

UNIVERSITE DE L'ETAT A LIEGE - FACULTE DES SCIENCES

LABORATOIRES DE GEOLOGIE DE L'INGENIEUR, D'HYDROGEOLOGIE  
ET DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE

# Hydrogéologie d'un aquifère karstique dans les calcaires carbonifères (Néblon-Anthisnes, Belgique)

## Apport des traçages à la connaissance des milieux fissurés et karstiques

par Ph. MEUS



Jury : Pr J. Thorez (président), Pr A. Monjoie (promoteur), Pr N. Crampon, C. Ek, A. Dassargues, Pr W. Käss, Pr A. Mangin, Pr F. Zwahlen

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade légal de Docteur en Sciences

Mars 1993



UNIVERSITE DE L'ETAT A LIEGE - FACULTE DES SCIENCES

LABORATOIRES DE GEOLOGIE DE L'INGENIEUR, D'HYDROGEOLOGIE  
ET DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE

# **Hydrogéologie d'un aquifère karstique dans les calcaires carbonifères (Néblon-Anthisnes, Belgique)**

## **Apport des traçages à la connaissance des milieux fissurés et karstiques**

par Ph. MEUS

*Photographie de couverture : le lac de la grotte de "Fontaine de Rivière", Hamoir, Belgique*



## Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier les institutions et sociétés suivantes pour le soutien financier indispensable qu'elles ont apporté au cours de ce travail :*

*- le Fonds National de la Recherche Scientifique (F.N.R.S.) qui a financé ces recherches durant quatre années en m'octroyant deux mandats d'aspirant;*

*- la société SPADEL grâce à qui j'ai bénéficié d'une cinquième année sous la forme du "Grant F.N.R.S. - SPADEL";*

*- le Ministère de la Région Wallonne qui a financé les deux projets d'étude sur les bassins du Néblon et d'Anthisnes;*

*- les Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique de l'Université de Liège (L.G.I.H.) qui m'ont accueilli durant toute la période de ces recherches.*

*Au terme de cette thèse, c'est également un réel plaisir pour moi de témoigner ma reconnaissance envers toutes les personnes qui l'ont rendue possible, quelle qu'en soit la manière :*

*- Mr le Professeur A. MONJOIE, directeur des L.G.I.H., a très spontanément accepté de diriger mes recherches. Il a su trouver les moyens qui m'ont permis d'étudier le comportement des aquifères karstiques, un sujet qui lui était cher dès avant mon entrée dans ses laboratoires en 1986. Je lui suis particulièrement reconnaissant pour sa compréhension et les conseils prodigués tout au long de cette thèse;*

*- Mr le Professeur J. THOREZ, directeur du Laboratoire de Minéralogie des Argiles, a accepté de présider le jury. Je lui exprime ici toute ma gratitude;*

*- Mr le Professeur F. ZWALHEN, directeur du Centre d'Hydrogéologie de l'Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel, a très sympathiquement accepté de faire partie de mon jury et m'a ouvert d'autres horizons, en favorisant les échanges entre nos deux instituts. Je n'oublie pas non plus que c'est lui, ainsi que les Professeurs A. BURGER, I. Müller et L. KIRALY qui m'ont formé en tant qu'hydrogéologue du karst et je leur en suis très reconnaissant;*

*- Mr le Professeur N. CRAMPON de l'Université de Lille a également accepté de faire partie du jury. Je l'en remercie vivement;*



- Mr le Professeur W. KÄSS du Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (Freiburg) est sans doute la personne à qui je dois le plus, car il a partagé avec moi son extraordinaire expérience sur les traceurs et m'a surtout apporté, grâce à ses analyses très pertinentes, la confiance indispensable dans les résultats des traçages. Je tiens tout particulièrement à le remercier pour sa disponibilité et ses conseils judicieux;

- Mr le Professeur A. MANGIN, directeur-adjoint du Laboratoire Souterrain du C.N.R.S. à Moulis, ne m'a pas laissé non plus perdre de vue quelles machines "physiques" sont les aquifères karstiques. Je le remercie pour m'avoir fait profiter de ses connaissances sur la structure et le fonctionnement du karst, pour l'intérêt porté à mes travaux ainsi que pour le traitement des données par analyse corrélatrice et spectrale;

- Mr C. EK, aux Laboratoires de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire, a non seulement été un ami mais également un excellent collègue dont l'expérience du karst m'a aussi été bénéfique. Je lui suis reconnaissant de m'avoir encouragé, d'avoir aussi participé aux corrections et d'avoir accepté de faire partie du jury;

- Mr J.L. BERGER de l'ISSEP a participé avec moi à l'étude du bassin d'Anthisnes. Plusieurs des résultats exposés ici sont le fruit d'une excellente entraide entre les deux géologues. Je lui dois également l'apprentissage du Macintosh qui me fut d'un grand secours tout au long de ce travail;

- MM P. BIVER, A. DASSARGUES et V. HALLET ont été pour moi un soutien on ne peut plus motivant durant la seconde partie du travail et la rédaction. Leurs connaissances sur les phénomènes d'écoulements et de transport dans les aquifères m'ont grandement aidé. Avec Pierre, nous avons partagé quelques moments-clés dans l'acquisition des données sur le terrain (plusieurs des résultats présentés ici concernant les traçages dans les craies et les sables sont le fruit de notre entraide) et dans la rédaction de nos thèses respectives. Ces trois personnes ont eu l'amabilité de participer aux corrections du texte, sans doute la tâche la plus ingrate de toutes. Alain a bien voulu faire partie du jury. Je les remercie tous les trois très sincèrement;

- MM BONTEMPS, BAS et DEFOSSE de l'Institut Henrijean avec qui ce fut un réel plaisir de collaborer;

- deux sociétés de distribution d'eaux ont largement contribué à la réalisation de ce travail en me permettant, entre autres, l'étude de leurs captages : la Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux (C.I.L.E.) et la Société Wallonne des Distributions d'Eaux (S.W.D.E.). Je remercie en particulier MM HODIAUMONT (C.I.L.E.) et BIRON (S.W.D.E.) pour leur aimable collaboration;

- Mr P. DEWIL de la Direction Générale des Voies Hydrauliques (Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports) a eu l'amabilité de me transmettre des données pluviométriques ainsi que des données limnimétriques, ce dont je lui suis reconnaissant;

- la Commune de Hannut nous a aimablement laissés accéder à la station d'épuration de Bertrée où nous avons effectué plusieurs traçages;

*Je tiens également à remercier toutes les personnes qui, sur le terrain, ou au laboratoire, ont été d'une grande efficacité, car leur dévouement est à la base du succès du travail : Mr L. FUNCKEN pour ses leçons de débrouillardise et sa patience, Mr P. GHYSEL qui m'a aiguillé sur le bassin du Néblon, MM A. LOX et J.M. BRAGARD pour leurs remarques et corrections, MM P. FLAMENT et Ph. DOYEN, qui ont participé à de multiples campagnes sur le terrain, MM O. VALENTINI et B. BADADA pour leur collaboration à la mise en oeuvre et à l'interprétation des traçages de Grand Hallet et de Jandrain, Melle N. GARCET pour sa collaboration à la mise en oeuvre et à l'interprétation des traçages de Crisnée et de Bertrée, Mme M.C. HALLEUX et Mr J.M. SPEETJENS pour les nombreuses analyses et leur collaboration efficace, les secrétaires des Laboratoires Mmes BAUDUIN, KAYE et KOCH, MM THONON (C.I.L.E.) et DENIS pour les relevés piézométriques et pluviométriques, les dessinateurs MM A. LAUWERS, R. THIRY et P. DOCQUIER, Mr M. CRUTZEN pour la prise en charge du traçage de Walhorn, Mr P. CASTERS (et famille) pour le traçage de Xhoris, MM M. DOYEN, J.C. LONDON et Mme F. ESSER pour les traçages à Anthisnes et à bien d'autres endroits peu accessibles, MM A. DEBLOND et J.M. MONVILLE (et famille) pour l'aide au cours des traçages à La Reid, tout le personnel de la grotte de Remouchamps pour leur accueil, Mr Y. DUBOIS pour le traçage à Remouchamps, MM Ph. JACQUES et I. COCINAS pour leurs conseils, Mr V. LEJEUNE pour son aide sur le terrain, les fermiers de la région de Ouffet, Mr L. VANDEVENNE du Cébedeau pour la mise à disposition du fluorimètre, la Maison de la Spéléologie pour l'aide à l'impression et, car j'en oublie, tous les amis des L.G.I.H., ou de l'extérieur, qui ont, ou auraient seulement voulu, m'aider.*

