilisé était presque toujours la fluorescéine dont le "pouvoir colorant" bien connu permettait une détection qui, le plus souvent, n'était que visuelle.

Depuis, l'industrie chimique a fourni de nouveaux produits susceptibles d'être utilisés comme traceurs en hydrologie de surface pour les mesures de débits par dilution, en hydrogéologie pour déterminer les caractéristiques d'un aquifère ou en génie civil pour mettre en évidence par exemple des zones de fuites dans des barrages ou des canaux. De plus en plus, il est nécessaire de disposer de substances traçantes ayant de bonnes performances, détectables avec une grande sensibilité et une bonne précision.

R. Charrière (1974) développe dans sa thèse le perfectionnement des techniques de mesures des traceurs fluorescents ces dernières années et leurs applications en hydrogéologie.

Le problème est de disposer d'un traceur qui, au cours de son transit, reflète fidèlement le comportement de la phase liquide, l'eau, qu'il représente. Le traceur idéal est celui qui serait capable de marquer les molécules d'eau elles-mêmes. Cette possibilité est offerte par les variétés isotopiques de la molécule d'eau marquées par des isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène. On montre en fait que seul le tritium est susceptible d'être utilisé comme traceur artificiel (J. Molinari in R. Charrière, 1974). Mais son emploi est coûteux et proscrit car sa longue période (12, 26 ans) signifie qu'il persistera dans les systèmes à grand pouvoir de rétention, ce qui peut entraver le succès d'études sur les fluctuations naturelles du tritium de l'environnement.

La recherche de nouveaux traceurs ne peut déboucher que sur des compromis entre différentes contraintes où interviennent à la fois, le faible pouvoir d'adsorption du traceur, son coût, sa sensibilité de détection, sa toxicité, sa stabilité, etc ...

Les traceurs artificiels les plus utilisés sont :

- .. Les différents sels dosés par voie chimique, activables ou radioactifs,
- .. et les traceurs fluorescents.

B. Gaillard (1976) développe dans sa thèse l'utilisation de ces marqueurs pour l'évaluation de la propagation des pollutions dans les aquifères poreux et leurs différentes performances.

Les traceurs fluorescents se distinguent par leur faible coût (étant donné leur emploi par petites quantités), leur sensibilité de détection considérable, leur non toxicité et leur facilité de mesure. De plus, des moyens d'analyse performants comme la spectrofluorimétrie permettent d'utiliser conjointement plusieurs traceurs fluorescents sur un même site durant une même campagne.

Dans la plupart des cas, le traçage reste malgré tout une opération essentiellement qualitative. Le but du travail présenté ici est de montrer que, dans certaines conditions, il est possible d'obtenir à partir d'une opération de traçage bien menée des informations plus poussées et plus nombreuses et même d'approcher d'une manière semi-quantitative les caractéristiques de l'aquifère.

Un aquifère concerné par une opération de traçage peut être représenté par un modèle de type "boîte noire". Le signal d'entrée étant l'injection du traceur, on ne dispose que du signal de sortie pour percer le secret de cette "boîte noire". Le signal de sortie correspond aux courbes de restitution du traceur. C'est de l'analyse de ces courbes que dépend la connaissance des interactions du traceur avec le milieu et des caractéristiques de l'aquifère.

C'est ici que l'appareillage intervient. Il est nécessaire de déterminer avec précision les concentrations de traceurs restitués même si celles-ci sont très faibles (inférieures à  $10^{-10}$  kg/l). Il est indispensable de disposer d'un spectrofluorimètre performant si l'on veut obtenir des informations semi-quantitatives sur les modes d'écoulements souterrains. L'utilisation de fluocapteurs est à éviter car ils n'apportent que des données très vagues sur les taux de restitution, les concentrations, les vitesses, et ne fournissent que des éléments qualitatifs.

Afin de comprendre le comportement du traceur dans l'aquifère et de passer à un stade semi-quantitatif, il faut déjà essayer de déterminer de quelle manière le milieu, au sein duquel il migre, peut influencer sa restitution.

Les traceurs fluorescents présentent tous un caractère anionique ou cationique, ils sont de ce fait sensibles aux phénomènes d'adsorption et de désorption. Il nous a donc paru intéressant de connaître le comportement des traceurs fluorescents les plus courants vis-à-vis des principaux constituants du sol, dans un milieu homogène et isotrope tout d'abord, tel qu'une colonne de filtration. Ceci est l'objet du premier chapitre de ce mémoire. Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Hydrologie de la Faculté de Pharmacie de Grenoble. Le comportement de cinq traceurs fluorescents a été étudié sur des colonnes contenant du carbonate de calcium comme base, auquel était ajouté tour à tour un certain pourcentage de silice, d'argile et d'acide humique.

Dans un deuxième chapitre, nous avons appliqué cette étude du comportement des traceurs à des expériences sur des aquifères de dimensions restreintes (avec des parcours inférieurs à 500 m), où les conditions hydrodynamiques étaient bien connues.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et à la synthèse d'exemples de traçage en milieu calcaire fissuré tout d'abord puis en milieu composite. Il y est exposé une méthodologie à suivre permettant d'obtenir le plus d'informations hydrogéologiques quantitatives possible

notamment sur les caractéristiques hydrodispersives des aquifères fissurés. L'analyse de la dispersion en liaison avec les conditions géologiques et hydrogéologiques est un élément fondamental tant pour la mise en évidence de l'importance de la zone fissurée que pour l'évaluation des risques de propagation d'une pollution.

Ces phénomènes de dispersion sont analysés et expliqués dans le quatrième et dernier chapitre.

\*  
\* \*

## CHAPITRE I

### ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE 5 TRACEURS FLUORESCENTS VIS-À-VIS DES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DU SOL

#### Introduction

- I - Description des expériences et de l'appareillage
- II - Les résultats
- III - Discussion
- IV - Conclusion

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

Lors des opérations de traçage effectuées ces dernières années sur des sites dont les limites hydrologiques étaient connues, nous avons constaté que le traceur n'était jamais restitué entièrement et qu'une forte proportion (de 50 à 90 %) n'était jamais retrouvée. Ce déficit est parfois la conséquence de la sortie des traceurs à des émergences non surveillées, mais le phénomène s'observe également dans certains réseaux souterrains bien connus des hydrogéologues. Ces constatations tendent à prouver qu'il se produit une rétention du traceur par le terrain au moment de l'injection ou plus tard, lors de son cheminement dans l'aquifère. Une partie est fixée par le terrain, l'autre est restituée d'une manière très diluée avec un certain temps de retard. Parmi les causes de rétention, le caractère cationique du traceur est souvent avancé. Ceci a d'ailleurs déjà fait l'objet d'une étude précédente dont nous rappellerons plus loin les résultats (J. Rochat et al., 1981).

Ces observations nous ont amené à étudier les composants du terrain qui favorisaient ou non cette rétention et si celle-ci variait selon le traceur utilisé.

Afin de partir sur des bases sûres et d'obtenir des résultats cohérents et comparables entre eux, il est nécessaire d'opérer en milieu homogène et isotrope, dans des conditions hydrodynamiques stables, pour maîtriser le plus possible les facteurs à prendre en compte.

Ces conditions ne peuvent être réunies qu'en laboratoire où les facteurs météorologiques ne peuvent pas venir perturber les expériences.

Nous utilisons des colonnes de matériaux poreux qui présentent un nombre élevé de surfaces de contact afin de rendre le traceur plus sensible aux phénomènes d'adsorption et désorption. Ces colonnes contenant les principaux constituants du sol, à l'état de poudre et saturés en eau, constituent un milieu homogène et isotrope qui peut représenter une portion d'aquifère. Afin de discerner quel facteur agit sur tel ou tel traceur fluorescent, il est indispensable de connaître parfaitement les éléments et les proportions du mélange contenu dans les colonnes.

Faire migrer les différents traceurs à travers une colonne de terrain brut ne fournit que des informations qualitatives assez vagues car il est impossible de déterminer quel constituant de la colonne a modifié la restitution dans tel ou tel sens.

## I - DESCRIPTION DES EXPERIENCES ET DE L'APPAREILLAGE

### I.1 - LES PRODUITS

Nous avons choisi d'étudier les cinq traceurs fluorescents suivants :

- la fluorescéine sodique ou uranine
- l'éosine
- la Rhodamine B
- l'Amidorhodamine G (ou sulforhodamine G)
- l'Amidorhodamine B (ou sulforhodamine B)

Chacun de ces cinq traceurs fluorescents est comparé au lithium (apporté sous forme de chlorure de lithium) qui sert d'étalon interne, c'est-à-dire que chaque traceur est injecté dans la colonne sous forme d'une solution à  $10^{-4}$  kg/l qui contient déjà  $5 \cdot 10^{-5}$  kg/l (ou 50 ppm) de lithium.

De cette manière, on pourra comparer chaque restitution de traceur différent avec celle d'un seul et même corps, le lithium.

Nous avons choisi le lithium à cause de son faible poids moléculaire, (P.M. = 7) se rapprochant ainsi le plus possible de la molécule d'eau. De plus, aucun des traceurs fluorescents étudiés (qui appartiennent tous à la famille des colorants dits xanthéniques) ne contient de lithium dans sa formule chimique (voir figure n° 1). Il est facilement dosable par adsorption atomique à des concentrations relativement faibles ( $1.10^{-7}$  kg/l). Enfin, le chlorure de lithium est un sel commode d'emploi, facilement disponible dans le commerce, bien soluble dans l'eau et connu pour ses faibles taux d'adsorption.

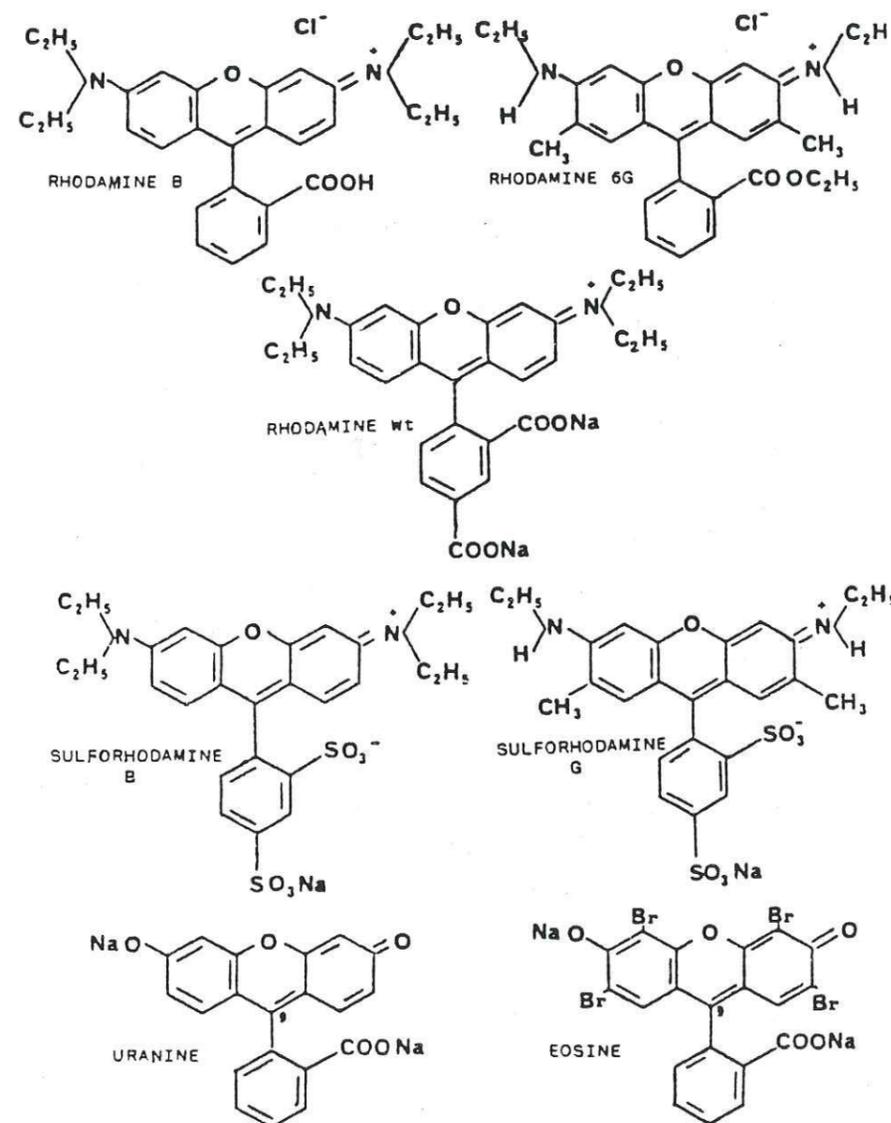
" Plus la charge d'un ion est grande, plus il est adsorbé. Les ions de même valence sont d'autant plus adsorbés que leur rayon est grand. Ceci est dû à l'accroissement de l'hydratation avec la décroissance du rayon qui conduit à une diminution de l'interaction électrostatique avec la surface de l'adsorbant " (J. Rochon, 1978).

L'ion  $Li^+$  semblait donc le plus intéressant en raison de son faible rayon.

Les traceurs vont migrer à travers des colonnes contenant des substances pures représentant les principaux constituants du sol, à savoir :

- le calcaire constitué essentiellement de carbonate de calcium (sous forme de calcite,  $CaCO_3$ , Merck),
- les sables constitués essentiellement de silice ( $SiO_2$ , Merck),
- les argiles représentées ici par une argile verte purifiée pour cosmétologie.

Figure n° 1 : Formules chimiques développées des traceurs xanthéniques étudiés. (in J.Rochat et al.1981 ).



Cette argile verte a été analysée au laboratoire de géologie de l'Université de Neuchâtel ; elle contient :

• Pour la fraction comprise entre 2 et 16  $\mu$  :

- 44 % de Kaolinite
- 29 % d'illite
- 27 % d'interstratifiés
- des traces de Quartz, de feldspaths potassiques, et d'anatase ( $TiO_2$ )

• Pour la fraction inférieure à 2  $\mu$  :

- 60 % de Kaolinite
- 21 % d'illite
- 19 % d'interstratifiés
- enfin l'humus représenté par de l'acide humique (Fluka).

Lors de travaux antérieurs, (J. Rochat et al., 1981), le carbonate de calcium s'est révélé être un constituant relativement neutre, agissant très peu sur le comportement du traceur et sur sa restitution. Il va faire l'objet, dans un premier temps, d'une vérification afin de savoir s'il peut servir de support de base dans la constitution des différentes colonnes. Pour chacun des cinq traceurs nous effectuons deux ou trois essais sur quatre colonnes de natures différentes :

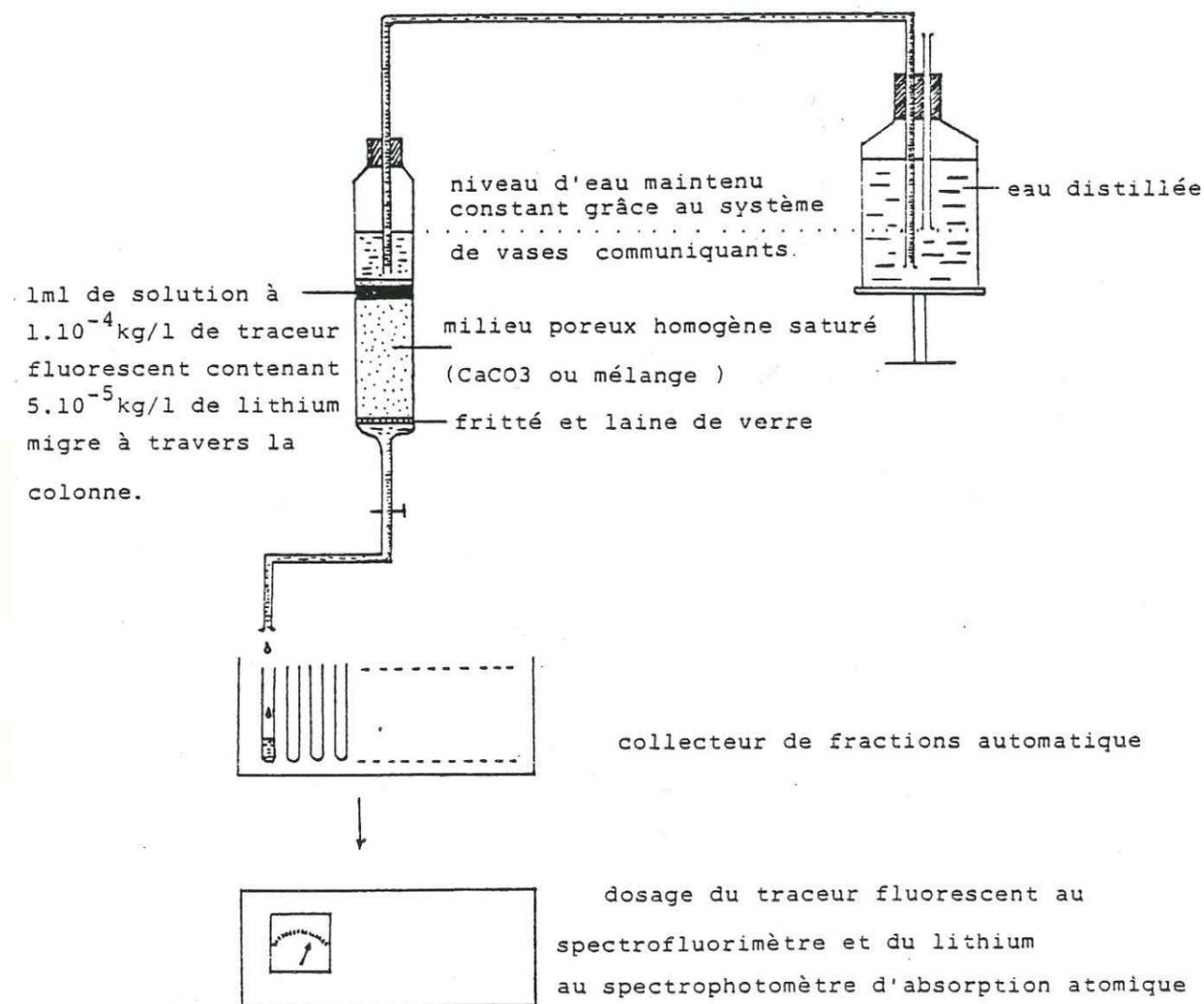
- colonne contenant 100 % de  $CaCO_3$  pur
- " 90 % " et 10 % de silice
- " 97 % " et 3 % d'argile verte
- " 95 % " et 5 % d'acide humique

### I.2 - L'APPAREILLAGE

Le traceur est poussé par simple gravité par de l'eau qui alimente sous pression constante la colonne grâce à un système de bulle à bulle par vases communicants (voir figure n° 2).

Figure n° 2 : Schéma de l'appareillage

utilisé pour les expériences sur colonnes



### I.3 - MODE OPERATOIRE

On remplit tout d'abord la colonne d'eau distillée, on pèse 20 g, soit de  $\text{CaCO}_3$ , soit d'un mélange de  $\text{CaCO}_3$  et d'un autre constituant que l'on verse petit à petit dans la colonne en le laissant sédimenter.

On ouvre le robinet de la colonne et on attend que le niveau de l'eau arrive à la hauteur du milieu poreux avant d'ajouter à l'aide d'une pipette un millilitre de solution contenant  $1.10^{-4}$  kg/l de traceur et  $5.10^{-5}$  kg/l de lithium.

Une fois que tout le traceur est absorbé, on ajoute de l'eau jusqu'à un niveau de 3 à 4 cm au-dessus du mélange poreux, niveau qui sera maintenu constant grâce au système décrit ci-dessus.

Grâce à un collecteur de fractions automatique, programmable (marque : L.K.B), toute la quantité d'eau et de traceur qui transite à travers la colonne est recueillie dans plusieurs tubes à essais qui se remplissent au fur et à mesure de l'écoulement à intervalles de temps réguliers. On mesure ensuite le volume contenu dans chaque tube à essais et on dose le traceur fluorescent au spectrofluorimètre (Farrand, mark I) puis le lithium au spectrophotomètre d'absorption atomique (Unicam - SP 90-A).

Les courbes de concentration en traceur et en lithium en fonction du temps ainsi obtenues permettent de fournir des informations précises quant au comportement des différents traceurs dans le milieu poreux considéré et de connaître les masses exactes de traceur restituées d'une part et de lithium d'autre part.

## II - LES RESULTATS

Les traceurs fluorescents peuvent être comparés entre eux grâce à la présence du lithium, qui sert d'étalon interne. Il est indispensable de disposer d'un tel témoin car les conditions hydrodynamiques peuvent, malgré toutes les précautions prises, varier d'une expérience à l'autre.

Afin de faire le moins d'erreurs possible sur le taux de restitution du Li et des traceurs, il faut préparer les gammes d'étalonnage (utilisées pour les dosages) à partir de la solution injectée dans la colonne.

Nous allons étudier les courbes de concentration en fonction du temps sous deux aspects : tout d'abord l'aspect quantitatif, c'est-à-dire le pourcentage de masse de traceur et de lithium restitué (= taux de restitution), puis l'aspect qualitatif, c'est-à-dire l'allure des courbes et les temps de sortie des "pics".

### II.1 - ASPECT QUANTITATIF

Les taux de restitution du lithium et des traceurs fluorescents, exprimés en pourcentages de masse, pour chacune des colonnes, sont rassemblés dans les tableaux suivants :

(ces pourcentages correspondent aux moyennes des trois essais)

#### II.1.1. Colonne de $\text{CaCO}_3$ pur

TABLEAU N° 1 : taux de restitution (exprimés en %) pour le Lithium et les différents traceurs fluorescents après migration à travers une colonne constituée de 100 % de  $\text{CaCO}_3$

Uranine	Li	Eosine	Li	Rhod WT	Li	Rhod 6G	Li	Rhod B	Li	Amido B	Li	Amido G	Li
96	100	100	95	100	96	35	95	95	95	100	97	95	93

En considérant que dans une telle expérience, on peut estimer l'erreur à 10 %, on admet alors que le lithium est restitué en totalité. Ceci nous conforte dans son choix comme élément de comparaison.

Le  $\text{CaCO}_3$  n'a pas d'influence sur les taux de restitution, sauf en ce qui concerne la Rhodamine 6G. Il pourra donc servir de support de base, pour les autres traceurs, dans la constitution des différentes colonnes.

Pour les colonnes contenant un mélange de  $\text{CaCO}_3$  et d'un autre constituant, nous n'avons étudié que les cinq traceurs fluorescents les plus utilisés récemment en hydrogéologie : l'uranine, l'éosine, la Rhodamine B, et les amidorhodamines B et G.

#### II.1.2. Colonne de $\text{CaCO}_3$ et 10 % $\text{SiO}_2$

Nous avons choisi comme proportion 10 % de  $\text{SiO}_2$  et 90 % de  $\text{CaCO}_3$  car à ce taux là, la silice n'est pas encore assez abondante pour former un gel qui colmaterait la colonne et empêcherait l'écoulement. En revanche, 10 % de silice représente une proportion assez importante pour mettre en évidence une adsorption éventuelle.

TABLEAU N° 2 : taux de restitution (exprimés en %) après migration à travers une colonne de 90 %  $\text{CaCO}_3$  + 10 %  $\text{SiO}_2$

Uranine	Li	Eosine	Li	Rhod B	Li	Amido B	Li	Amido G	Li
85	94	75	94	85	90	100	100	90	100

Sachant que l'erreur est estimée à 10 %, on peut considérer là également que le lithium est restitué en totalité, ainsi que les Amidorhodamines B et G. L'uranine et la rhodamine B sont légèrement adsorbées par la silice et l'éosine l'est un peu plus encore dans nos conditions expérimentales.

#### II.1.3. Colonne de $\text{CaCO}_3$ et 3 % d'argile verte

Avant de choisir cette argile (purifiée pour cosmétologie), nous avons fait un essai avec du kaolin pur, mais ce dernier, mélangé à du  $\text{CaCO}_3$  même dans de très faibles proportions (en dessous de 1 %) colmate la colonne et empêche tout écoulement de l'eau. Avec l'argile verte utilisée, il en est de même, mais le colmatage ne commence qu'à partir d'environ 3 %.

TABLEAU N° 3 : taux de restitution (exprimés en %) après migration à travers une colonne de 97 %  $\text{CaCO}_3$  + 3 % argile verte

Uranine	Li	Eosine	Li	RHOD B	Li	Amido B	Li	Amido G	Li
100	100	95	100	74	96	100	100	80	100

#### II.1.4. Colonne de $\text{CaCO}_3$ et 5 % acide humique

Etant donné sa plus faible densité que l'eau, l'acide humique a tendance à se séparer par flottation lorsqu'on dépasse la proportion de 5 %. Il n'est plus possible alors de le mélanger intimement avec la  $\text{CaCO}_3$  pour former une poudre homogène, il se rassemble en amas qui surnagent au-dessus de la colonne. Nous avons donc choisi la proportion de 5 % d'acide humique.

TABLEAU N° 4 : taux de restitution (exprimés en %) après migration à travers une colonne de 95 %  $\text{CaCO}_3$  + 5 % d'acide humique

Uranine	Li	Eosine	Li	RHOD B	Li	Amido B	Li	Amido G	Li
98	100	92	100	52	100	77	100	90	100

## II.2 - ASPECT QUALITATIF

La courbe de concentration du lithium en fonction du temps présente toujours un "pic" bien marqué. Elle va donc servir de référence pour comparer les courbes des différents traceurs fluorescents entre elles.

La précision des temps de sortie des pics du lithium et des traceurs pour une même colonne dépend du choix des paramètres du mode opératoire utilisés.

La vitesse d'écoulement dans les colonnes a conditionné le choix des intervalles de prélèvement. Ainsi, pour le  $\text{CaCO}_3$  pur, les tubes à essais changeaient toutes les 15 mn. Il en est de même pour les autres colonnes, mais avec un fractionnement différent. Pour les colonnes de  $\text{CaCO}_3 + 10\% \text{ SiO}_2$ , il y avait un prélèvement toutes les 6 mn ; pour les colonnes de  $\text{CaCO}_3$  et 3 % d'argile verte ainsi que pour celles de  $\text{CaCO}_3 + 5\%$  d'acide humique, les prélèvements avaient lieu toutes les 10 mn.

Tout cela signifie que lorsqu'on lit sur les tableaux (voir tableaux n° 5, 6, 7, 8) des temps "moyens" de 50 ou 65 mn, par exemple, cela veut dire que la majeure partie du traceur est sortie entre la 45ème et la 60ème minute dans le premier cas, ou entre la 60ème et la 75ème minute dans le second cas.

Les temps d'arrivée des premières molécules de traceur, du sommet du "pic", du centre de gravité (pour les courbes qui ne présentent pas de "pic") sont rassemblés dans les tableaux n° 5 à n° 8.

Tous ces temps sont exprimés en minutes.

### II.2.1. Colonne de 100 % $\text{CaCO}_3$ pur

TABLEAU N° 5 : les différents temps d'arrivée caractéristiques colonne de 100 %  $\text{CaCO}_3$  pur

traceur	premières arrivées	"pic"	"pic" du lithium	Décalage entre "pic" du lithium et "pic" du traceur
Uranine	35'	50'	50'	0
Eosine	35'	50'	50'	0
Rhod. WT	50'	65'	65'	0
Rhod. 6G	50'	65'	65'	0
Rhod. B	35'	50'	50'	0
Amido B	35'	50'	50'	0
Amido G	35'	50'	50'	0

*Remarque* - lorsque la courbe présente un "pic" bien marqué, l'abscisse du centre de gravité correspond pratiquement au temps d'arrivée du pic.  
- l'intervalle entre chaque prélèvement est de 15 mn c'est-à-dire que le tube n° 1 correspond au passage du traceur entre la première et la quinzième minute, le tube n° 2, entre la seizième et la trentième minute et ainsi de suite.

Tous les traceurs fluorescents sortent en même temps que le lithium. Le "pic" de la courbe du lithium qui apparaît toujours 15 mn après les premières détections correspond à celui des traceurs fluorescents même pour la rhodamine 6G qui n'est restituée qu'à 35 % (voir figures n° 3 et n° 4).

Figure n°3 : Colonne de CaCO3 pur

Histogrammes de restitution des différents traceurs

----- lithium  
 ——— traceur fluorescent

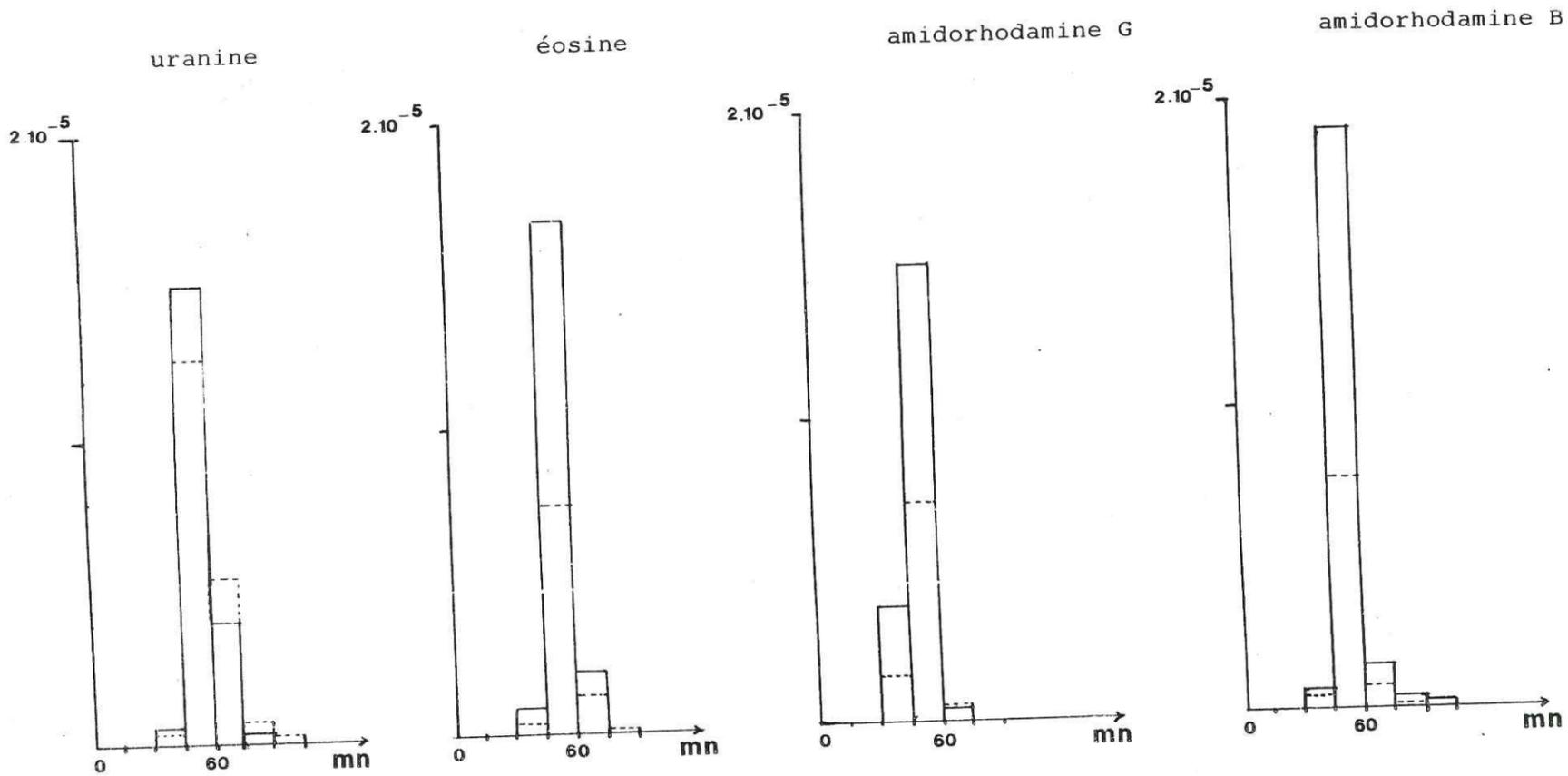
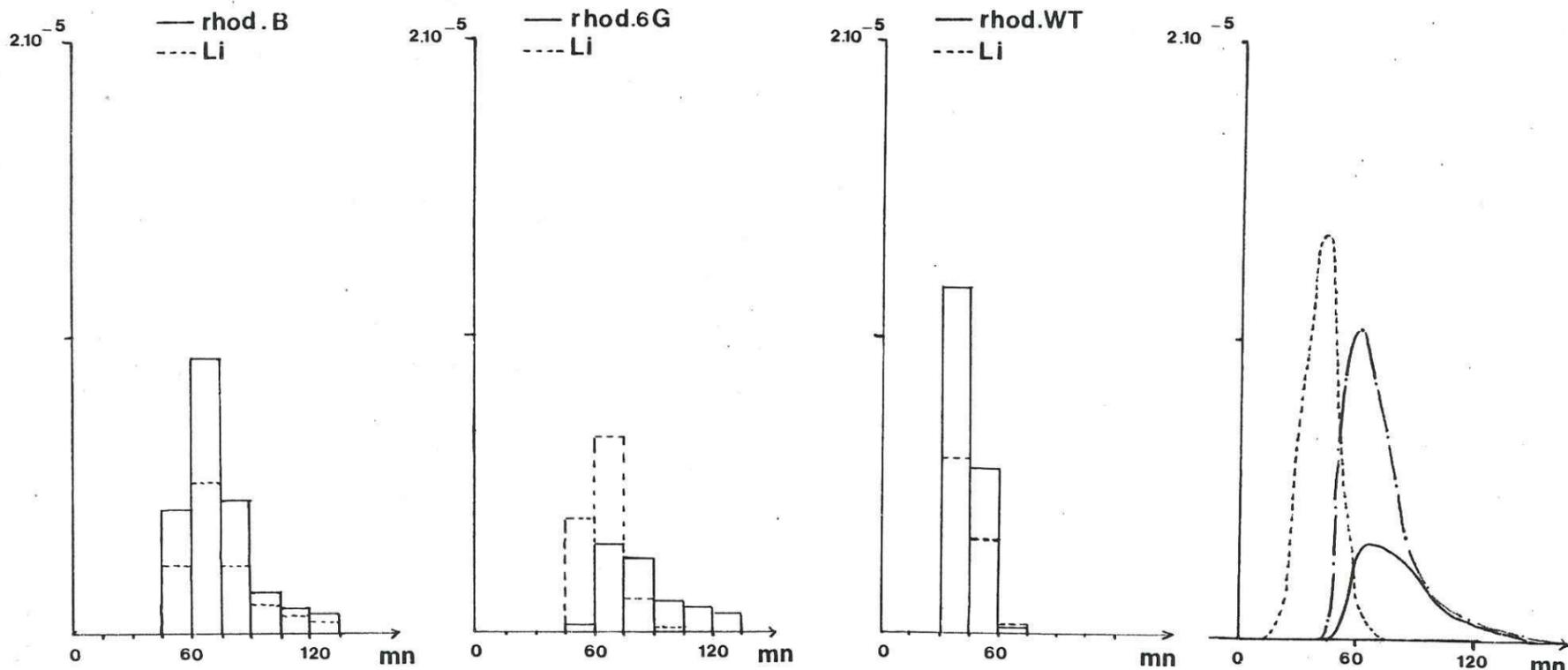


Figure n°4 : Colonne de CaCO3 pur

Histogrammes de restitution et Courbes de restitution comparatives des trois rhodamines des trois rhodamines

----- rhodamine WT  
 ——— rhodamine B  
 ——— rhodamine 6G



II.2.2. Colonne de 90 % CaCO<sub>3</sub> et 10 % SiO<sub>2</sub>TABLEAU N° 6 : les différents temps d'arrivée caractéristiques  
90 % CaCO<sub>3</sub> et 10 % Silice.

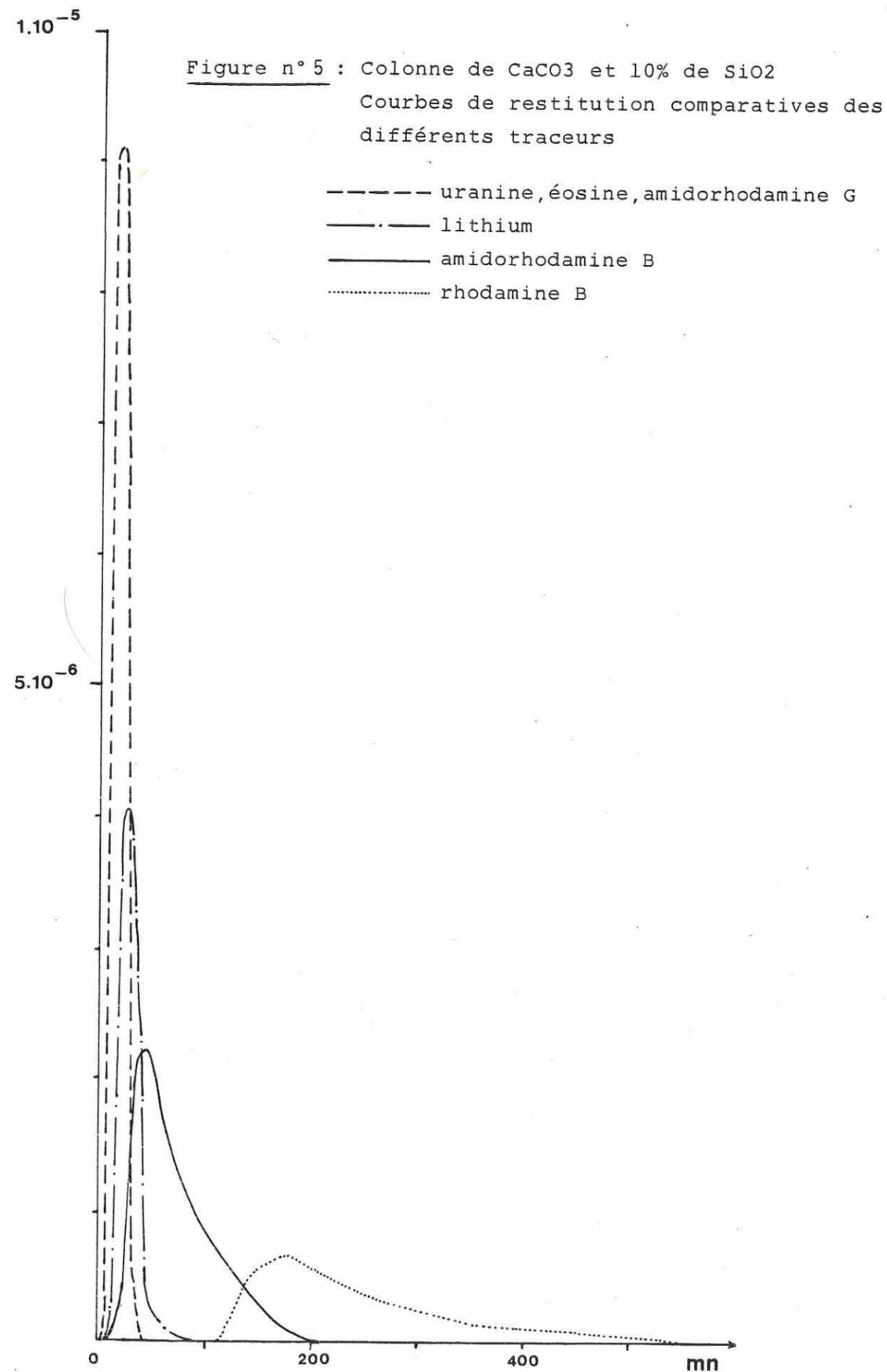
traceurs	premières arrivées	"pic"	"pic" du lithium	Décalage entre pic Li et pic du traceur en mn
Uranine	15'	15'	27'	- 12'
Eosine	9'	15'	27'	- 12'
Rhod. B	120'	165'	15'	+ 150'
Amido B	15'	39'	21'	+ 18'
Amido G	15'	21'	27'	- 6'

Le signe - signifie que le traceur est sorti avant le lithium.  
Le signe + signifie que le traceur est sorti après le lithium.

L'intervalle de prélèvement est de 6 minutes (même remarque qu'en II.2.1.).

Pour chaque traceur, il existe un décalage entre le pic de la courbe du lithium et celui du traceur; pour l'uranine, l'éosine et l'amido G le lithium sort après le traceur; pour la rhod. B et l'amido B c'est l'inverse. La Rhod. B se distingue nettement des autres par un retard considérable par rapport au lithium (150 mn). Remarquons ici qu'un tel retard ne correspond pas à un faible taux de restitution.

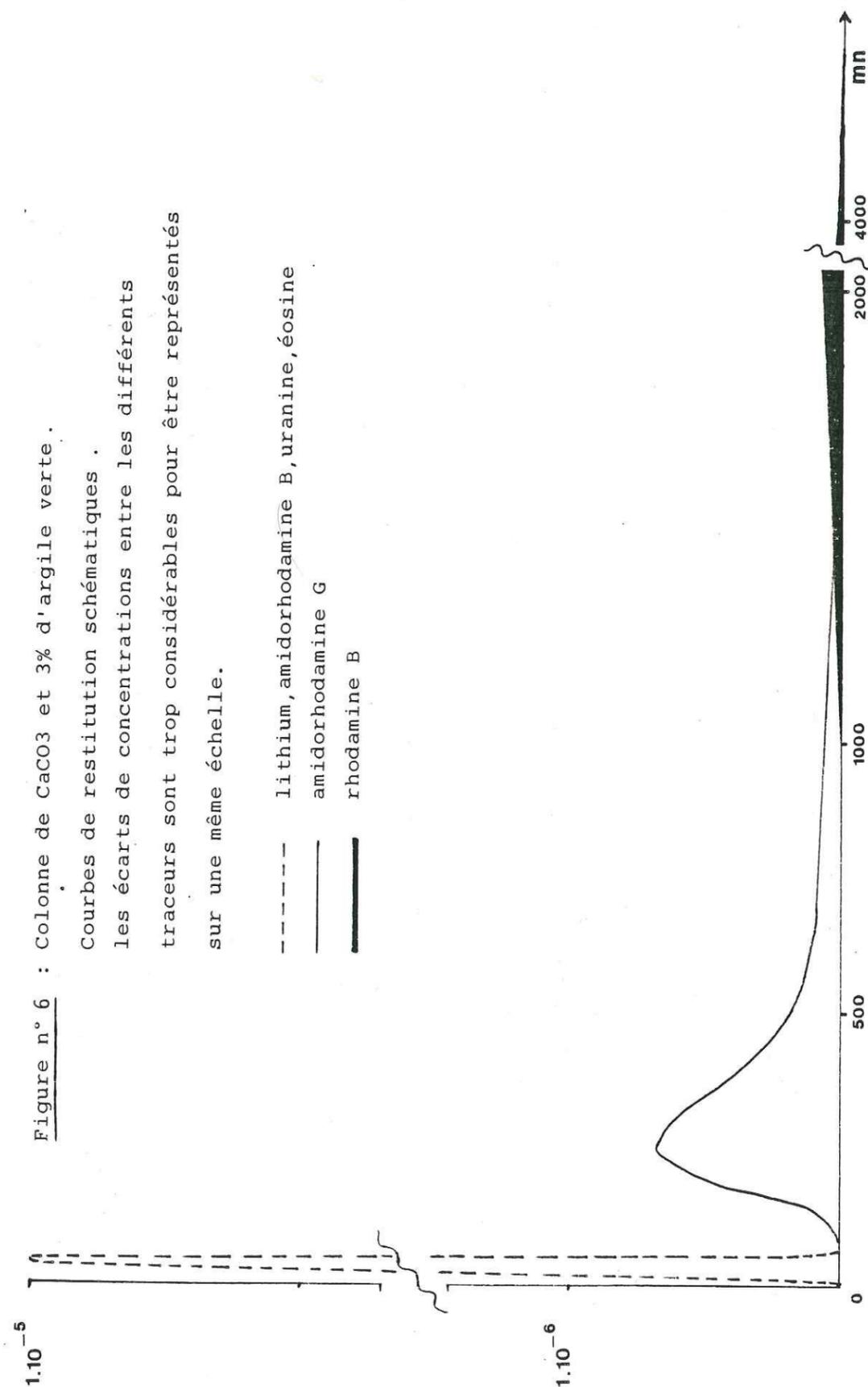
A l'inverse, le pic de l'éosine sort 12 mn avant celui du lithium, mais celle-ci n'est restituée qu'à 75 % (voir figure n° 5).



II.2.3. Colonne de 97 % CaCO<sub>3</sub> + 3 % d'argile verteTABLEAU N° 7 : les différents temps d'arrivée caractéristiques, colonne de 97 % de CaCO<sub>3</sub> + 3 % d'argile verte

Traceur	Premières arrivées	Pic du traceur fluorescent	Pic du lithium	Décalage entre pic lithium et pic du traceur	Décalage entre centre gravité traceur et pic lithium	Intervalle de prélèvement
Uranine	3'	9'	15'	- 3'		6'
Eosine	15'	15'	25'	-10'		10'
Rhod.B	1260' (=21h)	pas de pic marqué	30'	/	environ 3600' soit 60 h	variable
Amido B	15'	35'	25'	+10'		10'
Amido G	95'	240'	15'	+225'		10'

Ici aussi l'uranine et l'éosine sortent avant le lithium. L'Amidorhodamine B a un retard peu marqué par rapport au lithium, tandis que l'amidorhodamine G et la rhodamine B ont des retards considérables (de 20 à 300 fois plus importants) avec un léger taux d'adsorption (voir figure n° 6). Notons ici que l'amidorhodamine G a un comportement totalement différent de celui du cas précédent (colonne de CaCO<sub>3</sub> + 10 % SiO<sub>2</sub>).



### II.2.4. Colonne de 95 % CaCO<sub>3</sub> et 5 % d'acide humique

**TABEAU N° 8 :** les différents temps d'arrivée caractéristiques  
Colonne de 95 % de CaCO<sub>3</sub> + 5 % d'acide humique  
(intervalles de prélèvement de 10 mn)

Traceurs	Premières arrivées	Pic du traceur	Pic du lithium	Décalage entre pic Li et pic traceur	Décalage entre centre de gravité traceur et pic Li
Uranine	5'	15'	15'	0	
Eosine	15'	15'	15'	0	
Rhod. B	75'	pas de pic	25'	/	+ 260'
Amido-rhod.B	15'	15'	15'	0	
Amido-rhod.G	15'	15'	25'	- 10'	

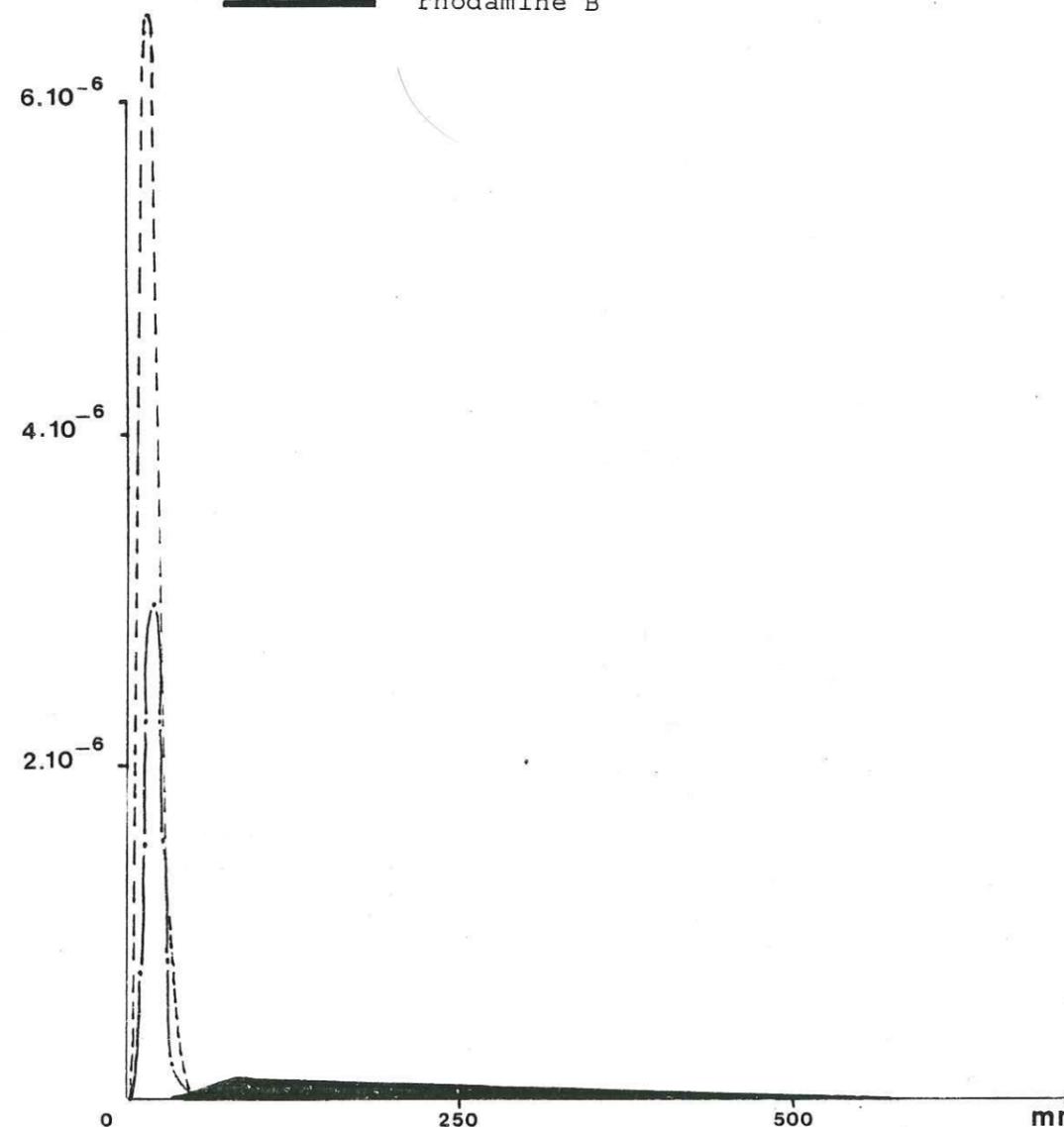
L'amidorhodamine G sort avant le lithium, l'uranine, l'éosine et l'amidorhodamine B sortent en même temps que celui-ci. Seule la rhodamine B ici aussi a un retard important par rapport au lithium, avec un taux de restitution de 50 % seulement. Ce retard par rapport au lithium ne correspond pas forcément à de faibles taux de restitution (l'amidorhodamine B sort en même temps que le lithium mais elle n'est restituée qu'à 77 %) (voir figure n° 7).