*Mille excuses à tous ceux à qui je n'ai souvent pas répondu sous prétexte de la thèse.*

*Enfin, un merci inqualifiable à tous mes proches pour leur soutien moral et leur patience infinie.*

*Cette thèse est dédiée à des amis qui en voulant assouvir leur soif de découverte sont disparus bien trop tôt : les deux Philippe, Tom et Sophie.*





## Résumé

Cette thèse est avant tout consacrée à l'étude des circulations karstiques dans les calcaires carbonifères du Sud de la Belgique. Son objectif est double : d'une part, approfondir la connaissance de l'aquifère à partir de l'étude d'une région limitée située dans le Condroz à l'extrémité Est du synclinorium de Dinant (bassins d'Anthisnes et du Néblon), d'autre part mettre au point des méthodes de mise en oeuvre et d'interprétation des traçages permettant de caractériser le comportement de l'aquifère lié à sa "double perméabilité". Dans ce but, plusieurs aquifères fissurés ou karstiques sont comparés.

L'introduction générale présente une synthèse des conceptions actuellement utilisées en hydrogéologie karstique et définit le calcaire carbonifère en tant qu'aquifère (intérêt économique, particularités du fonctionnement) dans le contexte plus général des aquifères carbonatés du Sud de la Belgique.

La première partie est consacrée à l'étude de la structure (approche structurale) et du fonctionnement (approche systémique) de deux systèmes karstiques drainant la même nappe dans les calcaires du Tournaisien et du Viséen : le bassin d'Anthisnes, dont l'exutoire est la résurgence de Comblain-au-Pont, et le bassin du Néblon drainé par les sources du Néblon. Les structures de ces deux systèmes sont comparées à l'aide de diverses méthodes géophysiques (électriques, électromagnétiques, diagraphiques) et à partir des observations en surface (fissuration, linéaments). Les différences de comportement sont liées au développement de la karstification. Elles apparaissent de manière très nette en considérant les réponses naturelles (hydrodynamique, hydrogéochimie) et provoquées (traçages).

Dans la seconde partie, une série de tests en écoulement naturel et en écoulement radial convergent permettent d'étudier les propriétés de transport des traceurs au sein de différents aquifères fissurés et karstiques et de dégager des tendances liées à la structure du milieu. Trois types d'aquifère sont envisagés : les calcaires dévoniens et carbonifères (aquifères fissurés et karstifiés), les craies du Crétacé (aquifère principalement fissuré) et les tuffeaux du Landénien (aquifère principalement à porosité d'interstice). Un examen critique des lois d'écoulement et de transport utilisées, ainsi que des différents types de traçage et types de traceur, est effectué au préalable. Plusieurs solutions analytiques sont envisagées pour déterminer les paramètres hydrodispersifs des aquifères.

Les dispersivités longitudinales des calcaires sont comprises entre 10 et 100 m, celles des craies entre 2 et 14 m et celles des tuffeaux entre 2 et 5 m.

**Mots-clés** : calcaire carbonifère, synclinorium de Dinant, méthodes géophysiques, hydrodynamique, analyse corrélatrice et spectrale, traçage artificiel, dispersion, milieu fissuré.

## Abstract

The actual scope of this research is to study the karstic groundwaters in the carboniferous limestones south of Belgium. The study deals with two different approaches, one in a local framework, the other thematic. On the one hand, two karstic systems are described in the synclinorium of Dinant in the Condroz region (Anthisnes and Neblon basins). On the other hand, a methodology of tracer tests, and their interpretation as well, are developed in order to understand groundwater flows related to the "dual permeability" of the aquifer. As a comparison, the tracer study is enlarged to other karstic and fissured aquifers.

The introduction deals with some general features about karst hydrogeology. The carboniferous limestones and their economic interest are presented in the regional framework of all the carbonated rocks in south Belgium.

The two karstic systems described in the first part belong to the same water table in the Tournaisian and Viséan beds. Their structure is studied by mean of geophysical prospecting (electric, electromagnetic, well logging) and fissuration measurements. The mechanisms of groundwater circulations are then studied by using indirect investigations such as hydrodynamical, hydrogeochemical or tracing investigations. These methods are applied to the main springs of each system : the spring of Comblain-au-Pont (Anthisnes basin) and the springs of the Neblon (Neblon basin). The behaviour of each system is related to its stage of karstification.

The second part deals with tracer tests in natural and radially convergent flow pattern. The aim is to distinguish among the features of the tracer curves those due particularly to the structure of the fissured network of the aquifer. Three different kinds of aquifer are studied : the devonian and carboniferous limestones (both fissured and karstic), the cretaceous chalks (mainly fissured), and the landenian "tuffaceous" sands (mainly porous). After describing the theory of groundwater flow and transport in fissured media, we justify the use of different tracers and tracing methods. Afterwards different mathematical models are used to calibrate the dispersion parameters.

The longitudinal dispersivities are ranging between 10 and 100 m in the limestones, between 2 and 14 m in the chalks and between 2 and 5 m in the landenian sands.

**Keywords** : carboniferous limestones, synclinorium of Dinant, geophysical methods, hydrodynamics, time series analysis, artificial tracing, dispersion, fissured aquifer.





## TABLE DES MATIERES

<b>Remerciements</b> .....	1
<b>Résumé</b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	5
<b>Table des matières</b> .....	6
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	11
1. Cadre de l'étude .....	11
2. Définition de l'aquifère karstique.....	13
3. Les formations karstifiables en Belgique.....	15
4. Les calcaires du Carbonifère en Belgique.....	18
5. Localisation des sites étudiés .....	19
<b>PREMIERE PARTIE :</b>	
<b>NAPPE KARSTIQUE DES BASSINS DU NEBLON ET D'ANTHISNES -</b>	
<b>COMBLAIN-AU-PONT</b> .....	21
1.1. Situation géographique et contexte géomorphologique .....	21
1.2. Caractéristiques lithologiques, géologiques et structurales .....	22
1.3. Formations aquifères, systèmes d'écoulement et phénomènes karstiques.....	26
1.3.1. Formations aquifères .....	26
1.3.2. Systèmes d'écoulement.....	27
1.3.3. Phénomènes karstiques.....	29
1.4. Structure du réservoir calcaire.....	30
1.5. Hydrodynamique et recharge de la nappe.....	43
1.5.1. Caractéristiques de l'écoulement .....	49
1.5.2. Bilans hydrologiques .....	54
1.5.3. Etude des hydrogrammes .....	57
1.5.3.1. Courbes de tarissement et évolution de la piézométrie.....	60
1.5.3.2. Courbes de décrue .....	65
1.5.3.3. Paramètres de la classification de Mangin.....	67
1.5.4. Débits classés.....	68
1.5.5. Analyses corrélatoires et spectrales .....	70
1.5.5.1. Buts et principes de la méthode.....	70
1.5.5.2. Application aux systèmes karstiques étudiés.....	73
1.5.6. Perméabilités en forage.....	81
1.5.7. Conclusions de l'étude hydrodynamique.....	83
1.6. Hydrogéochimie et qualité des eaux.....	86
1.6.1. Composition chimique des eaux.....	89
1.6.2. Variations de la conductivité aux émergences.....	93
1.6.3. Equilibres calco-carboniques .....	95
1.6.4. Dénudation karstique .....	99



1.7. Traçages dans les bassins du Néblon et d'Anthisnes .....	100
1.7.1. Introduction .....	100
1.7.2. Contexte hydrogéologique.....	101
1.7.3. Essais antérieurs.....	103
1.7.4. Traceurs utilisés.....	104
1.7.5. Conditions hydrométéorologiques.....	105
1.7.6. Mise en oeuvre des traçages.....	106
1.7.7. Résultats des traçages dans le Néblon.....	108
1.7.7.1. Traçages à partir des piézomètres.....	108
1.7.7.2. Traçages à la perte du Bois de Marsée .....	109
1.7.8. Résultats des traçages dans le synclinal d'Anthisnes.....	111
1.7.8.1. Traçages pertes - résurgence du Moulin .....	111
1.7.8.2. Traçages avec le piézomètre P14.....	115
1.7.8.2.1. Traçage en direction du P14.....	115
1.7.8.2.2. Traçage depuis le P14.....	116
1.7.9. Modélisation des essais de traçage.....	117
1.7.9.1. Introduction .....	117
1.7.9.2. Transport dans un drain karstique .....	118
1.7.9.3. Résultats des modélisations .....	121
1.7.10. Conclusions des traçages.....	126

## **SECONDE PARTIE :**

### **APPORT DES TRAÇAGES A LA CONNAISSANCE DES MILIEUX FISSURES ET KARSTIQUES .....**

2.1. Introduction.....	129
2.2. Circulation des eaux en milieu fissuré et karstique.....	130
2.3. Transport en milieu fissuré et karstique .....	136
2.3.1. Mécanismes et lois de transport.....	136
2.3.2. Interprétation des traçages .....	147
2.3.2.1. Paramètres des courbes de restitution .....	147
2.3.2.2. Solutions analytiques des équations de transport.....	152
2.3.2.3. Modèles numériques .....	157
2.3.2.4. Méthodes approchées de détermination des dispersivités.....	158
2.4. Mise en oeuvre des traçages artificiels.....	159
2.4.1. Choix du type de système-traçage .....	161
2.4.2. Choix des traceurs.....	166
2.5. Traçages dans les milieux fissurés et karstiques.....	176
2.5.1. Traçages dans les calcaires du Carbonifère.....	176
2.5.1.1. Traçages dans les bassins d'Anthisnes et du Néblon.....	176
2.5.1.2. Traçages sur le site de Spontin.....	176
2.5.1.2.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique.....	176
2.5.1.2.2. Mise en oeuvre des traçages.....	178
2.5.1.2.3. Résultats des traçages.....	180
2.5.1.3. Traçages sur le site de Fairoule .....	186

2.5.1.3.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	186
2.5.1.3.2. Mise en oeuvre des traçages .....	188
2.5.1.3.3. Résultats des traçages.....	189
2.5.1.4. Traçages sur le site de Mont-sur-Marchienne.....	191
2.5.1.4.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	191
2.5.1.4.2. Mise en oeuvre des traçages .....	193
2.5.1.4.3. Résultats des traçages.....	194
2.5.1.5. Traçages sur le site de Walhorn .....	196
2.5.1.5.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	196
2.5.1.5.2. Mise en oeuvre des traçages .....	198
2.5.1.5.3. Résultats des traçages.....	198
2.5.2. Traçages dans les calcaires du Dévonien .....	200
2.5.2.1. Traçages sur le site de La Reid .....	200
2.5.2.1.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	200
2.5.2.1.2. Mise en oeuvre des traçages .....	200
2.5.2.1.3. Résultats des traçages.....	202
2.5.2.2. Traçage sur le site de Xhoris.....	204
2.5.2.2.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	204
2.5.2.2.2. Mise en oeuvre du traçage.....	206
2.5.2.2.3. Résultats du traçage.....	206
2.5.2.3. Traçage sur le site de Remouchamps .....	208
2.5.2.3.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	208
2.5.2.3.2. Mise en oeuvre du traçage.....	208
2.5.2.3.3. Résultats du traçage.....	210
2.5.3. Traçages dans les craies du Crétacé.....	211
2.5.3.1. Traçage sur le site de Bertrée .....	211
2.5.3.1.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	211
2.5.3.1.2. Mise en oeuvre du traçage.....	213
2.5.3.1.3. Résultats du traçage.....	214
2.5.3.2. Traçages sur le site de Crisnée.....	217
2.5.3.2.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	217
2.5.3.2.2. Mise en oeuvre des traçages .....	220
2.5.3.2.3. Résultats des traçages.....	220
2.5.3.3. Traçages sur le site de Grand Hallet .....	224
2.5.3.3.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	224
2.5.3.3.2. Mise en oeuvre des traçages .....	226
2.5.3.3.3. Résultats des traçages.....	228
2.5.3.4. Traçage sur le site de Jandrain.....	230
2.5.3.4.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	230
2.5.3.4.2. Mise en oeuvre du traçage.....	232
2.5.3.4.3. Résultats du traçage.....	233
2.5.4. Traçages dans les sables du Landénien .....	235
2.5.4.1. Traçages sur le site de Bertrée.....	235
2.5.4.1.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique .....	235
2.5.4.1.2. Mise en oeuvre des traçages .....	236

2.5.4.1.3. Résultats des traçages .....	237
2.5.5. Distribution des temps de séjour .....	241
2.6. Comparaison des milieux à l'aide des paramètres hydrodispersifs.....	247
2.6.1. Les paramètres hydrodispersifs représentatifs de la structure du milieu fissuré ou poreux .....	247
2.6.2. Résultats des modélisations .....	250
2.6.3. Analyse comparative des paramètres hydrodispersifs.....	260
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>267</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>275</b>
<b>Rapports inédits.....</b>	<b>287</b>
<b>ANNEXE A.....</b>	<b>289</b>
A.1. Méthode géoélectrique-résistivité .....	289
A.2. Méthode électromagnétique.....	294
A.3. Méthode microgravimétrique.....	298
A.4. Méthode sismique .....	298
A.5. Diagraphies.....	299
A.5.1. Principe du Sonic.....	299
A.5.2. Principe du $\gamma$ -ray.....	300
A.5.3. Principe du $\gamma$ - $\gamma$ .....	300
A.5.4. Principe du Neutron.....	301
A.5.5. Principe des profils des paramètres physico-chimiques.....	301
<b>ANNEXE B.....</b>	<b>302</b>
<b>ANNEXE C.....</b>	<b>303</b>
<b>ANNEXE D.....</b>	<b>305</b>
<b>ANNEXE E.....</b>	<b>321</b>

# **INTRODUCTION GENERALE**







W. J. R.



## INTRODUCTION GENERALE

### 1. Cadre de l'étude

Les recherches dont nous présentons ici les résultats ont débuté en 1986, dans le cadre d'une étude hydrogéologique du bassin du Néblon effectuée à la demande du Ministère de la Région Wallonne. Le travail visait à replacer les sources captées par la CILE à Néblon-le-Moulin dans le contexte plus général du bassin des calcaires carbonifères (Tournaisien et Viséen) dont elles sont issues.

Dès le début de ce siècle, suite à la croissance des grandes villes belges, les ingénieurs se sont très rapidement tournés vers le calcaire carbonifère en raison de l'abondance et surtout de la qualité de ses eaux (captages du Néblon, de Modave et de Spontin). Très tôt, en effet, on s'est rendu compte que, contrairement aux calcaires dévonien, les calcaires carbonifères fournissaient une eau "élaborée", mieux à l'abri des contaminations bactériennes. Certains observateurs plus perspicaces (VAN DEN BROECK, MARTEL, RAHIR, 1910) ont cependant mis en garde les exploitants contre une confiance un peu excessive, en rappelant les particularités des roches carbonatées en tant que milieu très perméable et par conséquent très vulnérable. Ils font remarquer que, bien que l'exokarst, c'est-à-dire les manifestations en surface de la karstification, ne soit pas très développé dans les calcaires carbonifères, l'endokarst, ou développement de la karstification en profondeur, existe bel et bien, même si nous ne pouvons l'observer de façon directe. La variabilité des émergences en est la preuve la plus flagrante.