Figure n° 7 :

Colonne de CaCO<sub>3</sub> et 5% d'acide humique

Courbes de restitution comparatives des différents traceurs

- uranine, éosine, amidorhodamines G et B
- · - · - · lithium
- rhodamine B



### III - DISCUSSION

Chaque constituant a une action propre sur chaque traceur fluorescent, mais dans tous les cas, la restitution du lithium reste inchangée.

Les traceurs fluorescents utilisés sont sept colorants xanthéniques que l'on peut diviser en trois groupes :

- Les rhodamines B, WT et 6G (carboxyliques)
- Les sulforhodamines (ou amidorhodamines) B et G (sulfoniques)
- L'uranine (fluorescéine sodique) et l'éosine (dérivé tétrabromé de l'uranine).

(voir figure n° 1).

Lors de travaux antérieurs, le caractère ionique de ces différents traceurs a été mis en évidence (J. Rochat et al., 1981).

Rappelons ici que les amidorhodamines se comportent comme des anions. Mais le caractère anionique de l'amidorhodamine G est légèrement plus marqué que celui de l'amidorhodamine B.

Au contraire, la rhodamine 6G présente un caractère exclusivement cationique.

Les autres traceurs fluorescents ont un comportement ionique mixte ; cependant, l'éosine et l'uranine réagissent surtout comme des anions et la rhodamine B surtout comme un cation. Il est beaucoup plus difficile de préciser le caractère prépondérant de la rhodamine WT.

Lors de cette même étude, des solutions de ces traceurs xanthéniques ont été mises en contact pendant 24 heures avec les substances pures suivantes : carbonate de calcium, silice, kaolin et acide humique.

Nous avons complété ces travaux en étudiant le comportement de ces différents traceurs vis-à-vis de deux autres constituants importants du sol : l'alumine ( $Al_2O_3$ ) et l'oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ).

Les différentes solutions de traceurs  $5.10^{-6}$  M ont été divisées en deux parties. Les unes servaient de solutions témoins (100 %) lors des déterminations spectrofluorimétriques, elles ont été conservées dans les mêmes conditions que les essais, pour éviter toute dégradation photochimique préférentielle. Les autres ont été mélangées avec chacun des constituants du sol dans les proportions indiquées dans le tableau n° 9.

Des blancs (0 %) ont été préparés de façon identique en remplaçant les solutions de traceurs par de l'eau distillée. Après 24 h de contact à l'obscurité et à température ambiante, les solutions ont été séparées par décantation ou centrifugation et leur fluorescence a été mesurée au spectrofluorimètre.

Les intensités de fluorescence résiduelles ainsi obtenues sont exprimées en pourcentages de celles observées avec les solutions témoins. Le pH de ces témoins a été ajusté, si besoin était, à celui des essais et la correction du zéro était effectuée sur les blancs.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant.

TABLEAU N° 9 : les intensités de fluorescence résiduelle après contact avec les différents composants du sol

Traceurs 5.10 <sup>-6</sup> M.20cm <sup>3</sup>	Composants du sol											
	Acide humique		Silice		Kaolin		CaCO <sub>3</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	500 mg	250 mg	500 mg	250 mg	500 mg	250 mg	500 mg	250 mg	500 mg	250 mg	500 mg	250 mg
Amidorhod.G	84%	80%	73%	85%	74%	84%	100%	100%	96%	98%	93%	96%
Amidorhod.B	87%	85%	41%	78%	82%	96%	100%	98%	98%	96%	81%	87%
Eosine	13%	19%	100%	100%	97%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Uranine	2%	5%	100%	91%	98%	96%	95%	96%	98%	97%	98%	99%
Rhod.WT	0%	0%	41%	50%	77%	93%	96%	100%	82%	83%	74%	77%
Rhod.B	0%	0%	8%	11%	24%	22%	94%	94%	83%	82%	73%	82%
Rhod.6G	0%	0%	3%	2%	0%	1%	70%	100%	100%	100%	20%	43%

Le carbonate de calcium ne provoque pas de baisse de fluorescence sauf pour la Rhod. 6G.

L'acide humique, caractéristique de la terre végétale, entraîne les influences les plus marquées, mais la silice, et de façon moindre le kaolin, provoquent également des atténuations de fluorescence.

L'alumine engendre une légère baisse de fluorescence uniquement pour les Rhodamines B et WT, tandis que l'oxyde de fer a une légère activité sur l'amido . B et une plus marquée sur les Rhod. notamment sur la Rhod. 6G. Les résultats de ces deux ensembles d'expériences vont être comparés à ceux obtenus au cours des travaux sur colonnes et vont compléter l'interprétation qui en sera faite.

Avant de discuter des résultats, il faut rappeler que les solutions aqueuses de traceurs sont légèrement acides (pH 5,5-6).

Le caractère acide des rhodamines et des amidorhodamines augmente lorsque l'on passe des molécules monocarboxyliques aux dicarboxyliques et des dicarboxyliques aux disulfoniques.

Pour les amidorhodamines B et G, l'éosine, l'uranine et les rhodamines B et WT, le Carbonate de calcium pur n'a aucune activité tant sur le taux de restitution (qui est de 100 %) que sur l'allure de la courbe de concentration en fonction du temps. Il ne provoque aucun retard sur la sortie du traceur et ne peut donc pas être responsable des faibles taux de restitution observés lors des opérations de traçage. Seule la rhodamine 6G, du fait de sa charge positive, subit une forte adsorption (35 % de restitution seulement). Ce résultat confirme d'ailleurs celui obtenu lors de la mise en contact avec 500 mg de CaCO<sub>3</sub> (voir tableau n° 9).

Une partie de la rhodamine 6G est adsorbée par le CaCO<sub>3</sub> mais une partie non négligeable l'est aussi par le fritté et le verre de la colonne. Ces surfaces étant porteuses de charges négatives au niveau des aspérités.

Les propriétés adsorbantes de la silice sont bien connues, de plus celle utilisée dans nos conditions expérimentales est certainement plus active que celle qui peut exister dans l'eau et dans les sols sous nos climats. La silice est capable de fixer l'éosine, l'uranine, et la Rhodamine B à un degré moindre, mais ne retient pas les amidorhodamines B et G. En revanche, elle provoque un retard très important sur la sortie de la rhodamine B, et un plus faible sur celle de l'amidorhodamine B. La fixation est d'autant plus marquée que le caractère anionique du traceur est plus faible. Ces observations sont en faveur d'une association par paires d'ions avec le silicate, notamment en ce qui concerne la rhodamine B. Pour l'éosine et l'uranine, d'autres phénomènes doivent intervenir comme, par exemple, des liaisons "hydrogène" (J. Rochat et C. Luu Duc, 1973). A propos de la rhodamine B, qui présente le caractère le plus cationique des cinq traceurs étudiés, ces liaisons se manifestent également par un retard très prononcé, mais 85 % de ce traceur sont restitués au bout de 15 heures. Il se produit donc des phénomènes d'adsorption et de désorption successifs, mais non une adsorption définitive. En revanche, les travaux antérieurs

ont souligné une diminution importante de la fluorescence après mise en contact. Les amidorhodamines ne subissent aucune adsorption ni aucun retard, contrairement à ce qui se passe lors du contact avec 500 mg de silice. Ceci est peut-être dû au fait que la silice mélangée à du carbonate de calcium perd une partie de son pouvoir adsorbant et que les amidorhodamines sont trop anioniques pour être fixées. Inversement, l'éosine et l'uranine ne subissent aucune baisse de fluorescence lors de la mise en contact avec de la silice pure, bien que dans ce cas, on puisse imaginer l'établissement de liaisons "hydrogène". On peut noter que la "queue" de la courbe de concentration en lithium en fonction du temps traîne un peu plus avec la silice qu'avec les autres constituants, existerait-il des liaisons entre le lithium et les ions silicates ?

Avec le mélange  $\text{CaCO}_3$  + 3 % d'argile verte, l'uranine, l'éosine et l'amidorhodamine B ne subissent ni d'adsorption ni de retard notables par rapport au lithium. Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus lors de la mise en contact avec du kaolin, car toutes les argiles ont une structure voisine et une capacité d'échanger des ions. Ces traceurs ayant un caractère anionique plus marqué, il est normal qu'ils ne soient pas fixés par des argiles considérées classiquement comme échangeuses de cations.

Inversement, l'amidorhodamine G dont le caractère anionique a été prouvé, ne se trouve restituée qu'à 80 % et est fortement retardée par rapport à l'amidorhodamine B. Rien ne semble expliquer dans les formules chimiques de ces deux traceurs, les différences de comportements notées lors de nos essais.

La Rhodamine B n'est restituée qu'à 74 % et subit un retard considérable par rapport au lithium et aux autres traceurs (temps de passage 100 fois plus élevé). Ce résultat confirme bien celui obtenu lors de la mise en contact et s'explique par le fait que la rhodamine B a un caractère cationique et qu'elle est fixée par les argiles échangeuses de cations. Le lithium lui aussi est un cation, mais étant donné sa petite taille, il est beaucoup moins sensible aux phénomènes d'adsorption (J. Rochon, 1978).

Avec le mélange  $\text{CaCO}_3$  et 5 % d'acide humique, l'uranine, l'éosine et l'amidorhodamine G sont restituées à 100 % et ne subissent aucun retard par rapport au lithium. En revanche, lors de la mise en contact avec 500 mg d'acide humique pur, la fluorescence de l'éosine et de l'uranine était presque annulée et celle de l'amidorhodamine G diminuée de 20 %.

L'amidorhodamine B et la rhodamine B subissent une certaine adsorption qui se retrouve lors du contact avec de l'acide humique pur. L'acide humique a une action remarquable sur l'éosine, l'uranine et la rhod. B lors de la mise en contact, mais sur la rhodamine B seulement, lors de la migration à travers la colonne. L'acide humique a la propriété de donner des associations par échanges d'ions, "pont hydrogène" ou forces de Van der Waals. Avec la Rhodamine B, le milieu permet la protonation des azotes et la formation des cations organiques qui s'adsorbent par échange d'ions sur l'acide humique. Le caractère anionique des amidorhodamines (surtout de l'amido . G) est suffisamment marqué pour qu'une répulsion apparaisse et s'oppose à ce type de liaisons.

Les extinctions de fluorescence observées avec les solutions d'uranine et d'éosine lors du contact avec l'acide humique pur, indiquent qu'il s'agit ici d'un autre type de liaisons. L'acide humique est riche en groupements hydroxyles et peut s'associer par "pont hydrogène" avec les traceurs porteurs de  $\text{OH}^-$ . De telles associations ne sont plus observables dans nos conditions expérimentales lorsque le traceur passe plus rapidement au contact d'un acide humique fortement dispersé dans du carbonate de calcium (proportions : 5 % - 95 %).

L'alumine provoque une légère baisse de fluorescence seulement pour les rhodamines B et WT. Celles-ci peuvent se comporter à la fois comme des cations et des anions, car elles contiennent des azotes protonables et des groupements carboxyliques qui sont ionisables dans nos conditions opératoires.

La présence d'hydroxydes de fer et d'aluminium est compatible avec le pH du milieu ( $\text{pH} \approx 6$ ). Ces hydroxydes trivalents correspondant à  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont bien connus pour leurs propriétés adsorbantes

utilisées dans les traitements de floculation des eaux.  $Fe^{+++}$  est par ailleurs un oxydant et c'est peut-être autour de ces deux propriétés qu'il faut rechercher les causes des extinctions de fluorescence (Rérat, 1976).

Le pouvoir adsorbant des dérivés de l'aluminium et du fer expliquerait les comportements des traceurs observés dans les deux séries d'essais. Les rhodamines WT et B semblent, à ce propos, être les plus sensibles.

L'oxydation par l'ion  $Fe^{+++}$  serait par ailleurs responsable des différences notées lors des expérimentations. Les plus oxydées semblent être la rhodamine 6G et à un degré moindre l'amidorhodamine B.

#### IV - CONCLUSION

Ces travaux de mise en contact avec des substances pures et de migration à travers des colonnes ont, certes, amené des précisions quant au comportement des traceurs xanthéniques vis-à-vis des principaux constituants du sol, mais avec les éléments que nous avons obtenus nous ne pouvons pas tout expliquer. Notamment certaines différences de comportement vis-à-vis de l'acide humique selon qu'il est pur ou mélangé à du carbonate de calcium.

Il faudrait faire de nouveaux essais avec d'autres proportions, dans d'autres conditions de pH, et éventuellement avec d'autres constituants pour espérer résoudre ce problème.

Les résultats obtenus ici vont permettre d'expliquer, en partie au moins, les taux de restitution et l'allure des courbes de concentration en fonction du temps des essais "in situ" sur des portions d'aquifère.

Nous verrons plus loin (chapitre IV) que, grâce à ces résultats en laboratoire, nous pourrions calculer des coefficients de dispersivité caractéristiques du matériel poreux utilisé et qui serviront de comparaison à ceux calculés lors des opérations de traçage sur le terrain.

## CHAPITRE II

### TESTS DE PLUSIEURS TRACEURS "IN SITU" SUR DES PORTIONS D'AQUIFÈRES DE DIMENSIONS RESTREINTES

#### Introduction

- I - Les travaux antérieurs
- II - Les travaux personnels : les essais de St-Michel des Portes
- III - Conclusions

## INTRODUCTION

Dans ce second chapitre, je vais comparer et tenter de superposer les résultats obtenus lors des essais sur colonnes en laboratoire à ceux trouvés au cours des expériences de traçage sur des sites de petites dimensions. C'est-à-dire que l'on va passer d'une échelle décimétrique à des échelles décamétriques, voire hectométriques.

Tout d'abord, je vais rappeler quelques travaux de plusieurs auteurs, puis j'exposerai les miens et comparerai les différents résultats.

### I - LES TRAVAUX ANTERIEURS

#### I.1 - TRAVAUX DE B. GAILLARD (1976)

B. GAILLARD (1976) a étudié les phénomènes de dispersion sur un modèle physique (bac de dimensions métriques) représentant une portion d'aquifère assimilée à un milieu homogène et isotrope (sables de granulométrie homogène). Il a effectué ses essais dans le cas d'un écoulement en nappe plate caractérisée par un gradient hydraulique constant dans le sens de l'écoulement, par des lignes de courant parallèles, et par des isopièzes parallèles et équidistantes.

Dans les mêmes conditions hydrodynamiques, les courbes de concentration en fonction du temps des différentes substances injectées sont très semblables d'un produit à un autre.

Notamment les courbes de restitution de la rhod. B et de l'uranine sont pratiquement identiques. D'après B. GAILLARD, "*cette identité résulterait probablement de la faiblesse des phénomènes d'interaction avec le milieu (sables) en raison de sa nature presque exclusivement siliceuse*". Ceci est en contradiction avec les résultats

que nous avons obtenus tant lors de la mise en contact avec de la silice pure que lors de la migration à travers les colonnes de  $\text{CaCO}_3 + 10\% \text{SiO}_2$  (chapitre I). En effet, dans ces deux cas, la rhod. B et l'uranine ont des différences de comportement notables. De même, sur une portion expérimentale d'aquifère alluvial sableux contenant essentiellement de la silice et du  $\text{CaCO}_3$ , B. GAILLARD obtient des taux de restitution d'environ 30 % pour la rhodamine B comme pour l'uranine et de 5 % seulement pour le lithium (apporté sous forme de chlorure de lithium). Tandis que lors de nos expériences, le lithium est toujours entièrement restitué et la rhodamine B se distingue de l'uranine par une plus forte sensibilité aux phénomènes d'adsorption.

#### I.2 - TRAVAUX DE P. CALMELS (1985)

P. CALMELS (1985) a effectué des expériences sur un modèle physique en laboratoire afin de mettre au point une méthode qui permette d'assimiler un système hydrologique à un système linéaire et de déterminer la réponse impulsionnelle qui le caractérise.

Le signal d'entrée du système étant constitué par la simulation de précipitations tombant à la surface d'un bassin hydrologique, il cherche à définir la fonction qui caractérise le signal de sortie. Pour cela, il utilise - entre autres - trois traceurs fluorescents : la rhodamine WT, le Jaune sulfacide et l' amino-G. acide.

Les courbes de concentration en fonction du temps sont très semblables pour ces trois produits et permettent de confirmer le fait que la fonction de sortie est une exponentielle unique d'argument négatif. Les taux de restitution sont de 58 % pour le Jaune sulfacide, de 88 % pour la rhodamine WT et de 99 % pour l' amino-G. acide. Ces taux sont du même ordre de grandeur que ceux que nous avons obtenus avec d'autres traceurs fluorescents.

Notons ici que P. CALMELS a rempli son bac expérimental avec les mêmes sables (de granulométrie très homogène et essentiellement constitués de silice) que ceux utilisés par B. GAILLARD (1976).

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

Sa méthode lui permet de déterminer le temps de séjour moyen de l'eau dans le système car celui-ci correspond à l'inverse de l'argument de l'exponentielle, et le débit moyen des écoulements multiplié par ce temps de séjour lui donne le volume d'eau contenu dans l'aquifère.

P. CALMELS a ensuite appliqué cela à l'aquifère calcaire du bassin hydrologique de St-Genis dans les Hautes-Alpes.

Pour vérifier qu'une partie des eaux d'un ruisseau s'infiltrer et alimente une source, il a effectué deux traçages successifs à l'iode, connu pour sa faible sensibilité aux phénomènes d'adsorption, mais aussi pour son dosage chimique assez délicat. L'iode est apporté sous forme de iodure de sodium. Les taux de restitution ont été de 92 et de 100 % et les courbes de concentration en fonction du temps obtenues sont assez précises pour fournir les différentes vitesses d'arrivées correspondant aux différents temps de séjour dans l'aquifère.

Ces expériences ont permis de confirmer les hypothèses avancées et de chiffrer précisément la fraction qui s'infiltrer et alimente la source et celle qui rejoint la nappe plus en aval.

### I.3 - TRAVAUX DE J. ROCHAT ET J.-C. FOURNEAUX SUR LE SITE DU SURAN

A la suite des travaux réalisés en laboratoire sur des traceurs fluorescents xanthéniques et des résultats obtenus, J. ROCHAT et J.-C. FOURNEAUX (1981) ont poursuivi ces études sur le comportement des traceurs dans les circonstances mêmes de leur utilisation sur le terrain. Leur but était de définir les possibilités d'utilisation de quatre corps fluorescents comme traceurs en hydrogéologie. Compte-tenu de leurs caractéristiques spectrales respectives, ils n'ont pas été utilisés simultanément dans le cadre d'un multitraçage.

Sur un site karstique connu où les débits pouvaient être mesurés et contrôlés, ces quatre traceurs ont été injectés, les conditions hydrodynamiques restant identiques pendant toute la durée des injections.

#### a) Le site

Le site choisi est le karst de la vallée du Suran, dans le département de l'Ain, dans la partie sud du Jura français. Il s'agit d'un réseau pelliculaire qui se développe dans un vaste synclinal, au sein des calcaires du Kimméridgien (voir figure n° 8). Dans la zone où les auteurs ont travaillé, le karst est en charge sous la couverture quaternaire. Mais ces dépôts ne sont pas très épais et, au niveau de la rivière, il existe de nombreuses relations avec le cours superficiel du Suran.

Pour un gradient compris entre 1 et 2 pour cent les vitesses de transit sont de l'ordre de 600 m/h (J.-C. FOURNEAUX et al., 1980).

#### b) Les traceurs étudiés

Les quatre traceurs utilisés sont : l'amidorhodamine G extra, l'amidorhodamine B, l'amidoflavine FFP et le jaune lanaperl 10 GFF.

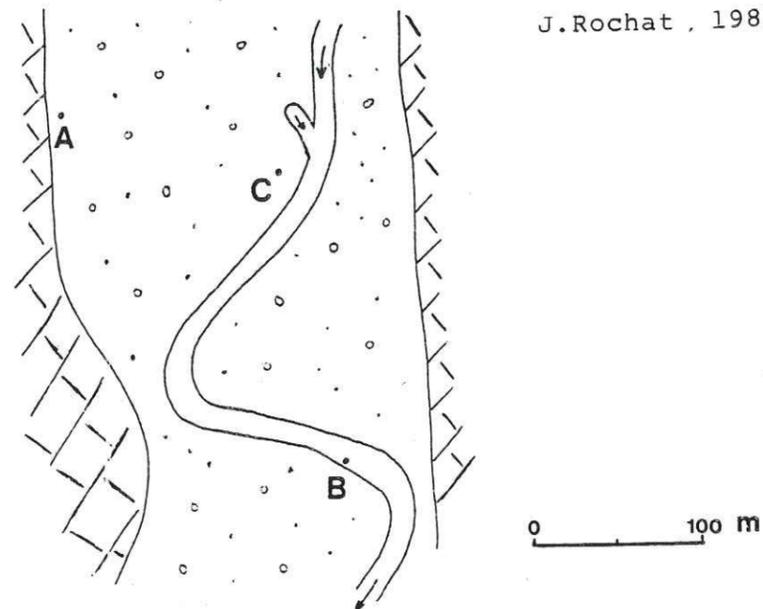
#### c) Opérations sur le terrain

Tout d'abord, le débit de l'écoulement karstique a été mesuré par la méthode au bichromate de potassium (J.-C. FOURNEAUX et al., 1980). Sa valeur est restée voisine de 630 l/s. Pendant toute la durée des opérations, la hauteur piézométrique a été suivie dans le piézomètre C (voir figure n° 8) afin d'apprécier les éventuelles variations des conditions hydrodynamiques.

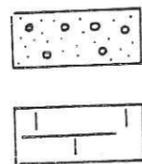
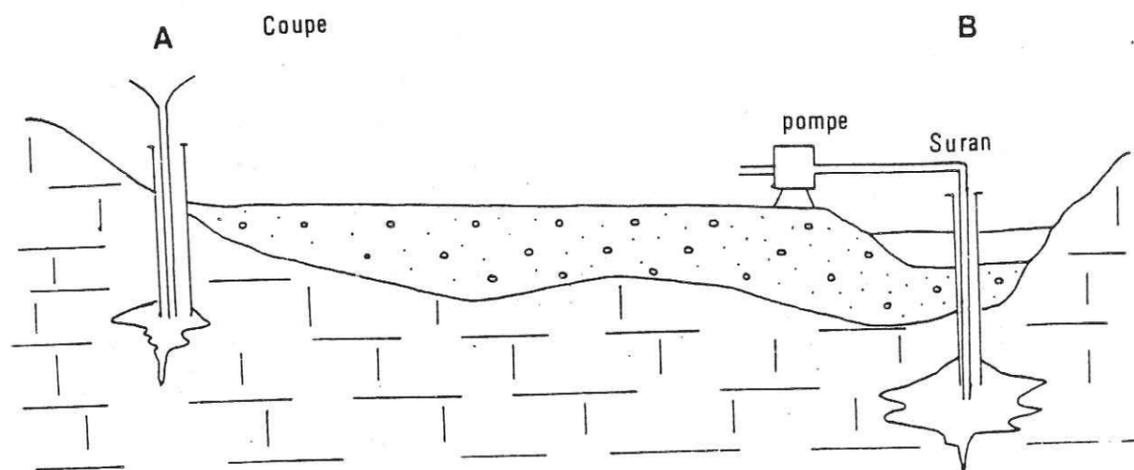
Cinq cents grammes de chacun des différents traceurs ont été injectés dans le piézomètre A par l'intermédiaire d'un tube plastique de 6 mètres de long afin d'atteindre directement le niveau de l'écoulement souterrain. Les prélèvements ont été effectués par pompage direct au niveau de l'écoulement souterrain, dans le piézomètre B. Leur fréquence a été d'un échantillon toutes les 6 mn pendant deux heures à partir du début de l'injection.

Figure n° 8 : Description du site du Suran (in J.C Fourneaux et

J.Rochat, 1981 )



Plan du site avec en A, le point d'injection, en B, le point de prélèvement et en C, le point de contrôle du niveau piézométrique



Quaternaire

Kimméridgien

Même légende pour A et B; vue en coupe du dispositif expérimental

d) Les résultats

Sur les quatre produits testés, trois ont donné des résultats satisfaisants. Le dosage de l'amido flavine a, par contre, conduit à des résultats aberrants.

TABLEAU N° 10 : les temps d'arrivée, les vitesses et les taux de restitution pour les différents traceurs (exprimés respectivement en minutes, en m/h et en pourcentages).

Traceur	Premières Arrivées	Arrivée du "pic"	Taux de restitution	V <sub>maxi</sub>	V <sub>moyenne</sub>	Vitesse maxi / Vitesse moyenne
Amido .B	15'	27'	68 %	1000 m/h	555 m/h	1,8
Amido .G	20'	27'	70 %	750 m/h	555 m/h	1,35
Jaune lanaperl	20'	27'	56 %	750 m/h	555 m/h	1,35

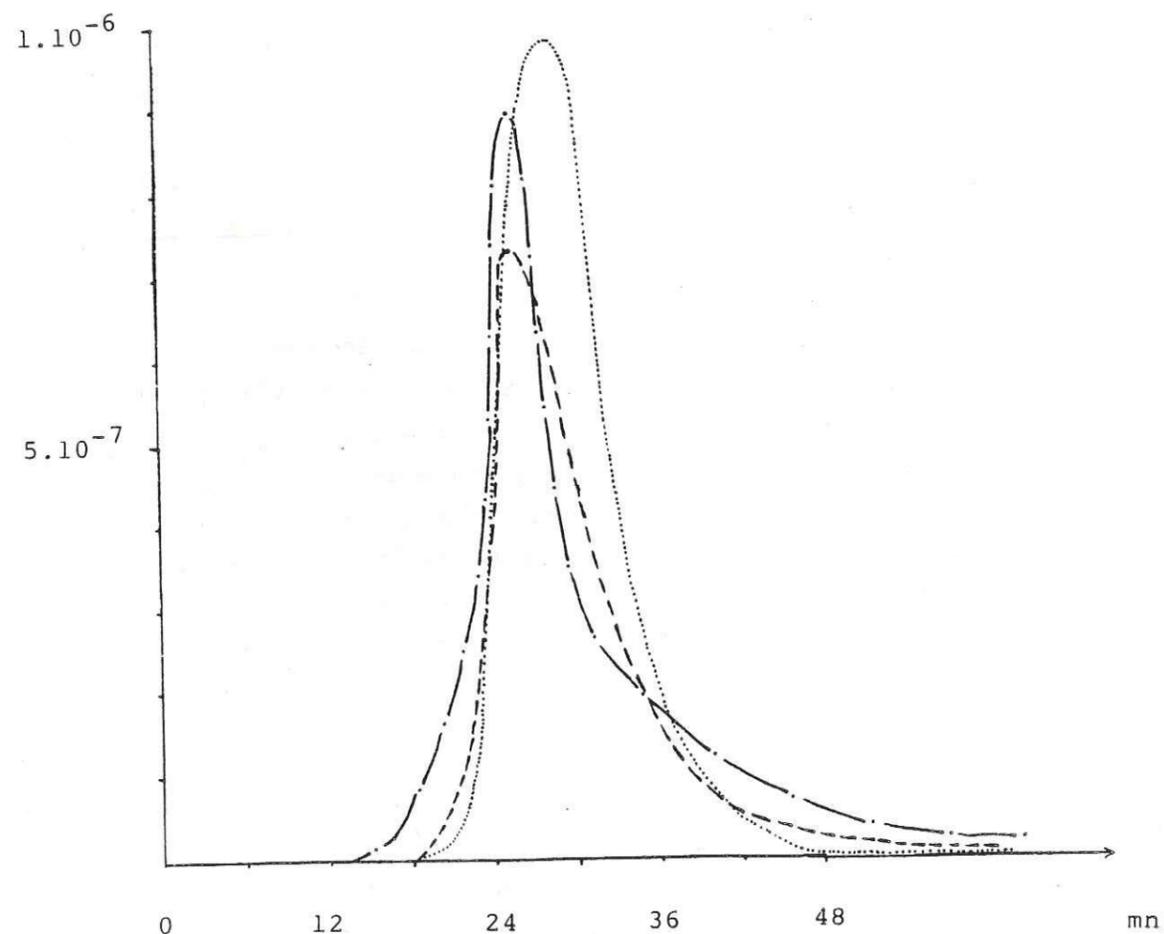
Les temps de transit et donc les vitesses d'arrivée, les concentrations et la forme des courbes de concentration, en fonction du temps des différents traceurs, sont très semblables (voir figure n° 9). Ceci confirme à la fois le bon mélange et la constance des conditions hydrodynamiques pendant la durée de l'expérimentation. Il est donc parfaitement possible de comparer entre eux les différents résultats obtenus. Le rapport de la vitesse maximale sur la vitesse moyenne sert à caractériser le milieu. Il sera comparé à ceux calculés pour des aquifères fissurés non karstiques (chapitre IV).

e) Discussion

Les amidorhod. B et G ont ici des performances identiques. Lors des travaux sur colonnes et de la mise en contact avec différents constituants du sol, elles avaient aussi des comportements semblables sauf pour la migration à travers la colonne de  $\text{CaCO}_3 + 3\%$  argile verte où l'amido G présentait un retard très net par rapport à l'amido.B. Compte tenu du mode d'injection directe dans l'écoulement et de la vitesse de

Figure n° 9: Courbes de concentration en fonction du temps obtenues sur le site du Suran.

..... amidorhodamine G  
 -.-.-.- amidorhodamine B  
 - - - - - jaune lanaperl



celui-ci, les temps de contact avec le terrain sont très limités (à l'inverse du milieu poreux de la colonne) et il ne peut pas se produire des phénomènes d'adsorption et de désorption importants. Les taux de restitution obtenus avec les deux amidorhodamines impliquent la disparition d'environ 30 % du produit dans les deux cas. Ce déficit ne peut pas être imputé à une adsorption étant donné les conditions d'injection. On peut aussi exclure l'existence d'eaux mortes vu la forme des courbes de concentration en fonction du temps. Si l'on admet une sous-estimation de 10 % du débit et une erreur de l'ordre de 10 % sur les taux de restitution, il manquerait encore plus de 10 % de la quantité de produit injecté.

Compte-tenu des résultats obtenus lors des travaux postérieurs, on peut envisager deux hypothèses pour expliquer ces taux de restitution : soit une adsorption des molécules de traceurs fluorescents par des particules d'argiles en suspension dans l'eau, soit une oxydation des molécules de traceurs par l'oxygène dissous dans l'eau du karst.

Le jaune lanaperl a des performances qui, bien qu'inférieures aux amidorhodamines G et B, n'en sont pas moins intéressantes et permettent d'envisager son utilisation comme traceur qualitatif. Mais sa moins bonne solubilité peut expliquer son faible taux de restitution. Il n'a toutefois pas fait l'objet d'études plus approfondies sur colonnes.

En ce qui concerne l'amidoflavine, les résultats obtenus traduisent une extinction quasi-totale de la fluorescence qui ne peut s'expliquer que par une modification de la molécule dans les conditions physico-chimiques de cette expérimentation. Elle n'a pas non plus été retenue pour des essais sur colonnes. L'allure des courbes de concentration en fonction du temps des trois traceurs (amidorhodamines B et G et Jaune Lanaperl) traduit un écoulement de type piston donc une dispersion très faible. D'une part, la dispersion transversale peut être considérée comme nulle. En effet, comme l'ont montré les mesures de débit au bichromate, toute l'eau qui s'écoule en A (au point d'injection) se retrouve en B. (figure n° 8). Il n'y a pas de circulation qui diverge vers un autre exutoire.

D'autre part, le nuage de traceur a été "cerné" en totalité, il est très ramassé sur lui-même, peu dilué et il n'y a qu'une infime partie

qui pourrait être passée sous le seuil de détection. La dispersion longitudinale (qui est représentée par l'étalement du nuage dans le temps) est donc très faible et ne doit pas être responsable des déficits de restitution enregistrés.

Comme il sera exposé dans le chapitre IV, cette dispersion longitudinale peut être chiffrée grâce à plusieurs coefficients (coefficient de dispersion longitudinale  $D_L$ , coefficient de dispersivité longitudinale  $\alpha_L$  et nombre de Péclet,  $Pe$ ).

Citons aussi R. CHARRIERE (1974) qui s'est intéressé aux traceurs fluorescents et a fait des études comparatives de leurs performances sur des sites de dimensions réduites.

## II - LES TRAVAUX PERSONNELS : Les essais de ST MICHEL DES PORTES

Au cours de l'été 1983 et du printemps 1984, j'ai testé six traceurs dont 4 fluorescents, sur un même site connu où je pouvais mesurer et contrôler les débits. Le but était de comparer le comportement de l'amidorhodamine B, l'amidorhodamine G, la rhodamine B, l'uranine, du bichromate de potassium et du chlorure de lithium, non plus sur colonnes mais en "grandeur nature" dans une portion d'aquifère constituée de calcaires et d'éboulis grossiers.

### II.1 - DESCRIPTION DU SITE

Le site choisi pour ces opérations de traçage est le bassin d'alimentation de la source de Font Noire sur le territoire de la commune de St Michel des Portes, à 10 km au sud-ouest de Monestier-de-Clermont (voir figure n° 10). La localisation de la source s'explique par l'existence d'un barrage constitué par les calcaires marneux du Jurassique supérieur. Les eaux sortent en amont de ce barrage au sein d'éboulis grossiers. En amont de la source, les versants sont entièrement tapissés d'éboulis. En particulier, en rive droite, on observe d'énormes blocs provenant de l'éboulement de la barre calcaire tithonique au Nord de la tête de Papavet.

Cette source est alimentée directement, en partie au moins, par les infiltrations du ruisseau. L'autre partie proviendrait d'une faille au sein des calcaires jurassiques. Les relations entre la source et le ruisseau avaient déjà été mises en évidence lors d'une précédente étude. (BIJU-DUVAL, 1983). Les infiltrations se font dans le lit du ruisseau des Pellas (voir figure n° 10) entre le pont coté 965 m et la source de Font Noire.

### II.2 - LES EXPERIENCES

Les six traceurs étudiés ont tous été injectés dans le ruisseau des Pellas, au niveau du pont coté 965 m, à une distance de 550 m environ en amont de la source. Au moment de chaque injection, les débits de la source et du ruisseau au niveau de la source ont été mesurés au micro-moulinet.

Dans tous les cas, les prélèvements ont eu lieu d'une part à la source et d'autre part dans le ruisseau au niveau de la source, sauf en ce qui concerne le traçage à l'amidorhodamine G pour lequel seule la source a été surveillée. En effet, cette expérience avec de l'amidorhodamine G, effectuée par la D.D.A. de l'Isère (J. BIJU-DUVAL, 1983) avait pour but uniquement de préciser les relations ruisseau-source. Les prélèvements n'avaient donc été faits que sur la source.

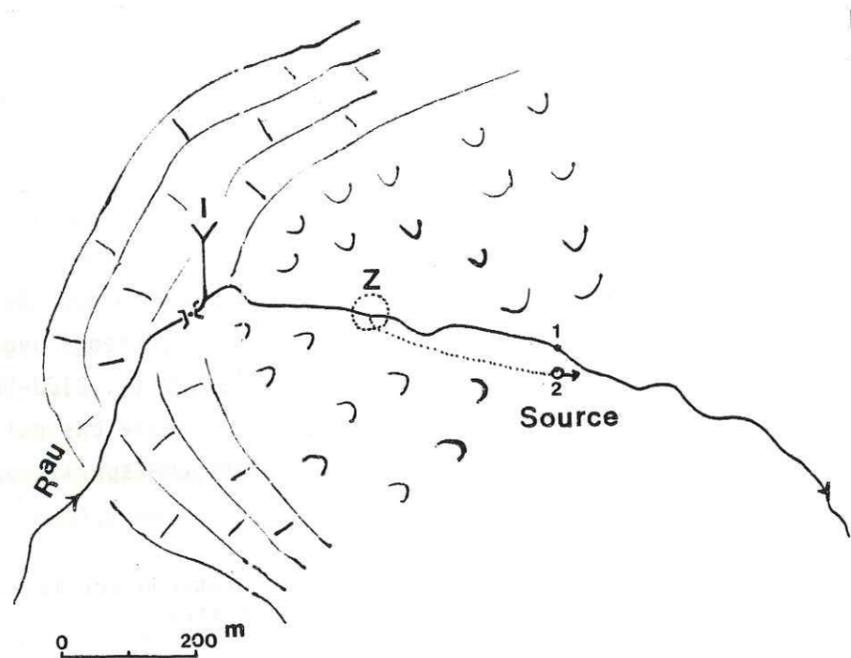
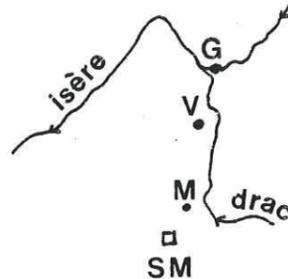
TABLEAU N° 11 : tableau des opérations sur le site de St Michel des Portes

Traceur	Masse de traceur injectée	Date de l'injection	Débit de la source au moment de l'injection	Débit du ruisseau au niveau de la source au moment de l'injection
Sulfo G	220 g	4.7.83	90 l/s	73 l/s
Uranine	220 g	19.3.84	130 l/s	215 l/s
Rhod. B	220 g	23.3.84	135 l/s	290 l/s
Amido.B	320 g	10.4.84	150 l/s	450 l/s
Bichromate de Potassium	1800 g	10.4.84	150 l/s	450 l/s
LiCl	2000 g	10.4.84	150 l/s	450 l/s

Figure n°10: Localisation et plan du site de St Michel des Portes.

Légende :

G: Grenoble  
V: Vif  
M: Monestier de Clermont  
SM: St Michel des Portes



I : point d'injection des traceurs

Z : zone d'infiltration du ruisseau et trajet des eaux souterraines. Gradient entre "Z" et "1,2" : 10 %.

1 : point de prélèvement dans le ruisseau des Pellas.

2 : " " " " à la source de Font Noire.



Jurassique supérieur calcaire



Eboulis grossiers

L'erreur sur les valeurs des débits est estimée environ à 5 %. Pour chaque opération, des prélèvements ont été effectués toutes les 5 minutes pendant 3 heures, puis toutes les 10 minutes pendant 1 heure et toutes les 20 minutes pendant 2 heures, soit au total pendant 6 heures.

### II.3 - LES RESULTATS

Les temps d'arrivée du maximum de concentration (c'est-à-dire les temps d'arrivée des "pics"), les vitesses moyennes d'écoulement, les taux de restitution, à la source et dans le ruisseau sont présentés dans le tableau n° 12.

TABLEAU N° 12 : les résultats des essais de St Michel des Portes

Traceur	Arrivée du pic au ruisseau	Arrivée du pic à la source	Vitesse moy. dans le ruisseau	Vitesse moyenne à la source	Taux de restitution au ruisseau	Taux de restitution à la source	Taux de restitution total
Amido . G	55'	150'	600 m/h	144 m/h	-	20 %	-
Uranine	55'	140'	600 m/h	156 m/h	68 %	25 %	93 %
Rhod. B	40'	140'	820 m/h	147 m/h	70 %	7 %	77 %
Amido . B	30'	130'	1100 m/h	155 m/h	88 %	5 %	93 %
Bichromate	30'	130'	1100 m/h	155 m/h	92 %	8 %	100 %
Lithium	30'	130'	1100 m/h	155 m/h	82 %	6 %	88 %

Les temps d'arrivée sont exprimés en minutes. Les vitesses moyennes dans le ruisseau sont calculées sur une distance de 550 m (= distance entre le point d'injection et le point de prélèvement), avec une erreur de 5 % environ. Les vitesses moyennes d'écoulement des eaux souterraines vers la source sont calculées en tenant compte du fait que la zone d'infiltration

se situe à une distance d'environ 300 m en amont de la source. L'erreur est aussi de 5 %, ainsi que celle faite sur les taux de restitution. Le gradient entre la zone d'infiltration et la source est de 10 %

Les courbes de concentration en fonction du temps sont représentées sur les figures n° 11 et n° 12.

Il est difficile de comparer le comportement des différents traceurs entre eux car les débits et donc les conditions hydrodynamiques ont considérablement varié tout au long de cette campagne de traçages. On peut toutefois noter quelques points intéressants qui confirment les résultats obtenus lors d'expériences antérieures.

#### II.4 - DISCUSSION

##### II.4.1. La restitution dans le ruisseau

Tout d'abord, les courbes concentration/temps observées au ruisseau présentent toutes un pic parfaitement marqué et ont toutes la même forme. Ceci montre qu'il y a un "bon mélange".

Les taux de restitution observés dans le ruisseau sont élevés (de 68 à 92 %) ce qui est normal étant donné les vitesses assez fortes et le trajet relativement court (550 m pendant 1/2 heure). Ce temps de parcours ne suffit pas pour qu'une forte proportion de traceur fluorescent soit détruite par la lumière.

##### II.4.2. La restitution à la source

Les taux de restitution à la source sont compris entre 6 et 25 % suivant le traceur utilisé. L'Amidorhodamine G et l'uranine présentent les taux les plus élevés (20 et 25 %).

Lors de la première campagne de traçages faite par J. BIJU-DUVAL, seulement 1 % de la masse d'uranine injectée avait été retrouvée à la source (le débit de la source était alors de 95 l/s). Ce faible taux de

Figure n° 11: Courbes de concentration en fonction du temps  
obtenues à St Michel des Portes.

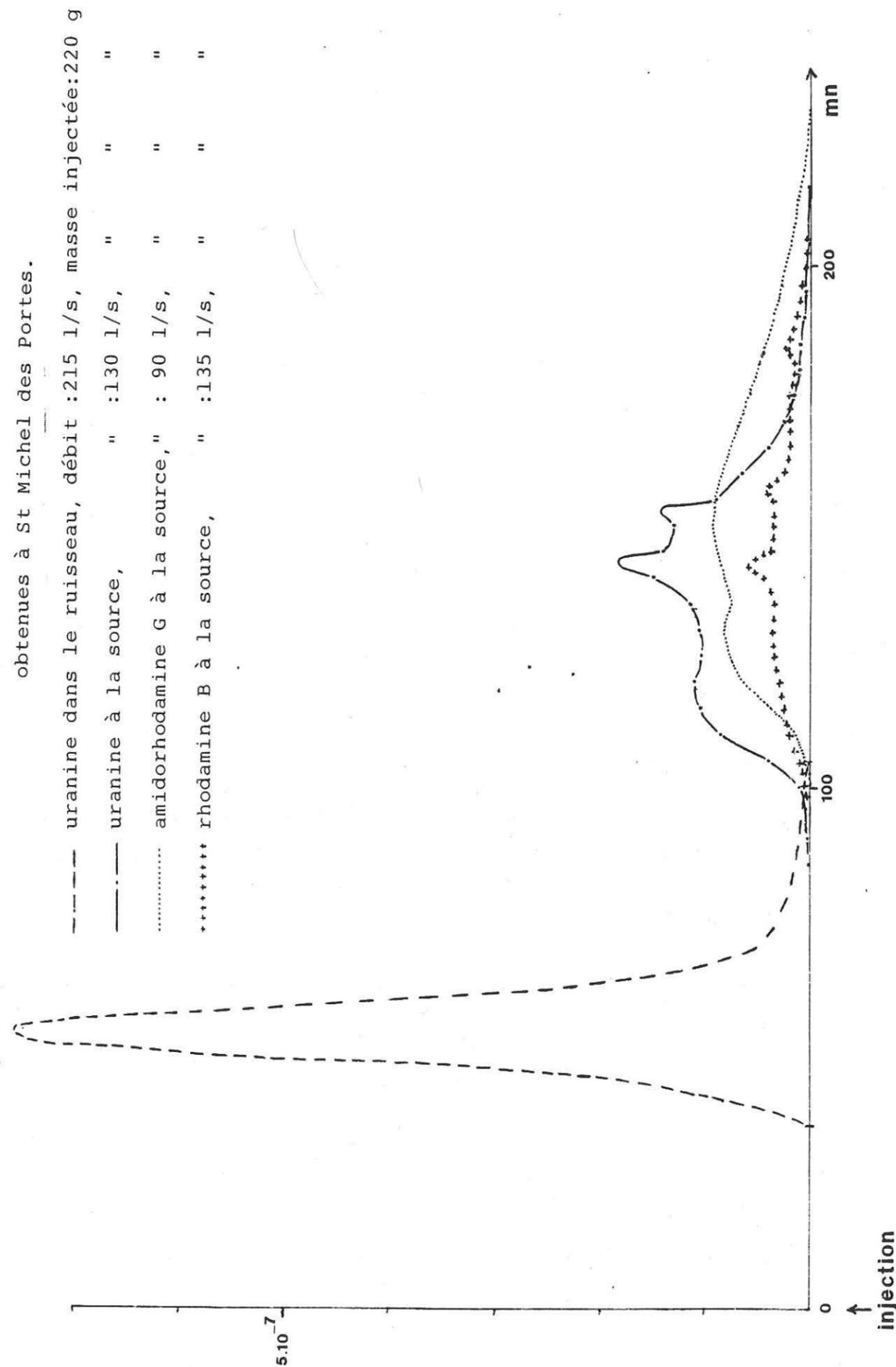
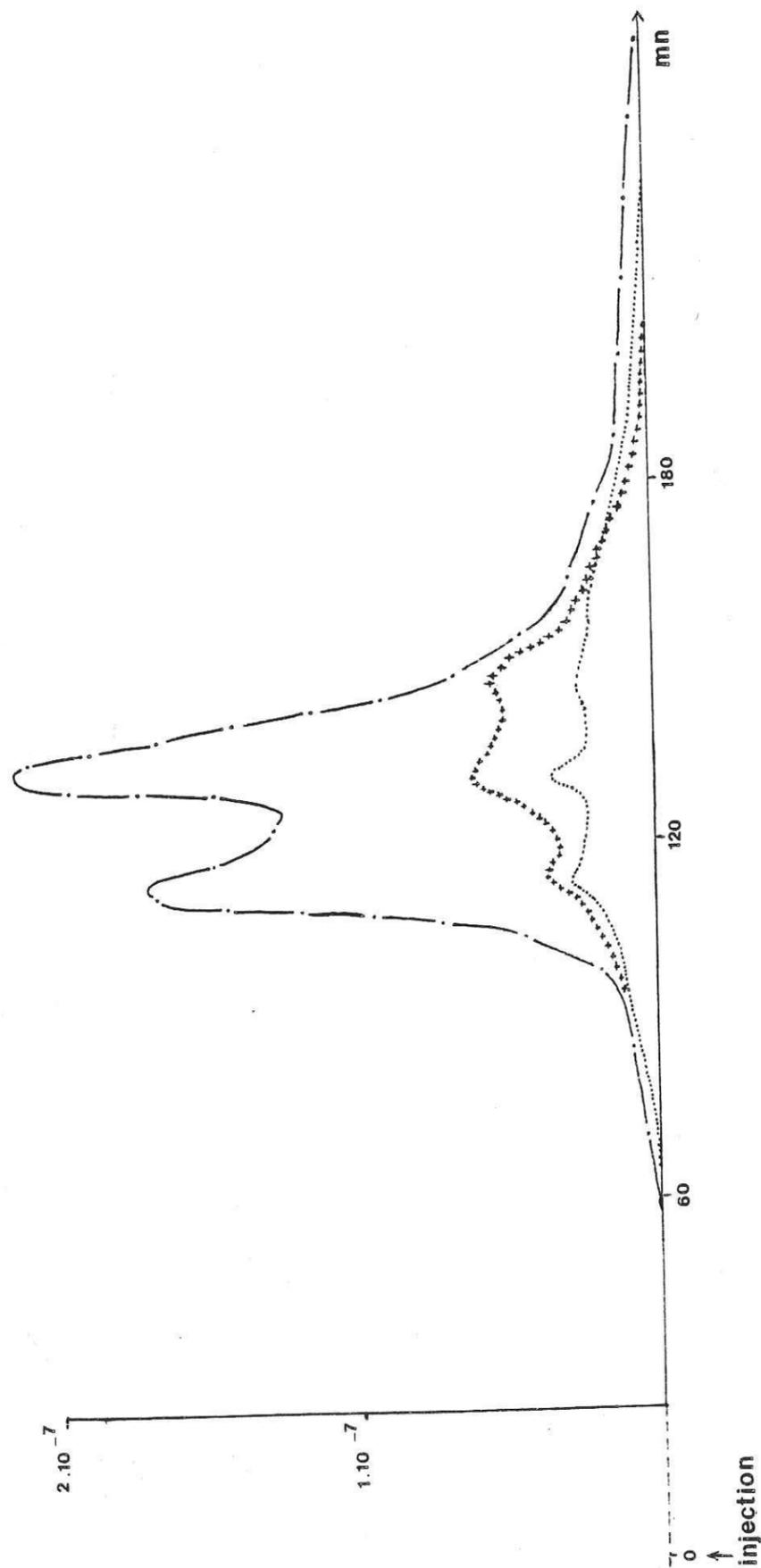


Figure n°12: Courbes de concentration en fonction du temps obtenues à St Michel des Portes, pour un débit à la source de 150 l/s.