Ne bénéficiant ni des moyens d'observation, ni des connaissances physiques actuelles du milieu, les auteurs précédents auront toutefois trop tendance à considérer l'aquifère karstique, soit comme un milieu constitué exclusivement de chenaux ("rivières souterraines" dans les calcaires viséens), soit comme un milieu exclusivement "poreux" (Tournaisien "filtrant"). Ce n'est qu'avec l'apparition du concept de "double perméabilité" (ou "double porosité") que les hydrogéologues du karst vont prendre conscience du rôle capacitif fondamental joué par les microfissures et éventuellement par la matrice poreuse de la roche, rôle capacitif qui devient de moins en moins important au fur et à mesure que se densifie le réseau de drainage par les chenaux karstiques.

Ce dernier aspect des écoulements est maintenant d'actualité à cause des nombreux problèmes de contamination chimique à long terme consécutifs à l'entreposage ou au rejet de déchets en surface dans les régions calcaires. Notre travail s'inscrit dans cette tendance. Il a pour but principal d'étudier les relations entre la structure de l'aquifère karstique et son fonctionnement hydrogéologique (réponses naturelles et provoquées). Il comporte deux volets :

- l'étude régionale de l'aquifère des calcaires carbonifères dans les bassins du Néblon et d'Anthisnes;
- une étude thématique sur le transport des traceurs dans les milieux fissurés et/ou karstifiés.

Chronologiquement, le bassin versant du Néblon a d'abord fait l'objet d'une approche assez classique consistant à étudier la structure du réservoir par des méthodes géophysiques. Il nous fallait ensuite utiliser des méthodes qui mettraient en évidence les effets de la double perméabilité. Le thème des recherches a alors essentiellement porté sur le comportement hydrodynamique de l'aquifère.

En prolongement de l'étude du Néblon, une seconde étude, plus orientée vers les problèmes de pollution, a débuté en 1988, toujours pour le compte de la Région Wallonne. Elle concernait la même nappe, mais dans le bassin versant voisin, celui d'Anthisnes - Comblain-au-Pont. Vu son caractère karstique nettement plus marqué, ce bassin nous a permis de mieux comprendre les mécanismes d'échanges entre les réserves contenues dans les blocs peu perméables et les drains du système.

Les bassins du Néblon et d'Anthisnes ont pu ainsi être comparés entre eux, tant sur le plan de la structure de l'aquifère que sur celui du comportement hydrodynamique et hydrogéochimique.

Nous heurtant cependant à de grosses difficultés, dues au caractère monotone de ces aquifères face à la précision des méthodes utilisées, nous nous sommes alors tournés vers les traçages artificiels. En effet, les traceurs constituent non seulement un excellent moyen de déterminer les directions et les sens d'écoulement dans les systèmes karstiques, mais leur comportement apporte aussi des informations sur la structure des vides au sein de l'aquifère.

Peu d'expériences ayant été réalisées sur ce type particulier d'aquifère, il a fallu d'abord mettre au point une méthodologie - la mieux adaptée possible - en tenant compte d'une série de facteurs tels que la nature du traceur, la méthode de détection, la quantité à injecter, le lieu, la période et le type d'injection, les points à surveiller, le pas et la durée d'échantillonnage, les risques de contamination des captages etc...

Une série de tests ont d'abord été réalisés dans les bassins d'Anthisnes et du Néblon alors que parallèlement à ceux-ci allait débiter une étude comparative de différents traçages réalisés sur des sites belges : certains dans les calcaires carbonifères, d'autres dans divers milieux fissurés tels que les calcaires du Dévonien, les craies du Crétacé ou les tuffeaux du Landénien. Le but poursuivi étant de distinguer, parmi les facteurs influençant la restitution des traceurs, ceux liés à la nature même du milieu aquifère de ceux liés plutôt aux conditions expérimentales (type de traceur, type d'injection), une multitude de situations de traçage ont été expérimentées, faisant notamment intervenir des forages.

Les premiers traçages importants en dehors des bassins d'Anthisnes et du Néblon ont été effectués sur le site de Spontin, dans le cadre du projet F.N.R.S.-SPADEL intitulé : "Utilisation des traceurs artificiels et naturels pour la protection des eaux souterraines, en particulier les eaux minérales. Etude du comportement des traceurs par essais in situ et simulation du transfert des polluants". Ce projet s'inscrivait dans le cadre d'une étude des zones de protection des sources minérales Duchesse et Presbytère, représentant les deux principaux exutoires de l'aquifère du Tournaisien dans le synclinal de Durnal.

Par la suite les expériences se sont multipliées en milieu calcaire (Fairoule, Mont-sur-Marchienne, Walhorn...), puis, fin 1991, nous avons participé à un projet de recherche européen (COST 65) dont le sujet était les "aspects hydrogéologiques de la protection des eaux souterraines dans les zones karstiques". Dans le cadre de ce projet, de nouveaux traçages ont été entrepris, non plus seulement sur des sites karstiques, mais également dans des milieux fissurés hétérogènes (craies du Crétacé à Bertrée, Crisnée, Grand Hallet et Jandrain, tuffeaux du Landénien à Bertrée).

Une partie importante de l'interprétation des traçages a été consacrée à la modélisation des courbes de restitution et à la comparaison des propriétés de dispersion des différents milieux (fissurés et karstiques).

En résumé, partant d'une monographie sur la nappe karstique des bassins du Néblon et d'Anthisnes (première partie), nous avons pu approfondir la connaissance des écoulements dans ces bassins par des méthodes de traçage, pour être amenés ensuite à rechercher l'influence des différents facteurs sur le transport des traceurs grâce à la comparaison avec des tests réalisés dans d'autres bassins et dans d'autres contextes hydrogéologiques (seconde partie). Au total plus de 50 injections de traceurs auront été réalisées in situ.

## 2. Définition de l'aquifère karstique

A l'origine, le mot "karst" désignait une région du Nord de la Slovénie dont le modelé très caractéristique était dû principalement aux actions de la dissolution des roches calcaires qui constituent le sous-sol de la région. Par extension, on utilise maintenant le terme pour toute région ou tout paysage qui présente des caractéristiques morphologiques similaires.

Il s'est avéré que ces phénomènes n'étaient pas limités aux roches carbonatées (calcaires et dolomies) mais pouvaient aussi se rencontrer dans toute roche contenant une proportion suffisante d'éléments solubles, entre autres les évaporites.

JENNINGS (1987) définit le karst comme "tout terrain affecté d'une morphologie et d'un drainage caractéristiques d'une plus grande solubilité de la roche vis-à-vis des eaux naturelles". Cette définition du karst est donc avant tout géomorphologique mais elle reste liée au phénomène chimique qu'est la dissolution. Cette dernière, en ayant pour effet d'élargir les fissures, permet un écoulement plus important de l'eau qui se met alors à éroder la roche. Les deux actions, dissolution (aussi appelée corrosion) et érosion sont regroupées tout naturellement sous le terme de "karstification".

Certaines morphologies typiques du karst (canyons, cavités, dolines...) ont également été observées dans des roches non solubles où elles résultent d'une simple convergence de forme. Le terme de pseudokarst a été réservé pour ce type de terrain afin de le distinguer des vrais karsts dus à la dissolution.

Les karstologues se sont dans un premier temps intéressés aux manifestations de la karstification en surface (exokarst) parce que le sous-sol était inaccessible.



Avec le développement de la spéléologie, on a commencé à accorder plus d'importance aux circulations des eaux en profondeur et aux morphologies souterraines qui en résultent (endokarst), mais la vision du milieu est toutefois restée incomplète car limitée aux seuls vides pénétrables, c'est-à-dire les conduits principaux. Sous l'impulsion des grands explorateurs comme MARTEL (VAN DEN BROECK, MARTEL, RAHIR, 1910), la théorie des "rivières souterraines" a permis d'expliquer un grand nombre de phénomènes hydrologiques du karst. Les besoins croissants en eau de bonne qualité et l'affinement des méthodes hydrogéologiques ont cependant fait prendre conscience de l'importance des réserves contenues dans les fissures impénétrables de la roche. Selon MANGIN et BAKALOWICZ (1989), la porosité des vides karstiques (p.v.k.) peut atteindre 15 % alors que l'ensemble des réseaux spéléologiques accessibles à l'Homme, même en extrapolant, totalise au mieux quelques pour mille.

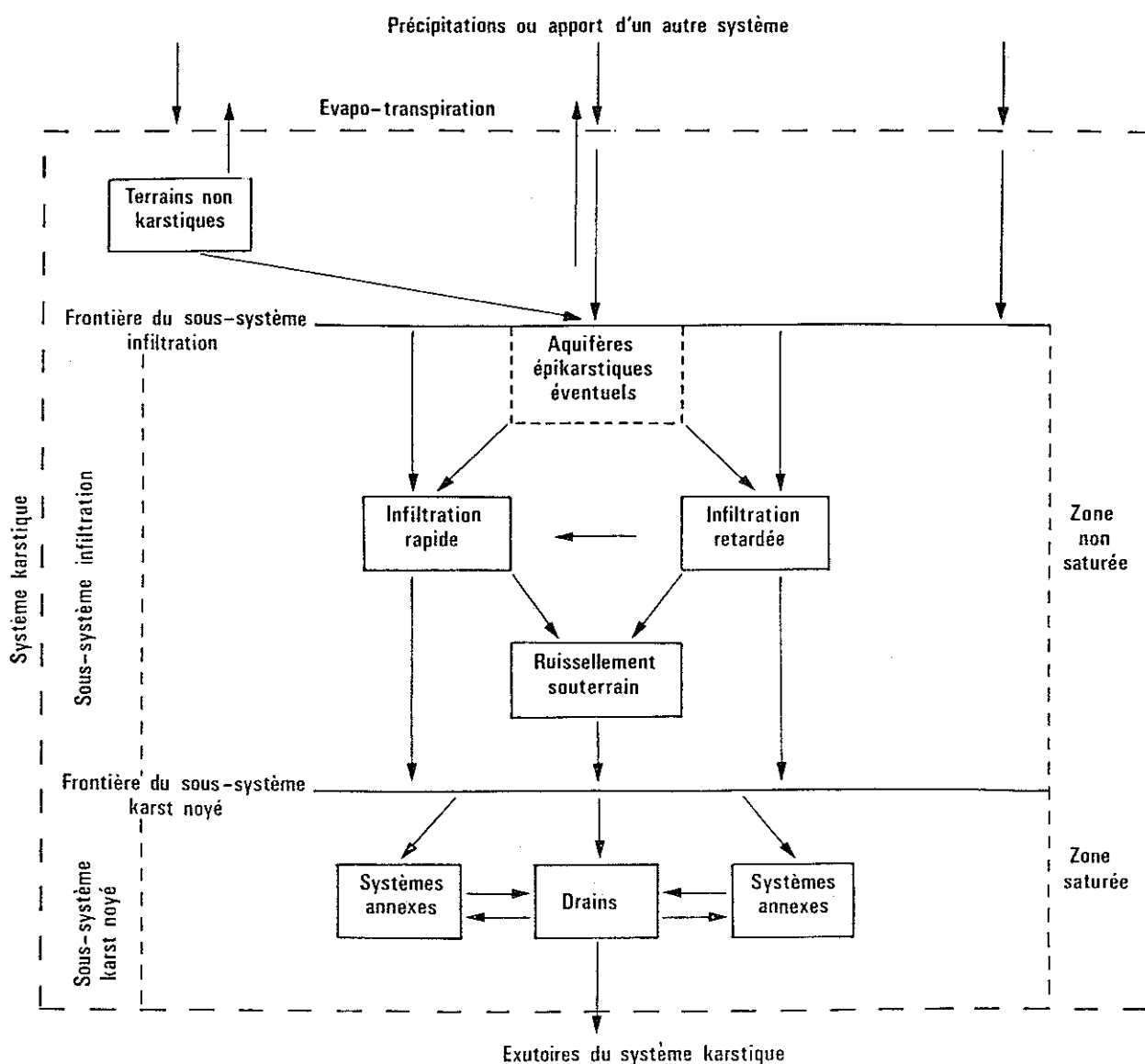


Fig. 1 : Schématisation d'un système karstique (d'après MANGIN, 1975).

Une approche plus "hydrogéologique" du karst est alors née et est apparu le terme plus approprié d'"aquifère karstique" pour désigner le milieu calcaire et l'eau qu'il contient. Divers auteurs se sont attachés à définir les particularités des circulations dans les aquifères karstiques, certains en recherchant plus la structure du karst (KIRALY, 1978), d'autres en étudiant plus les conséquences de cette structure sur le fonctionnement hydrodynamique ou chimique de l'aquifère (MANGIN, 1975, BAKALOWICZ, 1979). KIRALY (1978) a ainsi introduit la notion "d'unité hydrogéologique" en basant son raisonnement sur l'organisation spatiale des systèmes d'écoulement dans le karst tandis que MANGIN (1975, 1982) a appliqué une méthode globale, l'analyse systémique, pour tenir compte de la structure, du fonctionnement et de l'évolution de l'aquifère.

Ce dernier auteur a défini, sur le plan fonctionnel, le système karstique tel qu'il est représenté sur la fig. 1, comme "l'impluvium au niveau duquel les écoulements de type karstique constituent une unité de drainage". Cela suppose que le système soit autonome, cohérent et permanent. A l'heure actuelle, ce schéma permet d'expliquer le fonctionnement de bon nombre des karsts étudiés. Le système karstique est constitué de deux sous-systèmes, le sous-système infiltration et le sous-système karst noyé. Si l'on connaît relativement bien les entrées du sous-système infiltration, par contre on ne connaît pas celles du sous-système karst noyé, qui sont en fait les sorties du premier. La complexité des phénomènes d'infiltration est actuellement ce qui constitue l'obstacle majeur dans l'analyse systémique du karst.

Comparé aux autres aquifères, le karst a ceci de particulier qu'il est le résultat de processus d'auto-régulation entre les écoulements et la structure du système (KIRALY, 1978). Les écoulements, en influençant la karstification, modifient le champ des perméabilités, lequel, à son tour, modifie les écoulements. Ainsi de suite, la boucle recommence jusqu'à ce qu'un équilibre éventuel s'instaure <sup>1</sup>.

### 3. Les formations karstifiables en Belgique

On a l'habitude de distinguer les karsts en fonction de leur degré de développement (MONJOIE, 1984). Ainsi le karst peut être au stade de jeunesse lorsque la karstification n'a pas encore, ou très peu, élargi les fractures de la roche. Il atteint le stade de maturité lorsque des conduits karstiques suffisamment continus drainent efficacement les réserves de l'aquifère et enfin le stade de sénilité lorsque l'érosion souterraine rejoint l'érosion de surface, réduisant le temps de séjour moyen de l'eau dans l'aquifère. Dans le premier cas, les réserves peuvent être importantes mais pas facilement écoulables (milieu fissuré), dans le deuxième, les réserves sont aisément accessibles grâce au drainage naturel qui s'effectue le long des conduits karstiques et dans le troisième, les réserves sont trop proches de la surface, donc trop rapidement drainées, ou en tout cas trop vulnérables, pour constituer une ressource intéressante.