— · — · — ·	bichromate à la source, masse injectée : 1800 g
+++++	lithium " " : 330 g (2000g de LiCl)
.....	amidorhodamine B " " : 320 g



restitution ne peut être dû à la fixation par le terrain (comme cela avait été invoqué à l'époque), puisque dans des conditions hydrodynamiques semblables lors de la nouvelle opération de traçage, le taux est de 25 %. Mais peut-être y avait-il eu un mauvais mélange lors de l'injection ou piégeage par des eaux mortes dans le ruisseau.

Les courbes concentration/temps, obtenues à la source, présentent toutes deux ou trois pics plus ou moins marqués. Ceci indique qu'il existe plusieurs zones d'infiltration à partir desquelles l'eau circule à des vitesses différentes. Ces zones d'infiltration semblent se trouver à mi-chemin environ entre le point d'injection et la source. Ceci est appuyé par le fait qu'au cours du mois d'août 1983, le ruisseau des Pellas avait complètement tari au niveau de la source de Font Noire et l'on pouvait observer, 300 m en amont, une série de dépressions dans les galets dans laquelle le ruisseau (dont le débit était à cet endroit de 34 l/s) s'infiltrait, (BIJU-DUVAL, 1983). Si l'on considère que le trajet des traceurs dans le ruisseau est de 250 m et que le parcours souterrain est de 300 m, le calcul des vitesses au sein des éboulis donne des valeurs très voisines, (de l'ordre de 150 m/h) quelque soit le débit du ruisseau et quelque soit le traceur utilisé. Ceci montre que le débit d'infiltration reste à peu près constant à partir d'une certaine valeur du débit du ruisseau (de l'ordre de 200 l/s). On observe d'ailleurs souvent ce phénomène dans les cônes de déjection : le débit qui s'infiltrate atteint une valeur limite à partir de laquelle les écoulements superficiels n'ont plus d'influence (CARRET J-P. et FOURNEAUX J-C., 1979).

#### II.4.3. La Restitution globale

Si l'on considère le taux de restitution globale (source et ruisseau), on s'aperçoit qu'il ne varie pas beaucoup d'un traceur à l'autre. Le plus faible, 77 %, est celui de la rhodamine B, dont la sensibilité aux phénomènes d'adsorption-désorption a été démontrée (voir chapitre I). Notons cependant que, durant son parcours souterrain dans les éboulis, elle n'est pas plus retenue que les autres traceurs. Ces résultats ne concordent pas avec ceux obtenus lors des travaux sur colonnes. Pourtant le terrain ici est bien un milieu poreux calcaire avec des particules

d'argiles. La rhodamine B se distinguait des autres traceurs (lithium et traceurs xanthéniques) par un retard considérable, ce qui n'est pas le cas ici. Ceci est peut-être dû au transit rapide à travers les éboulis grossiers et aux surfaces de contact beaucoup plus réduites, comme cela avait déjà été remarqué par C. DROGUE (1971).

Quant au taux de restitution dans le ruisseau, légèrement plus faible pour la rhodamine B que pour les autres traceurs, il serait dû à une adsorption par des particules d'argiles en suspension, étant donné la légère crue du moment.

L'amidorhodamine B a une restitution comparable à celle du lithium tant au point de vue vitesse d'arrivée que pourcentage de masse restituée.

Le lithium n'est pas plus retenu que les autres traceurs contrairement à ce qu'avait obtenu B. GAILLARD sur sa parcelle expérimentale.

Le bichromate de potassium est le seul, des six traceurs utilisés, qui soit restitué à 100 %. Ceci confirme le fait qu'il peut être utilisé pour mesurer des débits souterrains (en milieu karstique par exemple, comme l'a fait J.-C. FOURNEAUX, 1980).

Au cours des études faites sur le Suran (J.-C. FOURNEAUX et J. ROCHAT, 1981), le taux de restitution de l'amidorhodamine B était de 70 % environ, il est ici de 93 %, ce qui en fait un bon traceur à utiliser surtout lorsque les vitesses sont élevées (de l'ordre de 150 m/h, ici). De même, l'uranine et l'amidorhodamine G ont des performances identiques et ne sont pas plus retenues l'une que l'autre, dans les mêmes conditions hydrodynamiques.

Les différences entre mes résultats obtenus à St Michel des Portes et ceux de B. GAILLARD sur sa parcelle expérimentale tiennent peut-être au fait que les vitesses dans les éboulis grossiers sont beaucoup plus fortes que celles observées dans les nappes alluviales (ici, 100 fois plus élevées).

### III - CONCLUSION

Ces expériences nous ont montré que le taux de restitution des traceurs fluorescents et du lithium est rarement de 100 % lors des opérations sur le terrain. Seul le bichromate de potassium est restitué entièrement. Tandis que lors des travaux en laboratoire sur colonnes, des taux de 100 % sont souvent atteints tant pour les produits fluorescents que pour le lithium.

En ce qui concerne le lithium, les résultats que j'ai obtenus sont en contradiction avec ceux présentés par B. GAILLARD. Rien n'explique, pour l'instant, cette différence, sauf peut-être les écarts des vitesses.

Les essais sur colonne permettent de mieux cerner les conditions hydrodynamiques et physicochimiques et ceci a une influence sur le calcul des taux de restitution. Ces calculs sont souvent plus aléatoires lors des essais sur le terrain.

Résumons les causes responsables de ces défauts de restitution. Elles correspondent à des phénomènes physiques, chimiques et biologiques :

Tout d'abord, les phénomènes d'adsorption, qui sont d'autant plus importants que les surfaces de contact sont grandes. De même, plus le temps de transit est long, plus les interactions avec le milieu peuvent se produire. En effet, si la vitesse moyenne d'écoulement est assez forte (comme c'était le cas à St Michel des Portes), les temps de contacts sont réduits, ce qui limite les phénomènes d'adsorption, même en milieu poreux. Cette adsorption est liée au caractère ionique des molécules de traceur xanthéniques (par exemple, les argiles échangeuses de cations retiennent les molécules de rhodamine B).

L'adsorption est plus ou moins définitive. En effet, elle peut être suivie d'une désorption qui, dans certains cas, est suffisamment importante pour permettre au taux de restitution de ne pas chuter. Par exemple, lorsque la rhodamine B migre à travers une colonne de  $\text{CaCO}_3$  + 5 % d'acide humique, son taux de restitution est de 50 % seulement. La moitié de la rhodamine B est donc retenue par l'acide humique d'une façon définitive, mais l'autre moitié va être restituée en une dizaine d'heures. Par contre, la rhodamine B

met plus de 150 h pour traverser une colonne de  $\text{CaCO}_3$  + 3 % d'argile verte mais elle est restituée à 75 %, c'est-à-dire qu'une partie du traceur a été retenue par l'argile un certain temps, mais ces liaisons intermoléculaires sont temporaires et elle est restituée avec du retard. Ce retard est facilement mesurable dans de telles expériences en laboratoire, mais sur le terrain, lors des opérations de traçage, il peut devenir considérable et entraîner des erreurs dans le calcul des taux de restitution car on n'obtient alors qu'une partie de la courbe concentration/temps. Il faudrait prélever pendant un temps très long pour obtenir toute la "queue" de la courbe. Et malgré cette précaution, il y aurait toujours une part importante du nuage qui passerait sous le seuil de détection.

A St Michel des Portes, la photodégradation des traceurs fluorescents injectés dans le ruisseau, peut aussi être la cause du léger défaut de restitution (5 à 10 %) -(RERAT, 1976).

Le pH de la solution injectée joue un rôle important. Une augmentation du pH (jusqu'à 10 ou 11) au moment de l'injection, favorise un transit plus rapide à travers le terrain en limitant l'adsorption. Mais lors d'une opération de traçage, l'addition de soude au point d'injection ne suffit pas à augmenter le pH d'une façon notable tout au long du parcours dans l'aquifère.

Comme nous l'avons vu lors de la mise en contact avec des oxydes de fer et d'aluminium, les traceurs fluorescents peuvent être adsorbés par les hydroxydes  $\text{Al}(\text{OH})_3$  et  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  à des pH voisins de 6-7, ou être oxydés et perdre une partie ou toute leur fluorescence si la molécule est détruite.

Enfin, des phénomènes de biodégradation peuvent être la cause des défauts de restitution surtout lorsque le milieu ne permet pas la filtration comme dans le cas d'éboulis grossiers ou de chenaux karstiques.

Si un bon nombre des résultats obtenus au cours de ces expériences, à la fois en laboratoire et sur le terrain, s'expliquent, il n'en reste pas moins qu'il faudrait encore affiner les travaux sur colonnes (avec d'autres composants du sol, d'autres proportions et à des pH variés) pour mieux comprendre le comportement des traceurs fluorescents et du lithium.

Une bonne connaissance du comportement physico-chimique du traceur vis-à-vis des constituants du terrain ne suffit pas pour faire du traçage quantitatif.

La détermination de certaines caractéristiques des aquifères, en particulier la dispersivité du milieu, ne peut s'obtenir que si l'opération se déroule dans certaines conditions et avec certaines précautions, notamment en ce qui concerne l'injection, les prélèvements et l'analyse des courbes de concentration en fonction du temps.

Dans le prochain chapitre, il va tout d'abord être proposé une méthodologie à suivre qui permettra de fournir le plus d'informations hydrogéologiques possible. Il en est ensuite présenté plusieurs applications, tout d'abord en milieu calcaire fissuré puis en milieu composite.

\*  
\* \*

---

DEUXIEME PARTIE

---

ETUDE QUANTITATIVE DES AQUIFERES FISSURES  
PAR LA METHODE DES TRAÇAGES

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE ET EXEMPLES DE TRAÇAGE  
EN MILIEU CALCAIRE FISSURÉ ET EN MILIEU COMPOSITE

Introduction

I - Méthodologie

II - Exemples de multitraçage en milieu calcaire fissuré

III - Etude d'aquifères complexes par la méthode des traçages

IV - Conclusion

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

Une approche des caractéristiques d'un aquifère fissuré, en particulier de la dispersivité, nécessite la mise en oeuvre de traçages dans des conditions bien définies. Comme nous le verrons tout d'abord, il importe que la zone fissurée soit concernée par le traceur et pas seulement les chenaux, comme c'est le cas le plus souvent. Il est souhaitable de pouvoir poursuivre les prélèvements assez longtemps pour espérer voir passer la "queue" du nuage.

Une analyse précise des échantillons permettra, seule, une approche quantitative du signal de sortie. En particulier, plus l'appareil est sensible, plus on limite les erreurs sur les taux de restitution.

Nous allons voir en détail cette méthodologie qui sera illustrée par plusieurs exemples et qui débouchera ensuite sur l'étude quantitative des caractéristiques hydrodispersives des aquifères fissurés et complexes.

### I - METHODOLOGIE

Rappelons tout d'abord ce qui caractérise un milieu fissuré.

Un milieu fissuré peut être représenté par le modèle classique où l'on distingue trois niveaux de circulations :

- Des circulations rapides se font dans des drains, des chenaux, ou des fractures ouvertes.
- Des circulations beaucoup plus lentes existent dans des fissures millimétriques à centimétriques.
- Enfin, dans les microfissures et les pores, il ne s'agit plus de circulations mais plutôt de rétention. Ce type de zone peut constituer un réservoir considérable où des traceurs peuvent être piégés.

Les conditions lithologiques et structurales déterminent l'importance relative de ces trois niveaux dont la proportion peut varier énormément d'un aquifère à l'autre et même d'un point à l'autre d'un même aquifère.

Dans la plupart des cas, lors d'un traçage, l'injection se fait en un point en relation avec un drain important. Le trajet du traceur ne concerne alors que les circulations du niveau I (voir figure n° 13).

Si l'on veut obtenir des informations sur les circulations dans le niveau II, il faut injecter le traceur directement dans cette zone. C'est bien évidemment dans les niveaux II et III surtout qu'interviennent les phénomènes d'adsorption et de désorption entraînant des retards considérables et des déficits importants dans la restitution.

Une opération de traçage consiste, en simplifiant, à injecter un signal d'entrée dans un aquifère et à mesurer le signal de sortie correspondant quelque part en aval. Si l'aquifère est, en général, assimilé à un modèle "boîte noire", il est pourtant possible d'obtenir des informations sur les conditions de circulations des eaux au sein du milieu traversé, par l'analyse de ce signal de sortie. L'existence de plusieurs signaux, s'il y a plusieurs points de mesure, apporte encore plus d'éléments.

Une étude géologique et éventuellement photogéologique doit toujours précéder une opération de traçage, celle-ci ne servant qu'à vérifier des hypothèses déjà mises en avant.

Un traçage comporte plusieurs étapes qui sont les suivantes :

- tout d'abord, l'injection (c'est-à-dire le signal d'entrée) puis le transfert du signal au sein de l'aquifère, enfin les prélèvements et les analyses des échantillons et surtout, l'étude des courbes de concentration en fonction du temps, c'est-à-dire l'analyse du signal de sortie.

Cette dernière étape permet de connaître la répartition spatiale du traceur, c'est-à-dire la dispersion dans l'espace (ou transversale) ainsi que les vitesses (vitesses moyennes d'écoulement et vitesses des premières arrivées) à partir desquelles on peut exprimer la dispersion dans le temps (ou longitudinale).

Nous verrons plus loin que les différents coefficients de dispersivité longitudinale peuvent être calculés pour les expériences sur colonnes en laboratoire et comparés à ceux obtenus dans les aquifères fissurés.

Chaque courbe de concentration en fonction du temps sera donc définie par un coefficient qui lui-même caractérisera le milieu traversé.

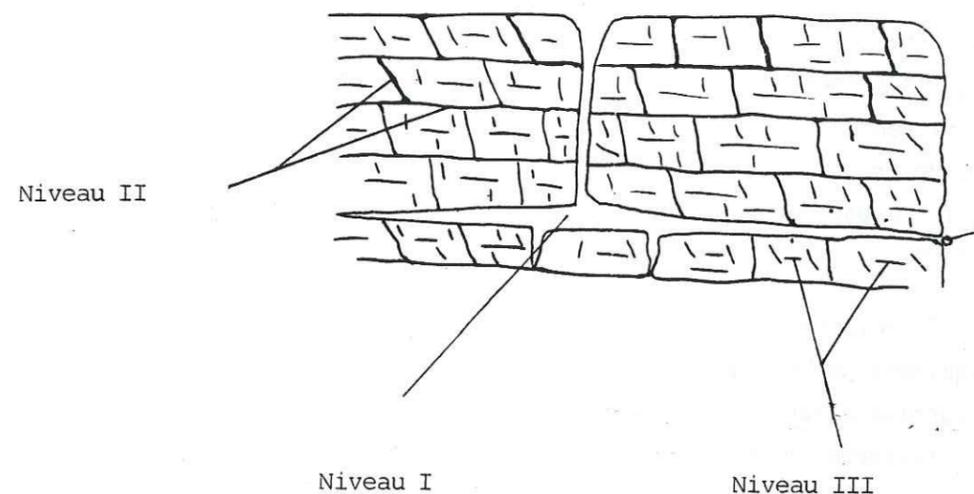


Figure n° 13 : Les trois niveaux de fissuration dans un aquifère fissuré

- Niveau I : fractures ouvertes
- Niveau II : fractures et fissures
- Niveau III : microfissures et pores de la roche

### A) L'INJECTION

Dans la plupart des cas, pour des raisons évidentes de facilité, l'injection du traceur est faite dans une perte active qui, le plus souvent, est en relation aisée avec un drain important ou tout au moins, avec une zone à circulation préférentielle. A l'exutoire, l'analyse de la concentration du traceur en fonction du temps va donner une courbe unimodale (voir figure n° 15 a et 15 b) avec une montée rapide de la concentration suivie d'une décroissance plus ou moins lente selon la distance parcourue.

La concentration du pic est relativement élevée par rapport à celle de la fin de la courbe (20 à 100 fois plus élevée). Dans ce cas là, le trajet du traceur ne concerne pas l'ensemble de l'aquifère mais uniquement un "chenal" à forte perméabilité (niveau I - figure n° 13). Ceci n'exclut pas l'existence d'une zone noyée. Mais celle-ci est très peu sollicitée et le traceur transite uniquement dans des chenaux où la vitesse est relativement forte par rapport à la vitesse moyenne d'écoulement au sein de l'aquifère.

En revanche, s'il est possible d'injecter le traceur dans une zone de l'aquifère peu ou pas sollicitée par un drain important, à un endroit où la surface piézométrique a une pente faible, le traceur va pénétrer dans la zone fissurée (niveaux II et III - figure n° 13). Les situations seront différentes selon que l'on est en période de hautes eaux ou de basses eaux.

Précisons tout d'abord ces deux notions :

- on peut considérer que la période de hautes eaux correspond à la crue sur un hydrogramme et celle de basses eaux à la décrue (figure n° 14 a et b).

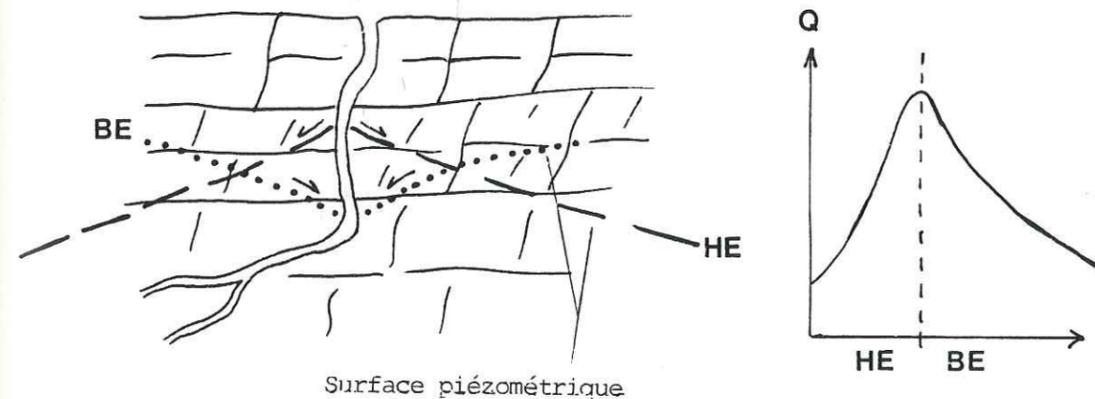


Figure n° 14 a

Figure n° 14 b

Figures n° 14 a et 14 b : Schématisation des phénomènes de crue et de décrue en milieu fissuré

En HE, la pression dans le niveau I (voir figure n° 13) est plus forte que celle dans le niveau II. Les circulations se font dans le sens fractures ouvertes vers fissures. Puis, au moment de la décrue, le réservoir constitué par les fissures se vidange dans les chenaux qui jouent alors le rôle de drains.

Si l'injection se fait dans une perte active, à proximité d'un drain important, en période de décrue, la courbe de concentration en fonction du temps présentera une montée rapide puis une décroissance exponentielle selon la loi :  $C(t) = C_0 e^{-\alpha t}$ .

$\alpha$  est fonction du débit dans le chenal (figures n° 15 a et n° 15 b). S'il y a plusieurs conduits, la courbe de concentration en fonction du temps présentera plusieurs pics (figure n° 15 c).

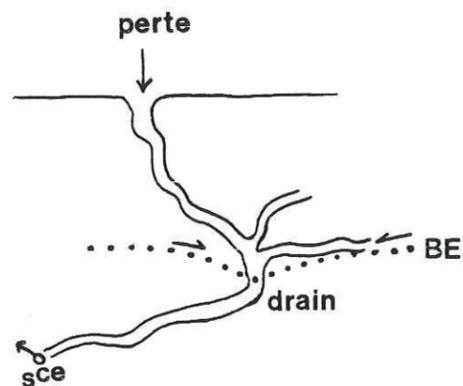


Figure n° 15 a : Injection dans une perte active en relation avec un drain.

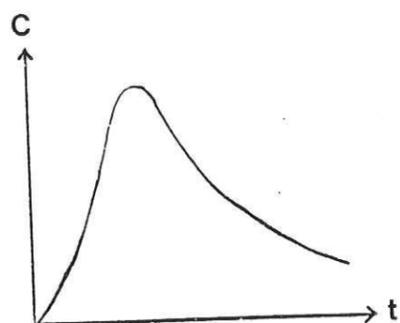


Figure n° 15 b : Courbe de concentration en fonction du temps obtenue lors d'une injection dans une perte en relation avec un drain actif.

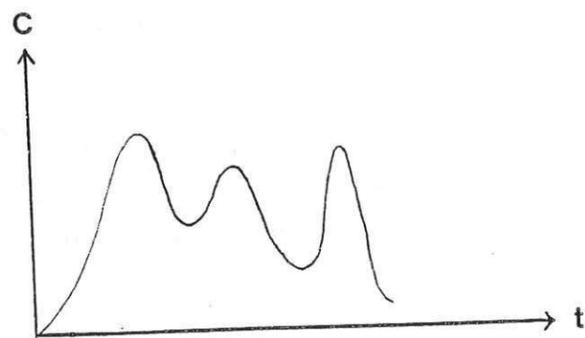


Figure n° 15 c : Courbe de concentration en fonction du temps obtenue dans le cas où il existe plusieurs cheminements possibles.

Si l'injection se fait directement dans les niveaux II et III, (de la figure n° 13), en période de crue, le traceur va se trouver dispersé et dilué dans le réseau de fissures.

L'allure de la courbe de concentration en fonction du temps est très différente du cas précédent (voir figure n° 16, a, b, c). Elle ne présente plus de pics bien marqués et les concentrations maximales sont peu différentes de la concentration moyenne. De plus, le temps de passage du nuage est beaucoup plus long.

Figure n° 16 a :  
Etat initial (en hautes eaux)

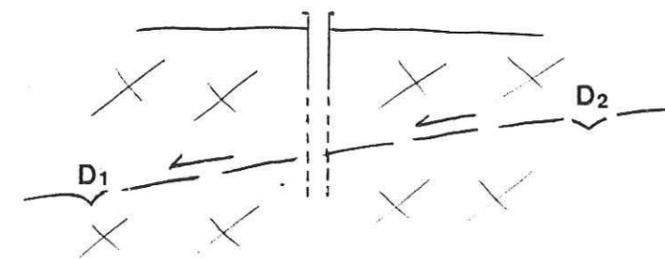


Figure n° 16 b :  
Etat pendant l'injection

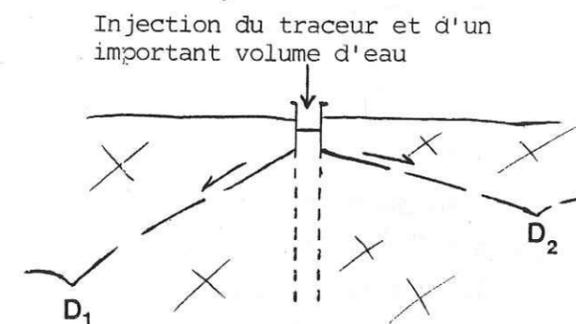
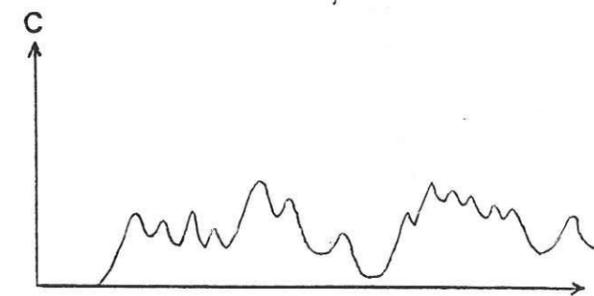


Figure n° 16 c :

Allure de la courbe de concentration en fonction du temps, obtenue lors d'une injection qui s'est faite directement dans la zone fissurée



Figures n° 16 a, b, c : Cas d'une injection directe dans la zone fissurée

### Le rôle de la surcharge :

Si l'injection se fait en un point où il n'existe pas d'écoulements, dans un forage ou dans une fouille, il faut pousser le traceur avec un volume d'eau important. L'infiltration rapide de ce volume d'eau crée une surcharge temporaire dans l'aquifère (*figure n° 17*).

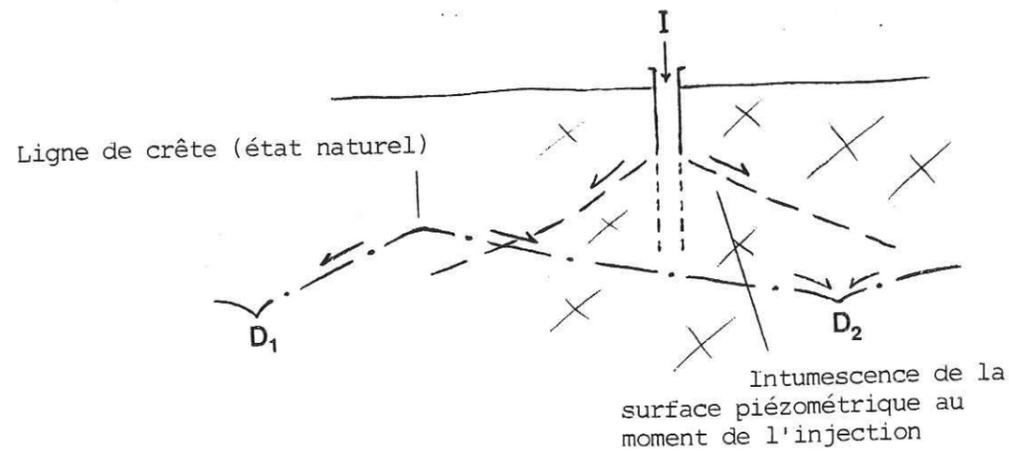


Figure n° 17 : Surcharge temporaire créée au moment de l'injection

Cette surcharge temporaire peut déformer la surface piézométrique à un point tel qu'il peut se produire des écoulements divergents (*figure n° 17*). Le traceur injecté en I va se retrouver en D<sub>1</sub> et D<sub>2</sub> alors qu'à l'état naturel, le point I est situé dans le bassin drainé par D<sub>2</sub>. C'est ce qui a été observé sur le site de la Roquebrussane dans le Var et sur le plateau de Crémieu dans l'Isère (voir § II). Dans tous les cas, l'existence de cette intumescence de la surface piézométrique va favoriser la dispersion du traceur et provoquer une dilution très marquée. Ceci n'est vrai que si le point d'injection n'est pas en relation directe avec une zone à forte perméabilité (chenal, fracture ouverte).

### B) ANALYSE DU TRANSFERT DU TRACEUR AU SEIN DU MILIEU FISSURE

Le transfert du traceur se fait soit dans la zone non saturée, soit dans la zone saturée, soit dans les deux zones successivement. Le trajet qu'il suit peut être représenté par deux composantes, l'une verticale, l'autre horizontale.

#### 1 - Le transit dans la zone non saturée

Dans la zone non saturée, la composante verticale est prédominante. Le temps de transit y varie selon les conditions d'injection. Il est très bref si l'injection se fait dans un forage qui atteint la zone noyée (comme sur les sites du Suran - chapitre II - § I.3 - ou de la Roquebrussane - chapitre III, § II.C) - où le traceur traverse directement la zone non saturée sans y être dispersé) mais beaucoup plus long si l'injection a lieu dans une fracture comme sur le plateau de Crémieu (chapitre III, § IIA)). Dans ce dernier cas, le transfert se fait plus ou moins verticalement dans la zone non saturée, le traceur suivant un trajet imposé par les fractures. A ce stade, selon l'orientation des fractures, le nuage peut se trouver plus ou moins dispersé avant d'atteindre la zone noyée (*figure n° 18 a*). Ce mode d'injection entraîne donc une dispersion longitudinale qui va se traduire à la restitution par une augmentation du temps de passage du nuage. La dispersion peut se faire aussi dans le plan horizontal (dispersion transversale) dans la zone non saturée. C'est ainsi que les deux traceurs injectés ont été retrouvés à toutes les sources sur tout le pourtour du plateau de Crémieu.

Si, au moment de l'injection ou juste après, il y a de fortes précipitations, le transit à travers la zone saturée est beaucoup plus rapide, il y a moins de possibilités de piégeage du traceur et les phénomènes d'adsorption sont limités.

#### 2 - Le transit dans la zone saturée

La composante horizontale y est prédominante. A partir du moment où le traceur atteint la zone saturée, il va suivre grossièrement la pente de la nappe qui est assez faible en général (quelques pourcents au plus).

Si l'injection se fait directement dans la zone saturée (comme sur les sites du Suran ou de La Roquebrussanne), on élimine ainsi les causes de dispersion dans la zone non saturée. Mais ceci ne suffit pas pour éviter les phénomènes de dispersion (comme l'a montré l'expérience sur le site de La Roquebrussanne où, malgré un parcours effectué entièrement dans la zone saturée, le traceur s'est trouvé très dispersé). En effet, ceux-ci se poursuivent dans la zone saturée grâce au réseau de fractures et de fissures.

La dilution du traceur et sa dispersion dans le temps et dans l'espace vont dépendre de la structure de l'aquifère, c'est-à-dire de l'importance et de l'orientation de la fracturation (figures n° 18 a, b).

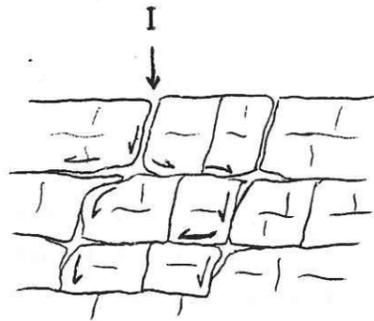


Figure n° 18 a : Dispersion dans la zone saturée (vue dans le plan vertical)

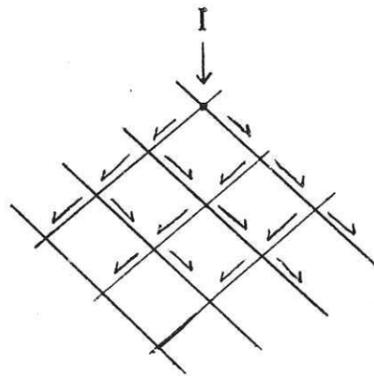


Figure n° 18 b : Dispersion dans la zone saturée (vue dans le plan horizontal)

Figures n° 18 a et b : Phénomènes de dispersion dus au réseau de fractures

L'angle entre la direction des lignes de courant et les fissures et l'angle d'ouverture des directions de fissuration vont déterminer la dispersion transversale (ou latérale). Le traceur peut emprunter différents trajets pour aller du point d'injection au point de prélèvement, ce qui provoque des différences de temps d'arrivée traduites par les nombreux pics sur les courbes de restitution. Ceci engendre la dispersion longitudinale.

A chaque intersection de fissures, il se produit une dichotomie du flux. Cette dichotomie implique des cheminements différents pour chacune des masses élémentaires d'eau, avec sa propre concentration en traceur. Cela explique qu'en un point quelconque de l'aquifère, la concentration va varier de façon aléatoire. Il n'y a pas assez de cheminements pour qu'il existe un mélange parfait qui donnerait à la courbe de concentration en fonction du temps une allure régulière de courbe de GAUSS (J-C.FOURNEAUX, 1981).

Selon la géométrie de la fracturation, la dispersion latérale est plus ou moins forte (figures n° 19 a, b, c).

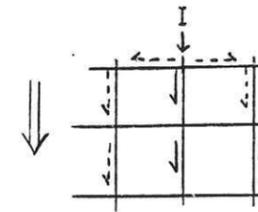


Figure n° 19 a : 2 directions de fractures perpendiculaires dont l'une est parallèle à la direction d'écoulement. La dispersion transversale est faible, la majeure partie du traceur a tendance à suivre la direction de l'écoulement.

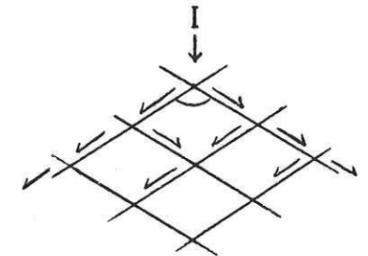


Figure n° 19 b : Les 2 directions de fractures sont très obliques par rapport à la direction d'écoulement, la dispersion transversale est élevée car le traceur emprunte les fissures qui lui sont offertes.

Figure n° 19 c :



La dispersion transversale est beaucoup plus faible si l'angle entre les directions de fracturation est plus faible.

Figures n° 19 a, b, c : Schématisation de la dispersion transversale selon la géométrie de la fracturation (vue dans le plan horizontal).

Il y a dichotomie du flux d'eau tracée à chaque intersection de plans de fracture et mélange avec des eaux non tracées, donc dilution (*figure n° 20*). Cette dilution va se manifester, à la restitution, par une concentration moyenne faible et de nombreux petits pics apparaissant de façon aléatoire au point d'observation.

Le réseau de fractures est, en fait, une succession de mailles et de noeuds. Ce modèle est à rapprocher de celui observé en milieu poreux, où chaque maille est un grain (J-C. FOURNEAUX, 1982).

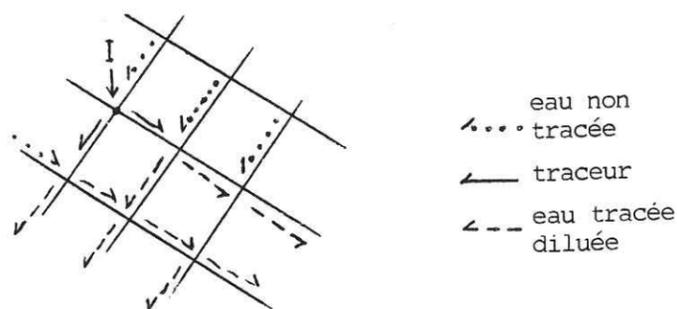


Figure n° 20 : A chaque noeud du réseau, il y a dilution des eaux tracées par des eaux non tracées.

Dans les fissures du niveau II (*figure n° 13*), le flux n'est pas homogène. Toutes les fissures n'ont pas la même largeur ni la même extension, elles vont donc voir passer des quantités de traceurs différents. Ceci va se traduire, à la restitution, par des courbes de concentration en fonction du temps irrégulières

### C) LES PRELEVEMENTS ET L'ANALYSE DES ECHANTILLONS

L'analyse détaillée du signal de sortie implique le prélèvement de nombreux échantillons pendant un temps suffisamment long pour pouvoir établir une courbe de la concentration en fonction du temps, car il faut tenir compte du fait que le temps de passage du nuage, en milieu fissuré, est d'environ un mois pour des distances de l'ordre du km. Etant donné la forte dilution, la concentration doit être mesurée avec une bonne

précision. Le dosage des traceurs fluorescents au spectrofluorimètre est le moyen le plus fiable pour la mesure des faibles concentrations obtenues en milieu fissuré.

En cas d'eaux troubles et fortement minéralisées, une décantation ou une centrifugation sont nécessaires avant le dosage.

Rappelons encore que l'utilisation des fluocapteurs n'apportera aucune information précise dans le cas d'un aquifère fissuré, les concentrations étant généralement trop faibles pour être détectées par cette méthode.

### D) L'ANALYSE DU SIGNAL DE SORTIE

L'étude détaillée de la courbe de concentration en fonction du temps apporte de nombreux éléments, notamment sur l'importance de la dilution du traceur, sur les vitesses (vitesses des premières arrivées ou vitesses maximales et vitesses moyennes d'écoulement), sur la dispersion dans le temps et dans l'espace, sur les taux de restitution. Toutes ces informations vont servir à caractériser l'aquifère.

#### 1 - Les concentrations

Les concentrations mesurées dépendent bien évidemment de la quantité de produit injectée et du produit lui-même, mais les conditions d'injection et les modes de circulation influent beaucoup plus sur les concentrations que la nature du traceur lui-même.

D'une manière générale, partout où il y a circulation au sein d'un milieu fissuré, les concentrations maximales mesurées sont beaucoup plus faibles que pour des circulations en chenaux. Ces faibles concentrations traduisent une dilution importante d'autant plus qu'elle se produit tout au long du parcours souterrain des eaux tracées, comme le montre la figure n° 20.

Les variations de concentration sont toujours aléatoires, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de véritables pics suivis d'une lente décroissance. On observe des augmentations de concentrations qui peuvent être liées à

des précipitations mais d'autres n'ont pas de raisons apparentes. Elles sont dues au fait que les flux diffèrent d'un cheminement à l'autre, c'est-à-dire à l'hétérogénéité du milieu.

D'une manière générale, la circulation d'eaux tracées au sein d'un milieu fissuré entraîne une grande dilution donc des concentrations faibles. Les écarts sont peu marqués tout au long de la restitution et cela d'autant plus que la fissuration est développée aussi bien sur une grande surface que sur une grande épaisseur.

Il est donc possible de lier le fait que l'on mesure de faibles concentrations à la circulation au sein d'un milieu fissuré.

## 2 - Les taux de restitution

C. DROGUE (1971) montre que le taux de restitution du traceur (c'est-à-dire son rendement) est très nettement lié au débit en milieu karstique. Mais ceci est valable aussi pour un aquifère dans des éboulis grossiers comme à St Michel des Portes où à des vitesses, donc à des débits élevés, correspondent des taux de restitution élevés.

Pour de faibles débits, les taux de restitution peuvent descendre jusqu'à 30 %, même sur de courtes distances ( $\approx 1$  km)

*" Le phénomène ne serait pas dans ce cas là l'adsorption du traceur dans le réseau mais plutôt l'étalement du nuage qui fait passer une certaine partie du produit à des concentrations inférieures au seuil de mesure " (C. DROGUE, 1971).*

Cet étalement du nuage représente en fait la dispersion dans le temps ou dispersion longitudinale.

Pour les deux exemples présentés ici où les taux de restitution ont pu être calculés, ceux-ci ont toujours été inférieurs à 20 %, quel que soit le traceur utilisé. Mais ceci n'empêche pas d'arriver à une interprétation satisfaisante, car malgré tout le traceur reflète les différents types de circulation. Les faibles taux de restitution sont dus au fait qu'une partie du traceur échappe aux circulations sur lesquelles sont mesurées les concentrations, notamment quand il existe une zone noyée sous le niveau de base.

## 3 - Les vitesses

On considère généralement que la vitesse moyenne du traceur représente la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau. Mais le problème est de définir cette vitesse moyenne du traceur qui est toujours plus faible que celle de l'eau à cause des phénomènes d'adsorption et de désorption.

L'apparition des premières traces de traceur traduit le transfert par les filets d'eau les plus rapides et non la vitesse moyenne du fluide.

*" Il faudrait plutôt considérer la vitesse prise à mi-distance entre le centre de gravité et la concentration maximale du nuage, ou avec une bonne approximation et pour plus de commodité, au maximum de concentration " (C. DROGUE, 1971).*

Mais en milieu fissuré, les courbes de restitution obtenues ne permettent pas, en général, d'estimer la position du centre de gravité et encore moins celle de la concentration maximale étant donné qu'il n'y a pas de véritable pic bien marqué. Il faut donc choisir, dans certains cas, une vitesse moyenne arbitraire.

Considérons que la vitesse moyenne est celle qui correspond au passage de 50 % de la masse de traceur injectée. Lors des expériences de traçage en milieu fissuré, les taux de restitution ont toujours été bien inférieurs à 50 % même à la fin de la période de prélèvement.

La vitesse moyenne est donc inférieure à celle correspondant au dernier prélèvement. Mais nous choisirons cette dernière pour nos calculs car c'est la seule dont nous disposons.

Dans un milieu karstique ou dans des éboulis grossiers, les courbes présentant généralement des pics bien marqués, les vitesses moyennes sont facilement calculables et sont comprises entre 20 et 200 m/h.

Dans les nappes de fissures, elles sont de quelques mètres par heure ou d'une dizaine de m/h.

Les vitesses des premières arrivées de traceur sont intéressantes dans le cas d'une étude de vulnérabilité vis-à-vis d'une pollution

éventuelle. Les erreurs faites sur le calcul de la vitesse maximale dépendent d'une part, du seuil de détection de l'appareil utilisé pour le dosage du traceur et d'autre part, de la forme du nuage car plus le nuage s'étale dans le temps, plus l'erreur est grande.

En milieu calcaire fissuré, dans les trois exemples présentés ici, les vitesses des premières arrivées sont de l'ordre de quelques dizaines de mètres par heure. Le rapport de la vitesse maximale sur la vitesse moyenne y est toujours supérieur à cinq (voir § II A) B) C) de ce chapitre), alors qu'en milieu karstique, il est compris entre 1 et 2 (voir chapitre II, expérience sur le site du Suran). Ces vitesses moyennes très faibles par rapport aux vitesses des premières arrivées sont dues à l'existence de nombreux cheminements possibles offerts aux eaux tracées par le réseau de fissures. De même que celui-ci provoque la dilution, il entraîne un étalement des arrivées. Cet étalement dans le temps n'est d'ailleurs pas le même pour tous les traceurs. Les phénomènes d'adsorption-désorption varient d'un traceur à l'autre et, pour un même traceur, avec la nature du terrain.

Les écarts entre les vitesses maximales enregistrés sur un même site tiennent aux différences d'orientation des fissures par rapport aux lignes de courant.

De plus, les perméabilités ne sont pas réparties de façon homogène. Dans un aquifère en milieu fissuré, il peut exister des zones plus perméables que d'autres dues à des variations latérales de faciès ou simplement à la répartition de la fissuration.

La surcharge créée au moment de l'injection par l'eau employée pour pousser le traceur peut aussi intervenir sur la vitesse des premières arrivées ainsi que la perméabilité propre de la zone où a lieu l'injection.

Il faut tenir compte, le cas échéant, du transit à travers la zone non saturée lorsque l'on n'injecte pas dans un forage mais dans une fouille dont le fond n'atteint pas le niveau aquifère.

Les vitesses maximales (c'est-à-dire des premières arrivées) ne sont pratiquement pas influencées par les phénomènes d'adsorption

et de désorption. Ce n'est bien évidemment pas le cas des vitesses moyennes.

D'une manière générale, le transit du traceur en milieu fissuré va se traduire par un écart important entre les vitesses des premières arrivées relativement élevées et les vitesses moyennes très faibles. Comme nous le verrons plus loin, il est possible de chiffrer cela.

Sur les sites étudiés, aucun résultat d'essais Lugeon ou de pompage n'a pu être obtenu, il n'est donc pas possible de rapprocher ou de comparer les valeurs des vitesses moyennes à des valeurs de perméabilité mesurées "in situ". Il y a là une voie de recherche prometteuse.

De même, dans l'état actuel de ces travaux, on n'envisage pas encore de pouvoir déterminer la porosité utile. Comme la perméabilité, celle-ci peut être très variable d'un point à l'autre d'un même aquifère fissuré. En effet, comme nous allons le voir dans les exemples suivants, les zones à plus ou moins forte perméabilité sont souvent réparties de façon très hétérogène dans ce type de milieu.

## II - EXEMPLES DE MULTITRACAGE EN MILIEU CALCAIRE FISSURE

### A) MULTITRACAGE DE L'ILE CREMIEU (Isère)

— Les résultats de cette expérience ont fait l'objet d'une publication présentée au 108<sup>ème</sup> Congrès National des Sociétés Savantes, à Grenoble, en 1983 (J-C. FOURNEAUX et F. DURR, 1983) —

"Au Nord-Est de Crémieu, en bordure de la vallée du Rhône, existent deux émergences karstiques distantes de 1 500 m environ. Elles sont situées à des altitudes très voisines. Afin de déterminer si ces deux sources drainaient un seul bassin ou deux bassins distincts, une opération de multitracage a été réalisée au mois de mai 1982. Les résultats obtenus ont été assez différents de ce que l'on pouvait attendre.

#### 1°) CADRE GEOGRAPHIQUE

Le plateau d'Annoisin-Chatelans représente la partie occidentale de l'Ile Crémieu. Il s'agit d'un triangle limité à l'Ouest par la vallée du Rhône, à l'Est par la vallée de l'Amby et au Sud par la vallée sèche de Ry.

Ce plateau, d'altitude moyenne voisine de 400 m, domine de 200 m la vallée du Rhône. Cette limite, quasiment rectiligne de Crémieu à Hiers-sur-Amby est liée à l'existence d'un important faisceau de failles marquant la limite orientale du fossé d'effondrement de la Bresse.

La vallée de l'Amby correspond aussi à une direction de fracture. Là, le ruisseau a creusé des gorges profondes qui atteignent des niveaux de calcaire marneux.

La limite Sud est moins nette. L'entaille de la vallée de Ry a été en grande partie creusée par des eaux de fonte d'une langue glaciaire du glacier du Rhône. Les dépôts quaternaires masquent les calcaires sur de grandes surfaces.

La zone ainsi délimitée couvre une superficie de l'ordre de 40 km<sup>2</sup>.

## 2°) GEOLOGIE

Le plateau d'Annoisin-Chatelans est formé par les assises du Jurassique moyen sur lesquelles repose une couverture discontinue de dépôts liés aux passages des glaciers pendant le Quaternaire.

Le Lias, visible à l'Est du site, est constitué de marnes et calcaires marneux, c'est-à-dire de formations imperméables.

Le Jurassique moyen débute par des calcaires à entroques à stratification entrecroisée et quelques lits de Silex ; cette formation, épaisse de 70 à 100 m, est datée du Bajocien (DAVID et al, 1979) ; elle repose sur le Lias qui n'est pas visible. Ces calcaires constituent la base des falaises aussi bien du côté de la vallée du Rhône que dans le Val d'Amby.

Au-dessus, viennent des calcaires à polypiers en lentilles, recouverts par des calcaires à faciès bio-détritique de comblement ; daté du Bajocien moyen, l'ensemble a une épaisseur de 80 m environ.

Par dessus viennent les calcaires oolithiques du Bajocien supérieur, épais de près de 50 m.

Au sommet, les calcaires "Choins" représentent le Bathonien supérieur ; il s'agit d'un calcaire légèrement spathique, peu argileux, de teinte gris bleu, à trainées ferrugineuses (L. DAVID et al, 1979).

Tout cela représente une série calcaire de près de 200 m d'épaisseur sans horizon susceptible de s'opposer au passage des eaux.

De nombreux éléments de morphologie karstique sont visibles : des dépressions fermées, des vallées sèches et quelques grottes visibles.

Mais les formations calcaires sont souvent masquées par la couverture quaternaire. Il s'agit d'épandages plus ou moins épais d'argiles à galets et blocs erratiques. La matrice argileuse est brune et montre parfois une évolution pédologique avancée. Les galets de roches cristallines sont très altérés. L'épaisseur de cette couverture atteint plus de 10 m à l'Ouest d'Annoisin-Chatelans (R. ENAY, 1980).