---

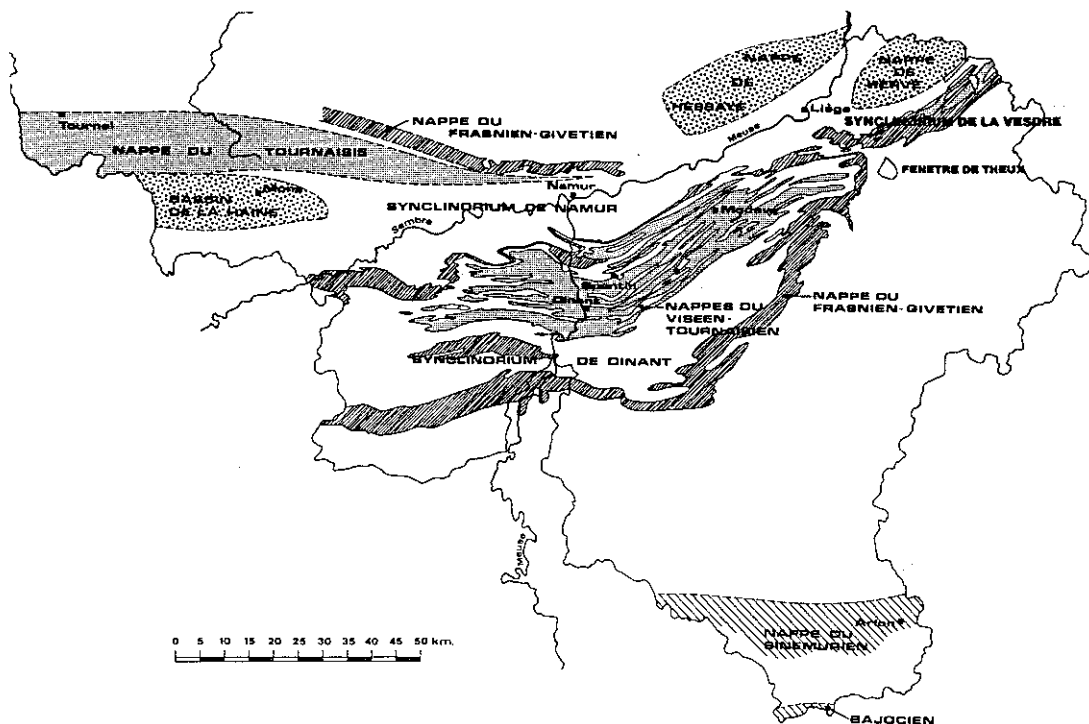
<sup>1</sup>Cet équilibre dépend des changements imposés au système par l'évolution de son environnement.

En Belgique, plusieurs formations carbonatées aquifères sont plus ou moins affectées par des phénomènes liés à la karstification (EK, 1984, MONJOIE, 1984, CCE, 1982) :

- les calcaires du Dévonien moyen et supérieur (Givétien et Frasnien), généralement très karstifiés;
- les calcaires et dolomies du Dinantien (Carbonifère inférieur : Tournaisien et Viséen), moyennement karstifiés;
- les calcaires et grès calcareux du Jurassique inférieur et moyen (Sinémurien et Bajocien), peu karstifiés.
- les craies du Crétacé supérieur (Campanien et Maestrichtien), peu karstifiées;

Dans le synclinorium de Dinant, les aquifères paléozoïques (Dévonien et Carbonifère), fortement plissés et faillés, forment généralement des karsts "barrés". La karstification y a atteint le stade de maturité.

Dans le synclinorium de Namur par contre, les aquifères paléozoïques, surtout le Carbonifère à l'Ouest de la Belgique (Tournaisien et Hainaut), sont plus profonds et moins morcelés. Le karst y est dans l'ensemble moins structuré malgré des effondrements karstiques locaux spectaculaires (puits naturels du Tournaisis).



**Fig. 2** : Principales nappes aquifères dans les roches carbonatées du Sud de la Belgique (modifié d'après MONJOIE, 1984).

Les aquifères mésozoïques (Jurassique et Crétacé) ont une structure monoclinale. Ils constituent un milieu fissuré caractéristique du stade de jeunesse de la karstification. Le Crétacé est localement recouvert par d'importants dépôts meubles du Tertiaire et du Quaternaire.

La fig. 2 (d'après MONJOIE, 1984) montre la répartition des aquifères là où ils forment des nappes relativement étendues dans la partie Sud du pays.

Les calcaires du Dévonien (Givétien et Frasnien) se retrouvent dans le synclinorium de Namur et dans celui de Dinant, sur le bord Sud duquel ils sont le plus karstifiés. On les retrouve également à l'Est de la Belgique dans le synclinorium de la Vesdre et dans la fenêtre de Theux. Ils sont en général moins purs que ceux du Dinantien. Les potentialités aquifères sont assez restreintes en raison de la grande vulnérabilité et du drainage rapide des réserves.

Les calcaires du Carbonifère (Tournaisien et Viséen) occupent le coeur de toute une série de bassins synclinaux à l'intérieur du synclinorium de Dinant ainsi que, dans une moindre mesure, dans le synclinorium de la Vesdre et dans la fenêtre de Theux. Ils contiennent une nappe beaucoup plus continue dans le synclinorium de Namur (Tournaisis et Hainaut), sous les terrains de couverture du Secondaire et du Tertiaire.

Le Crétacé est aquifère dans le bassin de la Haine (bassin de Mons), en Hesbaye et sur le plateau de Herve.

Le Jurassique n'est présent qu'au Sud du pays, dans la province du Luxembourg.

Pour montrer l'importance des ressources en eau des différentes nappes dans les roches carbonatées, le tableau suivant (d'après CCE, 1982) reprend, par aquifère, les pourcentages captés rapportés à la production totale d'eau souterraine en Belgique (état en 1978) :

AQUIFERE	%
Calcaires du Dévonien dans le bassin de Dinant	1,1
Calcaires du Carbonifère dans le bassin de Dinant	11,4
Calcaires du Carbonifère dans le bassin de Namur (y compris le Tournaisis)	18,6
Crétacé du bassin de Mons	9,7
Crétacé de Hesbaye	5,0
Jurassique	1,2

Près de 50 % de la production d'eau provient des aquifères carbonatés et parmi ceux-ci, 64 % proviennent des calcaires carbonifères.

Le bord Nord du bassin de Namur constitue un gisement de première importance qui, par endroits, a été surexploité.

#### 4. Les calcaires du Carbonifère en Belgique

Nous venons de voir que les aquifères du Carbonifère (Tournaisien et Viséen) se présentaient sous forme de deux types de gisements :

- des karsts barrés, à nappes libres, dans les petits synclinaux du synclinorium de Dinant et ses prolongements (synclinorium de la Vesdre);
- des aquifères continus, à nappe généralement captive, dans les calcaires faiblement inclinés, sur le bord Nord du synclinorium de Namur, au Nord du sillon Sambre et Meuse (gisement le plus important de Belgique).

Dans le premier cas, les exutoires sont localisés, les réserves écoulables importantes et on peut délimiter assez aisément des systèmes ou des bassins karstiques. La structure en synclinal des séries calcaires avec ennoyages convergents vers des axes transverses (Meuse, Néblon, Hoyoux, Bocq, Ourthe) assure un drainage préférentiel permettant, par des ouvrages de relativement faible extension, de solliciter des volumes importants de réservoirs (MONJOIE, 1984). Les prélèvements les plus importants sont de l'ordre de 40 à 60000 m<sup>3</sup>/j à Modave (AGIE, 1967), de 25 à 30000 m<sup>3</sup>/j à Spontin ainsi que dans le Néblon.

Dans le second cas, il s'agit de nappes beaucoup plus étendues, avec peu de réserves écoulables mais des réserves permanentes considérables. La principale nappe, celle du Tournaisien (CCE, 1982), subit une surexploitation intense ayant pour conséquence :

- la baisse continue des niveaux piézométriques et le dénoyage progressif de la nappe captive;
- l'apparition d'effondrements karstiques (puits naturels), provoquant des infiltrations d'eaux de surface, responsables de graves pollutions de la nappe (DERYCKE, 1982, LAURENT, 1979).

Les prélèvements dans le Carbonifère du bord Nord du synclinorium de Namur représentaient en 1978, rien que pour le Tournaisien, environ 144000 m<sup>3</sup>/j. Une meilleure répartition de l'exploitation de l'aquifère vers l'Est devrait réduire la surexploitation de la nappe car on estime (CEE, 1982) que de grands volumes d'eau sont encore disponibles globalement. Les captages consistent pour l'essentiel en des puits et accessoirement en des sources, des anciennes carrières ou des anciennes mines (Vedrin).

Signalons enfin que, dans le Hainaut (DELMER, 1979 et 1982), un karst aquifère dans de l'anhydrite appartenant au Viséen a été découvert par un forage géothermique (forage de St Ghislain) vers 2000 mètres de profondeur. La nappe serait alimentée par l'impluvium des calcaires carbonifères affleurant au Nord.

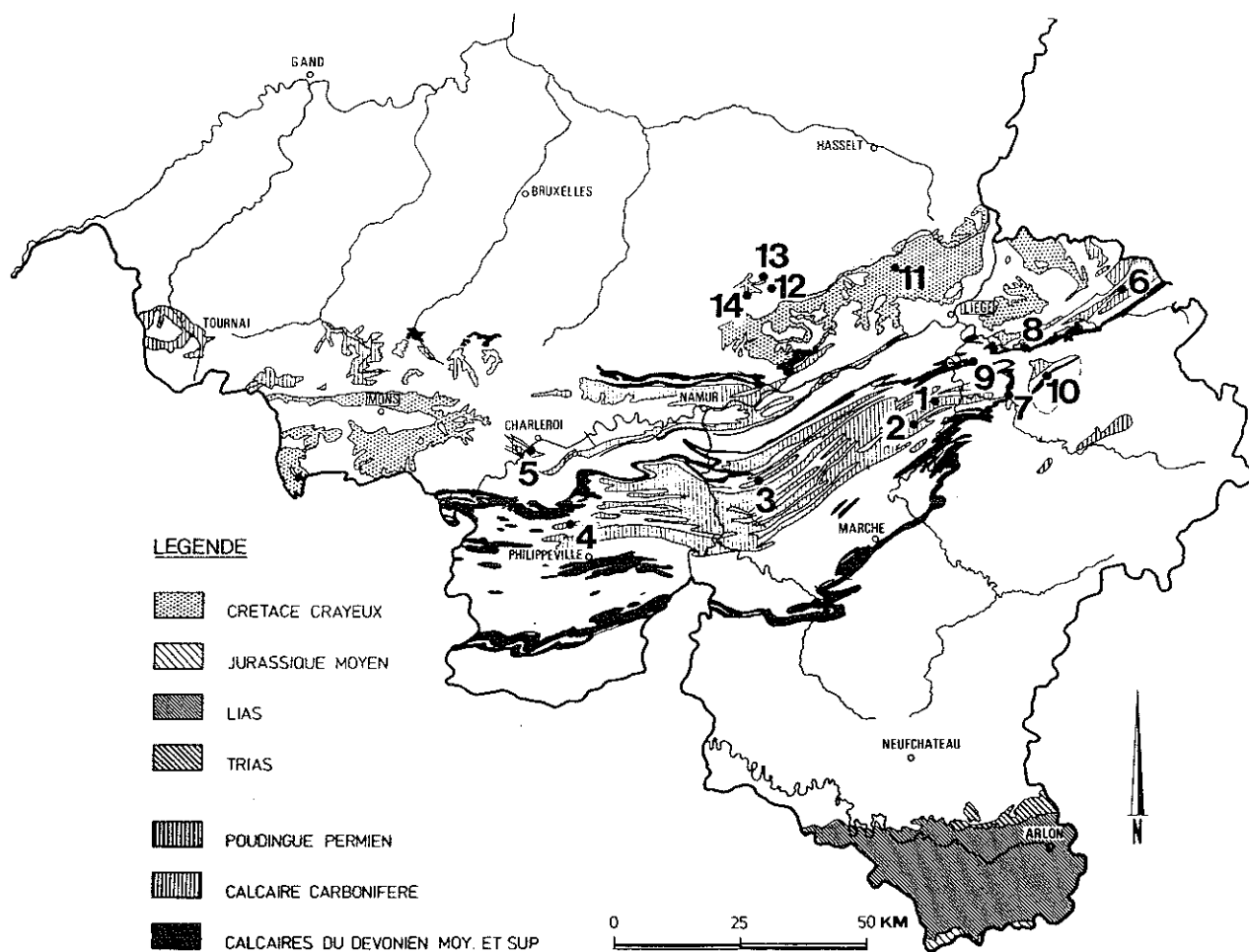
Seuls les karsts en forme de petits synclinaux au Sud du sillon Sambre et Meuse permettent des études globales à une échelle raisonnable (quelques centaines de mètres à quelques kilomètres), les limites des systèmes étant généralement bien définies.



## 5. Localisation des sites étudiés

La localisation des sites étudiés est reprise à la fig. 3.

La première partie du travail est consacrée à l'étude de la structure et du fonctionnement de deux systèmes karstiques appartenant à la même nappe dans les calcaires du Carbonifère à l'extrémité Est du synclinorium de Dinant. Le bassin d'Anthignes (point 1) est drainé en direction de l'Ourthe tandis que le bassin du Néblon (point 2) a, pour niveau de base, le Néblon, qui est lui-même un affluent de l'Ourthe. Dans le bassin du Néblon, les exutoires sont des sources captées par les galeries de la CILE à Néblon-le-Moulin. Dans le bassin d'Anthignes, l'exutoire est une grosse émergence, anciennement captée par la CILE à Comblain-au-Pont.



**Fig. 3 :** Localisation des sites étudiés dans les roches carbonatées fissurées et karstiques du Sud de la Belgique (modifié d'après EK, 1976). 1 = bassin d'Anthignes 2 = bassin du Néblon 3 = Spontin 4 = Fairoule 5 = Mont-sur-Marchienne 6 = Walhorn 7 = Remouchamps 8 = Croisiers (les tests relatifs à ce karst ne sont pas décrits dans ce travail) 9 = Xhoris 10 = La Reid 11 = Crisnée 12 = Bertrée 13 = Grand Hallet 14 = Jandrain.

Dans la seconde partie du travail, nous avons étendu nos recherches sur les traçages à d'autres sites dans les calcaires carbonifères :

1) dans le synclinorium de Dinant :

- les calcaires du Tournaisien et du Viséen à Spontin (point 3, vallée du Bocq);
- les calcaires du Tournaisien à Fairoule (point 4, vallée de l'Eau d'Heure);

2) dans le synclinorium de Namur à proximité de la faille Eifélienne :

- les calcaires du Viséen à Mont-sur-Marchienne (point 5, vallée de l'Eau d'Heure);

3) dans le synclinorium de la Vesdre à l'Est de la Belgique :

- les calcaires du Tournaisien et du Viséen de Walhorn (point 6, vallée de la Gueule).