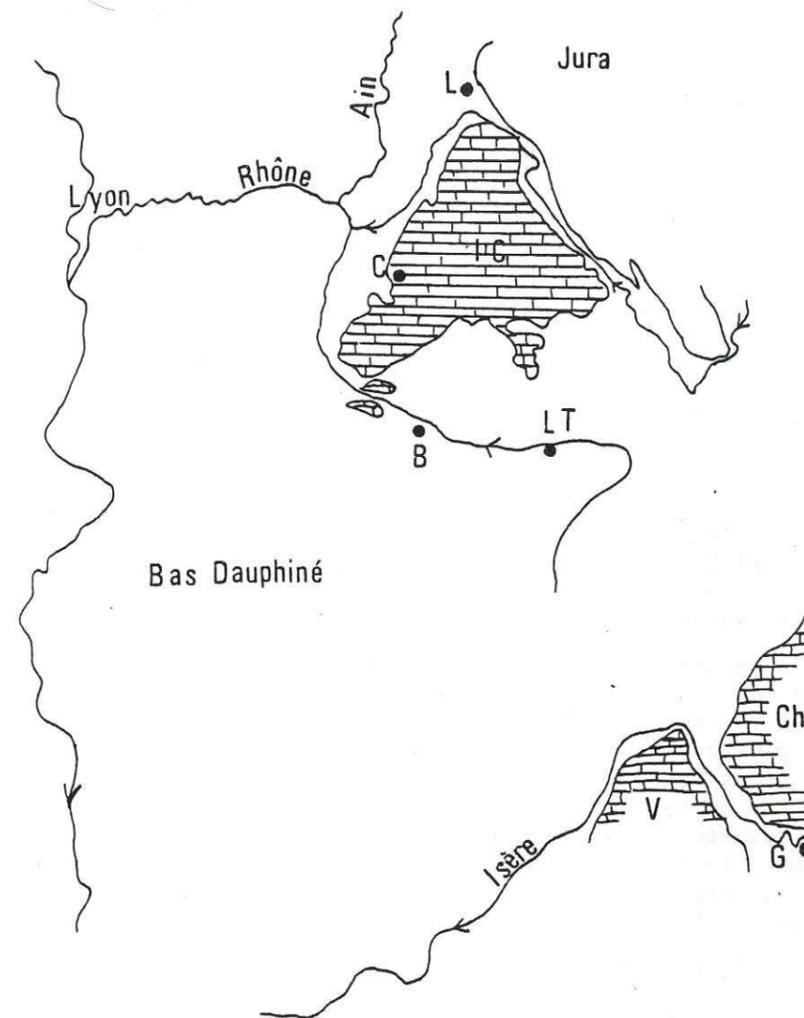


Figure n° 21 : Carte de situation de l'Ile Crémieu .

(in J.C Fourneaux et F.Durr, 1983)

B : Bourgoin ; LT : La Tour du Pin ; C : Crémieu ;

L : Lagnieu ; IC : Ile Crémieu ; V : Vercors ;

Ch : Chartreuse ; G : Grenoble .

Ces épandages représentent des moraines remaniées par les eaux de fonte.

Du point de vue structural, ce plateau correspond à un horst, bordé de tous côtés par des failles (R. ENAY, 1980). La fracturation est importante. Trois directions principales se dégagent : N30°, N60° et N140°.

L'ensemble du plateau présente un très léger pendage vers l'Est.

### 3°) LA KARSTIFICATION

La karstification est ancienne sur tout le plateau. Cette région est soumise à un régime continental depuis la fin du Crétacé. Elle est restée émergée pendant tout le Tertiaire.

Mais il n'existe pas, à la surface du plateau, de perte ou de véritable gouffre. Par contre, on trouve des galets de roches cristallines de grosse taille à l'intérieur des galeries visitables. Cela implique la présence de gouffres importants sous la couverture quaternaire et l'existence de conditions de circulations des eaux différentes des conditions actuelles à un moment donné.

### 4°) HYDROGEOLOGIE

Dans l'état actuel, il n'existe aucun écoulement permanent à la surface du plateau et les écoulements temporaires sont rares et peu importants. Les eaux des précipitations s'infiltrent au sein des assises calcaires qui constituent l'aquifère.

Il existe deux résurgences importantes au pied de la falaise, côté Ouest. Il s'agit de la fontaine St Joseph, au Nord du village de Vernas, et la source de la Serve, au Sud de ce même village. Ce sont les deux plus gros exutoires du plateau. D'autres sources présentant des caractères karstiques existent sur le pourtour du plateau. Il s'agit de la source Beptenaz, au Sud, des sources de Thiou et des Rochettes à l'Est et des sources de la Fontaine Eolienne et du torrent de Chatelans au Nord-Est. Toutes ces sources sont pérennes et montrent des caractères karstiques, mais elles ont des débits beaucoup plus faibles que les deux résurgences de Vernas.

Sur le plateau même, de petites sources liées aux formations quaternaires sont visibles autour d'Annoisin et sur la limite Sud. La présence de nappes au sein des formations quaternaires est attestée par l'existence de plusieurs puits peu profonds qui servaient à l'alimentation des fermes jadis.

### 5°) LE TRACAGE

Les deux résurgences de Vernas représentant un potentiel important, il était intéressant de savoir s'il s'agissait de deux exutoires d'un même aquifère ou de deux sources indépendantes.

Deux traceurs fluorescents ont donc été injectés dans deux trous sur le plateau. Il s'agit dans les deux cas de fissures non pénétrables.

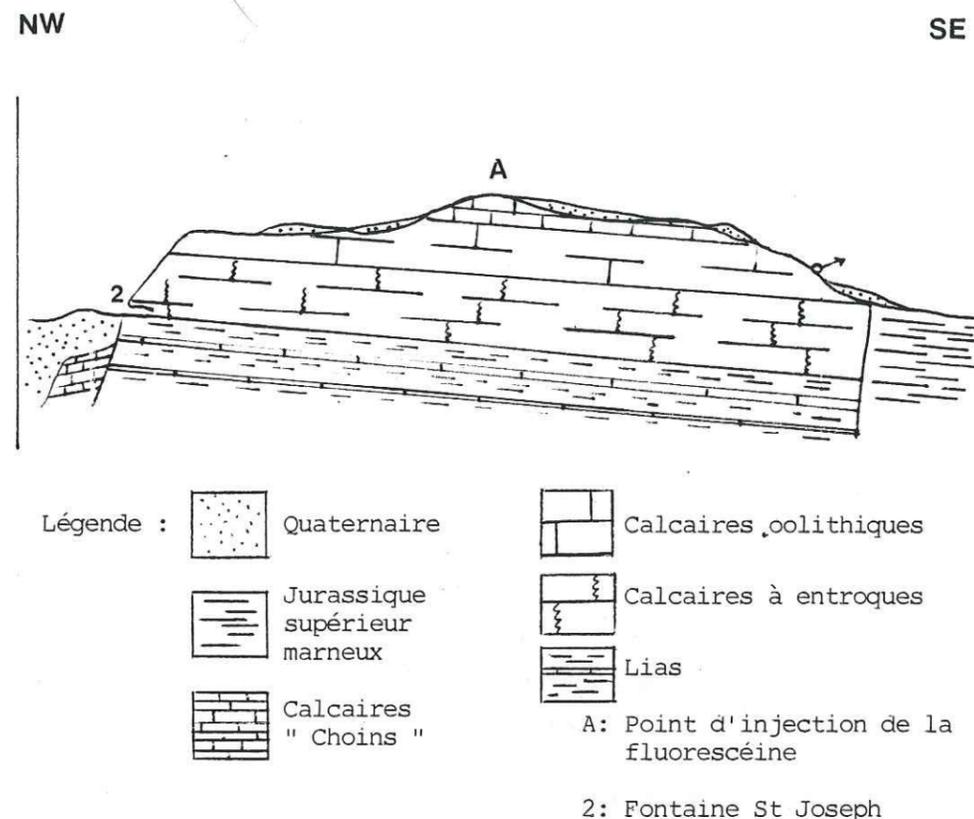


Figure n° 22 : Coupe schématique du massif de l'Ile Crémieu (in J.C Fourneaux et F. Durr , 1983 ).

Ainsi, 2 kg de fluorescéine ont été injectés au point A (voir figure n° 23) vers 405 m d'altitude, en bordure de la route d'Annoisin à Chatelans. Le traceur a été poussé par 3 m<sup>3</sup> d'eau. L'infiltration a été immédiate et totale. L'opération a été terminée à 14 h 15, le 21 Avril 1982.

De même, 2 kg de Rhodamine B ont été injectés au point B, vers 410 m d'altitude, à 600 m à l'Ouest de Chatelans. Là aussi le traceur a été poussé avec 3 m<sup>3</sup> d'eau. L'infiltration a été totale et immédiate. Elle s'est terminée à 14 h 45 le même jour.

Les prélèvements ont été effectués non seulement sur les deux résurgences de Vernas mais aussi sur les cinq autres sources évoquées plus haut.

Les mesures limnimétriques effectuées sur la Fontaine St Joseph ont montré que l'injection a été faite en période de tarissement. Ce tarissement se poursuivait alors depuis plus d'un mois et s'est poursuivi pratiquement pendant toute la durée des prélèvements.

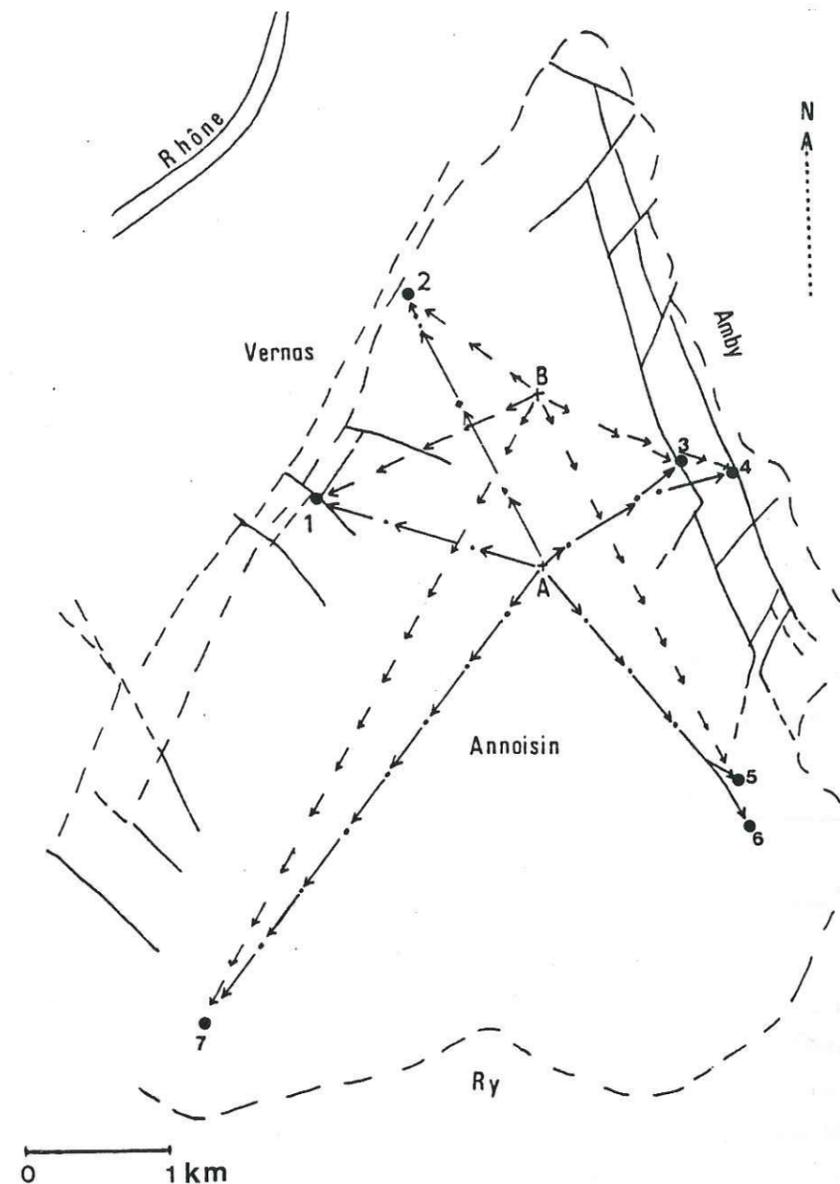
L'opération de traçage a donc été réalisée en période de basses eaux assez marquées.

Les précipitations ont été nulles ou très faibles pendant toute cette période. " (J-C. FOURNEAUX et F. DURR, 1983).

#### 6°) LES RESULTATS

Les échantillons ont été analysés au spectrofluorimètre Farrand, mark I. Les résultats obtenus montrent que les deux traceurs sont ressortis à toutes les sources surveillées.

Le tableau 13 donne les valeurs des temps des premières arrivées aux différentes sources, des vitesses maximales de transit, des vitesses "moyennes" et de leurs rapports.



- |   |                         |
|---|-------------------------|
| A: point d'injection de la fluorescéine | 6: source des Rochettes |
| B: point d'injection de la rhodamine B  | 7: source Bepthenaz     |
| 1: fontaine de la Serve                 |                         |
| 2: fontaine St Joseph                   |                         |
| 3: fontaine Eolienne                    |                         |
| 4: ruisseau de Chatelans                |                         |
| 5: ruisseau de Thiou                    |                         |

Figure n° 23 : Schéma des opérations de traçage à l'île Crémieu (d'après J.C Fourneaux et F. Durr ,1983).

TABLEAU N° 13 : Résultats du traçage de l'Ile Crémieu

Source	FLUORESCEINE				
	Distances en m	Temps des lères arrivées	Vitesses maximales en m/h	Vitesses moyennes en m/h	$\frac{V \text{ max}}{V \text{ moy.}}$
1. La Serve	1700	48 h	35	6,4	5,4
2. St Joseph	2100	52 h	40	8	5
3. F. Eolienne	1200	53 h	23	4,5	5,1
4. Rau. Chatelane	1500	45 h	33	5,7	5,8
5. Rau. de Thiou	2000	54 h	37	7	5,3
6. Sce des Rochettes	2250	54 h	42	8,2	5,1
7. Beptenaz	4000	92 h	45	9	5

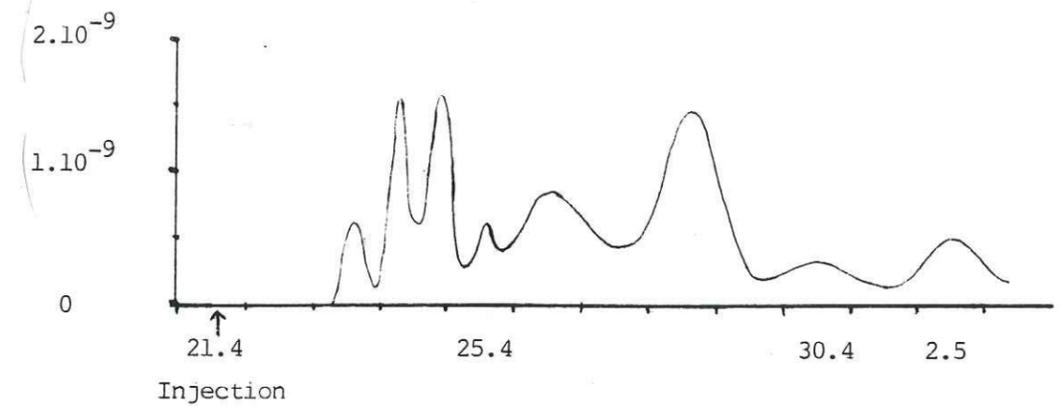
  

Source	RHODAMINE B				
	Distances en m	Temps des lères arrivées	Vitesses maximales en m/h	Vitesses moyennes en m/h	$\frac{V \text{ max}}{V \text{ moy.}}$
1. La Serve	1800	45 h	40	6,8	5,9
2. St Joseph	1100	51 h	22	4,2	5,3
3. F. Eolienne	1100	52 h	22	4,2	5,2
4. Rau. Chatelane	1500	52 h	29	5,7	5,1
5. Rau. de Thiou	3050	69 h	45	9	5
6. Sce des Rochettes	3350	69 h	49	9,7	5
7. Beptenaz	5000	91 h	55	11	5

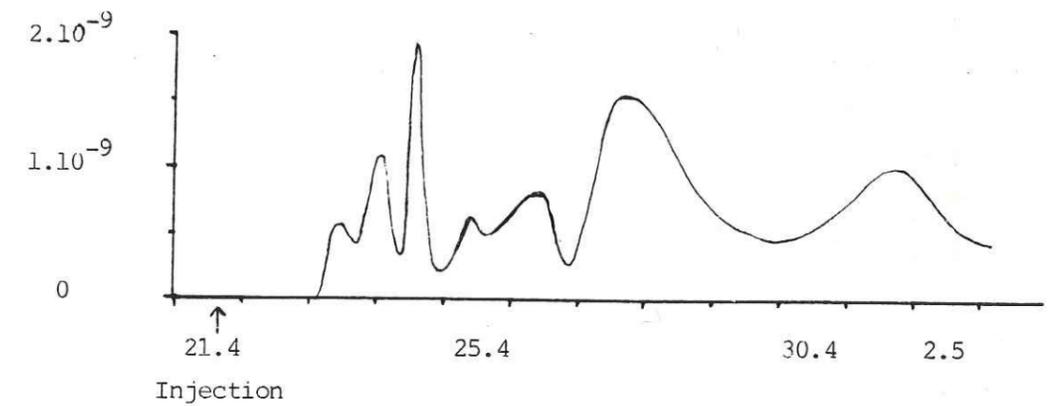
Les pics de concentration observés aux deux émergences de Vernas (Sce de La Serve et Sce St Joseph) n'étaient pas simultanés (figures n° 24 et 25).

D'une façon générale, les concentrations ont varié entre des valeurs de  $1.10^{-10}$  et  $2.10^{-9}$ .

Les vitesses maximales de transit sont relativement homogènes pour l'ensemble du plateau. Elles augmentent systématiquement avec la distance



point n°1: fontaine de la Serve



point n°2: fontaine St Joseph

Figure n° 24 : Ile Crémieu : courbes de restitution de la fluorescéine aux deux émergences principales (d'après J.C Fourneaux et F. Durr ,1983).

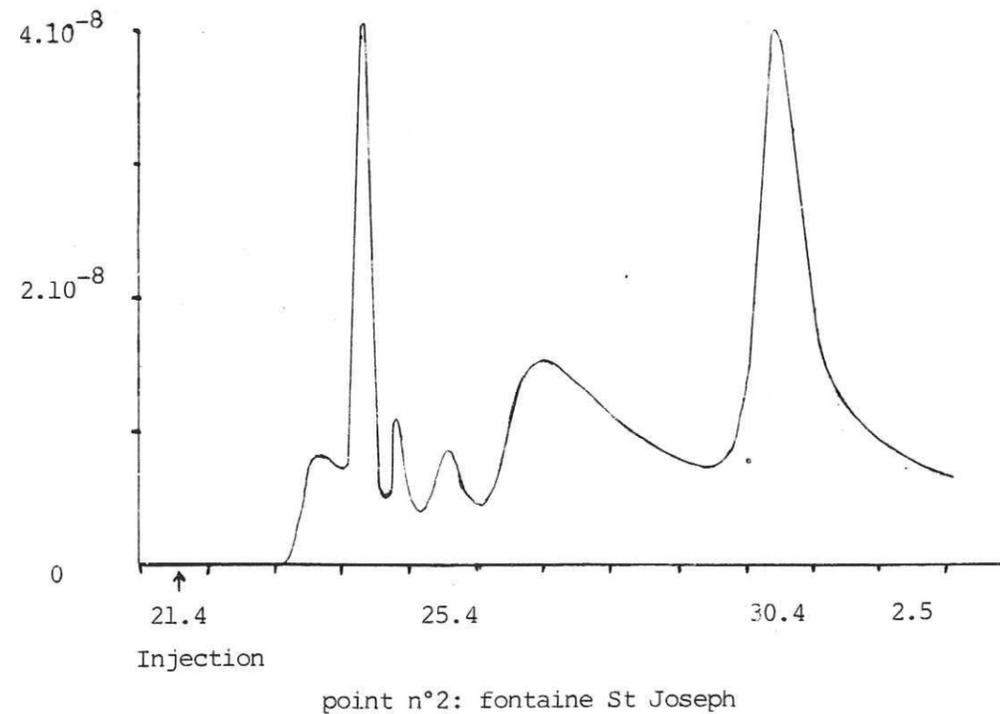
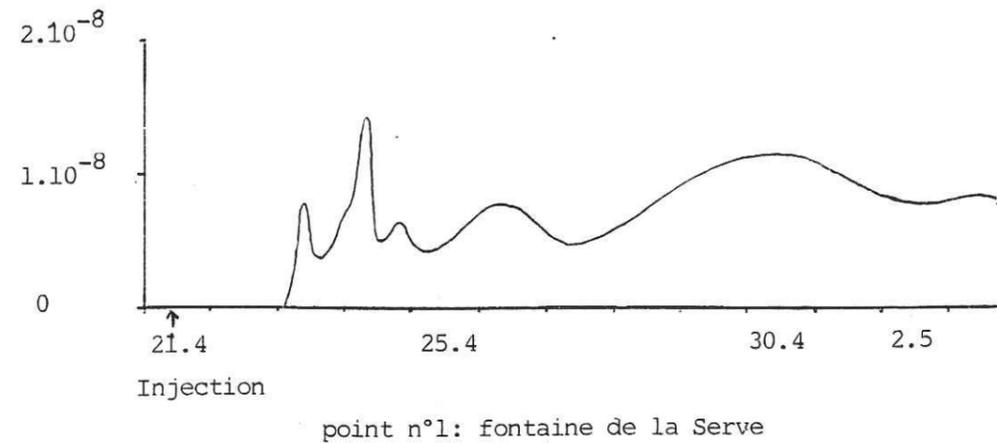


Figure n° 25 : Ile Crémieu : courbes de restitution de la rhodamine B aux deux émergences principales (d'après J.C Fourneaux et F. Durr ,1983).

et tendent vers une limite qui est de l'ordre de 60 m/h. D'après les auteurs, cette limite correspondrait à la vitesse dans la zone saturée, la vitesse dans la zone non saturée étant très faible. En fait, dans la zone non saturée (qui n'a que quelques mètres d'épaisseur), le transfert se fait probablement assez rapidement grâce aux fractures ouvertes et la dispersion dans le plan vertical est faible. Les faibles vitesses correspondraient plutôt au transit dans une nappe de fissures (ou dans une zone de chenaux en partie colmatés par des dépôts quaternaires), qui se trouverait au-dessus d'un karst actif. Après avoir traversé cette nappe de fissures "suspendue", le traceur circule dans des chenaux karstiques (visibles aux émergences de Vernas) à une vitesse plus élevée qui correspond à la limite observée sur la courbe de la figure 26.

Comme les vitesses maximales, les vitesses moyennes augmentent avec la distance pour ensuite atteindre une limite qui est de l'ordre de 10m/h. Tout ceci prouve que les vitesses des circulations à l'intérieur de ce massif sont homogènes et que, quelque fût le point d'injection, on aurait obtenu le même genre de résultats.

" Les estimations quantitatives montrent qu'une faible part des traceurs était ressortie le 5 Mai, lors des derniers prélèvements bien que les concentrations mesurées sur ces échantillons fussent nulles. Une part notable des traceurs est piégée et a ensuite été mobilisée lors de crues, comme cela a pu être observé sur d'autres karsts (V. LEMORDANT, 1977) "

(J-C. FOURNEAUX et F. DURR, 1983).

#### 7°) INTERPRETATION

Les résultats obtenus prouvent l'existence d'un seul et même aquifère de type nappe de fissures, probablement très plat.

La dispersion transversale constatée n'est pas courante dans une zone où la karstification se développe depuis très longtemps ; en effet, cette région a été émergée pendant tout le Tertiaire et le Quaternaire. Il serait plus logique de trouver un karst très hiérarchisé.

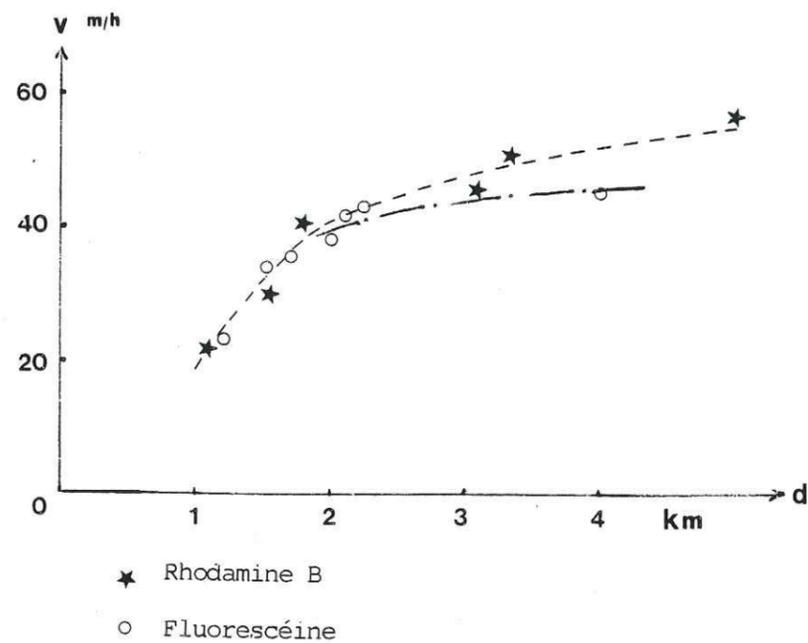


Figure n° 26 : Courbes de la répartition des vitesses des traceurs en fonction de la distance (d'après J.C Fourneaux et F. Durr, 1983).  
Plus la distance augmente, plus la vitesse tend vers une limite qui doit représenter la vitesse réelle au sein du karst .

Cette dispersion ne s'explique pas uniquement par les changements du niveau de base en relation avec les glaciations comme l'ont écrit les auteurs. Comme nous le verrons plus loin, des phénomènes analogues ont été mis en évidence sur des sites où aucune variation du niveau de base ne peut être invoquée.

#### B) TRACAGE DE NIORT (Deux-Sèvres)

— Les résultats de cette expérience ont fait l'objet d'une publication présentée au 108<sup>ème</sup> Congrès National des Sociétés Savantes, à Grenoble, en 1983 - (J-P. BILLAUT et al., 1983) —

Lors d'un essai de détermination de la vulnérabilité d'une nappe en milieu calcaire fissuré mais non karstifié, une expérience de multi-tracage a été réalisée à l'Ouest de Niort (*figure n° 27*). Trois produits fluorescents ont été injectés dans des fouilles creusées à la pelle mécanique. Des prélèvements ont été effectués dans quatre puits pendant deux semaines.

##### 1°) GEOLOGIE DU SITE

Les plateaux situés à l'Ouest de Niort sont formés par les assises du Bathonien et du Callovien, avec une couverture quaternaire de quelques mètres d'épaisseur dans la partie basse.

Ce Quaternaire est constitué par des argiles et des limons. Réduits à quelques décimètres dans la partie haute, il peut atteindre plus de 6 m d'épaisseur le long de la voie ferrée (*figure n° 29*). La présence d'éléments de calcaires assure une certaine perméabilité.

Le Callovien est formé, de haut en bas, par des marnes et calcaires marneux qui reposent sur des calcaires blancs sub-lithographiques en petits bancs. L'épaisseur de la série ne dépasse pas vingt mètres (G. MATHIEU et al., 1966).

Le Bathonien est constitué par des calcaires blancs hémimétriques ; son épaisseur est comprise entre 20 et 25 m.

Les formations inférieures n'interviennent pas dans l'Hydrogéologie locale. Elles peuvent être considérées comme imperméables.

L'ensemble de la série présente un léger pendage vers le Sud. Par ailleurs, une importante fissuration affecte ces formations calcaires. Les directions dominantes sont comprises entre Nord 75° et Nord 100° mais il existe aussi une famille de fissures dont l'orientation oscille autour de Nord 0° (*figure n° 28*).

Les fractures les plus importantes sont colmatées par des argiles ; ce n'est pas le cas pour les fissures.

Aucune trace de karstification n'est visible ni dans la morphologie des plateaux ni dans les carrières où les calcaires sont visibles en tranche.

## 2°) HYDROGÉOLOGIE

Il existe une nappe importante exploitée pour l'alimentation en eau potable et pour les usages agricoles au sein des formations calcaires du Bathonien et de la base du Callovien. Cette nappe est alimentée par les précipitations qui tombent sur les plateaux situés au Nord-Ouest de Niort. Là, la faible épaisseur de la couverture quaternaire facilite l'infiltration rapide. De plus, ce sont les calcaires du Bathonien qui affleurent (*figure n° 29*).

Cette nappe s'écoule du Nord vers le Sud. Le Marais sert de niveau de base. Le gradient est de l'ordre de 1 %. Les caractéristiques hydro-dynamiques de cet aquifère ne sont pas connues. Mais dans un ouvrage il est pompé des débits de 50 m<sup>3</sup>/h avec un rabattement de l'ordre de 1 m. La perméabilité moyenne de l'aquifère est donc relativement élevée.

## 3°) LE MULTI-TRACAGE

L'expérience de multi-traçage a été réalisée le 8 Décembre 1982. De la fluorescéine (1,5 kg) a été injectée au point n° 6 (*figure n° 29 et figure n° 32*) dans les calcaires du Bathonien. Poussé par 6 m<sup>3</sup> d'eau, le traceur s'est infiltré immédiatement.

De l'Amido-Rhodamine G a été injectée au point n° 2 dans les calcaires marneux du Callovien. Là aussi le traceur a été poussé avec 6 m<sup>3</sup> d'eau. L'infiltration a duré un quart d'heure environ.

De la Rhodamine B a été injectée au point n° 5, dans des conditions identiques. Là, l'infiltration a été très lente, dans une fouille creusée entièrement dans la couverture quaternaire, sur 4,5 m de profondeur.

Les prélèvements ont été faits sur quatre puits. Le premier (PC) correspond à un ouvrage de 40 m de profondeur où se font des pompages de l'ordre de 50 m<sup>3</sup>/h à raison d'une heure sur deux en moyenne. Les pompages se sont poursuivis pendant toute la durée de l'opération.

Le deuxième point (PV) est un puits de trois mètres de profondeur creusé dans le niveau calcaire du Callovien. Chaque prélèvement était précédé d'un pompage de 10 minutes à un débit voisin de 25 m<sup>3</sup>/h.

Le troisième point (PA) est un forage de 20 m de profondeur à usage agricole inexploité actuellement. Une pompe à main a été utilisée pour un pompage de 10 minutes avant chaque prélèvement.

Le quatrième point (PX) est un puits de ferme muni d'une pompe à main.

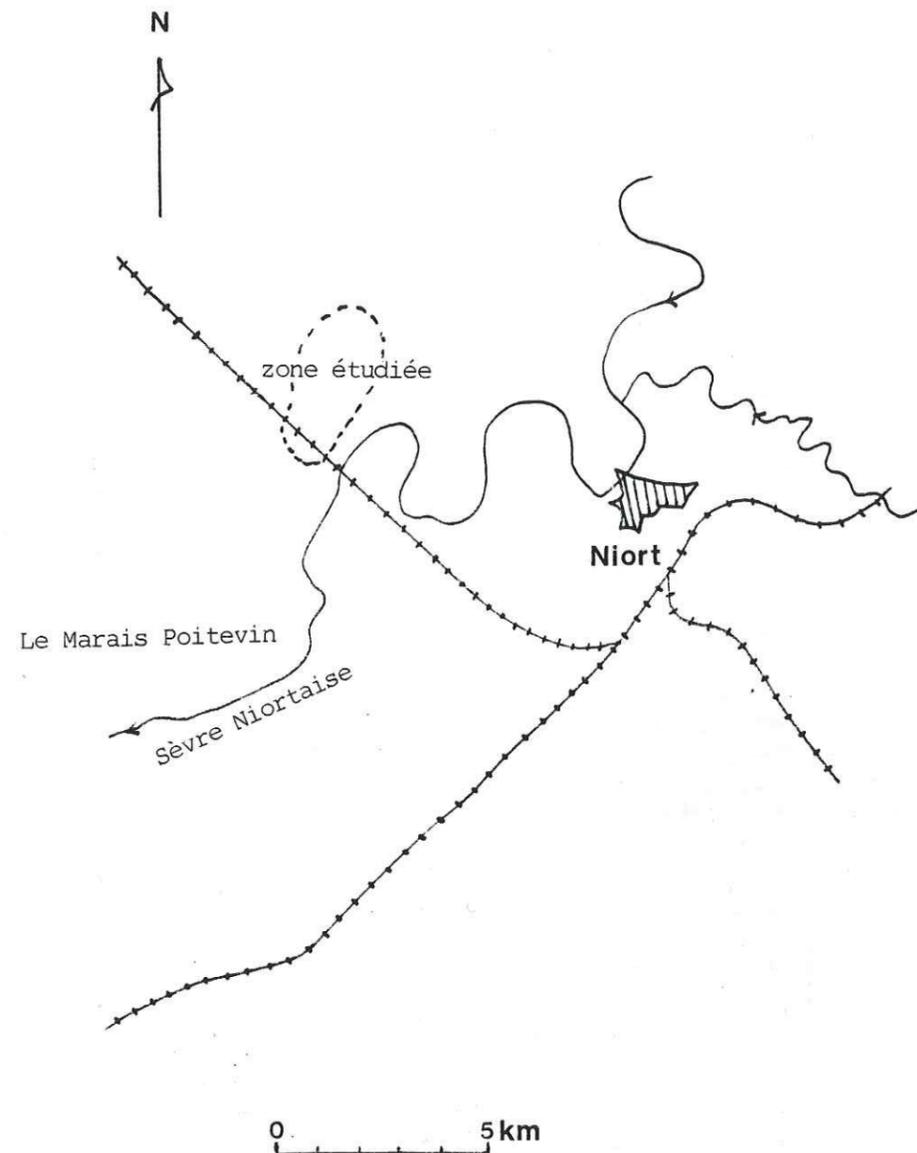


Figure n° 27 : Plan de situation

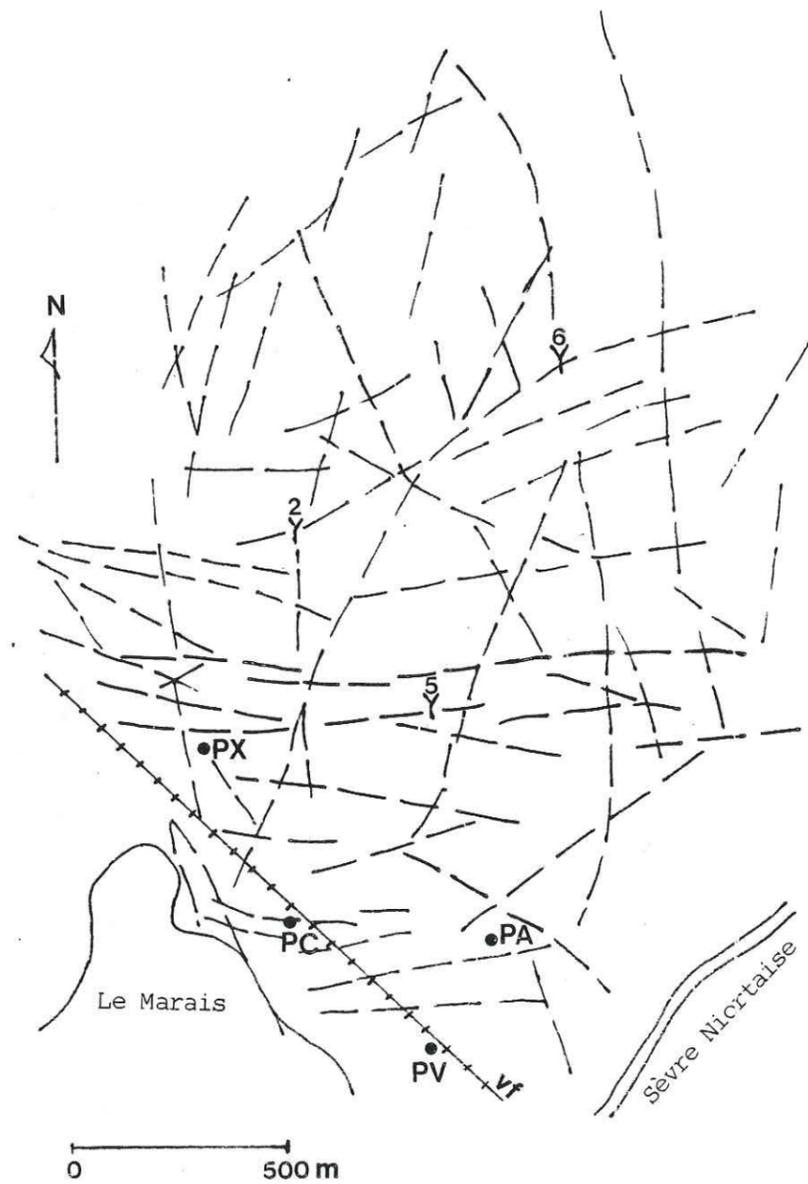
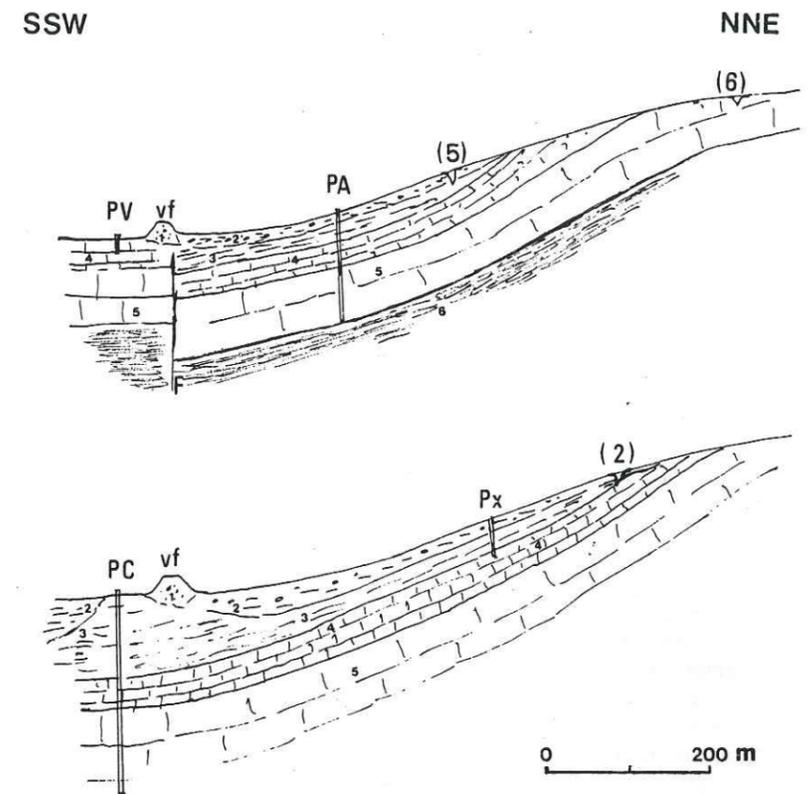


Figure n° 28 : Carte schématique de la fracturation d'après photographie aérienne



- Légende :
- 1 : remblai de la voie ferrée
  - 2 : Quaternaire
  - 3 : Callovien marneux et marno-calcaires
  - 4 : Callovien calcaire
  - 5 : Bathonien
  - 6 : Lias

Figure n° 29 : Coupes géologiques schématiques

Il faut noter que dès la fin des opérations d'injection et pratiquement pendant toute une semaine, de fortes précipitations sont tombées sur toute la région, entraînant une remontée sensible du niveau piézométrique, ainsi que des inondations.

L'infiltration d'une part notable de ces précipitations a contribué au lessivage des zones non saturées où pouvait être piégée une partie des traceurs, ainsi qu'à leur transfert au sein de l'aquifère.

Cette remontée de la nappe a probablement eu pour corrolaire une augmentation des vitesses au sein de l'aquifère.

#### 4°) LES RESULTATS

Les trois traceurs ont été retrouvés aux quatre points de prélèvements. Les premières traces ont été détectées moins de 24 heures après les injections, partout. Les trois traceurs étaient encore présents dans les derniers prélèvements effectués, 12 jours après l'injection. Les résultats sont rassemblés dans les courbes des figures 30 et 31.

##### a) Le puits "PC"

Dans cet ouvrage, la première arrivée nette de fluorescéine s'est produite après moins de 18 heures, soit une vitesse voisine de 85 m/h. On observe ensuite deux pics assez nets, 48 h après l'injection et 8 jours après. Ces pics sont peu marqués, ce qui traduit une grande dilution du traceur dans l'aquifère.

La Rhodamine B a été trouvée sous forme de traces (concentration inférieure à  $10^{-10}$ ) au bout de 13 h ; la concentration de  $10^{-10}$  n'a été observée qu'après 50 h ; il n'y a pas eu de véritable pic.

L'Amido-Rhodamine G apparaît sous forme de traces après 15 h, soit une vitesse de l'ordre de 65 m/h ; elle est arrivée ensuite à des concentrations supérieures (à peine) à  $10^{-10}$ , 18 heures plus tard.

Pour ces deux produits, on peut envisager l'hypothèse qu'ils soient restés dans la partie supérieure de l'aquifère peu sollicitée par le pompage qui s'adresserait surtout à la tranche inférieure de l'aquifère.

##### b) Le puits "PV"

Dans ce puits, la fluorescéine est arrivée après 18 h de trajet, soit une vitesse de l'ordre de 90 m/h, assez analogue à ce qui a été observé pour le PC malgré un pompage beaucoup plus faible. Les concentrations ont été en général plus élevées qu'au PC ; le maximum est atteint 6 jours après l'injection lors du dernier prélèvement sur ce point ( $7 \cdot 10^{-9}$ ).

La Rhodamine B est arrivée avec une forte concentration (relative) en même temps, soit une vitesse de l'ordre de 60 m/h. Les concentrations ont toujours été beaucoup plus fortes qu'au PC.

L'Amido-Rhodamine G est arrivée aussi au même moment, ce qui donne une vitesse supérieure à 90 m/h. Les concentrations mesurées sont plus élevées qu'au PC, mais moins élevées que pour les deux autres produits.

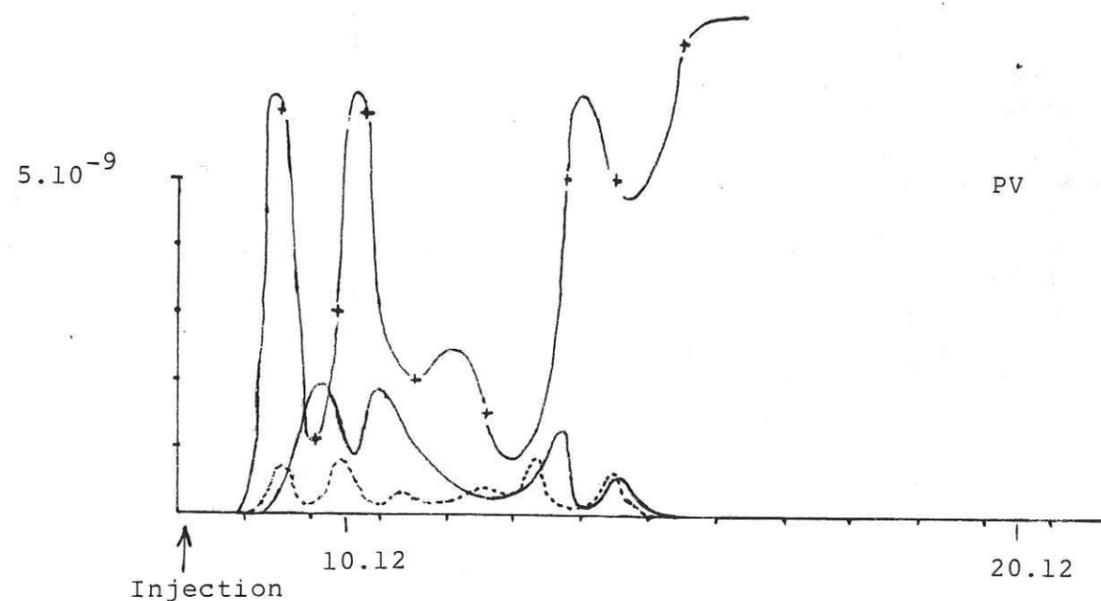
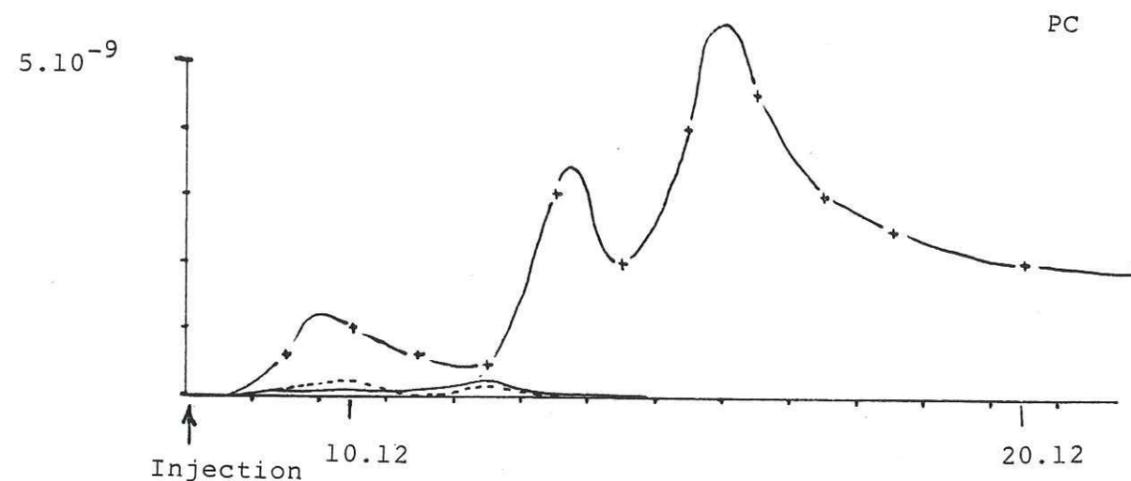


Figure n°30 : Courbes de concentration en fonction du temps obtenues au PC et au PV pour les trois traceurs

+ — + fluorescéine      - - - - - amidorhodamine G  
 — rhodamine B

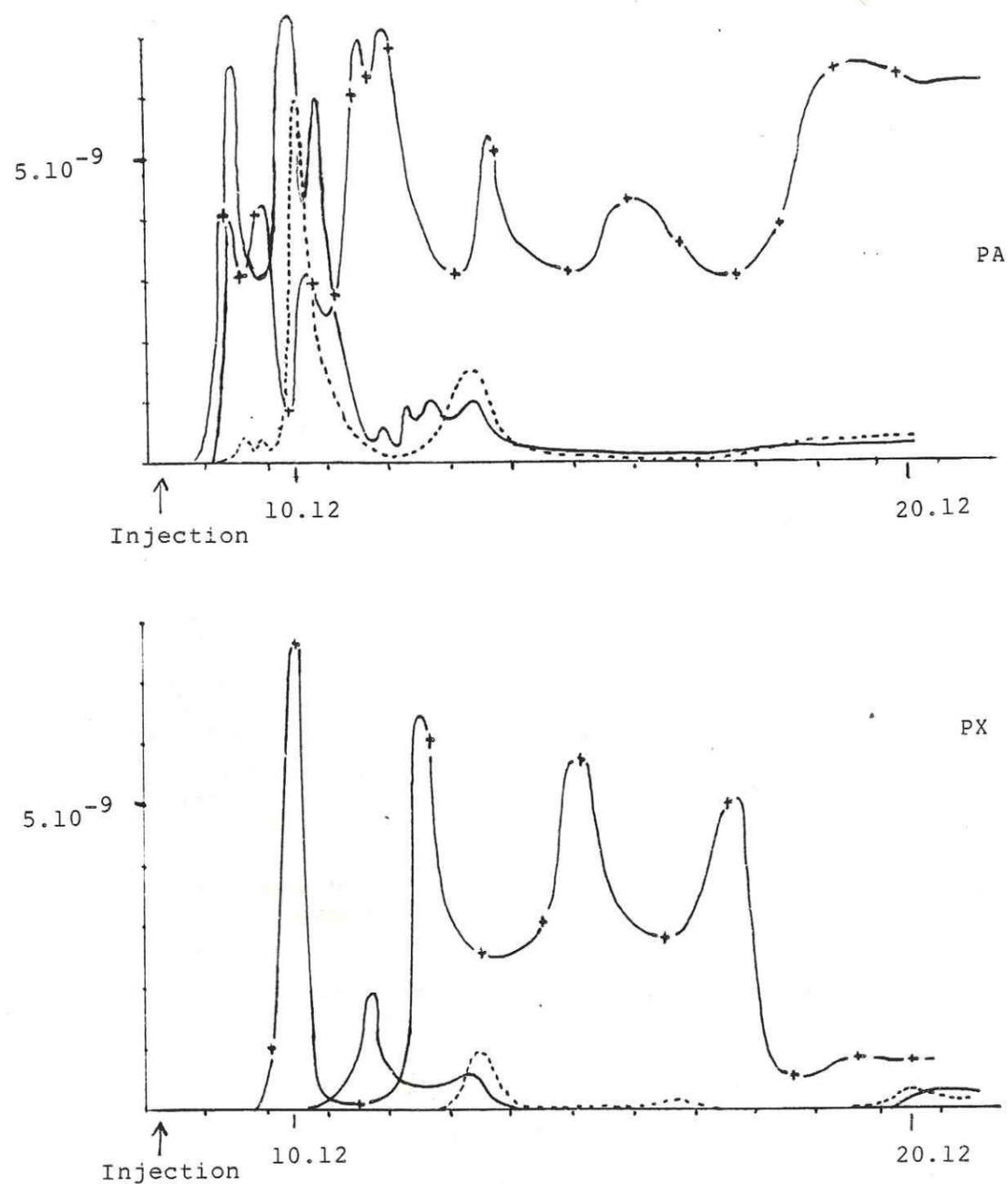


Figure n° 31: Courbes de concentration en fonction du temps  
obtenues au PA et au PX pour les trois traceurs

—+— fluorescéine    - - - - - amidorhodamine G  
— rhodamine B

Cet ouvrage ne sollicite que la tranche supérieure de l'aquifère dans laquelle les deux Rhodamines ont été injectées ; il semble situé sur un axe de plus forte perméabilité puisque c'est là que l'on observe les vitesses les plus fortes.

#### c) Le puits Aymond "PA"

Dans cet ouvrage, la fluorescéine est arrivée, de façon nette, après un trajet de 22 h, ce qui donne une vitesse de l'ordre de 60 m/h ; les concentrations sont restées élevées mais relativement constantes pendant toute la durée des prélèvements.

La Rhodamine B est arrivée après un trajet de 19 h, ce qui donne une vitesse de l'ordre de 30 m/h ; les concentrations, très élevées au début, ont décru pendant quatre jours ; un nouveau nuage est alors arrivé.

L'Amido-Rhodamine G est arrivée après un trajet de 14 h, ce qui donne une vitesse de 75 m/h. Les pics sont peu marqués et la concentration était encore égale à la moitié du maximum atteint 12 jours après l'injection.

D'une manière générale, les vitesses sont plus lentes que pour le PV et le PC, mais les concentrations sont plus élevées qu'au PC.

#### d) Le puits de la Folie "PX"

La fluorescéine est arrivée après un trajet de 20 h environ, ce qui donne une vitesse de 60 à 65 m/h ; les concentrations mesurées ont été assez irrégulières.

La Rhodamine B est arrivée pratiquement en même temps ce qui donne une vitesse de l'ordre de 30 m/h.

L'Amido-Rhodamine G est arrivée de façon certaine beaucoup plus tard, mais une pollution accidentelle lors du premier prélèvement peut avoir masqué un premier nuage.

Des concentrations notables des trois produits subsistaient lors du dernier prélèvement, 12 jours après l'injection.

#### 5°) L'AQUIFERE

Les résultats obtenus permettent de faire quelques hypothèses sur la structure de l'aquifère. Il s'agit d'un milieu fissuré non karstique. S'il existe une zone à plus forte perméabilité orientée Nord-Sud qui passerait près du P.V, elle n'est pas très marquée.

La fissuration est très importante puisqu'elle entraîne une très forte dispersion transversale comme le prouve la présence de Rhodamine B au PX et la présence de l'Amido-Rhodamine G au P.A. La dispersion longitudinale se traduit par des rapports des vitesses moyennes sur

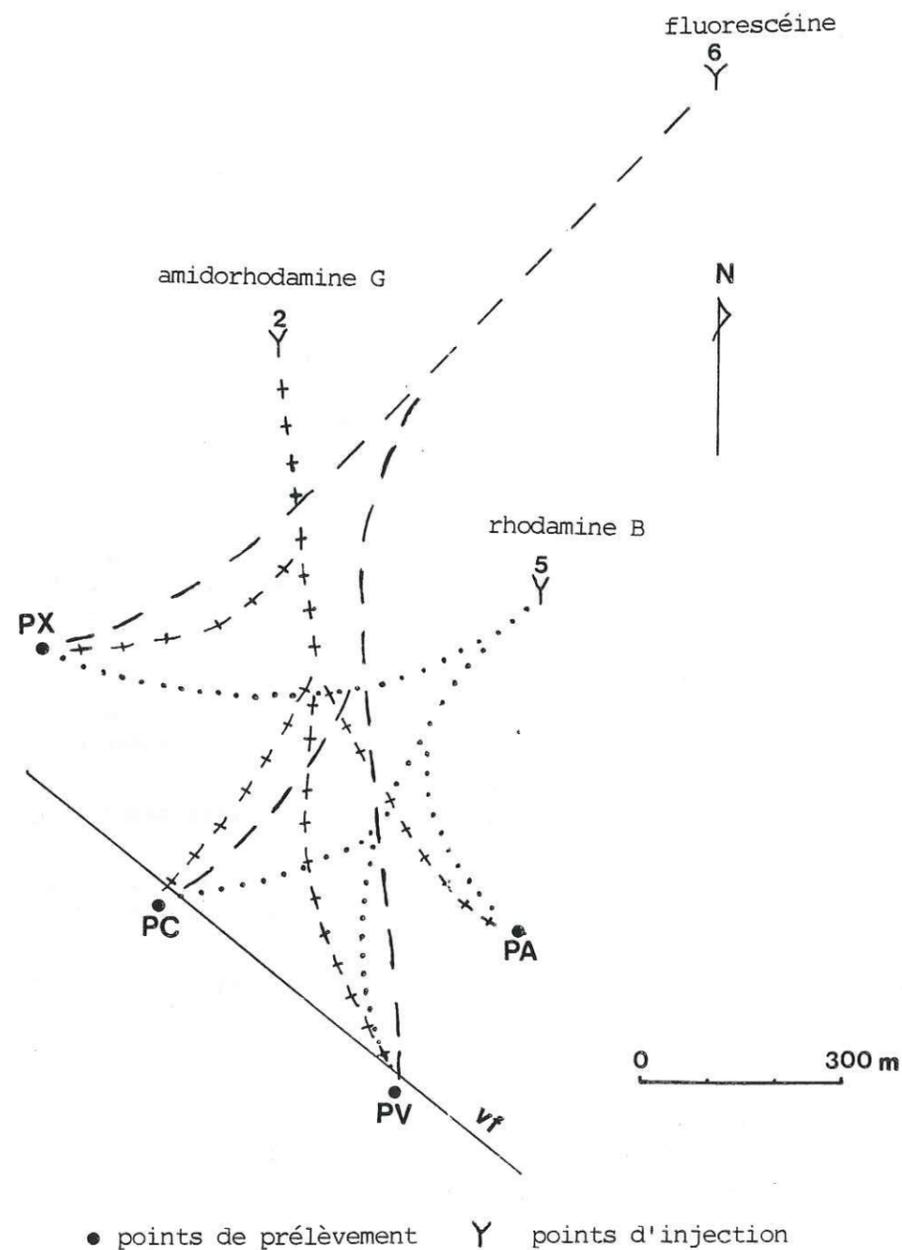


Figure n°32 : Carte schématique des circulations des traceurs

les vitesses maximales, élevés. Ces rapports sont tous supérieurs à 6 (voir tableau n° 14). Ceci confirme l'hypothèse du milieu fissuré non karstique.

Les vitesses maximales relativement élevées impliquent l'existence d'un gradient fort, au moins dans la partie amont de l'aquifère. La remontée de la nappe en relation avec les fortes précipitations a probablement augmenté ce gradient et explique peut-être la récurrence de "pics" observée pour pratiquement tous les traceurs à tous les points.

D'une manière plus générale, on peut dire qu'il existe un seul et même aquifère qui s'écoule grossièrement du Nord vers le Sud.

Les marnes (ou calcaire-marneux) visibles dans les fouilles où ont été injectées la Rhodamine B et l'Amido-Rhodamine G ne jouent pas le rôle d'imperméable. Seule la couverture Quaternaire, dans la partie basse, peut limiter l'infiltration, mais elle ne semble pas susceptible de l'empêcher totalement. Elle est d'ailleurs probablement très discontinue.

L'écoulement des eaux se fait probablement selon un axe à forte perméabilité avec une dispersion latérale importante liée à l'orientation des fissures par rapport à la direction des lignes de courant. Cela permet d'expliquer les différences de vitesse observées pour un même traceur. Cet axe à "plus forte perméabilité" semble être orienté du NNE vers le SSW dans la partie amont, puis du NNW vers le SSE.

#### 6°) LE COMPORTEMENT DES DIFFERENTS TRACEURS

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des différentes vitesses d'arrivée et de leurs rapports pour les trois traceurs aux points de prélèvement.

TABLEAU N° 14 : Valeurs des différentes vitesses d'arrivée et de leurs rapports pour les trois traceurs aux points d'observation

	PC	PV	PA	PX
Distance en m	1500	1600	1300	1300
Vitesse maximale en m/h	85	90	60	60
Vitesse moyenne en m/h	6	11	6	7
$\frac{\text{Vitesse max}}{\text{Vitesse moyen.}}$	14	8	10	9

	750	800	500	750
Distance en m	750	800	500	750
V max en m/h	60	60	30	30
V moy en m/h	8	6	4	5
$\frac{V \text{ max}}{V \text{ moy.}}$	7	10	7	6

	850	1150	950	550
Distance en m	850	1150	950	550
V max en m/h	65	90	75	?
V moy en m/h	8	9	8	?
$\frac{V \text{ max}}{V \text{ moy}}$	8	10	9	?

Nota : la vitesse moyenne est celle correspondant au dernier jour de prélèvement.

la vitesse maximale correspond à la vitesse des premières arrivées de traceur détectables.

Les écarts entre les différentes vitesses maximales sont relativement faibles. Ils s'expliquent par les conditions d'infiltration au point d'injection pour les écarts entre produits et par la position du point de prélèvement par rapport à l'axe à forte perméabilité pour les écarts entre points.

Les vitesses moyennes sont, elles aussi, assez homogènes. Cette homogénéité des vitesses ne se retrouve pas au niveau des concentrations, ni dans l'espace, ni dans le temps. Les concentrations de tous les traceurs varient très vite dans le temps et ces variations ne sont pas simultanées.

Ceci tient essentiellement aux conditions de circulation des eaux au sein de l'aquifère, c'est-à-dire à la dispersion entraînée par la fissuration importante.

Les écarts de concentration entre les traceurs en un même point s'expliquent (peut-être !) au PC, mais beaucoup moins facilement au PV où la concentration en Amido-Rhodamine G est restée faible sans raison apparente ; d'autant plus que cette concentration est tout à fait comparable à celle des autres traceurs au PA.

Il n'est pas possible de dire que les traceurs se comportent différemment les uns des autres dans ce type d'aquifère. Les différences observées tiennent plus aux conditions d'injections, de prélèvement et de circulation qu'aux propriétés des différents traceurs.

En particulier, la répartition des écarts de concentration, dans l'espace et dans le temps, ne permet pas de dire qu'un des traceurs est plus sensible aux phénomènes d'adsorption que les autres.

L'écoulement général se faisant selon une direction Nord-Sud, les masses élémentaires d'eau vont suivre les trajets offerts par les directions de fractures N95°-100° ou N255°-260°. Ceci explique la grande ouverture de l'angle entre les directions d'écoulements réels observés sur le terrain et donne une image de la dispersion transversale (figure n° 33).

27 AOÛT 2003

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

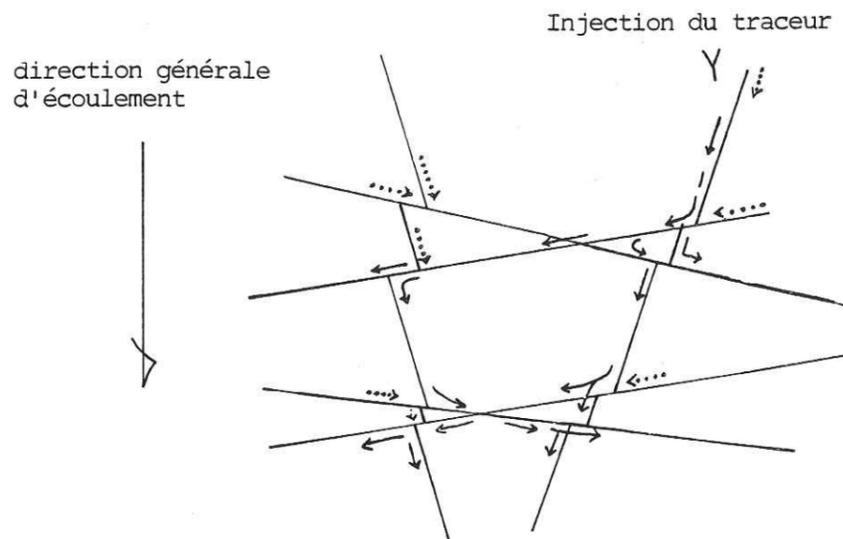


Figure n° 33 : Modèle de dispersion transversale en relation avec la fracturation observée sur le site (vue en plan)

Les flèches —> symbolisent le trajet du traceur ; il y a dispersion par dichotomie du flux à chaque intersection de plans de fractures.

Les flèches ...> représentent les apports d'eau non tracés qui entraînent une dilution.

Il est difficile de préciser quel rôle a joué, dans cette dispersion, la remontée de la nappe résultant des fortes précipitations. Il est certain que cela intervient sur les vitesses de transfert des traceurs. D'autre part, la remontée de la nappe offre des possibilités de cheminement supplémentaires. En période de hautes eaux, les temps de transit et de séjour sont plus brefs.

#### 7°) CONCLUSIONS

Dans un aquifère fissuré, la dispersion traduit l'extension dans l'espace et dans le temps de la zone où la concentration d'un traceur (et donc d'un polluant quelconque) dépasse le seuil de détection, c'est-à-dire la vulnérabilité de l'aquifère.

Cette dispersion dépend essentiellement des caractéristiques lithologiques et structurales de l'aquifère, mais les conditions hydrodynamiques jouent un rôle non négligeable.

Dans l'exemple étudié ici, la géométrie de la fissuration permet des transferts de matière selon des directions qui font un angle de plus de 70° par rapport aux lignes de courant. Cela entraîne une dispersion transversale considérable donc une très grande vulnérabilité de l'aquifère en cas de pollution accidentelle. L'existence d'une zone à plus forte perméabilité ne suffit pas, tout au moins en période de hautes eaux, à empêcher cette dispersion comme cela peut se passer dans les zones où existent des réseaux karstiques hiérarchisés.

#### C) TRACAGE DE LA ROQUEBRUSSANNE (Var)

— Les résultats de cette expérience ont fait l'objet d'une publication présentée au 109ème Congrès National des Sociétés Savantes, à Dijon, en 1984 - (J-C.FOURNEAUX et al, 1984) —

##### 1°) CADRE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le site choisi correspond à la plaine qui s'étend à l'Est de La Roquebrussanne ; il s'agit d'une zone où existe une surépaisseur des formations du Mucelkalk puisqu'un forage en a traversé plus de 450 m.

Cette plaine a une forme triangulaire, avec une longueur de 8 km environ ; sa plus grande largeur atteint 6 km. Un remplissage quaternaire masque le substratum triasique. La limite Ouest correspond à une faille méridienne qui la sépare d'un vaste massif de Calcaires du Jurassique supérieur. La limite Nord est constituée par un faisceau de plis serrés et de failles orientées N 80. Au Sud, le Trias semble passer normalement sous le Lias et le Dogger.

En période de basses eaux, l'Issole se perd complètement au droit du village de la Roquebrussanne pour ne réapparaître que quelques kilomètres plus à l'Est, en aval du village de Garéoult. Il en est de même de tous les ruisseaux qui viennent du Nord et du Sud.

Sur la limite Nord de la plaine, deux importantes zones d'effondrement jalonnent le tracé d'un accident. Il s'agit du Grand Lac, à l'Ouest, profond d'une cinquantaine de mètres où il y a toujours de l'eau, et du Petit Lac, à l'Est, profond d'une vingtaine de mètres, sec en période de basses eaux.

Les sources de Garéoult semblent représenter l'exutoire de cet aquifère. Mais il existe aussi une importante source sur le tracé de la

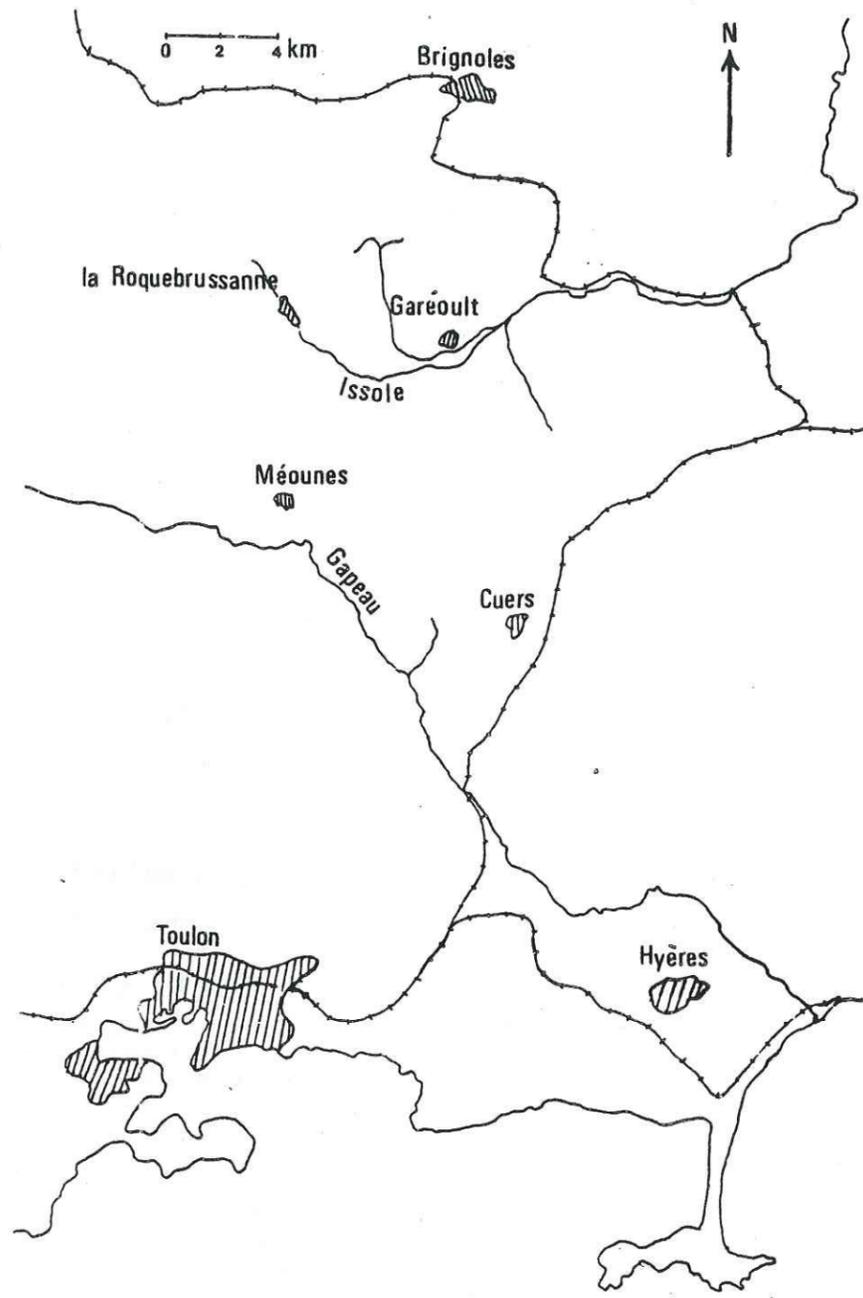


Figure n° 34 : La Roquebrussanne :  
Plan de situation

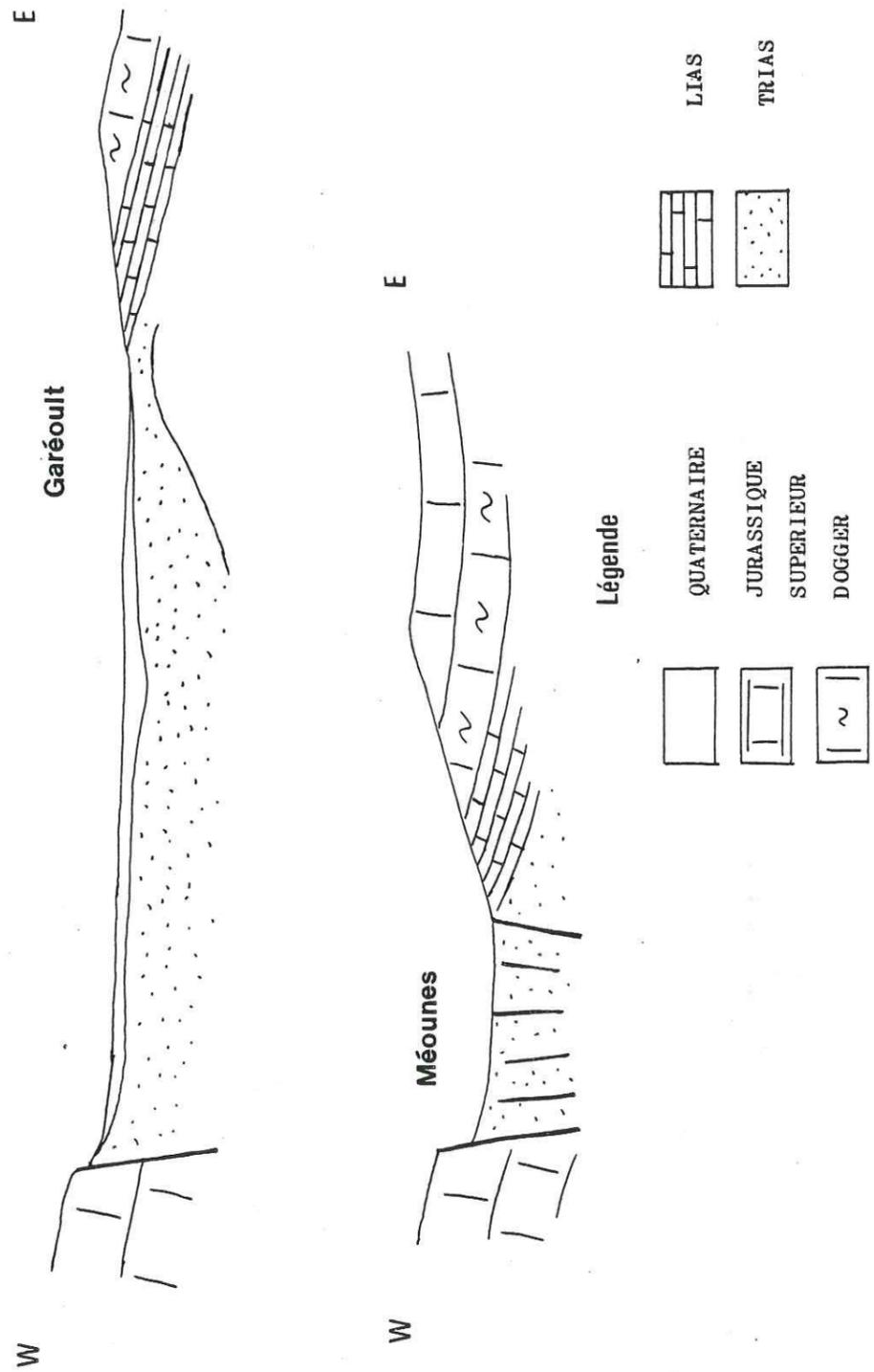


Figure n° 34 bis : La Roquebrussanne :  
coupes géologiques schématiques.

faille qui limite la plaine à l'Ouest, dont les eaux rejoignent le Gapeau, à Méounes. Plus au Sud, en rive gauche du Gapeau, trois autres sources importantes existent. La structure géologique implique une alimentation en provenance du Nord.

Une opération de traçage a donc été entreprise pour mettre en évidence l'existence éventuelle d'un aquifère au sein des assises du Muchelkalk. Le problème consistait à pouvoir injecter deux traceurs en deux points différents et que ces traceurs atteignent bien l'aquifère.

Les deux points choisis à cet effet sont deux forages. Le premier correspond au forage profond qui a traversé plus de 450 mètres de Muchelkalk. Un essai d'eau a montré que l'infiltration y était possible. Le deuxième point correspond à un forage réalisé pour cette opération et implanté sur le tracé présumé de l'accident qui passe par le Grand Lac. Là aussi, un essai d'eau a montré les possibilités d'infiltration.

## 2°) LE TRACAGE

Quatre kilogrammes de Rhodamine B diluée dans l'alcool et additionnée de Soude ont été injectés au premier point ; ils ont été poussés par 18 m<sup>3</sup> d'eau. La charge a atteint plus d'un Bar dans le tube, pendant quelques minutes.

De même quatre kilogrammes de fluorescéine dissous dans de l'eau ont été injectés dans le forage à l'Est du Grand Lac. Ils ont été poussés par 4 m<sup>3</sup> d'eau ce qui a provoqué une surcharge de près de deux Bars pendant quelques minutes.

## 3°) LES PRELEVEMENTS

Le choix des points de prélèvement a été fait en fonction des conditions géologiques et hydrogéologiques. Un premier groupe de points se trouve dans le secteur de Garéoult. Trois exutoires représentatifs des différentes venues de ce secteur ont été choisis. Un deuxième groupe de points correspond aux différentes sources de la région de Méounes. Quatre sources ont été choisies.

Les prélèvements ont été faits du 14 Février 1983 au 14 Mars de la même année, à raison de deux prélèvements par jour pendant une semaine, puis un par jour et enfin un tous les deux jours.

Les échantillons conservés à l'abri de la lumière ont été ensuite analysés au spectro-fluorimètre.

## 4°) LES RESULTATS

Les deux traceurs ont été retrouvés à tous les points (*figure n°35*). Les courbes expérimentales obtenues sont rassemblées sur les figures n° 36 et n° 37.

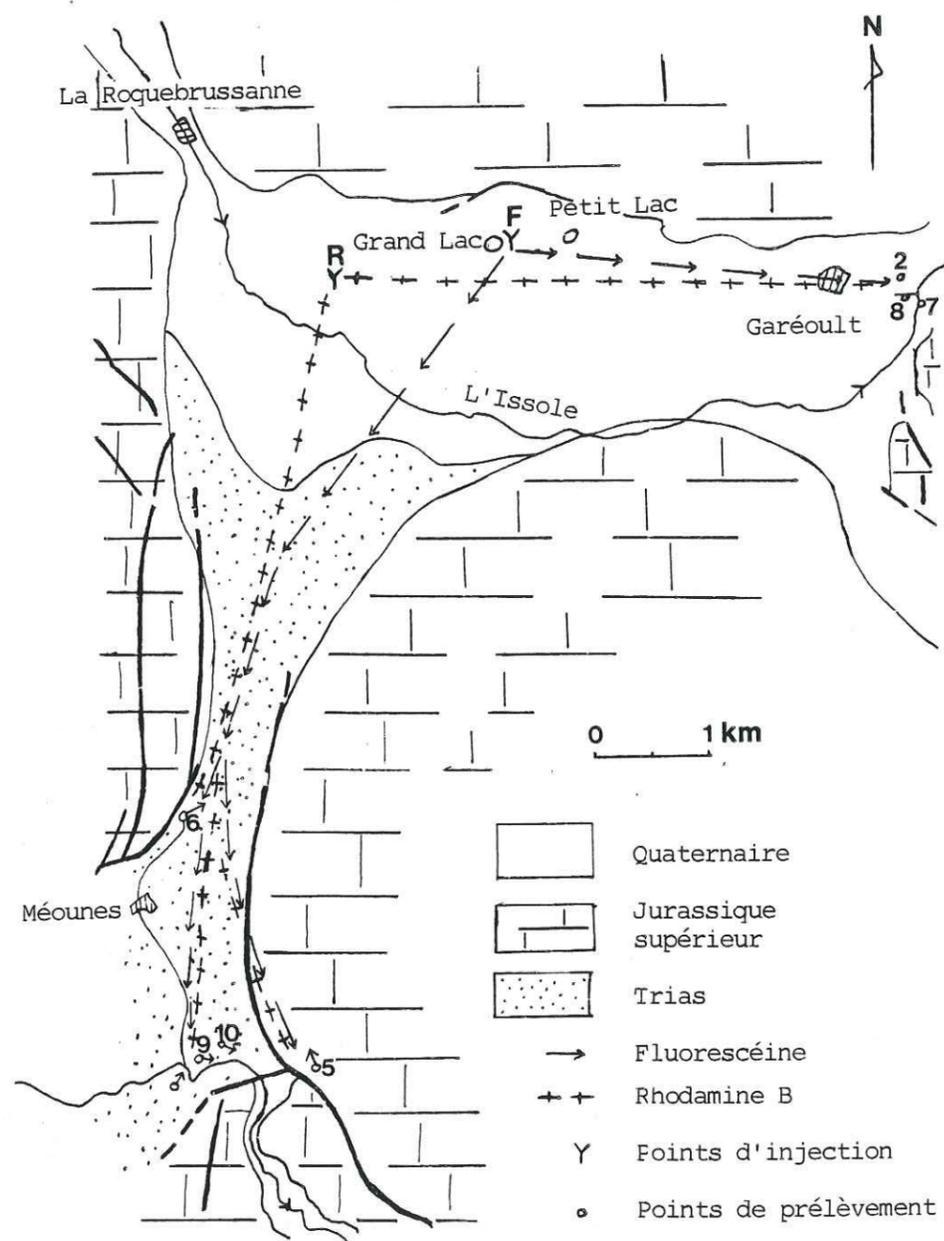


Figure n° 35 : Carte géologique et schéma de circulation des deux traceurs

Les concentrations maximales mesurées sont de  $5.10^{-9}$  pour la fluorescéine et de  $6.10^{-10}$  pour la rhodamine B.

A partir du moment où les traceurs sont apparus, les concentrations ont peu varié ; il n'y a pas eu de véritable pic mais une suite de variations, dans un sens ou dans l'autre, plus ou moins différente d'un point à l'autre et pour les deux traceurs.

Les vitesses de transit entre les points d'injection et les différents points d'observation sont comprises entre 21 et 85 m/h, ce, pour les premières arrivées.

La fluorescéine était encore présente à des concentrations voisines ou supérieures à  $10^{-9}$  dans tous les échantillons prélevés le 14 Mars.

La Rhodamine B n'était plus présente qu'en deux points mais le seuil de détection est plus élevé pour ce produit et ceci explique probablement cela. Les concentrations plus faibles obtenues avec la Rhodamine B s'expliquent, elles, par la plus forte adsorption de ce produit malgré la présence de soude.

Le tableau 15 ci-dessous récapitule les vitesses maximales, les vitesses moyennes et leurs rapports pour la fluorescéine aux différents points de prélèvement. Les courbes de restitution de la Rhodamine B ne permettent pas d'estimer correctement les vitesses moyennes ; seules les vitesses des premières arrivées ont été calculées.

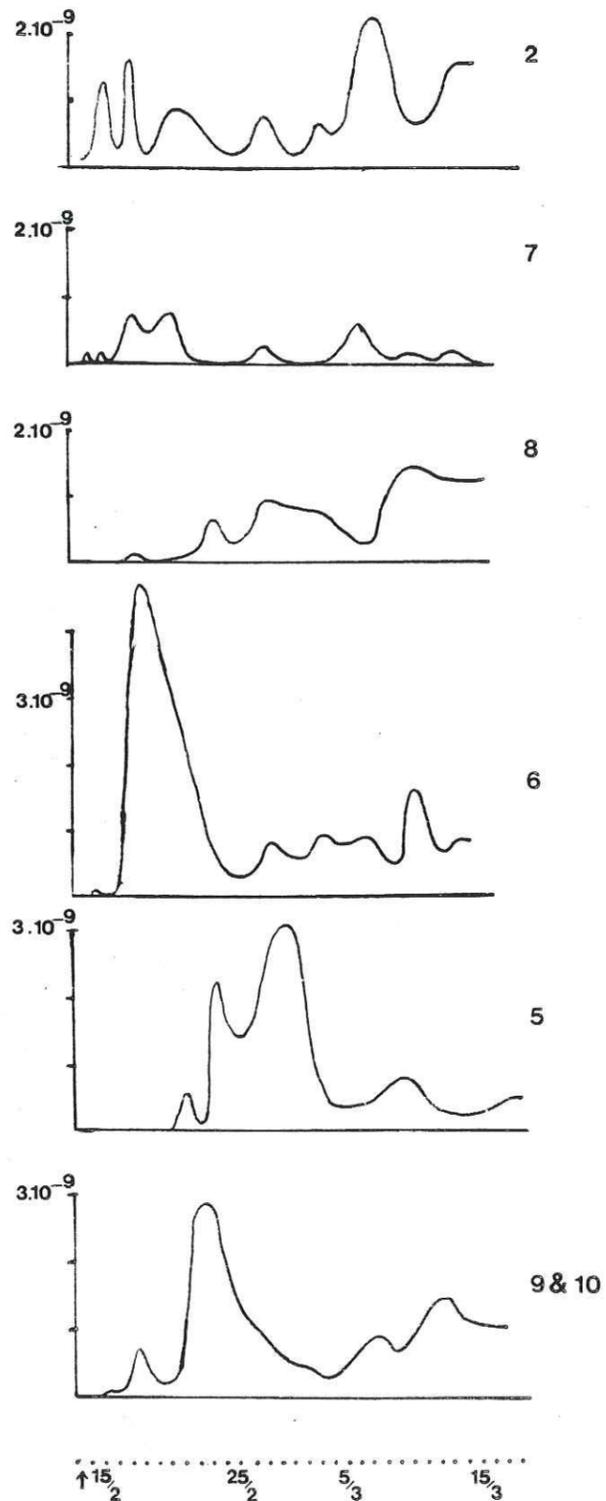


Figure n° 36 : La Roquebrussanne ; restitution de la fluorescéine

G  
A  
R  
É  
O  
U  
L  
T

M  
É  
O  
U  
N  
E  
S

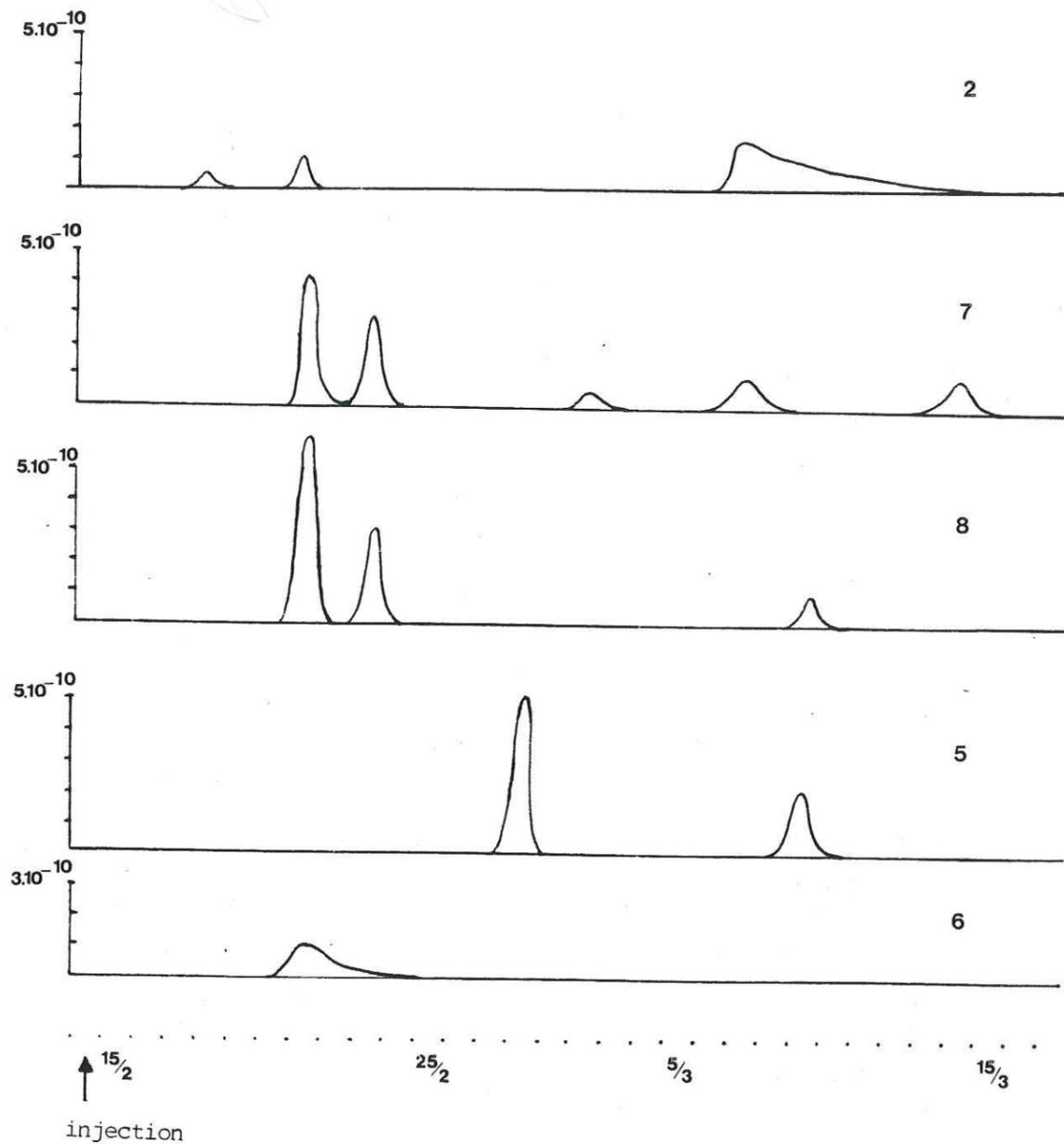


Figure n° 37 : La Roquebrussanne ; courbes de restitution de la rhodamine B .  
2,7,8 : Garéoult , 5 et 6 : Méounes

TABLEAU N° 15 : Les différentes vitesses d'arrivée des deux traceurs

	FLORESCEINE				RHODAMINE B		
	Distances en m	Vitesse maximale en m/h	Vitesse moyenne en m/h	$\frac{V_{max}}{V_{moy}}$	Distances en m	Vitesse maximale en m/h	
Groupe de Garéoult	2	3500	70	5	14	5000	28
	7	3500	40	5	8	5000	27
	8	3500	41	5	8	5000	27
Groupe de Méounes	5	8000	48	10	5	7000	21
	6	8000	70	10	7	7000	42
	9	8000	85	12	7	7000	33
	10	8000	85	12	7	7000	33

##### 5°) ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Les différents résultats obtenus concordent. La présence des deux traceurs à tous les points de prélèvement témoigne de l'existence d'une forte dispersion dans l'espace (ou transversale) qui se traduit par des lignes de courant qui semblent se couper à 90°. Une telle dispersion transversale ne peut s'expliquer que par l'existence de nombreuses fissures ayant des orientations différentes.

Compte-tenu des conditions d'injection, ce réseau de fissures doit être développé sur une certaine épaisseur, bien en dessous du niveau de base géologique actuel.

Les faibles concentrations des traceurs aux différents points de prélèvement impliquent une grande dilution. Celle-ci est le résultat de la dispersion.

La présence de traceurs à tous les points de prélèvement 28 jours après l'injection traduit une dispersion dans le temps (ou longitudinale). Celle-ci se manifeste aussi par des rapports, vitesses maximales/vitesses moyennes, élevés (ils sont tous supérieurs ou égaux à 5 pour la fluorescéine) (voir tableau n° 15). Ceci confirme l'existence d'un réseau de fissures au sein des calcaires et dolomies qui constituent l'aquifère.

Un calcul sommaire permet d'estimer à environ 700 g la quantité de fluorescéine ressortie au bout de 28 jours. Il aurait donc fallu prélever encore pendant deux mois au moins pour retrouver des concentrations nulles.

L'absence de pics bien marqués sur les courbes de concentration en fonction du temps, pour tous les points, exclut la possibilité qu'il y ait des chenaux de type karstique, au moins dans la partie de la plaine où a été faite l'injection. L'existence de tels chenaux qui auraient joué le rôle de drain compte-tenu de la situation de basses eaux dans laquelle se trouvait alors l'aquifère, aurait empêché la dispersion dans l'espace.

Ces résultats n'impliquent tout de même pas que la fissuration soit répartie de façon homogène dans tout l'aquifère. Il est même très probable qu'il existe des zones à plus forte perméabilité réparties sur le tracé des grands accidents. Seule une analyse de la piézométrie peut permettre de les localiser avec précision dans un tel contexte.

La surcharge créée au moment de l'injection ne fait que représenter localement la situation qui existe en période de hautes eaux. Le fait qu'elle n'intervienne pas de façon simultanée aux deux points d'injection permet seul de voir des écoulements se faire dans des directions perpendiculaires et se croiser.

La grande dilution des traceurs et la longueur du temps de restitution traduisent aussi l'importance de l'aquifère. Les deux traceurs se sont mélangés à un volume d'eau considérable qui peut donner un ordre de grandeur du volume d'eau stocké dans la partie de l'aquifère concernée par l'opération de traçage.

Ce volume est du même ordre de grandeur que le produit du débit des différents exutoires par le temps de restitution. Ceci doit convaincre les utilisateurs de cette méthode de la nécessité de prélever les échantillons pendant une longue période afin de bien voir la fin de la restitution des traceurs.

Cette relation n'existe que parce que l'infiltration des deux traceurs s'est faite rapidement dans les forages et a concerné une tranche considérable de l'aquifère.

Du point de vue géologique, les résultats obtenus apportent quelques éléments nouveaux. Si la situation des sources de Garéoult s'explique par la présence des assises du Lias qui forment une sorte de barrage, il n'en est pas de même pour celle des sources de la vallée du Gapeau, aux environs de Méounes.

Ces relations mises en évidence montrent que les différentes failles méridiennes de la région de Méounes jouent le rôle de drains, non seulement pour les massifs calcaires, mais aussi pour une partie de la nappe de la plaine de la Roquebrussanne.

Sans la présence de ces drains, il est d'ailleurs peu probable que les traceurs n'aient été détectés à plusieurs kilomètres des points d'injection (aux sources de Méounes), étant donné la forte dilution qu'ils ont subie dans la nappe de la plaine.

### III - ETUDE D'AQUIFERES COMPLEXES PAR LA METHODE DES TRACAGES

Après l'étude d'aquifères fissurés en milieu calcaire, nous allons nous intéresser aux milieux complexes.

Les expériences de traçage dans les aquifères hétérogènes permettent de définir les différents types de circulations qui y coexistent. Ces milieux sont complexes car ils peuvent être le siège à la fois d'écoulements superficiels rapides, de circulations en chenaux ou en nappe de fissures et même de cheminements en milieu poreux.

Deux exemples de traçage dans de tels aquifères ont fourni des informations intéressantes sur les conditions de circulations des eaux souterraines et leur vulnérabilité.

#### A) EXPERIENCES DE TRACAGE SUR LE SITE DU CLOU (Haute Tarentaise, Isère)

En collaboration avec les services de la Région d'équipement Alpes-Lyon d' E.D.F., nous avons procédé à des opérations de traçages sur le site du barrage du Clou, en Haute Tarentaise, au cours de l'été et du début de l'automne 1983 (*figure n° 38*).

##### 1°) BUT DE L'ETUDE

Le but de ces traçages était de définir, de façon aussi précise que possible, les relations existant entre les différentes pertes, observées sur le pourtour de la cuvette, et les sources situées en aval des appuis du futur barrage. Cette étude devait, en outre, rechercher la présence éventuelle d'écoulements souterrains préférentiels (ou leur absence).

Enfin, les résultats des opérations de traçages devaient permettre une analyse du comportement des eaux souterraines et de leur condition de circulation au sein du massif.

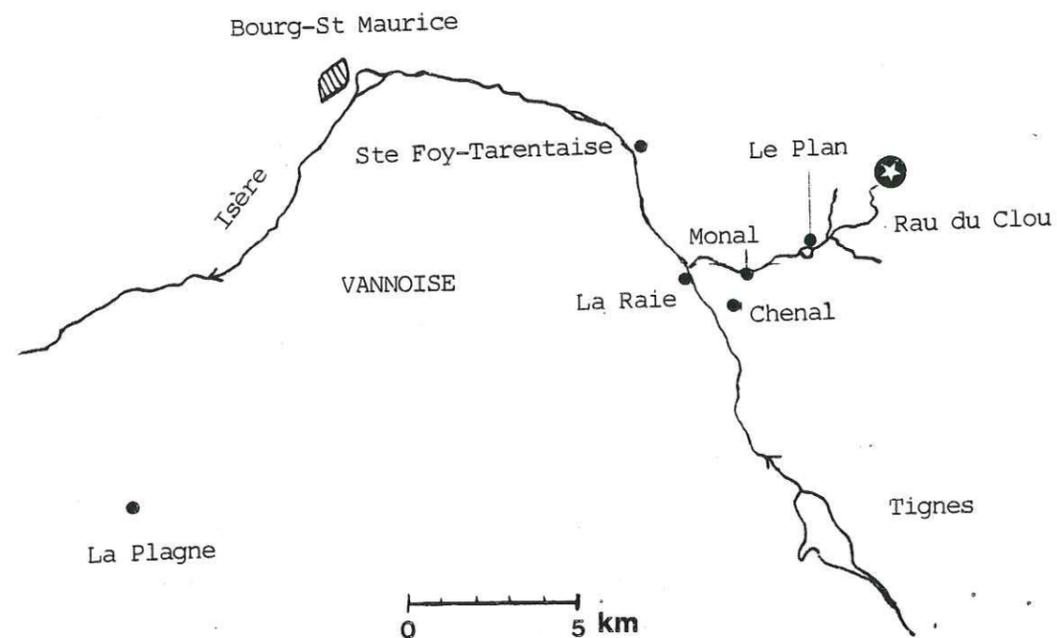


Figure n° 38 : Le Clou :  
Situation géographique

## 2°) GEOLOGIE DU SITE (figure n° 39)

La géologie du site est très complexe car il s'agit d'une zone qui a subi un véritable écaillage lors des derniers épisodes alpins. Mais d'une manière générale, la succession des formations est la suivante :

. Le socle métamorphique permo-houiller est recouvert par le trias constitué à la base de calcaires dolomitiques, de marbres et de dolomies, puis de quartzites. Ensuite des cargneules blanches marquent le contact entre le trias et la nappe des schistes lustrés. Cette dernière est tapissée par endroit (et notamment dans le fond de la cuvette) de formations meubles quaternaires (moraines, éboulis, silts).

## 3°) HYDROGEOLOGIE

Plusieurs dolines se sont formées lors de la fonte des derniers glaciers, dans les cargneules qui affleurent sur le flanc Nord de la cuvette, au-dessus du Lac du Clou vers 2500 m d'altitude. Les cargneules contiennent du gypse dans lequel ont pu se former des chenaux de dissolution.

Un des buts du traçage était de savoir si cette zone de dolines (dans laquelle les eaux de ruissellement s'infiltrent) était en relation avec des sources et des venues d'eau dans les galeries de reconnaissance.

Des vides et des zones de mylonites avaient été observées dans les forages, au niveau du contact entre la couverture et le socle, ce qui pouvait laisser présager des circulations assez importantes. De plus, tous les forages ont rencontré des venues d'eau, certains étaient même artésiens.

Le contact socle-couverture, qui semble plonger en direction de la Vallée de la Tarentaise, n'est pas une surface régulière, mais plutôt une succession d'écailles tectoniques qui peut freiner l'écoulement.

Il n'existe aucune grosse émergence de type karstique en aval du site. Les sources répertoriées sont celles de Monal et de Chenal qui ont chacune des débits inférieurs à 10 l/s. La source située sur la rive droite du ruisseau du Clou, à une altitude de 2.130 m environ, se trouve

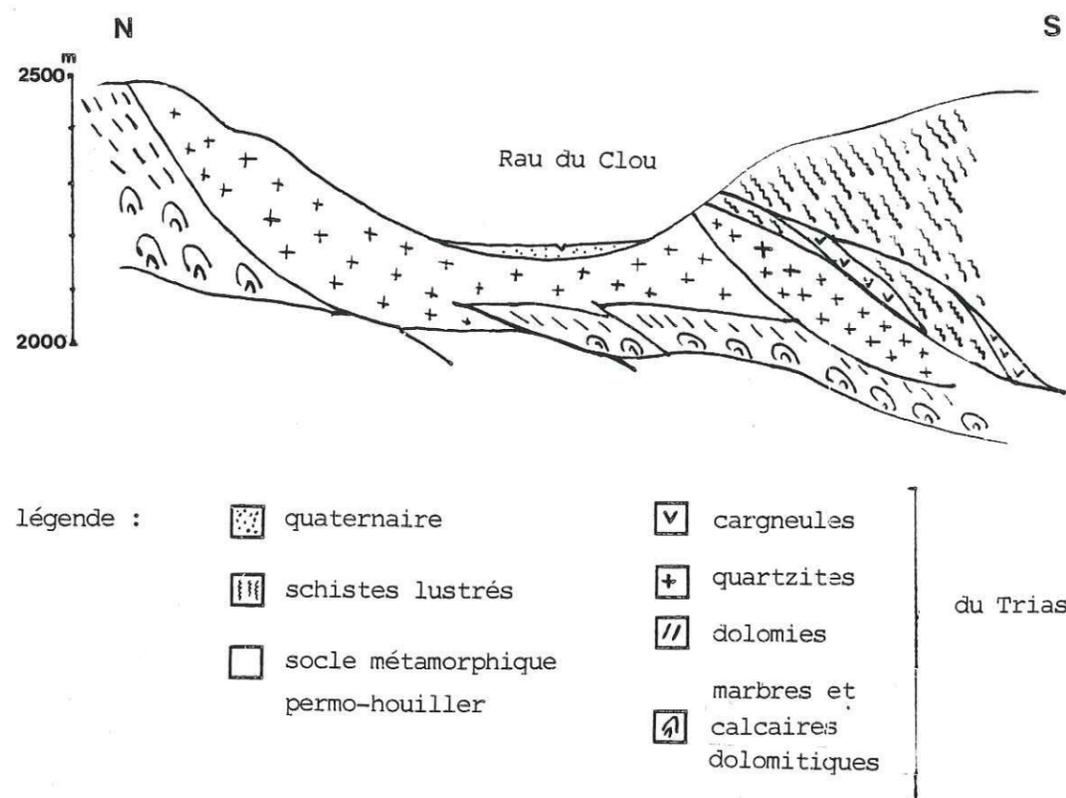


Figure n° 39 : Coupe géologique schématique du secteur du Clou

au-dessus du contact socle/couverture, dans le trias dolomitique. On peut donc penser que ces vides rencontrés par les forages et les galeries de reconnaissance ne constituent pas un réseau de conduits actifs mais qu'ils sont plus ou moins colmatés par endroits par du gypse ou des dépôts alluviaux.

#### 4°) LES OPERATIONS

Une première visite sur les lieux a été faite le 7 Juin 1983 afin de définir les opérations à mettre en oeuvre.

Le 20 Juillet, une deuxième visite a permis de choisir les points de prélèvements et de faire les points "zéro". Ce jour-là, il a été décidé une première injection de 2 kg de fluorescéine dans une perte bien visible dans une doline située au Nord du lac du Clou, à 2.515 m d'altitude environ (figures n° 40 et 41), le débit disparaissant dans la perte était de l'ordre de 10 l/s, soit, pour une injection en 30 s, une concentration en fluorescéine de l'ordre de  $7 \cdot 10^{-4}$ .

L'injection a eu lieu le 21 Juillet à 9 h du matin. Les prélèvements ont été faits sur une période de 6 semaines sur les points ainsi définis :

- n° 1 : source temporaire à 2.250 m d'altitude ;
- n° 2 : forage artésien (lors de l'injection) situé à 2.220 m d'altitude, au NW des chalets du Clou (C83.12) ;
- n° 3 : eaux d'exhaure de la galerie rive droite (2.225 m) ;
- n° 4 : eaux d'exhaure de la galerie rive gauche (2.180 m) ;
- n° 5 : source rive droite sous les deux galeries (2.130 m) ;
- n° 6 : source de Chenal (1.800 m).

Un deuxième traçage a été mis en oeuvre les 28 et 29/9/1983. Deux kilogrammes de Rhodamine B dilués dans l'alcool et dans 250 litres d'eau ont été injectés sous pression dans le forage C 83.12 (point de prélèvement n° 2 de la première opération) ; une partie du traceur est remontée le long du tube et a coulé en surface avant de se réinfiltrer en partie. La concentration de la Rhodamine était de l'ordre de  $8 \cdot 10^{-4}$ .

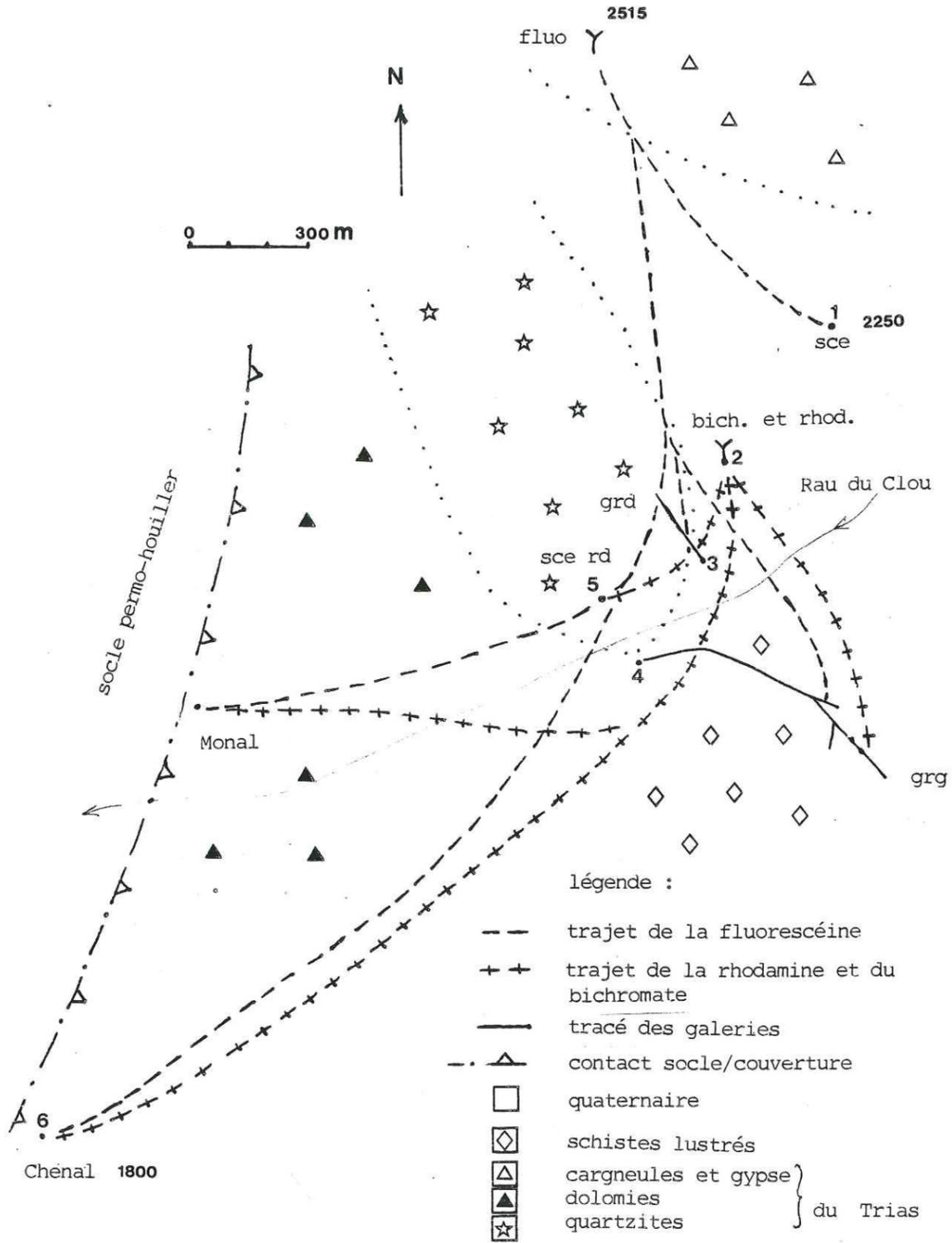


Figure n° 40 : Le Clou; carte géologique et schéma des circulations ( en plan)

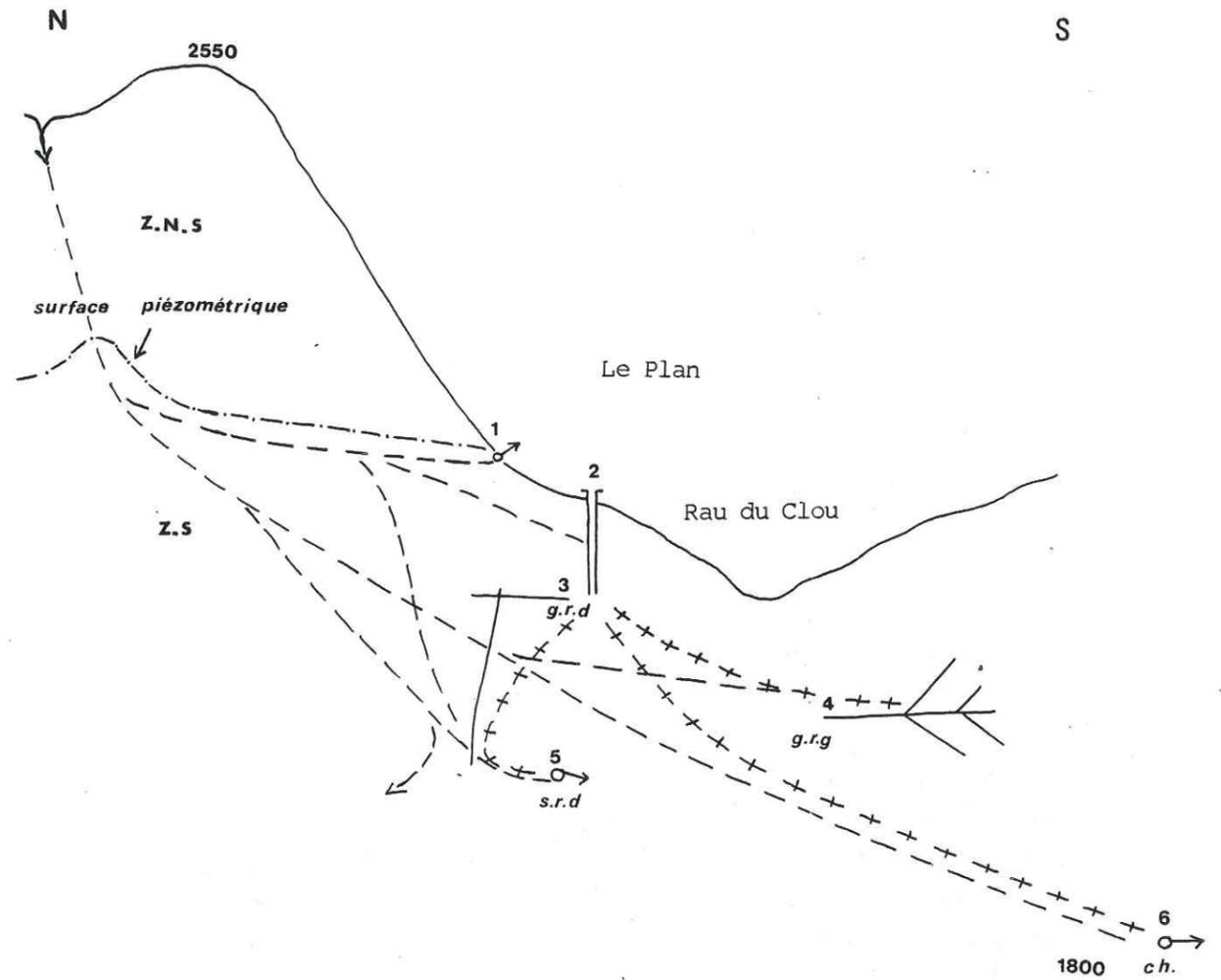


Figure n° 41 : Le Clou : schéma des circulations (en coupe)

--- trajet de la fluorescène  
 +++ trajet du bichromate et de la rhodamine

A la suite de cet échec et après avoir fait cimenter le tube, une troisième injection a été réalisée. Le 10 Octobre à 10 h du matin, 41 kg de bichromate de potassium ont été injectés sous une pression de 0,8 bar, à une concentration voisine de  $8.10^{-3}$ .

Les prélèvements ont été faits sur les points ainsi définis :

- I a : forage dans la galerie rive droite (venue du fond),
- I b : même forage mais sur la somme des autres venues, (ces deux forages étaient artésiens).
- II : source rive droite (point n° 5 lors de la première injection),
- III : source du Monal vers 1.875 m d'altitude,
- IV a : forage 82-15 dans la galerie rive gauche (pm 450),
- IV b : forage 82.11 dans la galerie rive gauche (pm 547),
- IV c : venue d'eau sur le côté gauche de la même galerie au pm 565,
- IV d : venue d'eau en calotte au pm 570,
- V : source de Chenal (ancien point n° 6).

Des prélèvements ont été effectués après l'injection de Rhodamine sur tous les points jusqu'au 8/11 malgré les conditions défavorables d'injection. Les échantillons ont été conservés à l'abri de la lumière et à température à peu près constante jusqu'au moment d'être analysés. Les dosages ont été effectués au spectrofluorimètre (Farrand mark I) pour la fluorescéine et la rhodamine B et au spectrophotomètre pour le bichromate de potassium, après adjonction du réactif à la Diphényl-carbazide.

TABEAU N° 16 : Tableau de correspondance des différents points de prélèvement sur le site du Clou

Fluorescéine	Bichromate & Rhodamine
Point 1	sec, non utilisé
Point 2 (forage C.83.12)	point d'injection des deux traceurs
Point 3	pts Ia et Ib (Galerie R.D)
Point 4	pts IVa,b,c et d (Galerie R.G)
Point 5	point II (Sce rive droite)
Point 6	point V (chenal)
Non utilisé	point III (Le Monal)

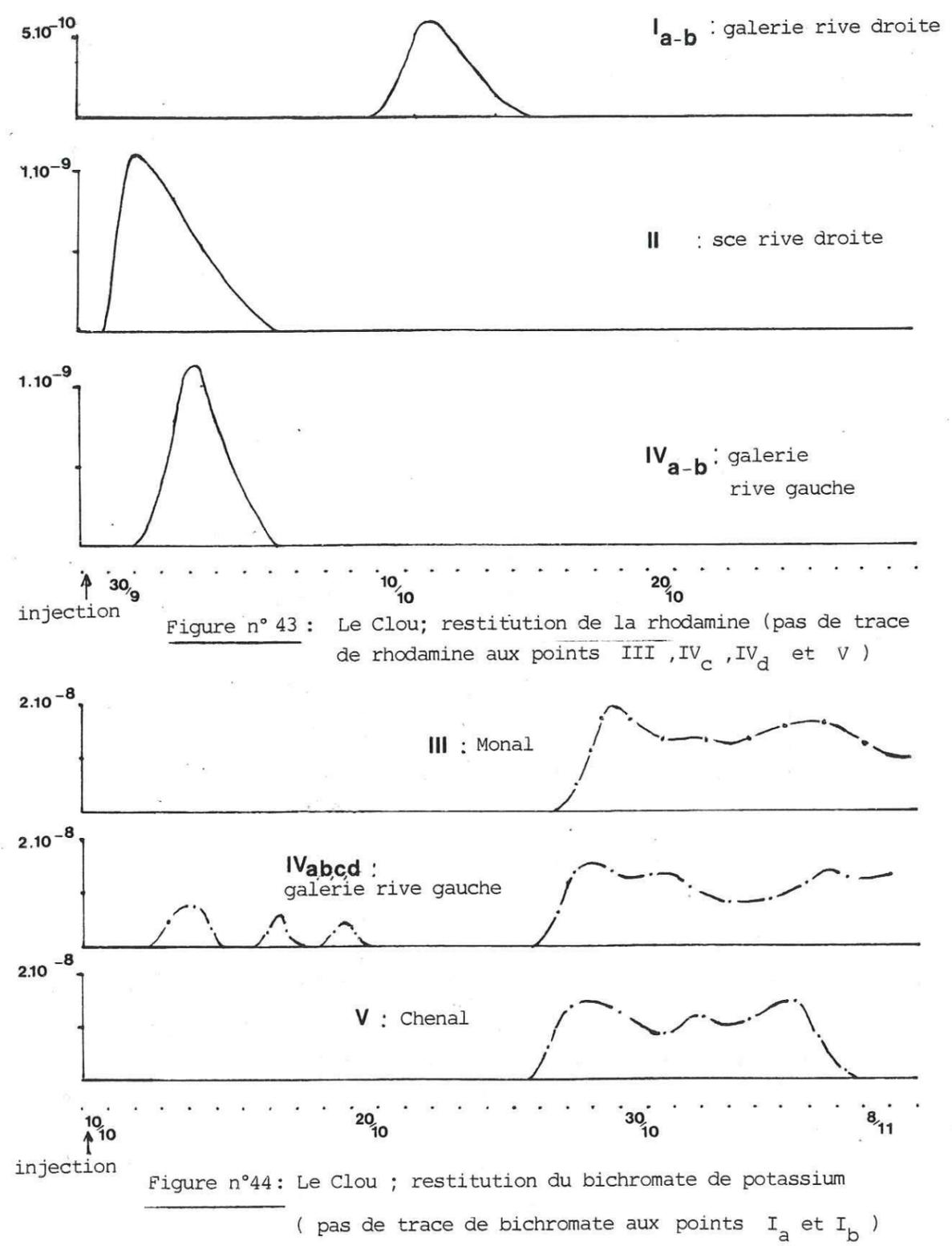
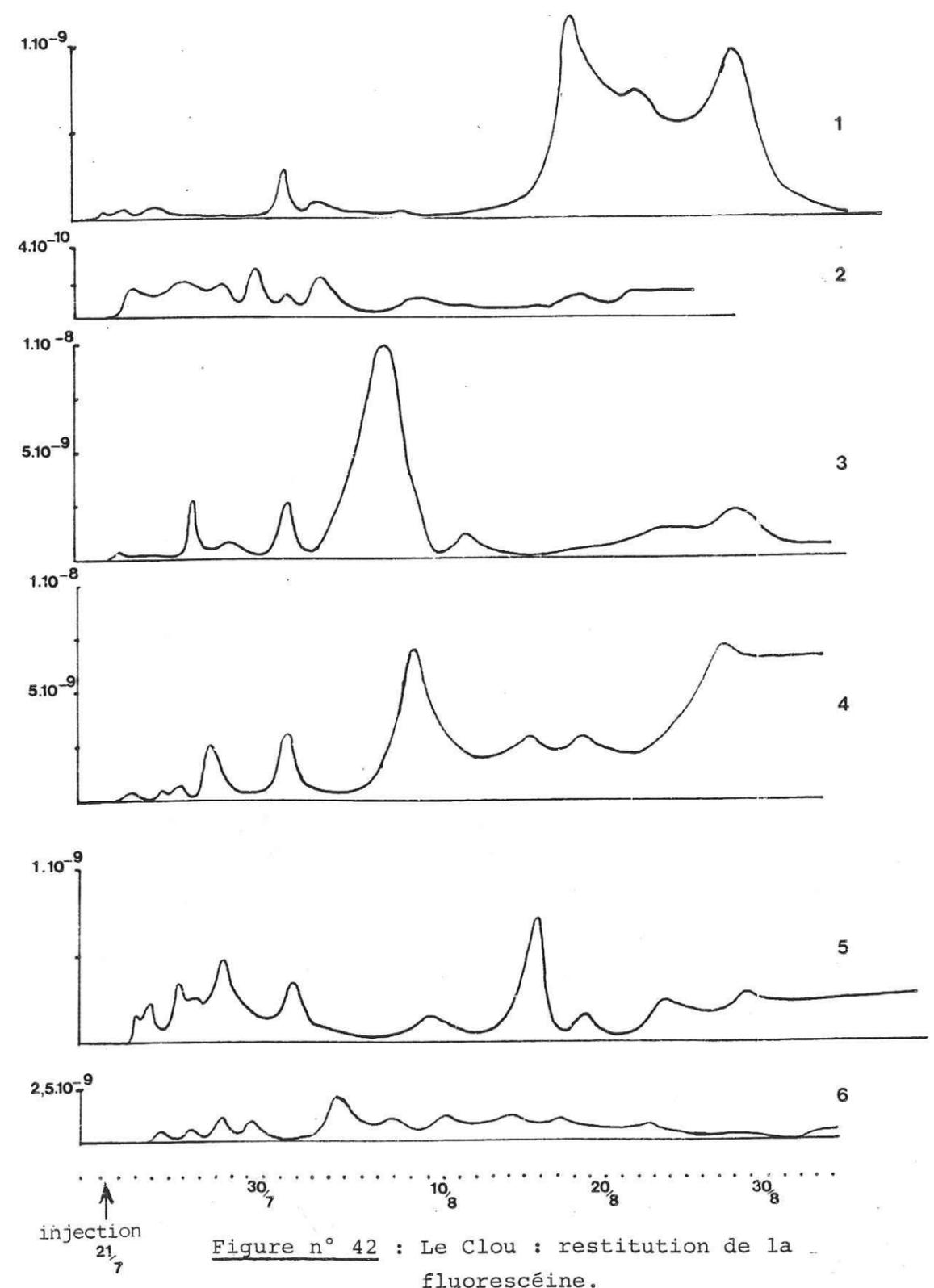
##### 5°) LES RESULTATS

A partir des résultats obtenus, les courbes de concentration en fonction du temps ont été tracées pour tous les points et les trois traceurs (*figures n° 42, n° 43, n° 44*).

Les prélèvements ont été interrompus alors que la concentration était encore très forte. De la fluorescéine a été retrouvée à tous les points (sauf le n° 2 sec depuis le 26.08) au mois d'octobre.

Les vitesses de circulation de la fluorescéine sont inscrites dans le tableau 17 ci-après.

Les conditions d'injection de la Rhodamine B ne permettent pas d'utiliser les résultats correctement. La Rhodamine ne se détecte qu'à des concentrations de  $10^{-10}$  et les points où rien n'a été trouvé peuvent en avoir eu soit à des concentrations inférieures à  $10^{-10}$ , soit après l'arrêt des prélèvements.



Les résultats obtenus n'apportent aucune information supplémentaire ou contradictoire par rapport aux résultats du premier traçage. Les débits plus faibles (et donc les vitesses et les concentrations maximales) compliquent aussi les possibilités d'analyse.

TABLEAU N° 17 : Les vitesses observées pour la fluorescéine

	<u>Premières arrivées</u>	<u>P i c</u>
Point		
1	150 m/h	4 m/h
2	36 m/h	5 m/h
3	220 m/h	9 m/h
4	180 m/h	10 m/h
5	83 m/h	12 m/h
6	31 m/h	8 m/h

Les résultats des dosages du bichromate sont présentés sur la figure n° 44.

Une gamme témoin a montré que le bichromate était décelable à des concentrations supérieures à  $10^{-8}$ . Compte-tenu des quantités injectées, les concentrations mesurées indiquent des dilutions analogues à celles observées pour la fluorescéine.

La présence de bichromate dans un seul échantillon au point II (source rive droite) est une énigme. La forte concentration mesurée impliquerait normalement l'existence d'une "trainée" bien marquée. Il peut donc s'agir d'une pollution accidentelle du flacon, du préleveur (?), ou au moment de l'analyse. Ce résultat n'est pas exploitable.

Les autres résultats sont homogènes et satisfaisants du point de vue purement méthodologique. Ils montrent que le bichromate peut être utilisé comme traceur à condition de pouvoir injecter des quantités au moins 10 fois plus grandes que pour la fluorescéine.

En résumé, la fluorescéine est sortie à tous les points ; la Rhodamine a été retrouvée dans la galerie RD, dans la source RD et en deux points de la galerie RG (forages des Pm 450 et 547) ; le bichromate, enfin, est arrivé à la source RD, au Monal, dans les quatre points de la galerie RG et à Chenal.

#### 6°) COMMENTAIRES DES RESULTATS

Les résultats des trois opérations de traçage impliquent d'abord l'existence d'un seul aquifère qui correspond à la couverture hétérogène posée sur le socle Permo-Houiller et à la base (au moins ?) des Schistes Lustrés. Il y a communication entre les pertes dans les Cagneules, les sources (RD, Chenal et Monal) et les zones aquifères sollicitées par les forages en surface et en galerie RD et RG.

Il faut parler d'une nappe même si les communications ne sont pas faciles entre deux points voisins. Mais cela n'implique en rien l'existence d'un milieu homogène.

L'analyse des courbes de concentration de la fluorescéine en fonction du temps fait apparaître trois types de circulation :

- des circulations très rapides marquées par de petits pics séparés par des points à concentration inférieure au seuil de détection,
- des pics bien marqués viennent ensuite avec des vitesses de l'ordre de 10 m/h,
- enfin, des zones à concentration bien marquée mais sans pic, avec des vitesses de transit de l'ordre du mètre par heure.

L'importance relative de ces différents types d'écoulement varie beaucoup d'un point à l'autre.

Au point n° 1

Il s'agit d'un trop plein temporaire où l'écoulement superficiel est nettement prédominant. Les fortes concentrations relatives observées à partir de la mi-août correspondent au tarissement et ne peuvent être considérées comme la marque d'une circulation en nappe de fissures.

Au point n° 2

Le forage était en charge jusqu'à la date du 22/8. Il s'agit d'un trop plein artificiel. Les concentrations mesurées ont été les plus faibles trouvées pour les différents points. Les pics traduisant des circulations superficielles sont peu marqués. Les premières arrivées correspondent à une vitesse de transit de l'ordre de 40 m/h.

Le pic principal, peu marqué lui aussi, donne une vitesse de 5 m/h.

Au point n° 3

où les mesures ont été faites sur les eaux d'exhaure de la galerie rive droite, les écoulements superficiels arrivent très rapidement puisque le premier "pic" arrive le 21/7 vers 14 h, ce qui donne une vitesse de transit de l'ordre de 220 m/h. Les pics à forte concentration n'apparaissent qu'à partir du 26/7, avec des concentrations de  $2,5 \cdot 10^{-9}$ ; cela donne une vitesse de plus de 9 m/h.

Au point n° 4

où sortent les eaux d'exhaure de la galerie rive gauche, la première arrivée a été mesurée le 21/7 vers 21 h, ce qui donne une vitesse de transit de 150 m/h. Les pics à forte concentration (relative) sont bien marqués à partir du 24/7, ce qui donne une vitesse un peu supérieure à 10 m/h. La concentration va ensuite rester supérieure à  $3 \cdot 10^{-9}$  du 8 au 31/8; elle sera mesurée à plus de  $10^{-9}$  au début du mois d'octobre.

Au point n° 5

c'est-à-dire à la source de la rive droite, les premières arrivées de fluorescéine sont mesurées le 22/7 vers 18 h, ce qui donne une vitesse de l'ordre de 50 m/h. Par la suite, la concentration reste inférieure à  $5 \cdot 10^{-10}$  sans pics bien marqués; il est possible de définir une arrivée assez nette donnant une vitesse de transit de près de 12 m/h; cette arrivée correspond plus au début d'un nuage qu'à un véritable pic.

Au point 6

(Chenal), la première arrivée a lieu le 25/7, ce qui donne une vitesse de l'ordre de 30 m/h; la concentration est importante puisqu'elle atteint  $2,5 \cdot 10^{-9}$  rapidement. Elle était encore de  $2 \cdot 10^{-9}$  au début du mois d'octobre. Le premier pic donne une vitesse de 8 m/h, mais ici la concentration "en masse" domine nettement.

L'ensemble de ces éléments met en évidence une très grande dispersion du traceur tant dans l'espace que dans le temps. Ceci implique des circulations complexes et de "type" différent (*figure n° 45*).

On peut définir trois types de circulations différents à partir des courbes de restitution (concentration en fonction du temps):

- des circulations rapides avec des vitesses de 30 à 220 m/h, correspondant à des cheminements superficiels;
- des circulations avec des vitesses de l'ordre de 10 m/h qui donnent des pics traduisant des circulations en "chenaux";
- des circulations plus lentes (vitesses de l'ordre du m/h) avec des concentrations assez homogènes pouvant indiquer un écoulement de nappe de fissures.

Les résultats du traçage au bichromate confirment les résultats obtenus avec la fluorescéine; ils montrent la même dispersion dans l'espace et dans le temps (*figures n° 40 et 44*).

L'absence de circulations rapides peut être due aux conditions d'injection; le forage C 83.12 permet une injection directement dans les zones fissurées relativement profondes.

Les vitesses calculées à partir des premières arrivées détectées sont inscrites dans le tableau n° 18.

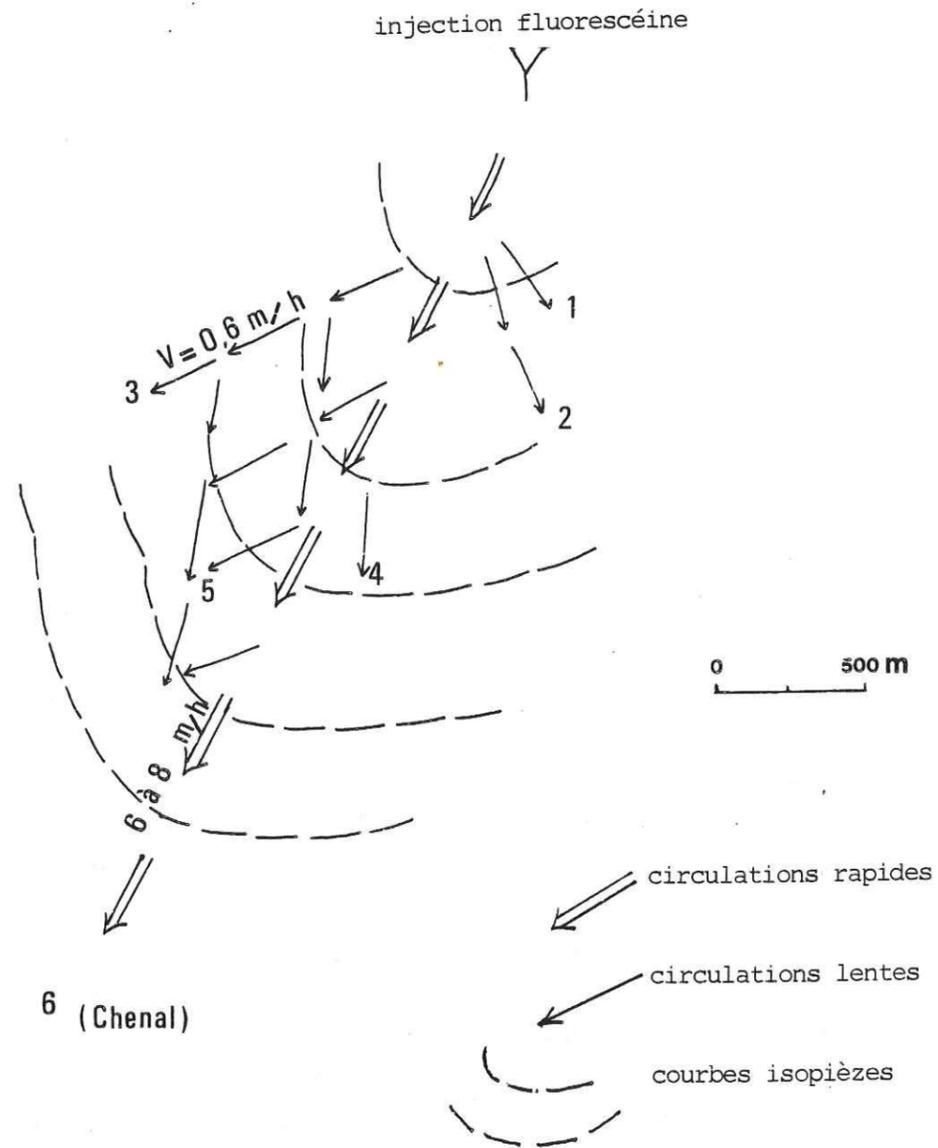


Figure n° 45 : Le Clou : répartition schématique des vitesses dans l'espace.

TABLEAU N° 18 : vitesses des premières arrivées de bichromate

Points	Vitesses maximales	Remarques
pt II	5 m/h	1 seul échantillon contient du bichromate
pt III	3 m/h	Pas de pic mais concentration constante du 29/10 au 8/11.
pt IVa	15 m/h 1 m/h	Traces le 13/10 Concentration constante du 2/11 au 8/11, traces du 27/10 au 8/11.
pt IVb IVc IVd	1,3 m/h	Concentration comprise entre 1 et $2 \cdot 10^{-8}$ du 27/10 au 8/11. Apparition le 27/10 puis concentration comprise entre 4 et $5 \cdot 10^{-8}$ jusqu'au 8/11.
pt V	5,5 m/h	Traces le 27/10, concentration de l'ordre de $10^{-8}$ jusqu'au 6/11 puis plus rien.

L'absence de bichromate dans la galerie RD est probablement liée aux conditions hydro-dynamiques. On peut envisager l'existence d'une "crête" dans les courbes isopièzes entre le point d'injection et la galerie. La majeure partie des écoulements ne se ferait pas dans cette direction et donc les concentrations en bichromate seraient trop faibles pour être détectées.

La présence de bichromate dans un seul échantillon à la source RD (pt II) s'explique assez mal ; la concentration mesurée impliquerait normalement l'existence d'une "traîne" très nette dans les deux ou trois échantillons suivants ; une erreur de manipulation n'est pas à exclure dans ce cas présent.

Les éléments apportés par le traçage à la rhodamine sont assez contradictoires avec ceux apportés par le bichromate, bien que l'injection ait eu lieu au même point.

La rhodamine est arrivée dans le forage de la galerie RD, en même temps dans les deux tubes, alors qu'aucune trace de bichromate n'a été trouvée là.

La rhodamine a atteint la source RD et la galerie RG (deux points sur quatre) avec une vitesse de 9 à 10 m/h selon les points ; elle n'a pas été trouvée aux deux derniers points de la galerie RG (IV c et d) alors que c'est en IV d que les concentrations les plus élevées en bichromate ont été trouvées.

La présence de rhodamine dans la galerie RD à des concentrations de 1 à  $5 \cdot 10^{-10}$  n'est pas tout à fait contradictoire avec la non détection de bichromate dans la mesure où cela donne des concentrations inférieures ou égales à  $10^{-8}$ , c'est-à-dire au seuil de détection du bichromate si l'on néglige les pertes en rhodamine (?)

L'absence d'une courbe de restitution suffisamment longue ne permet pas de trancher certaines de ces contradictions.

La rhodamine est ressortie à des concentrations relatives plus faibles que le bichromate. Il a été injecté 20 fois plus de bichromate ; les concentrations en rhodamine sont de 50 à 100 fois moins élevées que celles en bichromate.

Cela tient en partie aux conditions d'injection (fuites) et en partie à la rétention par adsorption de la rhodamine.

#### 7°) INTERPRETATION DES RESULTATS

L'ensemble des éléments obtenus par ces traçages permet de donner quelques idées sur l'Hydrogéologie du site ; il ne s'agit que d'interprétations qui peuvent être remises en question au fur et à mesure que de nouvelles informations seront acquises.

Les résultats montrent qu'il existe des communications relativement aisées entre les différents points d'injection et les points de prélèvement. On peut donc considérer qu'il existe un aquifère unique même si celui-ci est très hétérogène.

La grande dispersion dans l'espace et dans le temps implique la présence d'un réseau de fissures et de fractures bien développé. Les conditions générales d'écoulement doivent être assez proches de ce qui existe dans les nappes de fissures.

L'analyse des courbes de restitution des traceurs (et en particulier celle de la fluorescéine) permet de distinguer trois types de circulation dans cet aquifère ; ils peuvent s'interpréter de la façon suivante :

- Les vitesses rapides (de 30 à 220 m/h) correspondent à des circulations dans la tranche superficielle très décomprimée du terrain qu'il s'agisse des éboulis ou des zones à fissures ouvertes du substratum rocheux comme au-dessus de la galerie RD.
- Les vitesses moyennes (de l'ordre de 10 m/h) correspondent à des circulations en chenaux sans qu'il faille voir là une analogie poussée avec le milieu karstique.
- Les vitesses lentes (de l'ordre du mètre/heure) correspondent à des circulations au sein d'une nappe de fissures (*voir figure n° 45*).

La part respective de ces différents types d'écoulement n'est pas la même pour les différents points de prélèvement donc pour les différentes zones de l'aquifère. Mais si l'on ne considère que les deux galeries, les circulations "en nappe de fissures" représentent probablement plus de 60 % en rive droite et près de 80 % en rive gauche ; ce calcul est fait en tenant compte des teneurs en fluorescéine mesurées dans les échantillons prélevés au début du mois d'Octobre.

Les vitesses de l'ordre de 10 m/h sont faibles pour des circulations en chenaux, surtout si l'on tient compte du gradient. Il faut envisager des chenaux discontinus au sein d'une zone noyée.

Les vitesses de l'ordre du mètre/heure (et même beaucoup moins si l'on fait le calcul à partir du temps pris sur le centre de gravité de la courbe) sont elles aussi faibles pour un écoulement de nappe en

fissures dans le contexte local (forts gradients). Il faut envisager une forte diminution de la perméabilité en profondeur.

Compte-tenu des débits estimés et des concentrations mesurées, la plus grande partie de la fluorescéine est ressortie aux deux galeries. Cet élément est à prendre en compte sans pourtant qu'il soit possible de donner une explication satisfaisante pour l'instant.

#### 8°) CONCLUSIONS

Les trois traçages réalisés sur le site du Clou ont apporté des résultats dont il est possible de tirer un certain nombre de points bien caractérisés.

Il n'existe qu'un seul aquifère au sein duquel les communications entre les différentes parties sont aisées. Ceci n'implique en rien, il faut insister là dessus, qu'il puisse s'agir d'un milieu homogène et isotrope. Au contraire, il apparaît que toute la zone concernée présente une très grande hétérogénéité à toutes les échelles.

Les résultats obtenus avec la fluorescéine ont permis de distinguer trois types de circulations :

- Des circulations superficielles très rapides (30 à 220 m/h).
- Des circulations en chenaux donnant des pics et présentant des vitesses lentes pour ce genre d'écoulement (de l'ordre de 10 m/h).
- Des circulations en "nappe de fissures" avec des vitesses très lentes (un mètre/heure et moins).

Les différences observées dans les résultats des trois traçages sont liées, en grande partie, aux conditions d'injection (lieux et méthodes), mais aussi aux traceurs eux-mêmes. Le seuil de détection ( $10^{-8}$ ) élevé du bichromate peut masquer certains phénomènes.

#### B) OPERATION DE TRACAGE DES EAUX INFILTREES DANS LA DOLINE DE LA NORMA (Savoie) (Août-Septembre 1984).

Le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université Scientifique et Médicale a réalisé une opération de traçage sur la perte de la doline située à l'ouest de la station de la Norma, le 16 Août 1984 (voir figure n° 46).

Le but de cette opération était de définir le devenir des eaux qui disparaissent dans cette doline (et donc des eaux usées de la station de la Norma qui y sont rejetées), et de savoir comment ces eaux circulent dans le sous-sol.

Le traçage a été précédé par une étude du site du point de vue géologique et hydrogéologique.

#### 1°) GEOLOGIE DU SITE (voir figure n° 47)

La station de la Norma est construite dans un sillon rempli de formations quaternaires qui masquent le contact entre les schistes lustrés au Sud et le gypse triasique au Nord.

La doline est située très près du contact, à un endroit où le quaternaire a disparu.

Vers l'Ouest, au niveau du talweg du ruisseau de St Antoine, les schistes lustrés affleurent. Il y a là un contact anormal masqué par les alluvions du cône de déjection.

Vers l'Est, au niveau de Villarodin, le versant est couvert d'éboulis et de moraines plus ou moins glissés, avec de nombreux paquets de gypse et de cargneules, ainsi que des dolomies.

Les schistes lustrés semblent passer un peu sous le gypse dans le talweg du ruisseau de St-Antoine ; cela impliquerait que les schistes lustrés se trouvent assez près sous la doline.

Le gypse a probablement une structure légèrement diapryrique.

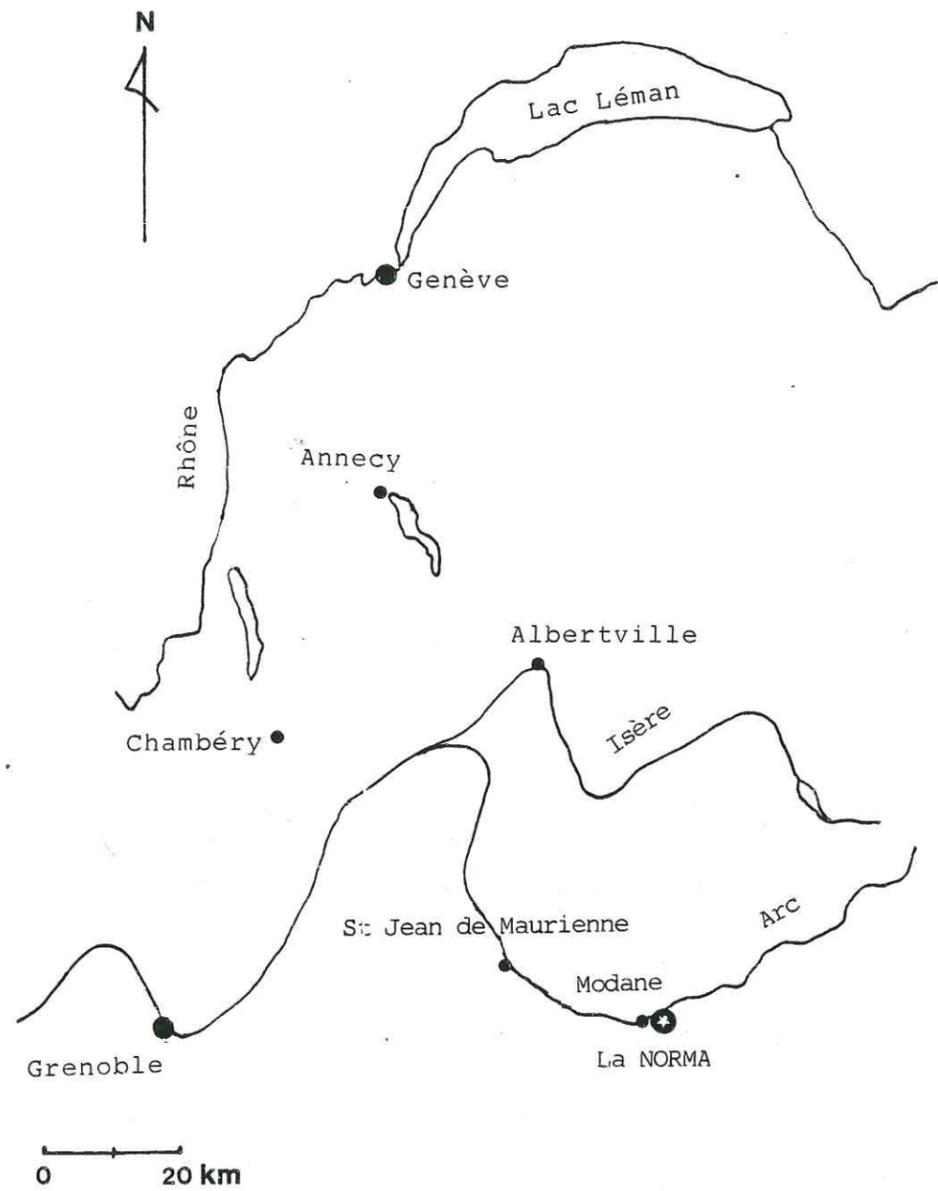
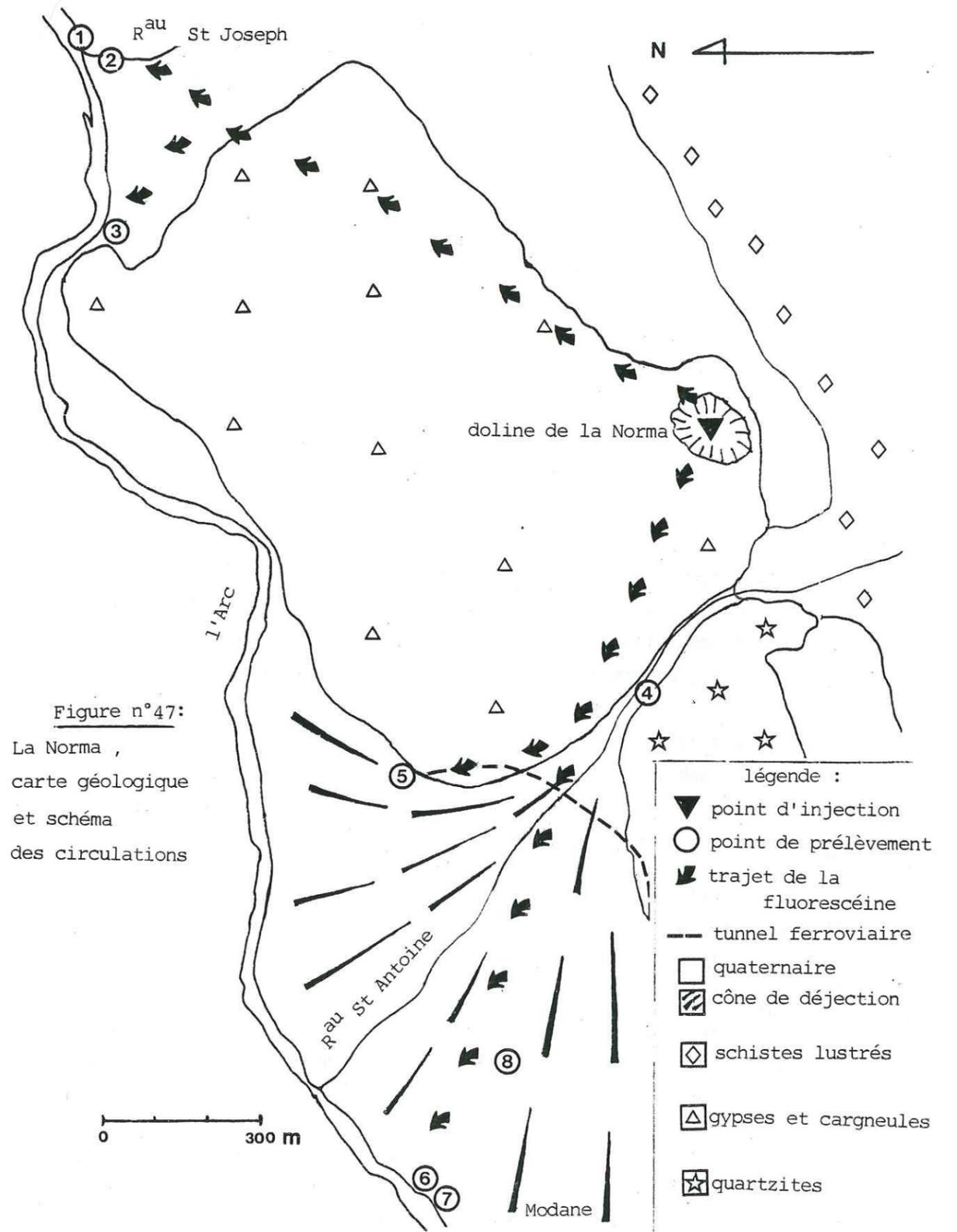


Figure n° 46 : La Norma : situation géographique .



## 2°) HYDROGEOLOGIE

Le gypse est une roche très soluble mais imperméable. Les eaux y circulent dans des chenaux de dissolution ; il n'y existe que très rarement des nappes de fissures.

Les chenaux peuvent se colmater, soit par effondrement, soit par envahissement de produits insolubles (argiles), entraînés dans les dolines.

Les schistes lustrés sont souvent très fissurés et présentent de ce fait une perméabilité de fissures importante. Il peut exister de véritables nappes au sein de cette formation.

Le cône de déjection du ruisseau de St Antoine est très poreux mais sans doute relativement peu perméable en raison de la nature lithologique des formations du bassin versant.

Les formations quaternaires qui tapissent le versant à l'Est de la Norma sont elles aussi très poreuses et peu perméables. Mais, comme dans le cône de déjection, il peut y exister des lentilles de matériaux plus grossiers, permettant la circulation des eaux souterraines.

### • Les débits

Le débit des eaux qui s'infiltrent dans la doline était de l'ordre de 30 l/s au mois d'août. Il atteint des valeurs bien supérieures au moment de la fonte des neiges.

Il n'existe, plus bas que la doline, aucune source ayant un débit de cet ordre :

- la source du Rocher, en bordure de l'Arc, a un débit de l'ordre de 5 l/s.
- le ruisseau de St Joseph a un débit de 30 l/s mais la plus grande partie de ce débit provient de plus haut. Les apports entre 1310 (cote de la doline) et son confluent avec l'Arc sont de l'ordre de 5 à 10 l/s.

Les débits des autres points examinés atteignent rarement 1 l/s. C'est le cas des eaux d'exhaure du tunnel SNCF de St Antoine,

situé dans le cône de déjection, ainsi que de la source près du pont de Modane ; cette source représente un des exutoires des eaux du cône.

Le ruisseau de St Antoine tarit souvent, au moins au niveau du pont sur la RN 6, alors qu'il y a toujours au moins 20 l/s qui disparaissent dans la doline.

## 3°) LES POINTS DE PRELEVEMENTS (voir figure n° 47)

Les points choisis pour y prélever des échantillons aux fins d'analyse sont les suivants :

	<u>Altitude</u>
1. L'Arc, en amont du pont de Glaire	1080
2. Le ruisseau de St Joseph, au pont de Glaire	1080
3. La source du Rocher, en bordure de l'Arc	1080
4. Le ruisseau de St Antoine, en amont de la carrière	1170
5. Les eaux d'exhaure du tunnel SNCF de St Antoine	1100
6. La source qui se trouve au niveau du pont de Modane, en bordure de l'Arc	1060
7. L'Arc, en aval du pont de Modane	1050
8. La fontaine, près de l'église de Modane	1100

## 4°) LES OPERATIONS

### 4.1. L'injection

L'injection du traceur a eu lieu le 16 Août 1984, entre 14 h 30 et 15 h 30.

On a utilisé 5 kilogrammes de fluorescéine, dissoute dans 30 l. d'alcool, et diluée dans 70 l. d'eau.

Le débit naturel de la doline était, le jour de la manipulation, de l'ordre de 30 l/s. La fluorescéine a donc été entraînée sans problème.

### 4.2. Les prélèvements

Les prélèvements ont commencé le 16 Août par un point " zéro " avant l'injection.

Ils se sont poursuivis jusqu'au 24 Septembre, à raison de :

- . 1 prélèvement par jour du 16 au 26 Août,
- . 1 prélèvement tous les 2 jours, soit les 28 et 30 Août, et les 3, 5, 7 et 10 Septembre,
- . Puis 1 prélèvement les 15, 17 et 24 Septembre,

Soit au total : 20 prélèvements par point, en comptant le numéro " zéro "

### 5°) LES RESULTATS

Les échantillons, conservés à température constante et à l'abri de la lumière, ont été analysés au spectrofluorimètre.

Les résultats obtenus sont rassemblés sur les courbes de concentration en fonction du temps de la figure n° 48.

#### 5.1. Commentaires des résultats

Au point 1, il est logique de ne trouver aucune trace dans l'Arc : en effet, même si arrivent, en amont du confluent du ruisseau de St Joseph, des eaux contenant du traceur, la faible concentration, diluée dans l'Arc, n'en permet plus la détection.

Au point 2, les faibles concentrations mesurées sont en rapport avec les vitesses de circulation peu élevées ; en effet, pour une distance d'environ 1200 m, le temps de parcours de la première vague est de l'ordre de 340 h, soit une vitesse de 3,5 m/h, pour un gradient de 12,5 %.

La deuxième vague est liée aux précipitations qui sont tombées pendant la première décade de Septembre.

Au point 3, les éléments sont identiques. On obtient une vitesse de l'ordre de 4 m/h, pour une distance de 1200 m, et un temps de transit voisin de 300 heures. Le gradient est de 18 %.

Les concentrations mesurées sont identiques à celles du point 2.

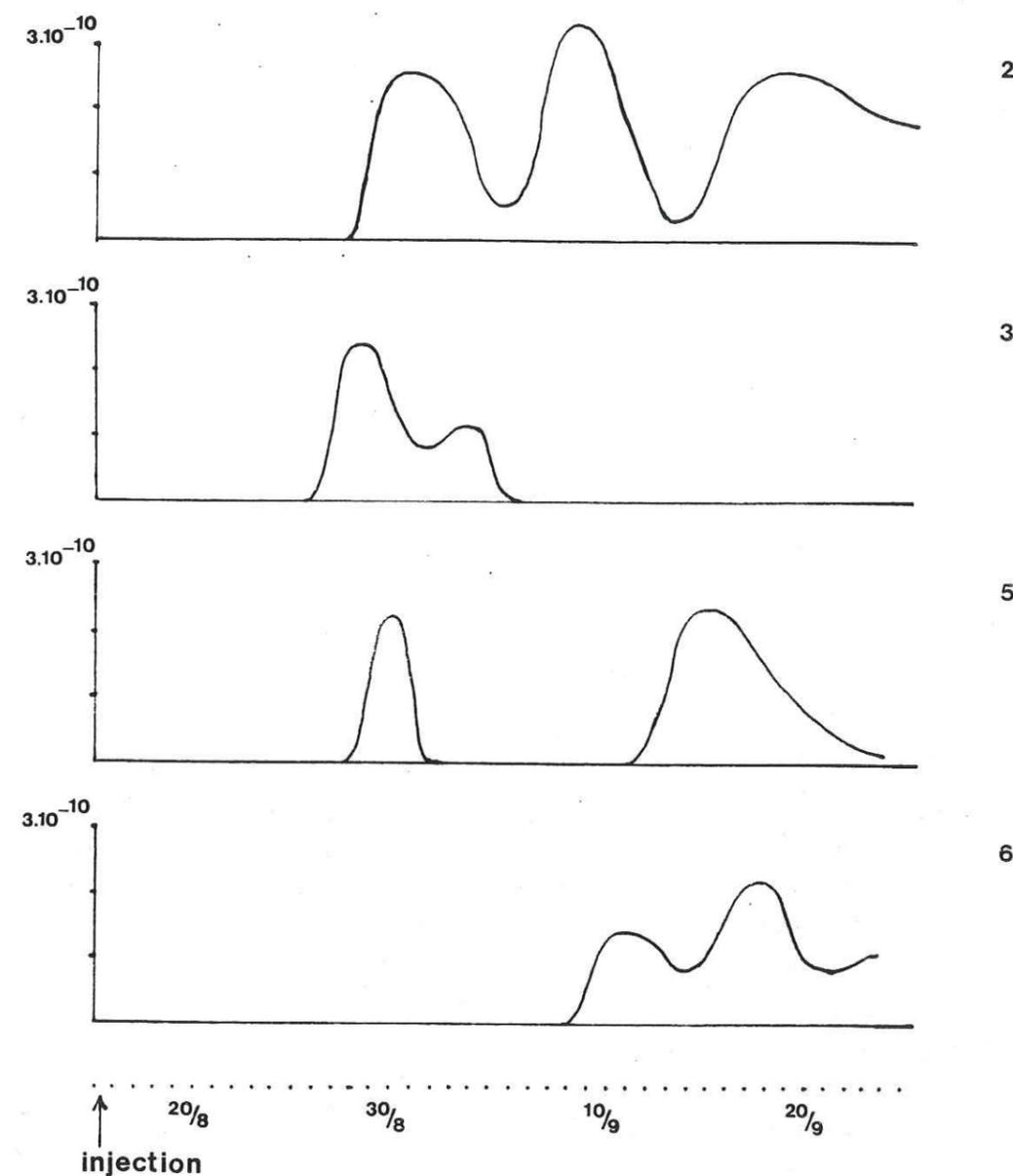


Figure n°48 : La Norma; courbes de restitution de la fluorescéine.

Au point 4, dans le ruisseau de St Antoine, en amont de la carrière, l'absence de traceur vient confirmer l'absence de relations entre les eaux de ce ruisseau et les gypses, que la chimie des eaux avait mise en évidence.

Au point 5, au niveau du tunnel SNCF, le traceur est arrivé avec une vitesse de 2 m/h, et un temps de transit de 340 h pour une distance d'environ 700 m.

Le gradient est de 28 %, la concentration est faible.

Les eaux du tunnel proviennent du cône de déjection du ruisseau de St Antoine, ou directement des gypses.

Au point 6, la source, située en bordure de l'Arc, en rive gauche, au pont de Modane, est une émergence des eaux du cône de déjection.

Là aussi, les concentrations mesurées sont faibles (toujours voisines de  $2 \cdot 10^{-10}$ ), ainsi que les vitesses de transit. On obtient 2,6 m/h pour la première arrivée, pour une distance de 1600 m, un temps de 600 heures et un gradient de 15 %.

Au point 7, dans l'Arc, en aval du pont de Modane, l'absence de traceur implique qu'il n'existe pas de relation directe entre la doline et l'Arc, qui aurait échappé à notre étude. La dilution, dans les eaux de l'Arc, des eaux à faible concentration de traceur, fait que ce dernier n'est pas détecté à l'analyse.

Au point 8, l'absence de traceur tendrait à prouver que cette source est captée plus haut que la zone concernée par le traçage.

## 5.2. Interprétation des résultats

Les eaux qui s'infiltrèrent dans la doline s'écoulaient vers l'Ouest dans le cône de déjection du ruisseau de St Antoine, et vers l'Est dans la partie aval du bassin du ruisseau de St Joseph.

Les vitesses de transit sont très faibles.

Les faibles concentrations mesurées impliquent une importante dilution.

Tels sont les éléments obtenus à partir des résultats du traçage.

L'ensemble de ces éléments implique l'existence d'une nappe de fissures alimentée, en partie seulement, par les infiltrations dans la doline.

L'observation de la structure géologique permet de penser que cette nappe se trouve dans les schistes lustrés.

Elle s'écoule vers l'Ouest et vers l'Est. Des deux côtés, elle se déverse dans des formations quaternaires : le cône de déjection du ruisseau de St Antoine à l'Ouest, et les formations qui couvrent le versant à l'Est.

Les vitesses sont tout à fait conformes à ce que l'on connaît des vitesses de circulation des eaux souterraines en milieu fissuré ou alluvial. Ces faibles vitesses et les faibles concentrations obtenues excluent absolument la présence de chenaux de type karstique.

Les vitesses sont, par ailleurs, très homogènes et indépendantes du gradient, ce qui ne peut que confirmer l'existence d'aquifères poreux ou fissurés.

De plus, il a été mis en évidence deux zones d'émergence bien distinctes, l'une à l'Est, l'autre à l'Ouest ; ceci implique une dispersion du traceur qui ne peut se faire qu'au sein d'un aquifère fissuré ou poreux, c'est-à-dire d'une nappe.

Les concentrations mesurées -  $2 \cdot 10^{-10}$ , c'est-à-dire 2 molécules de traceur pour 10 milliards de molécules d'eau, correspondent à une dilution de 5 kg de traceur dans environ  $250.000 \text{ m}^3$  d'eau, puisque le traceur injecté était déjà dilué dans 100 litres. La fluorescéine a donc concerné un volume très important, ce qui conforte l'hypothèse de l'existence d'une nappe de fissures.

6°) CONCLUSIONS

Les éléments obtenus par l'opération de traçage permettent d'affirmer que les eaux infiltrées dans la doline de "La Norma" n'alimentent pas une résurgence mais rejoignent une nappe.

Cette nappe s'écoule à la fois vers l'Ouest et vers l'Est.

A l'Ouest, elle alimente le cône du ruisseau de St Antoine, et à l'Est, le bassin aval du ruisseau de St Joseph.

Il faut noter que seule une telle opération pouvait apporter de semblables résultats ; il a fallu à la fois une longue période de prélèvements (40 jours) et des moyens performants d'analyses pour y parvenir.

C) COMMENTAIRE

Ces deux derniers exemples de traçage à la fluorescéine sont caractérisés par une injection dans une perte qui, contrairement à ce qui existe souvent, n'est pas en relation directe avec des chenaux à écoulement rapide.

B. de Sartiges (1978) a effectué un traçage à la fluorescéine dans le synclinal de Mémise, à l'Est d'Evian. Il se proposait de déterminer le devenir des eaux infiltrées au coeur du synclinal, dans une perte de plus de 20 l/s. Des 2,5 kg de fluorescéine injectés, il n'a été retrouvé aucune trace aux émergences situées sur tout le pourtour du massif, après plus de 45 jours de surveillance.

Cette expérience a montré qu'il existe une nappe au sein des calcaires (formant l'ossature du synclinal) qui se vidange par plusieurs exutoires dans des nappes plus ou moins importantes au sein d'alluvions dans des sillons quaternaires (J-C. FOURNEAUX, 1982).

Ceci est un exemple où, comme sur les sites du Clou et de la Norma, malgré la présence d'une perte à gros débit, il n'existe pas de réseau karstique actif avec une résurgence importante mais une nappe qui se vidange lentement par plusieurs petits exutoires.

IV - CONCLUSIONS

Comme nous l'avons vu dans tous ces exemples de traçage, les phénomènes de dispersion conditionnent d'une manière notable les modes de circulation des eaux souterraines dans les aquifères fissurés et complexes.

En milieu considéré comme homogène et isotrope, il est aisé de chiffrer les caractéristiques hydrodispersives à partir des courbes de concentration en fonction du temps ; mais en milieu hétérogène, en est-il de même ?

Dans le prochain chapitre, nous allons tout d'abord faire quelques rappels théoriques sur la dispersion, puis proposer une méthode de calcul de la dispersivité valable à la fois en milieu homogène et hétérogène.

Mais la seule connaissance de la dispersivité ne suffit pas pour caractériser un milieu complexe. Elle peut être complétée par celle d'autres facteurs.

\*  
\* \*

CHAPITRE IV

LES PHÉNOMÈNES DE DISPERSION

- I - Rappels théoriques sur la dispersion
- II - Proposition d'une détermination de  $\alpha_L$  simplifiée
- III - Détermination du nombre de Péclet et de  $\alpha_L$  par la méthode graphique de J-P. Sauty (1978).
- IV - Application aux expériences sur colonnes et sur les sites du Suran et de St Michel des Portes
- V - La dispersion en milieu fissuré
- VI - La dispersion dans les aquifères complexes
- VII - Conclusion

I - RAPPELS THEORIQUES SUR LA DISPERSION (G. De Marsily, 1981)

Le mouvement de l'eau dans la zone saturée, dans un milieu poreux ou fissuré, est régi par des phénomènes de convection et de dispersion, indépendamment de tout transport de matière par l'eau (par exemple, migration de solutés).

La convection est due au déplacement de l'eau, à l'échelle macroscopique parmi les tortuosités des pores ou des fissures.

Convection et dispersion de l'eau entraînent la migration et la dispersion des matières transportées.

En écoulement convectif-dispersif, la variation de concentration au cours du temps obéit aux lois qui régissent la diffusion de la chaleur dans un solide (H.S. CARSLAW and J-C. JAEGER, 1959).

La distribution des concentrations vérifie l'équation suivante :

$$\operatorname{div} (\bar{D} \operatorname{grad} C) - \operatorname{div} C \vec{U} = \omega \frac{\partial C}{\partial t}$$

où C est la concentration de la solution, t le temps, U est la vitesse moyenne d'écoulement (vitesse de Darcy) et  $\omega$  la porosité cinématique.

$\bar{D}$  est le tenseur de dispersion =

$$D_L \text{ est le coefficient de dispersion longitudinale} \quad \begin{vmatrix} D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_T \end{vmatrix}$$

$D_T$  est le coefficient de dispersion transversale.

La dispersion résulte de l'action combinée d'un phénomène purement mécanique et d'un phénomène physico-chimique. On ne peut pas, en général, dissocier ces deux phénomènes ; aussi écrit-on :

$$D_L = \alpha_L U + D_m$$

et

$$D_T = \alpha_T U + D_m$$

où  $D_m$  est le coefficient de diffusion moléculaire et  $\alpha_L$  et  $\alpha_T$  sont des paramètres qui ne dépendent que du milieu. Ce sont les coefficients de dispersion intrinsèque ou dispersivités.

$\alpha_L$  = dispersivité longitudinale

$\alpha_T$  = dispersivité transversale

Dans la pratique, pour les nappes superficielles à écoulement rapide, qui sont le plus concernées par la pollution, la diffusion moléculaire est masquée par la dispersion mécanique (ou cinématique) nettement prépondérante (O. PFANNKUCH, 1963 et A. LALLEMAND et P. PEAUDECERF, 1978).

Le coefficient de dispersion longitudinale  $D_L$  est donc proportionnel à la vitesse, le terme de diffusion moléculaire étant négligeable devant la dispersion cinématique.

On a donc :  $D_L = \alpha_L U$

Pour un écoulement uniforme, monodimensionnel, de vitesse  $U_x$  selon la direction  $ox$ , on a :

$$\operatorname{div} (C \vec{U}) = \frac{\partial C U_x}{\partial x} + \underbrace{\frac{\partial C U_y}{\partial y}}_{=0} + \underbrace{\frac{\partial C U_z}{\partial z}}_{=0}$$

$$\Rightarrow \operatorname{div} (C \vec{U}) = U_x \frac{\partial C}{\partial x} + \underbrace{C \frac{\partial U_x}{\partial x}}_{=0}$$

$$\Rightarrow \operatorname{div} (C \vec{U}) = U_x \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$\text{De plus, } \operatorname{div} (\vec{D} \operatorname{grad} C) = \frac{\partial}{\partial x} (\vec{D} \operatorname{grad} C)_x = D_L \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$\Rightarrow \operatorname{div} (\vec{D} \operatorname{grad} C) = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

dans ce cas-là, l'équation de la dispersion s'écrit donc :

$$\omega \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x}$$

Définissons les conditions aux limites :

- à  $t = 0$ , le nuage de traceur est concentré en  $x=0$ .
- quand  $x$  tend vers l'infini,  $C$  tend vers zéro, c'est-à-dire qu'à une grande distance du point d'injection, la concentration va devenir très faible.

Cette équation peut s'écrire sous une forme plus simple si l'on effectue le changement de variables suivant :

$$\text{soit } X = x - \frac{U}{\omega} t \\ \text{et } t' = t$$

$(X, t')$  constitue un repère lié au nuage du traceur,  $\frac{U}{\omega} t$  est la position moyenne du nuage dans le repère initial  $(x, t)$ .

$(\frac{U}{\omega})$  est la vitesse effective à l'intérieur du milieu.

Il faut donc maintenant écrire  $\frac{\partial C}{\partial x}$  et  $\frac{\partial C}{\partial t}$  en fonction de  $\frac{\partial C}{\partial X}$  et  $\frac{\partial C}{\partial t'}$ .

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial X} \cdot \underbrace{\frac{\partial X}{\partial x}}_{=1} + \frac{\partial C}{\partial t'} \cdot \underbrace{\frac{\partial t'}{\partial x}}_{=0}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial X}$$

$$\text{et } \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right) = \frac{\partial C}{\partial X} \underbrace{\frac{\partial X}{\partial t}}_{=-\frac{U}{\omega}} + \frac{\partial C}{\partial t'} \underbrace{\frac{\partial t'}{\partial t}}_{=1}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{\partial C}{\partial t} \right) = \frac{\partial C}{\partial t'} - \frac{U}{\omega} \frac{\partial C}{\partial X}$$

Si l'on remplace  $\frac{\partial C}{\partial X}$  et  $\frac{\partial C}{\partial t}$  par leur expression en fonction de  $\frac{\partial C}{\partial X}$  et  $\frac{\partial C}{\partial t'}$  dans l'équation simplifiée de la dispersion (cas d'un écoulement uniforme, monodimensionnel), on obtient :

$$\frac{\partial C}{\partial t'} = \frac{D_L}{\omega} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}$$

Il existe une solution particulière de cette équation qui vérifie les conditions aux limites et qui s'écrit :

$$C = \frac{C_{te}}{\sqrt{t'}} e^{-X^2 / (4 \frac{D_L}{\omega} t')} \quad (C_{te} = \text{constante})$$

où  $\frac{C_{te}}{\sqrt{t'}}$  est la concentration maximale obtenue à la restitution.

$$C_{te} = \frac{m}{S \sqrt{4 \pi D_L \omega t'}} \quad \text{où } m \text{ est la masse de traceur restituée, et } S \text{ est la section de l'écoulement unidirectionnel.}$$

La solution particulière s'écrit donc :

$$C = \left( \frac{m}{S \sqrt{4 \pi D_L \omega t'}} \right) e^{-X^2 / (4 \frac{D_L}{\omega} t')}$$

## II - PROPOSITION D'UNE DETERMINATION DE $\alpha_L$ SIMPLIFIEE

Si R représente le rayon de la "tache" (ou du nuage) à un instant donné, on a  $R = \sqrt{2 \frac{D_L}{\omega} t'}$

$$\begin{aligned} \text{Si } X = R, \text{ on a } C &= C_{\max} e^{-1/2} \\ \Rightarrow C &= \frac{C_{\max}}{\sqrt{e}} \\ \Rightarrow C &\approx 0,6 C_{\max} \end{aligned}$$

On peut définir R comme étant la distance entre l'axe passant par le maximum de concentration et le point de la courbe dont l'ordonnée est

$\frac{C_{\max}}{\sqrt{e}}$  (voir figure n° 49).

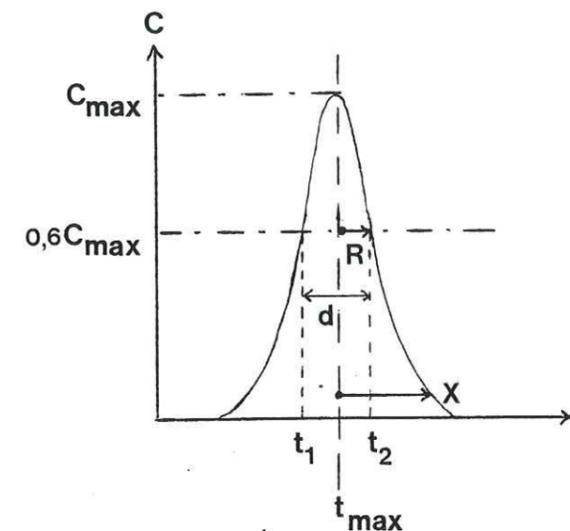


Figure n° 49 : Allure de la courbe théorique  $C(t)$  pour un écoulement uniforme, monodimensionnel.

Soit d, le diamètre de la "tache",  $d = 2 R$ , et soit  $(t_2 - t_1)$ , le temps au bout duquel la tache a un diamètre d (voir figure n° 49)

$$(t_2 - t_1) = \frac{\omega}{U} d = \frac{\omega}{U} 2 \sqrt{2 \frac{D_L}{\omega} t_{\max}}$$

avec  $t_{\max}$  = temps, écoulé depuis l'injection, correspondant au maximum de concentration

$$\text{à } t_{\max}, R = \sqrt{2 \frac{D_L}{\omega} t_{\max}}$$

$$\Rightarrow (t_2 - t_1)^2 = \left( \frac{\omega}{U} \right)^2 \cdot 8 \frac{D_L}{\omega} t_{\max}$$

$$\Rightarrow 8 \frac{D_L}{\omega} = \left[ \frac{(t_2 - t_1) U}{\omega} \right]^2 \frac{1}{t_{\max}}$$

$$\Rightarrow 8 \frac{D_L}{\omega} = \frac{(t_2 - t_1)^2 \ell^2}{t_{\max}^3} \quad \text{car } \frac{U}{\omega} = \frac{\ell}{t_{\max}}$$

$$\Rightarrow \frac{D_L}{\omega} = \frac{\ell}{8} \frac{(t_2 - t_1)^2}{t_{\max}^2} \frac{U}{\omega}$$

$\ell$ , étant la distance entre le point d'injection et le point de prélèvement.

équation (1) :

$$\alpha_L = \frac{\ell}{8} \frac{(t_2 - t_1)^2}{t_{\max}^2}$$

car  $D_L = \alpha_L U$

III - DETERMINATION DU NOMBRE DE PECLLET ET DE  $\alpha_L$  PAR LA METHODE GRAPHIQUE DE J-P. SAUTY (1978)

Soit Pe le nombre de Peclet défini de la manière suivante :  
 $Pe = \frac{U\ell}{D_L}$  (B. GAILLARD, 1976 et G. De MARSILY, 1981).

Un nombre de Péclet infini traduit un écoulement piston tandis qu'un nombre de Péclet faible traduit un écoulement très dispersif.

J-P. SAUTY (1978) et N. CRAMPON (1983) proposent des abaques pour déterminer le nombre de Péclet à partir des courbes expérimentales (voir figures n° 50 et n° 51). Il suffit de reporter, sur un papier calque, le temps en abscisse sur échelle logarithmique et la concentration réduite en ordonnée sur échelle décimale. La concentration réduite s'obtient en faisant le rapport de la concentration mesurée sur la concentration maximale du pic ( $C_r = \frac{C}{C_{\max}}$ ). On fait ensuite glisser ce graphique, parallèlement à l'axe des temps, sur les courbes théoriques de l'abaque jusqu'à ce que la partie ascendante de la courbe expérimentale coïncide avec celle de l'une des courbes théoriques. On lit le nombre de Péclet correspondant et on peut alors calculer  $\alpha_L$  grâce à la formule :  $\alpha_L = \frac{\ell}{Pe}$ .

Comparons ces deux méthodes de détermination de  $\alpha_L$  en les appliquant aux résultats expérimentaux obtenus sur les différents sites étudiés.

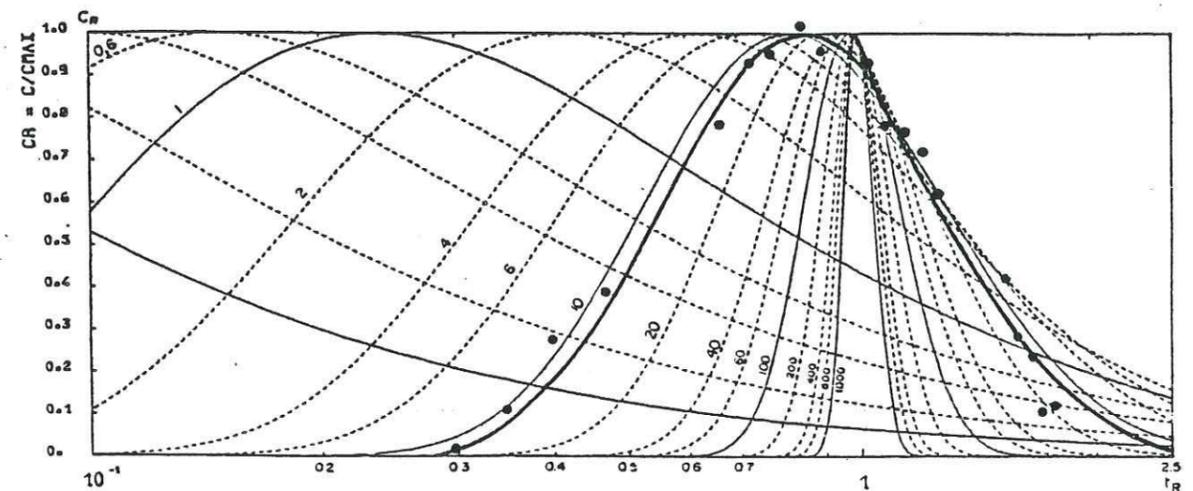


Figure n°50: Exemple d'identification des paramètres de dispersion par interprétation graphique de traçages réalisés in situ. (in J.P Sauty, 1978)

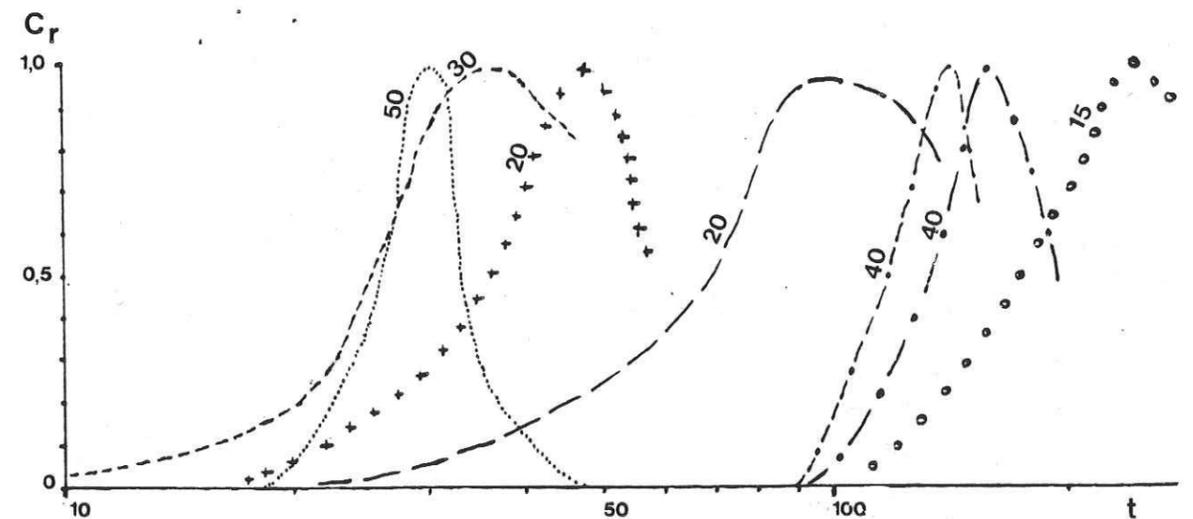


Figure n°51 : Identification de Pe par la méthode de J.P Sauty pour les colonnes et les sites du Suran et de St Michel des Portes.

- — — Suran, h = 1325 m
- " , h = 600 m
- ..... " , h = 250 m
- ++++ colonne CaCO3 pur
- ooooo " " et 3% d'argile
- :-:-:- St Michel des Portes

IV - APPLICATION AUX EXPERIENCES SUR COLONNES ET SUR LES SITES  
DU SURAN et de ST MICHEL DES PORTES

1°) EXPERIENCES SUR COLONNES EN LABORATOIRE

Le calcul de la dispersivité longitudinale par ces deux méthodes ( $\alpha_L = \frac{\ell}{8} (t_2 - t_1)^2 / t_{\max}^2$  et méthode des abaques) est valable pour une injection instantanée (ou brève) en écoulement uniforme monodimensionnel. On peut considérer que les essais sur colonnes (chapitre I) remplissent ces conditions.

Le nombre de Péclet et les dispersivités longitudinales calculés ainsi, numériquement ou graphiquement, pour les différentes colonnes, sont rassemblés dans le tableau n° 19. Pour toutes les colonnes on a  $\ell = 5.10^{-2}$  m.

Colonnes	Méthode personnelle numérique		Méthode graphique : J-P. Sauty	
	$\alpha_L$ en mm	Pe	$\alpha_L$ en mm	Pe
CaCO <sub>3</sub> pur	$0,5 < \alpha_L < 1$	$50 < Pe < 100$	$1,25 < \alpha_L < 2,5$	$20 < Pe < 40$
CaCO <sub>3</sub> et 10% SiO <sub>2</sub>	$1 < \alpha_L < 2$	$25 < Pe < 50$	$1,25 < \alpha_L < 2,5$	$20 < Pe < 40$
CaCO <sub>3</sub> + 3% argile verte	$1 < \alpha_L < 3$	$17 < Pe < 50$	$2,5 < \alpha_L < 5$	$10 < Pe < 20$
CaCO <sub>3</sub> + 5% acide humique	$2 < \alpha_L < 4$	$13 < Pe < 25$	$3,3 < \alpha_L < 5$	$10 < Pe < 15$

TABLEAU N° 19 : Les dispersivités longitudinales  $\alpha_L$  et les nombres de Péclet déterminés pour les différentes colonnes, d'une part par la méthode personnelle numérique et d'autre part par la méthode graphique de J-P. Sauty.

Les coefficients  $\alpha_L$  correspondent en fait aux dimensions moyennes des tortuosités des pores entre les grains du matériau.

Les deux ensembles de valeurs obtenus avec chacune des deux méthodes diffèrent légèrement. D'une manière générale, les nombres de Péclet déterminés grâce aux abaques sont inférieurs à ceux calculés à partir de l'équation (1), mais étant donné que la courbe expérimentale ne se superpose pas parfaitement à la courbe théorique, la détermination de Pe est assez approximative. Cependant, il est important de noter que l'ordre de grandeur des différentes valeurs reste le même.

2°) EXPERIENCES SUR LES SITES DU SURAN ET DE ST MICHEL DES PORTES

Lors d'écoulements très rapides en chenaux (comme sur les sites du Suran ou de St Michel des Portes - chapitre II), on peut considérer que la dispersion transversale est nulle. Toute la quantité de traceur injectée circule dans le ou les conduits et est restituée à l'exutoire. Il n'y a pratiquement pas de traceur qui se trouve dispersé latéralement ou entraîné vers un autre exutoire.

En simplifiant, on peut admettre que ce type d'expérience correspond à une injection brève en écoulement uniforme et monodimensionnel. Dans ces conditions, on peut calculer la dispersivité  $\alpha_L$  et le nombre de Pe par les deux méthodes présentées plus haut.

Les différentes valeurs obtenues sont rassemblées dans le tableau n° 20. Sur le site du Suran, en plus des essais comparatifs de plusieurs traceurs fluorescents (voir chapitre II), des mesures de débits par intégration avaient été effectuées au bichromate de potassium. Les courbes de restitution du bichromate ainsi obtenues permettent de déterminer les coefficients  $\alpha_L$  et Pe ; ceux-ci sont présentés dans le même tableau.

	l en m	Méthode personnelle numérique		Méthode graphique de J-P. Sauty	
		$\alpha_L$ en m	Pe	$\alpha_L$ en m	Pe
SURAN	250	2	125	5	50
	600	16	37	20	30
	1325	6	220	66 ?	20 ?
ST MICHEL des PORTES	300	1	300	7	40

TABLEAU N° 20 : Les dispersivités et les nombres de Péclet déterminés sur les sites du Suran et de St Michel des Portes, d'une part par la méthode personnelle numérique, d'autre part par la méthode graphique de J-P. Sauty.

Là aussi, les nombres de Péclet déterminés par la méthode des abaques sont inférieurs à ceux obtenus par l'équation (1). Sur le site du Suran, pour l'expérience effectuée sur un parcours de 1325 m, la détermination de Pe par les abaques est très incertaine étant donné que la courbe expérimentale ne coïncide pas avec la courbe théorique.

On peut penser que les valeurs de  $\alpha_L$  correspondent grossièrement, pour le site du Suran, à la largeur du conduit et pour celui de St Michel des Portes, à la dimension moyenne des interstices entre les blocs ou à celle des blocs eux-mêmes.

On peut même calculer un coefficient  $\alpha_L$  à partir de la courbe de concentration en fonction du temps obtenue dans le ruisseau des Pellas à St Michel des Portes (voir figure n° 11). Cette valeur de  $\alpha_L$  correspond, dans ce cas là, à la longueur de la section mouillée du ruisseau ( $\alpha_L = 3,3$  m).

Il existe une autre manière de calculer la dispersivité  $\alpha_L$ , en passant par l'intermédiaire du coefficient de dispersion longitudinale  $D_L$ . Celui-ci peut être calculé à partir de la solution particulière de l'équation de la dispersion :

$$C = \frac{m}{S \sqrt{4\pi D_L \omega t}} e^{-x^2 / (4 \frac{D_L}{\omega} t)}$$

on a :

$$C_{\max} = \frac{m}{S \sqrt{4\pi D_L \omega t_{\max}}} \Rightarrow D_L = \frac{m^2}{S^2 \omega 4 \pi t_{\max} C_{\max}^2}$$

On peut considérer qu'en écoulement karstique,  $\omega$  tend vers 1. Dans ces conditions, D. JAMIER (1977) écrit :

$$D_L = \frac{q^2}{4 \pi t_{\max} C_{\max}^2} \quad \text{où } q = U \cdot I$$

avec  $\begin{cases} U = \text{vitesse moyenne d'écoulement} \\ I = \text{intégrale de la courbe} \end{cases}$

car  $q^2 = \frac{m^2}{S^2} = U^2 I^2$   
 et  $\begin{cases} I = \frac{m}{Q} = \frac{m}{US} \end{cases}$  avec Q = débit constant.

Comparons cette dernière méthode de calcul de  $D_L$  avec celle qui découle de l'équation (1), en les appliquant toutes les deux au site karstique du Suran.

Calculons le coefficient de dispersion longitudinale  $D_L$  pour le site du Suran :

$$D_L = \frac{m^2}{S^2 4 \pi t_{\max} C_{\max}^2}$$

$$\begin{aligned} m &= 0,35 \text{ kg} \\ S &= 3 \text{ m}^2 \\ t_{\max} &= 27 \times 60 \text{ s} \\ C_{\max} &= 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \\ U &= 0,17 \text{ m/s} \end{aligned}$$

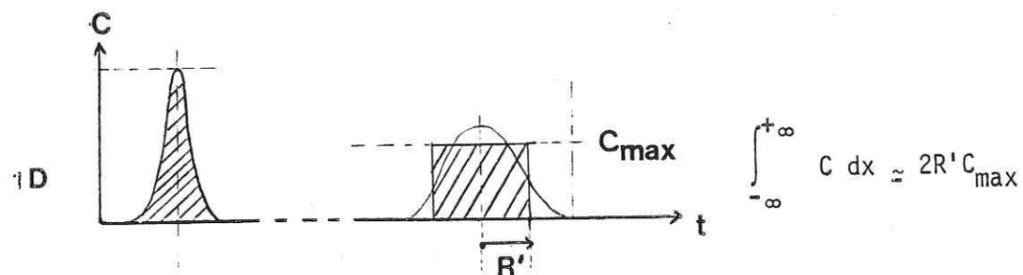
$$= \frac{(0,35)^2}{36 \pi (27 \times 60) \times 10^{-6}}$$

$$\Rightarrow D_L \approx 0,67 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$D_L = \alpha'_L U \Rightarrow \alpha'_L = \frac{D_L}{U} = \frac{0,67}{0,17} = 4 \text{ m.} \quad \alpha'_L = \text{dispersivité calculée d'après D. Jamier}$$

Par la méthode de calcul précédente, nous trouvons  $\alpha_L = \frac{\ell}{8} \frac{(t_2 - t_1)^2}{t_{\max}^2}$  en prenant comme valeur pour  $(t_2 - t_1)$  l'intervalle de temps correspondant à la largeur du pic au niveau de l'ordonnée  $C = 0,6 C_{\max}$ .

Calculons le rapport  $\frac{\alpha'_L}{\alpha_L}$ ; en écoulement monodimensionnel, on a :  $\int_{-\infty}^{+\infty} C \, dx = C_{\text{te}} = \frac{m}{S\omega}$



variation de C en fonction de t, selon la direction OX (dimension 1).

Figure n° 52 : courbe de restitution en écoulement uniforme monodimensionnel : schéma explicatif des formules employées

$$\text{On a donc } \frac{m}{S\omega} = 2R'C_{\max} \Rightarrow R' = \frac{m}{2S\omega C_{\max}}$$

D'autre part :  $D_L = \frac{m^2}{\omega S^2 C_{\max}^2 4 \pi t_{\max}}$

et  $D_L = \alpha'_L U$

$$\Rightarrow \alpha'_L = \frac{\omega R'^2}{\pi t_{\max} U}$$

en prenant  $\omega = 1$  pour un écoulement dans un conduit karstique.

$$\Rightarrow \alpha'_L = \frac{R'^2}{U \pi t_{\max}} \Rightarrow \alpha'_L = \frac{(t_2 - t_1)^2 U^2}{\pi U t_{\max}} \Rightarrow \alpha'_L = \frac{\ell}{\pi} \frac{(t_2 - t_1)^2}{t_{\max}^2}$$

et  $R' = (t_2 - t_1)U \quad U = \frac{\ell}{t_{\max}}$

$$\frac{\alpha'_L}{\alpha_L} = \frac{8}{\pi} \approx 2,5$$

On avait  $\alpha_L = 2 \text{ m}$  et  $\alpha'_L = 4 \text{ m}$ , donc  $\frac{\alpha'_L}{\alpha_L} = 2$ , mais en tenant compte des approximations faites (notamment sur  $\omega$  et sur  $S$ ), les valeurs sont cohérentes.

L'inconvénient de cette dernière méthode de calcul de  $D_L$  (ou  $\alpha_L$ )

( $D_L = \frac{m^2}{S^2 \omega 4 \pi t_{\max} C_{\max}^2}$ ) est qu'elle nécessite la connaissance de  $\omega$  (si le milieu est non karstique) ce qui est rarement le cas lorsque l'on effectue une expérience de traçage sur un site peu connu.

## V - LA DISPERSION EN MILIEU FISSURE

En milieu fissuré, la dispersion longitudinale est due, d'une part, à l'hétérogénéité des vitesses au sein d'une même fissure (profil parabolique des vitesses, G. de Marsily, 1981) et, d'autre part, à l'hétérogénéité des vitesses d'une fissure à l'autre (degré d'ouverture différent).

La dispersion transversale dépend de l'angle que font les directions de fissure entre elles.

L'étalement du nuage de traceur représente la dispersion. La longueur du nuage traduit la dispersion longitudinale et sa largeur, la dispersion latérale. On parle aussi de dispersion dans le temps pour la dispersion longitudinale puisque celle-ci s'apprécie en mesurant le temps de passage du nuage au point de prélèvement. La dispersion latérale (ou transversale) est aussi appelée dispersion dans l'espace.

En fait, lors d'une opération de traçage, l'analyse des échantillons prélevés aux différents points va permettre de définir un temps de passage du ou des nuages donc une dispersion dans le temps. L'examen de la répartition des différents traceurs sur le site donnera une image de la dispersion dans l'espace. La dispersion dans le temps découle directement de l'écart entre la vitesse des molécules les plus rapides et la vitesse moyenne. Plus celui-ci est grand, plus le temps de passage du nuage sera long et donc plus grande sera la dispersion dans le temps.

Celle-ci dépend aussi des phénomènes d'adsorption et de désorption, qui sont différents d'un traceur à l'autre (chapitre I) et sont liés à la nature du terrain en particulier dans la zone non saturée.

### 1 - La dispersion transversale (ou latérale)

La dispersion latérale ou dispersion dans l'espace est liée à la surcharge au moment de l'injection (voir figure n° 17). La surcharge provoquée par l'injection d'eau pour pousser le traceur crée une intumescence de la surface piézométrique qui engendre une divergence des lignes de courant. Cela sera d'autant plus marqué que la surface piézométrique est plane.

Mais la dispersion latérale dépend surtout de la structure fissurée du milieu (voir figures n° 18 et n° 19). L'orientation de l'écoulement va jouer un rôle important dans la dispersion (voir figures n° 19 a,b,c)

A Niort, l'angle entre ces plans, déduit d'une étude photogéologique, est de 160° environ. La dispersion latérale a été importante puisque les traceurs ont été retrouvés à tous les points d'observation (voir chapitre III, § II-B). L'angle maximum entre les lignes de courant est voisin de 75°.

Dans le Var, à la Roquebrussanne, l'angle maximum entre les lignes de courant est de 120°, alors que l'angle entre les deux familles principales de fractures est, lui, voisin de 90° (voir chapitre III, § II-C).

A Crémieu, dans l'Isère, malgré la présence de chenaux karstiques, sous l'aquifère fissuré, jouant le rôle de drains, la dispersion latérale a été totale puisque les deux traceurs sont partis dans toutes les directions (voir chapitre III, § II-A - figure n° 23).

Dans les 3 exemples, les trajets des différents traceurs se recoupent. Ceci s'explique par la dichotomie des flux au niveau des intersections des plans de fissures (voir figure n° 18 a, b). Même si la dispersion latérale est facilitée par la surcharge créée lors de l'injection, il n'en reste pas moins qu'un tel partage du flux ne peut se concevoir qu'au sein d'une zone saturée en milieu fissuré.

Ces trajets qui se recoupent impliquent aussi qu'en de nombreuses zones, l'écoulement principal puisse se faire très obliquement par rapport aux lignes de courant théoriques déduites d'une étude piézométrique.

Des dispersions comme celles décrites dans ces 3 exemples ne pourraient en aucun cas être liées à des écoulements dans des chenaux de type karstique. La présence de chenaux crée des discontinuités qui ne peuvent que très difficilement être franchies et donc limite la dispersion dans l'espace et en tous cas, interdit les trajets qui se recoupent.

Les éléments que fournissent de telles opérations de traçage ne permettent pas de chiffrer plus précisément la dispersion transversale. Il faudrait un dispositif de prélèvements multiples par l'intermédiaire de forages sur des sections perpendiculaires à la direction de l'écoulement général, de l'amont vers l'aval. On pourrait ainsi relever des profils de concentration dans le plan transversal de l'écoulement.

De telles expériences ont été effectuées en milieu poreux sur des portions restreintes d'aquifère (B. GAILLARD, 1976 et J-P. SAUTY, 1977), mais leur mise en oeuvre serait beaucoup plus lourde en "grandeur nature" en milieu fissuré.

Rappelons tout de même que J-P. SAUTY a obtenu, en écoulement uniforme en milieu considéré comme homogène (sables), une dispersivité transversale 20 fois plus faible que la dispersivité longitudinale. Les rapports habituellement rencontrés in situ varient de 10 à 20.

## 2 - La dispersion longitudinale

Nous avons vu que la dispersion longitudinale correspond à l'étalement du nuage de traceur dans le temps. Le calcul de la dispersivité longitudinale  $\alpha_L$  va permettre de chiffrer, au moins d'une manière approximative, cet étalement. En effet, ce calcul va donner une fourchette de valeurs ou un ordre de grandeur et non pas un chiffre exact étant donné les hypothèses et les simplifications faites au départ.

En milieu fissuré, pour les exemples décrits ici (*voir chapitre III, § II A) B) C)*), il n'est pas possible d'utiliser la méthode des abaques de J-P. SAUTY pour déterminer  $Pe$  et  $\alpha_L$  car les courbes de restitution présentent toutes une succession de plusieurs pics plus ou moins hauts et non pas un seul pic bien marqué qui serait superposable aux courbes théoriques.

Les coefficients  $\alpha_L$  et les nombres de Péclet ont donc été calculés uniquement par la méthode numérique grâce à l'équation (1)

$$\alpha_L = \frac{l}{8} \frac{(t_2 - t_1)^2}{t_{\max}^2}$$

Leurs valeurs, pour les trois sites étudiés en milieu fissuré, sont rassemblées dans le tableau n° 21.

Les deux temps ( $t_2 - t_1$ ) et  $t_{\max}$  sont difficiles à définir étant donné l'allure des courbes de concentration en fonction du temps. On peut néanmoins déterminer une fourchette de valeurs pour chaque courbe expérimentale.

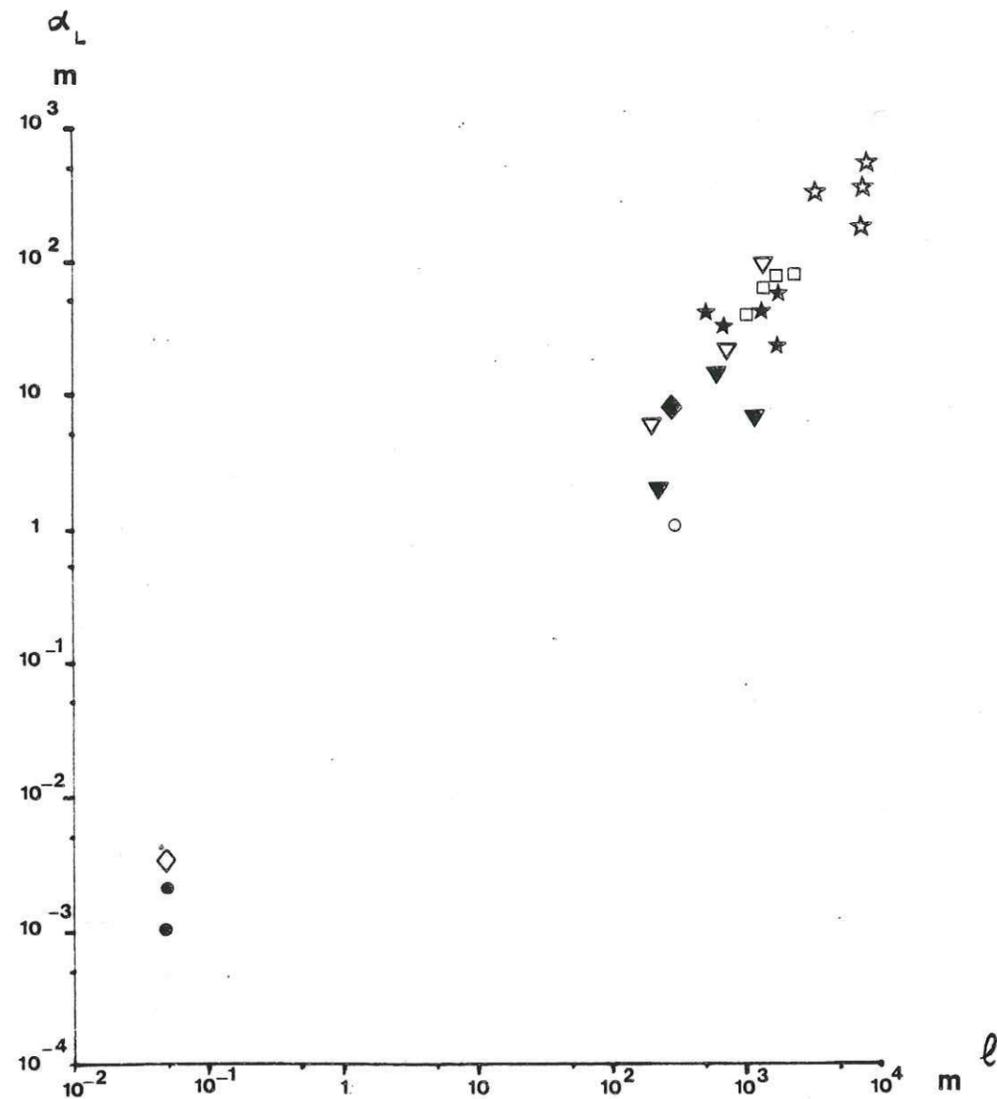
TABLEAU N° 21 : Les fourchettes de valeurs de  $\alpha_L$  et de  $Pe$  pour les trois sites en milieu fissuré calcaire

Sites	$\alpha_L$ en m	$Pe$
NIORT	$20 < \alpha_L < 60$	$13 < Pe < 75$
CREMIEU	$35 < \alpha_L < 65$	$31 < Pe < 34$
LA ROQUEBRUS-SANNE	$110 < \alpha_L < 500$	$13 < Pe < 50$

Cet ordre de grandeur de la dispersivité du milieu donne une idée de la distribution des hétérogénéités.

Comme nous l'avons vu plus haut, un nombre de Péclet infini traduit un écoulement piston tandis qu'un nombre de Péclet faible traduit un écoulement très dispersif. Si l'on compare les tableaux 19, 20 et 21, on s'aperçoit que l'écoulement le moins dispersif correspond au site de St Michel des Portes. Pour les trois expériences en milieu fissuré, les nombres de Péclet sont équivalents alors que les coefficients  $\alpha_L$  varient dans un rapport de 1 à 25.

Sur la figure 53, on observe que, d'une façon très globale, la dispersivité est plus élevée lorsque le parcours est plus grand. Ceci a déjà été constaté par A. LALLEMAND-BARRES et P. PEAUDECERF (1978), mais les mesures qu'ils ont rassemblées étaient trop diverses, surtout en ce qui concerne les milieux fissurés, pour dégager une conclusion générale sur ce point.



méthode de J.P Sauty :

◇

◆

▽

méthode personnelle :

●

○

▼

★

□

☆

colonne

St M. des Portes

Suran

Niort

Crémieu

La Roquebrussanne

Figure n°53 : Valeurs de la dispersivité  $\alpha_L$  en fonction de la distance parcourue  $l$ .  
(échelle bilogarithmique)

La dispersivité est un paramètre intrinsèque qui ne dépend théoriquement que du milieu.

" De bonnes conditions expérimentales ne devraient donc pas entraîner de relations entre les valeurs de dispersivités et la distance parcourue. Une bonne corrélation entre ces deux types de valeurs serait alors l'indice de conditions de mesures impropres car entraînant des erreurs systématiques. En effet, si l'on identifie le milieu naturel à un système homogène, il est théoriquement nécessaire que la distance soit supérieure à une distance critique au-delà de laquelle, on atteint un régime asymptotique. En deça, toute assimilation à un système simple et donc toute tentative d'extrapolation est aventureuse.

Une liaison étroite entre la valeur de la dispersivité et la distance tendrait à prouver que la distance critique n'a pas été atteinte dans la plupart des expériences "

(R. LALLEMAND-BARRES et P. PEAUDECERF, 1978).

Or, on peut penser qu'à La Roquebrussanne, où le parcours maximum est de 8000 m, on aurait largement atteint cette distance critique, si elle existait. Il est illusoire de vouloir trouver un milieu fissuré qui devienne "plus homogène" au-delà de 8 km.

Le problème est que les aquifères concernés ici présentent des complications tectoniques et des variations latérales ou verticales de faciès telles qu'on ne peut pas penser qu'il existe une certaine taille de maille (ou une distance) critique au-delà de laquelle le milieu peut être considéré comme homogène.

A l'Ile Crémieu, par exemple, plus la distance de parcours sera grande, plus le traceur aura de possibilités de rencontrer des drains étant donné qu'il existe des sources karstiques sur le pourtour du plateau.

Avant d'effectuer un traçage, on ne dispose pas de moyens pour savoir s'il existe une maille ou, si c'est le cas, qu'elle est sa taille.

En fait, les aquifères étudiés ici sont des milieux très hétérogènes, il est donc difficile de passer de la théorie à la pratique et de donner des valeurs de dispersivités significatives. Les calculs de dispersivités tels qu'ils sont donnés ici, sont valables pour des colonnes ou des bacs de matériaux poreux ou encore pour des expériences sur des sites restreints comme ceux du Suran ou de St Michel des Portes où le transit est rapide, la dispersion faible et où les courbes de concentration en fonction du temps présentent un pic bien marqué. Dès qu'il s'agit d'aquifères fissurés de dimensions kilométriques, il est bien évident que plus le parcours du traceur est grand, plus la probabilité de rencontrer une ou des "hétérogénéités" est élevée. La dispersivité devient donc un paramètre variable et il y a beaucoup de "chance" pour qu'il augmente avec la distance, comme le montre la figure n° 53.

Notons cependant que la dispersivité augmente nettement avec la distance d'un site à l'autre, mais de façon beaucoup moins évidente sur un même site. Cela tient au fait que, pour chaque opération de traçage, les longueurs de parcours sont semblables entre les différents points de prélèvement et donc les coefficients  $\alpha_L$  représentent tous la même échelle d'hétérogénéité. En revanche, lorsque l'on passe d'un site à l'autre, on fait varier cette échelle si l'on change la distance.

Pour obtenir des valeurs de dispersivité plus précises et plus représentatives, il faudrait faire de nombreuses expériences sur un même site, dans les mêmes conditions hydrodynamiques, sur des parcours de plus en plus longs. De toute façon (et comme l'ont remarqué A. LALLEMAND et P. PEAUDECERF, 1978) " *il apparaît illusoire d'apprécier a priori le caractère dispersif d'un milieu aquifère. Des expériences in situ sont dans tous les cas nécessaires* ".

Comme nous l'avons vu précédemment, J-P. SAUTY (1978) s'est intéressé aux phénomènes de dispersion et à l'interprétation des expériences de traçage par des méthodes graphiques d'abaques. Il envisage, entre autres, le cas d'une injection brève en écoulement uniforme dans une nappe en milieu poreux homogène (dans des sables). Sur un site donné, il observe que la dispersivité croît d'abord avec la distance de mesure pour ensuite se stabiliser, lorsqu'on dépasse une certaine

longueur. " *Cette stabilisation de la dispersivité mesurée correspond au passage à un schéma d'aquifère homogène* ". C'est ainsi qu'il définit une échelle dite d'hétérogénéité, " *au-delà de laquelle les hétérogénéités se compensent statistiquement avec passage à un milieu macroscopiquement homogène* " (J-P. SAUTY, 1978).

Les abaques qu'il propose ne sont plus utilisables dès que l'on passe à un milieu fissuré présentant une hétérogénéité telle que les courbes expérimentales n'ont plus du tout l'allure des courbes théoriques, comme c'est le cas dans nos exemples ici. CRAMPON et al. (1983 et 1984) ont complété les études de J-P. SAUTY mais en restant toujours dans l'hypothèse du milieu considéré comme homogène et en appliquant leurs théories à des sites de petites dimensions dans la nappe de la craie essentiellement (parcours inférieurs à 30 m). Leurs abaques ne sont utilisables que pour des courbes expérimentales présentant un seul pic bien marqué et régulier.

Il faut donc trouver une autre méthode, simple si possible, et un autre paramètre qui permettent de mieux caractériser le pouvoir dispersif d'un aquifère fissuré.

Le rapport des vitesses (vitesse maximale sur la vitesse moyenne) constitue une donnée utile, représentative et facile à obtenir. En effet, nous avons vu précédemment (*chapitre III, § I*) qu'en milieu karstique ou à circulation rapide, à faible pouvoir dispersif, les rapports sont toujours inférieurs à 2 tandis qu'en milieu fissuré, ils sont supérieurs à 5 au minimum. Si l'on choisit comme vitesse moyenne maximale celle correspondant au dernier prélèvement, (quand un taux de restitution de 50 % n'est pas atteint à la fin de la période de prélèvement), on pourra dire que le rapport est supérieur à une certaine valeur minimale. Plus cette valeur est élevée, plus l'étalement du nuage est grand, donc plus la dispersion longitudinale est forte. C'est à Crémieu, où il existe des conduits karstiques, que les rapports sont les plus faibles ( $\sim 5$ ). Tandis qu'à Niort, ils sont plus élevés et témoignent d'un milieu fissuré non karstique. A La Roquebrussanne, l'aquifère est plus complexe et comprend des zones à écoulement préférentiel plus perméables, ce qui provoque des variations dans les valeurs des rapports.

Ce rapport des vitesses permet donc de caractériser les courbes de concentration en fonction du temps obtenues lors d'expériences de traçage dans des aquifères fissurés, sur des parcours de quelques kilomètres. Ces courbes sont en effet difficiles à interpréter et ne sont pas superposables aux courbes théoriques des abaques (proposés par J-P. SAUTY et al.), étant donné la forte dilution et les phénomènes de rétention qui "écrêtent" et étalent les "pics".

A partir des 3 exemples de traçage en milieu calcaire fissuré, il apparaît donc nécessaire de compléter le calcul de la dispersivité et du nombre de Péclet par celui du rapport des vitesses (vitesse maximum sur vitesse moyenne) pour apprécier le caractère hydrodispersif du milieu.

#### VI - LA DISPERSION DANS LES AQUIFÈRES COMPLEXES

Reprenons les deux exemples de traçage sur les sites du Clou et de la Norma (voir chapitre III, § III).

- Sur le site du Clou, après l'injection, le traceur circule en partie dans des écoulements superficiels rapides et en partie dans des chenaux et des nappes de fissures.

D'après les différentes vitesses d'arrivée de la fluorescéine, on peut déterminer les différents types de circulations en connaissant le contexte géologique.

Encore moins que pour les milieux exclusivement calcaires, on ne peut superposer les courbes expérimentales aux courbes théoriques des abaques pour déterminer la dispersivité ou le nombre de Péclet. Elles en sont en effet très éloignées et présentent plusieurs pics plus ou moins marqués correspondant aux différentes zones. On peut calculer (à partir de l'équation (1)) pour chaque pic une dispersivité  $\alpha_L$  et considérer qu'elle caractérise la zone traversée par le traceur à cet instant donné. Mais cette méthode ne donne pas des résultats très significatifs car les valeurs de  $\alpha_L$  dépendent beaucoup de l'intervalle de temps  $(t_2 - t_1)$  choisi, (c'est-à-dire de la largeur du pic).

Le tableau n° 22 montre que les vitesses de transit n'influent pas directement sur les valeurs de  $\alpha_L$ . Comme en milieu calcaire, les surfaces de contact importantes (dus aux nombreuses fissures) provoquent des phénomènes d'adsorption et de désorption qui retardent la restitution du traceur. Toutefois ces retards ne sont pas tels qu'ils engendrent des erreurs importantes dans l'évaluation des temps de transit, étant donné que de toute façon, dans ces milieux, ceux-ci sont élevés.

TABLEAU N° 22 : Le site du Clou : les différentes vitesses d'arrivée de la fluorescéine et les valeurs des dispersivités correspondantes

FLUORESCEINE : points de prélèvements	Vitesses en m/h	$\alpha_L$ en m
N° 1 : Source temporaire 2250 m	14 3,5 1,4	125 8 16
N° 2 : Piézomètre	5	230
N° 3 : Galerie Rive droite	9 2,5 1,5	5,5 11 61
N° 4 : Galerie Rive gauche	10 3	21 8
N° 5 : Source Rive droite	12 3 2	80 3 140
N° 6 : Source Chenal	15 5	40 240

Pour le point n° 2 (piézomètre), par exemple, la valeur de  $\alpha_L$  est très arbitraire car si l'on choisit  $(t_2 - t_1) = 13$  j et  $t_{\max} = 10$  j, on obtient  $\alpha_L = 230$  m, mais si l'on prend  $(t_2 - t_1) = 9$  j et  $t_{\max} = 6$  j, on obtient  $\alpha_L = 310$  m.

On voit donc que ces valeurs sont assez aléatoires et on peut penser qu'elles auraient été différentes dans d'autres conditions hydrodynamiques ou même avec un autre traceur. En effet, dans ces cas-là, d'autres pics secondaires auraient pu apparaître ou les pics existants auraient pu être plus "larges".

Pour tous les points d'observation, l'allure des courbes de restitution de la fluorescéine ne permet de calculer des valeurs de  $\alpha_L$  que très approximatives qui ne caractérisent pas de façon nette les différentes zones de l'aquifère.

Dans le cas de cet exemple d'expérience de traçage sur le site du Clou, il apparaît que la comparaison des différentes vitesses d'arrivée apporte plus d'informations que l'analyse des valeurs de  $\alpha_L$ . On ne peut espérer, dans un milieu d'une telle hétérogénéité, appliquer la théorie de la dispersion à la pratique. En revanche, on peut appréhender de manière assez précise les différents types de circulation qui coexistent, grâce à l'analyse des vitesses. Etant donné qu'il n'y a pas de vitesse moyenne pour chaque courbe mais plusieurs vitesses différentes pour les trois types d'écoulement, on ne peut pas calculer le rapport vitesse maximale/vitesse moyenne comme pour les aquifères en milieu calcaire.

• Sur le site de la Norma, (voir chapitre III, § III), l'injection s'est faite dans une perte au sein des gypses et le traceur a circulé successivement dans plusieurs formations, fissurées et alluviales.

Le calcul des coefficients de dispersivité aux points n° 2, 3, 6 donne des valeurs comprises entre 25 et 40 m. Pour le point n° 5, le calcul devient très incertain étant donné la forme de la courbe. L'hétérogénéité de l'aquifère et surtout l'allure des courbes de restitution rendent ce calcul peu significatif. En effet,  $\alpha_L$ , se rapporte-t-il au milieu fissuré ou alluvial ?

De plus, on peut penser que l'on ne dispose que de la "crête" des courbes étant donné la très forte dilution du traceur et que l'on commet une erreur importante sur le temps de passage du pic. Encore plus

que pour l'expérience sur le site du Clou, il apparaît illusoire de vouloir rapprocher d'un exemple théorique ce système aquifère et il est préférable de s'en tenir à l'analyse des vitesses de transfert.

## VII - CONCLUSIONS

L'application des lois de la dispersion dans les aquifères fissurés ou complexes n'est pas facile étant donné les hétérogénéités qu'ils présentent. L'équation de la dispersion et les calculs de coefficients qui en découlent sont tout à fait valables pour des aquifères assimilables à des milieux homogènes et isotropes ou pour des expériences de traçage de petite ou moyenne envergure dans des zones à circulations préférentielles. Dès que le volume concerné par le traceur et la distance parcourue deviennent trop importants, la dispersion, la dilution et donc l'étalement du nuage sont tels que les courbes de concentration en fonction du temps ne présentent plus un seul pic bien marqué mais une succession de petites "pointes" aléatoires. Ces courbes ne sont plus superposables aux courbes théoriques des abaques proposés par J-P. SAUTY pour la détermination de  $\alpha_L$  et  $Pe$ . La méthode de calcul de  $\alpha_L$  par la formule

$$\alpha_L = \frac{l}{8} \frac{(t_2 - t_1)^2}{t_{\max}^2}$$

est possible mais souvent délicate. La connaissance de la dispersivité doit être complétée par celle du rapport de la vitesse maximale sur la vitesse moyenne, afin de mieux cerner les modes de circulation des eaux souterraines.

Comme nous l'avons vu au chapitre II, P. CALMELS propose une utilisation des courbes de tarissement pour déterminer les réserves utiles d'un aquifère.

Dans le même ordre d'idées, I. MÜLLER (1982) suppose que la vidange des traceurs obéit aux mêmes lois et aux mêmes types d'équations exponentielles que celles valables pour caractériser les décrues des sources karstiques. Il lui apparaît probable que l'allure de la courbe de restitution d'un traceur pourrait caractériser les conditions d'écoulement dans une structure géologique.

"Chaque structure pourrait avoir sa courbe de restitution qui lui serait propre"

"L'itinéraire inconnu d'un traceur pourrait alors être abordé dans ce cas par similitude, en comparaison avec la décroissance exponentielle d'autres traceurs cheminant dans des structures bien identifiées" (I. Müller, 1982).

Mais, le problème est que ces méthodes nécessitent la connaissance des débits d'écoulements du bassin versant sur plusieurs années, ce qui est loin d'être toujours le cas. De plus, elle n'est utilisable que lorsque tous les apports se font sur un même bassin versant bien délimité et elle ne peut s'appliquer à des systèmes complexes tels que ceux du Clou ou de la Norma.

«  
\* \*

## CONCLUSIONS GENERALES

Au terme de ce travail, fruit d'une expérience acquise en laboratoire et sur le terrain, il est possible de dégager quelques points essentiels sur la méthodologie du traçage quantitatif.

Les traceurs fluorescents peuvent être utilisés pour l'obtention de données chiffrées, en particulier dans les aquifères fissurés. Ceci nécessite non seulement la connaissance des interactions physico-chimiques traceur-terrain, mais aussi le respect de quelques conditions quant à la conduite des opérations.

Les expériences faites en laboratoire, sur colonnes, à propos du comportement de plusieurs traceurs fluorescents, vis-à-vis des principaux constituants du sol, confirment le fait que la fluoescéine reste globalement le plus performant de tous. Cependant, elle présente l'inconvénient d'être, justement en raison de sa notoriété, couramment utilisée et il faut toujours s'assurer qu'elle est bien absente dans les eaux avant d'opérer sur un site. Notons, à ce sujet, que de la fluoescéine peut subsister dans des massifs fissurés plus de deux mois après l'injection, comme ceci a été constaté sur le site du Clou.

Le caractère anionique ou cationique des traceurs fluorescents induit une sensibilité aux phénomènes d'adsorption et de désorption. Des cinq produits étudiés, la rhodamine B est la plus sensible à ces phénomènes. Les amidorhodamines B et G et l'éosine ont des pouvoirs de rétention à peu près équivalents selon la nature du constituant utilisé dans les colonnes. Le carbonate de calcium ne provoque ni baisse de fluorescence, ni retard ou déficit de restitution, sauf pour la rhodamine 6G qui est la plus cationique.

Contrairement aux résultats obtenus par B. GAILLARD (1976), le lithium s'avère être un étalon interne parfait ; il est toujours restitué entièrement et sans retard. Aucune différence de comportement n'est

constatée quelque soit le constituant utilisé. Le lithium est donc un traceur fidèle, (dans les conditions où il a été employé ici), mais son seuil de détection élevé ( $5 \cdot 10^{-8}$  kg/l) nécessite une utilisation en grandes quantités (10 à 100 fois plus qu'un traceur fluorescent) pour une opération sur le terrain.

Dans les colonnes, le matériau poreux très fin utilisé amplifie les phénomènes d'adsorption et de désorption, car il offre aux molécules de traceur un grand nombre de surfaces de contact. Dans les chenaux karstiques ou dans des zones à écoulement rapide, ces surfaces sont nettement moins développées.

Lors des expériences sur des sites de dimensions restreintes, on constate qu'en fait, l'allure des courbes de concentration en fonction du temps et les taux de restitution dépendent plus des conditions hydrodynamiques et des modes de circulation que du traceur lui-même.

Comme l'a montré C. DROGUE (1977), en milieu karstique ou dans des zones à écoulement rapide (comme dans les éboulis grossiers de St-Michel des Portes, par exemple), le rendement d'un traceur est nettement lié au débit.

A des vitesses élevées donc à des débits élevés, correspondent des taux de restitution élevés. Ceci est dû au fait que plus les vitesses sont faibles, plus le nuage de traceur s'étale dans le temps et une grande partie de la courbe passe en dessous du seuil de détection. Inversement, quand le débit est élevé, l'effet piston est accentué, le nuage reste concentré et la courbe de restitution présente un pic bien marqué.

En milieu fissuré, les surfaces de contacts sont importantes. Les phénomènes d'adsorption et de désorption entraînent un étalement du nuage.

Dans la pratique, il n'est pas évident d'injecter le traceur de façon à ce que son trajet intéresse la zone saturée fissurée. En effet, si l'injection se fait dans une perte, ce qui représente la solution de facilité, le traceur risque de se propager essentiellement

dans la zone à circulations rapides (chenaux, fractures ouvertes ...). La probabilité de transit au sein même du milieu fissuré est beaucoup plus grande si l'injection est faite dans un forage ou dans une fouille comme dans les exemples étudiés.

A partir de l'analyse du signal de sortie, il est possible d'obtenir des données chiffrées relatives à l'aquifère concerné par le traçage. Les premières informations sont apportées par les concentrations. D'une manière générale, partout où il y a circulation au sein d'un milieu fissuré, les concentrations maximales mesurées sont beaucoup plus faibles que pour des circulations en chenaux. Ces faibles concentrations traduisent une dilution importante d'autant plus qu'elle se produit tout au long du parcours souterrain.

Il y a dichotomie du flux d'eau tracée à chaque intersection de plans de fractures et mélange avec des eaux non tracées, donc dilution. Cette dilution va se manifester, à la restitution, par une concentration moyenne faible et par de nombreux petits pics apparaissant de façon aléatoire au point d'observation.

Dans les fractures et fissures de dimensions différentes vont passer des flux variables d'eaux tracées qui n'empruntent pas les mêmes chemins. Cette hétérogénéité du milieu provoque donc des irrégularités dans les courbes de restitution. Ces irrégularités rendent difficiles les calculs de coefficients de dispersivité et de nombres de Péclet à partir du tracé des courbes.

Pour une injection instantanée (ou brève), dans un milieu considéré comme homogène et isotrope, où la vitesse est uniforme et l'écoulement monodimensionnel, il est proposé une méthode de calcul de la dispersivité longitudinale  $\alpha_L$ , à partir de la courbe de concentration en fonction du temps.

$$\alpha_L = \frac{\ell}{8} \frac{(t_2 - t_1)^2}{t_{\max}^2} \quad \text{où } \ell = \text{distance entre le point d'injection et le point de prélèvement, exprimée en mètres.}$$

$t_2 - t_1$  = temps correspondant à la largeur du pic au niveau où la concentration est égale à 0,6 fois la concentration maximale.

$t_{\max}$  = temps écoulé depuis l'injection, correspondant au maximum de concentration.

D'après cette formule empirique, il apparaît que la dispersivité  $\alpha_L$  dépend de la distance de parcours,  $\ell$ , ce qui, selon la théorie, ne devrait pas être le cas. En effet,  $\alpha_L$  est une caractéristique propre au milieu, donc indépendante des conditions expérimentales.

En milieu considéré comme homogène et isotrope,  $\alpha_L$  augmente tout d'abord avec la distance de parcours puis tend vers une limite qui représente l'échelle dite d'hétérogénéité (J-P. SAUTY, 1978).

En milieu fissuré hétérogène, cette limite ne peut être atteinte car elle n'existe pas. Le réseau de fractures et de fissures est une succession de mailles et de noeuds de dimensions très irrégulières. Plus on augmente le parcours expérimental, plus le traceur a de "chance" de rencontrer des hétérogénéités importantes (fractures ouvertes, zones à plus forte perméabilité ...).

Cette méthode de calcul de  $\alpha_L$  est applicable aux essais sur colonnes et aux expériences sur les sites du Suran et de St Michel des Portes, où les conditions de circulations sont compatibles avec les hypothèses de départ. Les valeurs de  $\alpha_L$  sont ainsi calculées avec une approximation tout à fait satisfaisante.

Dans des conditions semblables (c'est-à-dire quand les courbes de restitution présentent un seul pic bien marqué), il est possible d'utiliser les abaques proposés par J-P. SAUTY et N. CRAMPON (1978 et 1983) pour déterminer les dispersivités et les nombres de Péclet.

Les valeurs obtenues avec les deux méthodes sont d'ailleurs du même ordre de grandeur et tout à fait comparables, et toutes deux augmentent avec la distance.

Cette méthode des abaques est en revanche inutilisable lorsque les courbes présentent une succession de petits pics, comme c'est le cas en milieu fissuré. On peut calculer  $\alpha_L$  pour les différentes arrivées successives (à partir de la formule :

$$\alpha_L = \frac{\ell}{8} \frac{(t_2 - t_1)^2}{t_{\max}^2} )$$

mais on fait alors une approximation grossière en considérant l'écoulement uniforme et monodimensionnel et les valeurs obtenues ne suffisent plus à elles seules pour représenter ou caractériser le milieu.

Il faut compléter la connaissance de la dispersivité par celle du rapport des différentes vitesses. En milieu fissuré, alors que les vitesses des premières arrivées ont des valeurs comparables à celles mesurées en milieu karstique, les vitesses moyennes sont très faibles. Cet écart entre les différentes vitesses est un des éléments qui caractérise le transit au sein d'un aquifère fissuré.

Les rapports des vitesses maximales sur les vitesses moyennes sont inférieurs à deux dans les milieux à circulations rapides (dans les karsts ou dans les éboulis grossiers) et supérieurs à cinq dans les milieux fissurés.

En milieu complexe coexistent des aquifères aux caractéristiques très différentes. L'interprétation des courbes expérimentales à partir des calculs découlant de l'équation de la dispersion ou à partir des courbes théoriques des abaques est illusoire.

Les seuls éléments dont on dispose pour caractériser les courbes sont les vitesses. Il n'est plus possible de calculer un rapport étant donné qu'on ne peut plus parler de vitesse moyenne dans de tels milieux. Il convient donc d'analyser en détail les vitesses et de les comparer entre elles aux différents points d'observation afin de définir les conditions de circulation au sein du massif concerné par le traçage.

A l'issue de ce travail, il apparaît possible d'obtenir des données quantitatives à partir d'un traçage, même dans des aquifères très hétérogènes.

La connaissance des phénomènes de dispersion et des caractéristiques hydrodispersives du milieu permet alors d'approcher la structure de l'aquifère et éventuellement le volume des réserves.

Enfin, la comparaison d'une part, des vitesses moyennes des traceurs en milieu fissuré avec les valeurs des perméabilités mesurées in situ par essai de pompage ou essai Lugeon et d'autre part, celle des courbes de crues et décrues des débits en massif fissuré avec les courbes de restitution des traceurs (déjà entreprise dans certaines régions) permet un contrôle réciproque des données sur le comportement hydrodynamique de ces formations et une meilleure compréhension des mécanismes de circulation des eaux souterraines qui conditionnent la connaissance des volumes des réserves emmagasinées.

La propagation des traceurs est, en effet, étroitement déterminée par la structure du matériau aquifère et par l'importance des réserves qu'il contient au moment de l'expérience.

Les recherches dans ces domaines, auxquelles j'espère avoir apporté une modeste contribution, apparaissent donc importantes et prometteuses pour l'avenir.

•••

## BIBLIOGRAPHIE

*Dans cette bibliographie, je ne cite que les ouvrages réellement utilisés pour rédiger ce mémoire. Chacun d'entre eux comporte une bibliographie plus ou moins complète, française et anglo-saxonne, à laquelle le lecteur pourra se référer.*

•••

ATKINSON T.C. et SMART P.L., 1979.

*Traceurs artificiels en hydrogéologie.*

Bull. BRGM (2ème Série) Section III, n° 3, pp. 365 à 380.

BAUDOIN F. et FOURNEAUX J-C., 1982.

*Le bassin versant de la source de Pierre Chave (Saint-Auprès, Isère).*

Revue de Géographie Alpine, t : LXX-3.

BIJU-DUVAL J.

*La Source de Font Noire.*

Rapport interne D.D.A., Isère.

BRISSAUD F., 1982.

*Propagation en solution dans les aquifères et effet d'échelle.*

Compte-rendu du Séminaire de Strasbourg, C.N.R.S., environnement.

BRISSAUD F. et COUCHAT Ph., 1983.

*Interaction liquide-solide et migration des solutés en milieu poreux saturé.*

Bull. BRGM, Section III, n° 4, pp. 293 à 309.

BROUILLARD J-F., 1974.

*Les applications de la spectrofluorimétrie à l'hydrologie.*  
5ème Congrès National de Spéléologie, publié par la Société  
Suisse de Spéléologie, Interlaken.

BURGER A., 1979.

*Recherche de critères pour la protection des eaux souterraines  
karstiques contre la pollution. Application au Jura Suisse.*  
Bull. du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, n° 3, pp.115 à 154.

BUSSE J-F., 1974.

*Protection de la nappe de Lyon contre la pollution.*  
Mémoires du Congrès de Montpellier de l'A.I.H., Tome X, pp.46  
à 50.

BUSSE J-F., 1980.

*La pollution dans la nappe des formations quaternaires de  
l'Est de Lyon.*  
Thèse Université de Grenoble.

CALMELS P., 1985.

*Application de l'analyse système à l'exploitation des données  
hydrométriques et isotopiques en hydrologie.*  
Thèse Université de Grenoble.

CALVET R., 1982.

*Les processus associés au transport des solutés dans les sols.*  
Compte-rendu du séminaire de Strasbourg. C.N.R.S., environnement.

CARRET J-P. et FOURNEAUX J-C., 1979.

*Analyse des facteurs influents sur l'infiltration dans les  
cônes de déjection.*  
Comptes-rendus du 104ème congrès national des sociétés  
savantes, fasc. III, Bordeaux.

CARSLAW H.S. and JAEGER J-C., 1959.

*Conduction of Heat in solids.*  
Oxford University Press, Second Edition.

CHARRIERE R., 1974.

*Perfectionnements à la mesure de traceurs fluorescents.*  
*Application à l'hydrogéologie.*  
Thèse Université de Grenoble.

CRAMPON N., 1983.

*Abaques de détermination rapide des caractéristiques hydrodis-  
persives lors de traçages par injection brève.*  
Bull. BRGM, Section III, n° 4, pp. 287 à 292.

CRAMPON N., CARLIER E., PREAUX C., 1983.

*Détermination des paramètres hydrodispersifs par calages successifs  
de la courbe de restitution à l'aide d'abaques.*  
Bull. BRGM, Section III, n° 4.

DAVID L. et al., 1979.

Notice de la carte géologique 1/50.000<sup>e</sup> Montluel- B.R.G.M.

DROGUE C., 1971.

*Réflexions sur les possibilités offertes par les traceurs pour la  
mesure de la vitesse d'écoulement dans les roches calcaires fissurées.*  
Bull. BRGM, Section III, n° 4 (deuxième série).

DURR F., 1982.

*Contribution à l'étude hydrogéologique du massif karstique  
d'Annoisin-Chatelans. Travail de fin d'étude.*  
Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.

ENAY R., 1980.

*Les formations glaciaires et les stades de retrait du glacier  
würmien dans l'Ile Crémieu.*  
Bull. Mens. Soc. Linéenne de Lyon, n°1- 50ème année, pp.5 à 27.

ENAY R., 1980.

*L'Ile de Crémieu : évolution morphologique et structurale.*  
Bull. Mens. Soc. Linéenne de Lyon, n° 8, 49ème année, pp.482-505.

FOURNEAUX J-C., 1980.

*Utilisation de la spectrofluorimétrie et de la spectrophotométrie pour la mesure des débits karstiques.*  
Actes du 1er Colloque national pour la protection des eaux souterraines, Besançon.

FOURNEAUX J-C. et GRANGE R., 1980.

*Application des méthodes de jaugeages chimiques aux écoulements karstiques : le karst du Suran.*  
Actes du 1er Colloque national pour la protection des eaux souterraines, Besançon.

FOURNEAUX J-C. et ROCHAT J., 1981.

*Essais "in situ" de quatre traceurs fluorescents.*  
4th International symposium of underground water tracing (4<sup>e</sup> SUWT) Bern, publié par l'Institut de Géographie de l'Université de Berne, département hydrologie.

FOURNEAUX J-C., 1982.

*Exemples d'influence des glaciers sur les circulations karstiques.*  
Atti Convegno Internazionale sul Carso di alta montagna, Imperia.

FOURNEAUX J-C., 1982.

*Les conditions de mélange dans les aquifères alluviaux.*  
Comptes-rendus du 107ème Congrès national des sociétés savantes, Brest, Fasc. III.

FOURNEAUX J-C. et DURR F., 1983.

*Influence d'une variation du niveau de base sur un karst tabulaire, le massif d'Annoisin-Chatelans, dans l'Ile Crémieu (Isère).*  
Comptes-rendus du 108ème Congrès national des sociétés savantes, Grenoble, Fasc. I.

FOURNEAUX J-C., SOMMERIA L., BILLAUT J-P. et HENRY J-L., 1983.

*Exemple de dispersion en milieu calcaire fissuré.*  
Comptes-rendus du 108ème Congrès national des sociétés savantes, Grenoble, Fasc. I.

FOURNEAUX J-C., SOMMERIA L., BARBIER J-L., 1984.

*Etude d'un aquifère en milieu fissuré par des traçages.*  
Comptes-rendus du 109ème Congrès national des sociétés savantes, Dijon, Fasc. I.

FOURNEAUX J-C. et SOMMERIA L., 1984.

*Utilisation de la méthode des traçages pour l'étude d'aquifères fissurés en milieu calcaire.*  
Comptes-rendus de l'Assemblée Générale de l'A.G.S.E., Lyon.

FRIED J-J., 1982.

*Exposé de synthèse sur la modélisation mathématique dans l'étude de la pollution des eaux souterraines.*  
Comptes-rendus du séminaire de Strasbourg, C.N.R.S. environnement.

FRIED J-J. et UNGEMACH P.O., 1973.

*Modèles de pollution de nappes d'eau souterraine. Méthodologie et règles pratiques.*  
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. Centre d'Informatique Géologique.

GAILLARD B., 1976.

*Méthode de traceurs pour la détermination des paramètres de transfert de substances en solution dans l'eau des aquifères.*  
Thèse d'Université, Grenoble.

GANZ E., 1944.

*Contribution à l'étude des acides humiques.*  
Thèse de la Faculté des Sciences de Paris.

JAMIER D., 1977.

*Pollution et protection des aquifères karstiques.*  
Bull. du Centre d'Hydrologie de Neuchâtel, n° 3, 1979.

LALLEMAND-BARRES A. et PEAUDECERF P., 1978.

*Recherche des relations entre la valeur de la dispersivité macroscopique d'un milieu aquifère, ses autres caractéristiques et les conditions de mesures.*

Etude bibliographique - Bull. BRGM, Section III, n° 4, pp.277 à 284.

LEMORDANT Y., 1977

*Infiltration et transfert des eaux souterraines en pays karstique.*  
Thèse 3ème Cycle, Grenoble.

MARSILY de G., 1981.

*Hydrogéologie quantitative.*  
Masson, Paris.

MATHIEU G. et al., 1966.

Carte géologique Niort 1/80.000<sup>e</sup>, BRGM Ed.Orléans.

MOLINARI J. et al., 1976.

*Multitraçages dans les massifs karstiques du Vercors et de la Chartreuse (France).*  
3<sup>rd</sup> International symposium of underground water tracing (3<sup>rd</sup> SUWT), Ljubljana, Bled.

MÜLLER I., 1982.

*Multitraçage des eaux souterraines karstiques dans le bassin de la source de l'Areuse (Jura Neuchâtelois, Suisse).*  
Bull. Centre d'hydrologie de Neuchâtel, n° 4.

MUNCH M. et ACKERER Ph., 1982.

*Etude par simulation des régimes de dispersion en milieu poreux.*  
Comptes-rendus du séminaire de Strasbourg, C.N.R.S. environnement.

PAWULA A., 1983.

*Méthode comparative de détermination des paramètres de dispersion dans une nappe aquifère.*  
Colloque sur les ressources en eau et utilisation. Méthodes et études du cas algérien, Constantine.

PFANN KUCH H.O., 1963.

*Contribution à l'étude des déplacements de fluides miscibles dans un milieu poreux.*

Revue de l'IFP n° 2, 18, pp. 215 à 270.

RERAT J-C., 1976.

*La Rhodamine B : propriétés physico-chimiques ; étude de leurs incidences sur son utilisation comme traceur en hydrologie et sur son épuration dans les effluents.*

Thèse Université Pharmacie, Grenoble.

ROCHAT J. et LUU DUC C., 1973.

*Relations entre la structure et les propriétés dissolvantes de l'eau.*

LYON Pharmaceutique, 24, 1, pp. 25-29.

ROCHAT J., ALARY J. et FOURNEAUX J-C., 1981.

*Comportement des traceurs fluorescents xanthéniques. Influence des principaux composants du sol sur la rétention du traceur.*  
Spelunca, 5ème série, n° 3.

ROCHON J., 1978.

*Principaux mécanismes physico-chimiques causant la disparition de substances miscibles dans les sous-sols.*

Bull. BRGM, section III, n° 4, pp. 303 à 309.

SARROT-REYNAULD J. et FOURNEAUX J-C., 1976.

*Comparaison des types de circulation dans les massifs karstiques des chaînes subalpines françaises à partir des études hydrogéologiques et des traçages récents.* 2<sup>e</sup> Colloque d'hydrologie en pays calcaire.

Annales scientifiques de l'Université de Besançon, Fasc.25, 3ème série.

SARTIGES de B., 1978.

*Infiltration des eaux et relations entre aquifères profonds et superficiels : hydrogéologie du plateau de Thollon, de la montagne de Mémise et de la Vallée de l'Ugine (Haute Savoie).*

Thèse 3ème Cycle, Grenoble.

SAUTY J-P., 1977.

*Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage.*

Thèse docteur ingénieur, Grenoble.

SAUTY J-P., 1978.

*Mise au point et utilisation d'abaques pour l'interprétation des expériences de traçage dans les nappes d'eau souterraine.*

Bull. BRGM, Section III, n° 4, pp. 285 à 291.

SOMMERIA L., 1983.

*Les phénomènes de dispersion dans les aquifères. Application à l'utilisation des traceurs.*

Mémoire de DEA, hydrogéologie, Université de Grenoble.

\*  
\* \*

## LISTE DES FIGURES

	<u>Pages</u>
Fig. 1 : Formules chimiques développées des traceurs xanthéniques étudiés (in J. Rochat et al., 1981)	9
Fig. 2 : Schéma de l'appareillage utilisé pour les expériences sur colonnes.	11
Fig. 3 : Colonne de CaCO <sub>3</sub> pur. Histogrammes de restitution des différents traceurs.	18
Fig. 4 : Colonne de CaCO <sub>3</sub> pur. Histogrammes de restitution des 3 rhodamines et courbes de restitution comparatives des 3 rhodamines.	19
Fig. 5 : Colonne de CaCO <sub>3</sub> et 10 % de SiO <sub>2</sub> . Courbes de restitution comparatives des différents traceurs.	21
Fig. 6 : Colonne de CaCO <sub>3</sub> et 3 % d'argile verte. Courbes de restitution schématiques.	23
Fig. 7 : Colonne de CaCO <sub>3</sub> et 5 % d'acide humique. Courbes de restitution comparatives des différents traceurs.	25
Fig. 8 : Description du site du Suran (in J-C. Fourneaux et J. Rochat, 1981).	38
Fig. 9 : Courbes de concentration en fonction du temps obtenues sur le site du Suran.	40
Fig. 10 : Localisation et plan du site de St Michel des Portes.	44
Fig. 11 : Courbes de concentration en fonction du temps obtenues à St Michel des Portes.	47
Fig. 12 : Courbes de concentration en fonction du temps obtenues à St Michel des Portes, pour un débit à la source de 150 l/s.	48

	<u>Pages</u>
Fig. 13 : Les 3 niveaux de fissuration dans un aquifère fissuré.	57
Fig. 14 : Schématisation des phénomènes de crue et de décrue a et b en milieu fissuré.	59
Fig. 15 : Injection dans une perte active en relation avec a,b,c un drain.	60
Fig. 16 : Cas d'une injection directe dans la zone fissurée. a,b,c	61
Fig. 17 : Surcharge temporaire créée au moment de l'injection.	62
Fig. 18 : Phénomènes de dispersion dus au réseau de fractures. a et b	64
Fig. 19 : Schématisation de la dispersion transversale selon a,b,c la géométrie de la fracturation.	65
Fig. 20 : A chaque noeud du réseau, il y a dilution des eaux tracées par des eaux non tracées.	66
Fig. 21 : Carte de situation de l'Ile Crémieu.	73
Fig. 22 : Coupe schématique du massif de l'Ile Crémieu.	75
Fig. 23 : Schéma des opérations de traçage à l'Ile Crémieu.	77
Fig. 24 : Ile Crémieu : Courbes de restitution de la fluorescéine aux deux émergences principales.	79
Fig. 25 : Ile Crémieu : Courbes de restitution de la rhodamine B aux deux émergences principales.	80
Fig. 26 : Courbes de la répartition des vitesses des traceurs en fonction de la distance.	82
Fig. 27 : Plan de situation.	85
Fig. 28 : Carte schématique de la fracturation par photographie aérienne.	86
Fig. 29 : Coupes géologiques schématiques.	87

	<u>Pages</u>
Fig. 30 : Courbes de concentration en fonction du temps obtenues au PC et au PV pour les trois traceurs.	89
Fig. 31 : Courbes de concentration en fonction du temps obtenues au PA et au PX pour les trois traceurs.	90
Fig. 32 : Carte schématique des circulations des traceurs.	92
Fig. 33 : Modèle de dispersion transversale en relation avec la fracturation observée sur le site (vue en plan).	96
Fig. 34 : La Roquebrussanne : plan de situation.	98
Fig. 34bis : La Roquebrussanne : coupes géologiques schématiques.	99
Fig. 35 : Carte géologique et schéma de circulation des deux traceurs.	100
Fig. 36 : La Roquebrussanne : restitution de la fluorescéine.	102
Fig. 37 : La Roquebrussanne : courbes de restitution de la Rhodamine B.	103
Fig. 38 : Le Clou : situation géographique.	108
Fig. 39 : Coupe géologique schématique du secteur du Clou.	110
Fig. 40 : Le Clou : carte géologique et schéma des circulations (en plan).	112
Fig. 41 : Le Clou : schéma des circulations (en coupe).	113
Fig. 42 : Le Clou : restitution de la fluorescéine.	116
Fig. 43 : Le Clou : restitution de la rhodamine.	117
Fig. 44 : Le Clou : restitution du bichromate de potassium.	117
Fig. 45 : Le Clou : répartition schématique des vitesses dans l'espace.	122

	<u>Pages</u>
Fig. 46 : La Norma : situation géographique.	128
Fig. 47 : La Norma : carte géologique et schéma des circulations	129
Fig. 48 : La Norma : courbes de restitution de la fluorescéine.	133
Fig. 49 : Allure de la courbe théorique C(t) pour un écoulement uniforme, monodimensionnel.	143
Fig. 50 : Exemple d'identification des paramètres de dispersion par interprétation graphique de traçages réalisés in situ (in J-P. Sauty, 1978).	145
Fig. 51 : Identification de Pe par la méthode de J-P. Sauty pour les colonnes et les sites du Suran et de St Michel des Portes.	145
Fig. 52 : Courbe de restitution en écoulement uniforme monodimensionnel : schéma explicatif des formules employées.	150
Fig. 53 : Valeurs de la dispersivité $\alpha_L$ en fonction de la distance parcourue, $\ell$ .	156

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Pages</u>
N° 1 : Taux de restitution (exprimés en %) pour le lithium et les différents traceurs fluorescents après migration à travers une colonne constituée de 100 % de CaCO <sub>3</sub> .	13
N° 2 : Taux de restitution (exprimés en %) après migration à travers une colonne de 90 % de CaCO <sub>3</sub> et 10 % de SiO <sub>2</sub> .	14
N° 3 : Taux de restitution (exprimés en %) après migration à travers une colonne de 97 % de CaCO <sub>3</sub> et 3 % d'argile verte.	15
N° 4 : Taux de restitution (exprimés en %) après migration à travers une colonne de 95 % de CaCO <sub>3</sub> et 5 % acide humique.	15
N° 5 : Les différents temps d'arrivée caractéristiques ; colonne de 100 % de CaCO <sub>3</sub> pur.	17
N° 6 : Les différents temps d'arrivée caractéristiques ; colonne de 90 % de CaCO <sub>3</sub> et 10 % de silice.	20
N° 7 : Les différents temps d'arrivée caractéristiques ; colonne de 97 % de CaCO <sub>3</sub> et 3 % d'argile verte.	22
N° 8 : Les différents temps d'arrivée caractéristiques ; colonne de 95 % de CaCO <sub>3</sub> et 5 % d'acide humique.	24
N° 9 : Les intensités de fluorescence résiduelle après contact avec les différents composants du sol.	28
N° 10 : Les temps d'arrivée, les vitesses et les taux de restitution pour les différents traceurs sur le site du Suran.	39

	<u>Pages</u>
N° 11 : Tableau des opérations sur le site de St Michel des Portes.	43
N° 12 : Les résultats des essais de St Michel des Portes.	45
N° 13 : Résultats du traçage de l'Ile Crémieu.	78
N° 14 : Valeurs des différentes vitesses d'arrivée et de leurs rapports pour les trois traceurs aux points d'observation.	94
N° 15 : Les différentes vitesses d'arrivée des deux traceurs.	104
N° 16 : Tableau de correspondance des différents points de prélèvement sur le site du Clou.	115
N° 17 : Les vitesses observées pour la fluorescéine.	118
N° 18 : Vitesses des premières arrivées de bichromate.	123
N° 19 : Les dispersivités longitudinales $\alpha_L$ et les nombres de Péclet déterminés pour les différentes colonnes, d'une part par la méthode personnelle numérique et d'autre part par la méthode graphique de J-P. Sauty.	146
N° 20 : Les dispersivités et les nombres de Péclet déterminés sur les sites du Suran et de St-Michel des Portes, d'une part par la méthode personnelle numérique, d'autre part par la méthode graphique de J-P. Sauty.	148
N° 21 : Les fourchettes de valeurs de $\alpha_L$ et de $P_e$ pour les trois sites en milieu fissuré calcaire.	155
N° 22 : Le site du Clou : les différentes vitesses d'arrivée de la fluorescéine et les valeurs des dispersivités correspondantes.	161

AUTORISATION DE SOUTENANCE

---

DOCTORAT 3ème CYCLE, DOCTORAT-INGENIEUR, DOCTORAT USMG

---

Vu les dispositions de l'arrêté du 16 avril 1974,  
Vu les dispositions de l'arrêté du 5 juillet 1984,

Vu les rapports de M. J. Rochat.....

et M. Ph. Olive.....

M. lle LAURE SOMMERIA..... est autorisée  
à présenter une thèse en vue de l'obtention du grade de DOCTEUR de.....  
l'Université Scientifique et médicale de Grenoble.....

Grenoble, le .....

Le Président de l'Université Scientifique  
et Médicale

M. TANCHE

THESE U.S.M.G.  
Mention : Géologie appliquée

Titre de l'ouvrage :

**COMPOTEMENT DES TRACEURS FLUORESCENTS  
ET PHÉNOMÈNES DE DISPERSION**  
application à l'étude d'aquifères fissurés

Nom de l'auteur : Laure SOMMERIA

Établissement : Université Scientifique et Médicale de Grenoble

11 JUIN 1986

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

**RÉSUMÉ**

Les traceurs fluorescents présentent tous un caractère anionique ou cationique et sont donc sensibles aux phénomènes d'adsorption et de désorption. Le comportement des plus courants d'entre eux vis-à-vis des principaux constituants du sol ( $\text{CaCO}_3$ , silice, argile, acide humique) a été étudié sur colonnes de filtration, le lithium servant d'étalon interne.

Ces mêmes traceurs ont été testés sur des portions d'aquifères de dimensions restreintes. Les résultats ont montré que leur restitution dépend plus des conditions hydrodynamiques que de leur nature elle-même.

Des essais « in situ », réalisés sur des aquifères fissurés, ont prouvé qu'il était possible, à partir de la forme des courbes de concentration en fonction du temps, de distinguer les différents modes de circulation des eaux souterraines et de calculer la dispersivité même dans les cas où le milieu n'est ni homogène, ni isotrope.

La combinaison de cette dispersivité avec le rapport de la vitesse maximale sur la vitesse moyenne, permet de séparer les circulations en chenaux des circulations en milieu fissuré.

**MOTS-CLÉS**

Hydrogéologie ; Traçage ; Traceur fluorescent ; Dispersion ; Aquifère ; Milieu fissuré.