D'autres aquifères ont également fait l'objet de traçages afin de comparer le comportement des traceurs en milieu fissuré et en milieu karstique :

- l'aquifère des calcaires du Dévonien dans le synclinorium de Dinant à Remouchamps (point 7) et à Xhoris (point 9);

- l'aquifère des calcaires du Dévonien de la fenêtre de Theux à La Reid (point 10);

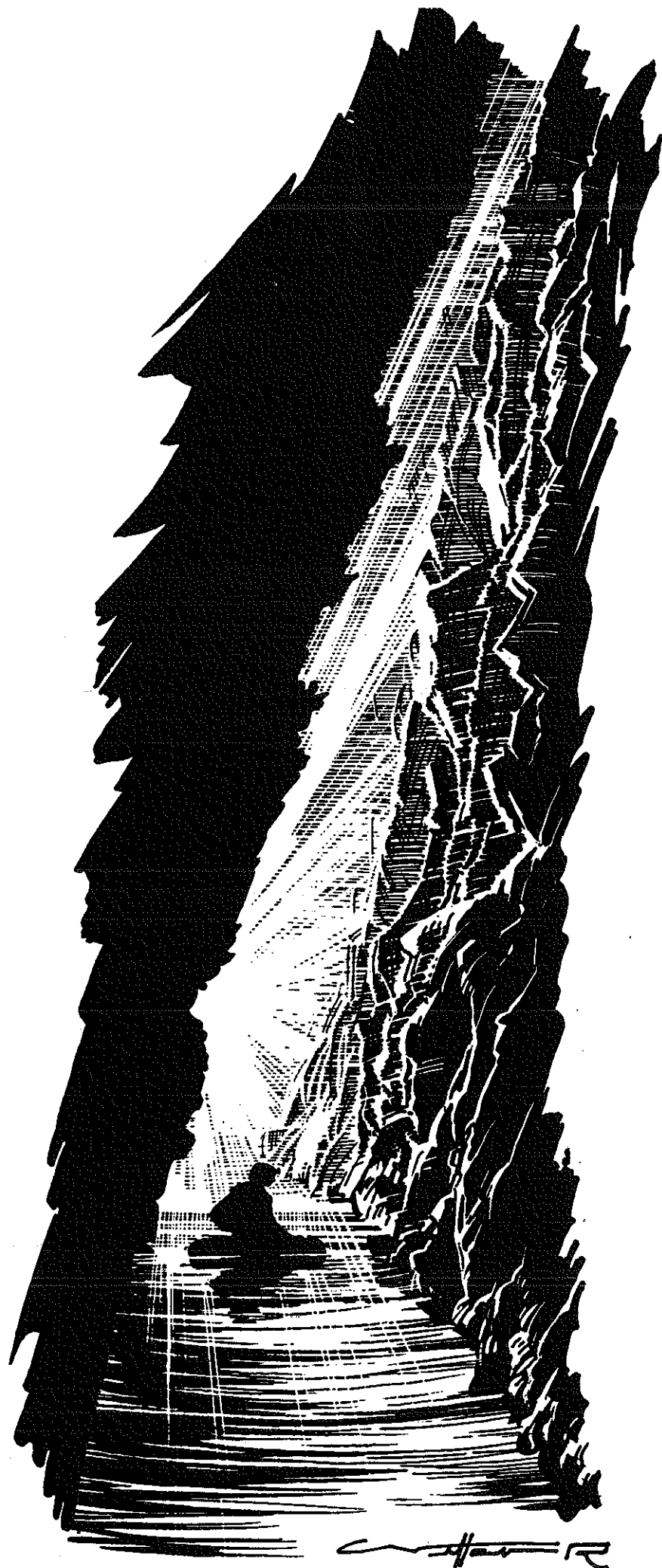
- l'aquifère des craies du Crétacé de Hesbaye à Crisnée (point 11), à Bertrée (point 12), à Grand Hallet (point 13) et à Jandrain (point 14);

- l'aquifère des tuffeaux du Landénien à Bertrée, sur le même site que précédemment (point 12).

Les quatre derniers sites (points 11 à 14), ainsi que Fairoule (point 4) et Mont-sur-Marchienne (point 5), sont chacun équipés d'un puits de pompage et d'un ou plusieurs piézomètres permettant des traçages en écoulement radial convergent.

## **PREMIERE PARTIE**

### **Nappe karstique des bassins du Néblon et d'Anthisnes - Comblain-au-Pont**



W. H. R.

## PREMIERE PARTIE : NAPPE KARSTIQUE DES BASSINS DU NEBLON ET D'ANTHISNES - COMBLAIN-AU-PONT

### 1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

La région étudiée fait partie du Condroz. Elle comprend des terrains plissés appartenant à l'extrémité orientale du synclinorium de Dinant, au Sud de la région liégeoise (voir fig. 3).

Le Condroz est un plateau caractérisé par une alternance typique de crêtes anticlinales à substratum schisto-gréseux (Famennien) et de dépressions synclinales calcaires (Dinantien). Par endroits, ce relief est entaillé par le réseau hydrographique surimposé transversalement à la structure générale E-W.

La nappe karstique étudiée s'étend de manière continue sur plusieurs synclinaux et sur plusieurs bassins versants, dont les principales rivières constituant les niveaux de base sont : le Hoyoux au Nord et à l'Ouest, le Néblon au Sud et l'Ourthe à l'Est. Côté Hoyoux, la nappe est exploitée à Modave par les galeries de captage de la C.I.B.E. (Compagnie Intercommunale Bruxelloise des Eaux).

La présente étude est limitée à la partie de la nappe drainée par l'Ourthe et le Néblon, c'est-à-dire aux deux bassins versants drainant le Sud et l'Est (fig. 1.1). Pour rappel, ces deux bassins ont fait l'objet de deux études hydrogéologiques distinctes pour le Ministère de la Région Wallonne (CILE, LGIH, INIEX, 1986 et 1989).

Schématiquement, le bassin formant la partie Est est une large vallée s'articulant autour du synclinal d'Anthisnes - Comblain-au-Pont, coupée transversalement par l'Ourthe à hauteur de Comblain-au-Pont, tandis que la partie Ouest de la nappe est drainée longitudinalement par le Néblon le long du synclinal de Chardeneux et sur le flanc Sud du synclinal de Bende. La crête de partage des eaux entre les deux bassins s'étend approximativement depuis Warzée (305 m) jusque Ouffet (290 m).

Le bassin du Néblon a une superficie de 65,39 km<sup>2</sup>, une longueur de 15,5 km et une largeur moyenne de 4 km. Celui d'Anthisnes a une superficie de 27,59 km<sup>2</sup>, une longueur de 12 km et une largeur moyenne de 2,5 km.

Les deux bassins n'ont pas suivi la même évolution géomorphologique, sans doute parce que leurs niveaux de base - l'Ourthe et le Néblon - ne se sont pas encaissés de la même manière. La particularité tient donc au fait que l'on a affaire à la même nappe, dans les mêmes formations carbonatées, mais à des stades de karstification différents.

- Dans le synclinal d'Anthisnes, l'encaissement plus important de l'Ourthe a provoqué une forte concentration des exutoires et une organisation plus poussée du drainage karstique. L'exokarst (dolines, vallées sèches, pertes), aussi bien que l'endokarst, y sont particulièrement développés. Le drainage y est principalement souterrain, l'exutoire étant la résurgence du Moulin à Comblain-au-Pont (105 m). Toutes les pertes sont situées sur le versant Nord du synclinal alors que le conduit souterrain principal, du moins dans sa partie aval, est situé sur le flanc Sud.

- Dans le bassin du Néblon, le réseau hydrographique de surface est plus développé. Le drainage souterrain est moins structuré et les exutoires sont plus diffus, le long du Néblon. Le principal exutoire de la nappe des calcaires est constitué par les sources de Néblon-le-Moulin (175 m), situées au point le plus bas de la rivière dans la zone calcaire. Celles-ci sont captées par les galeries de la C.I.L.E. (Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux). Il n'y a pas un collecteur unique, point d'aboutissement d'une série de systèmes locaux, comme c'est le cas dans les aquifères très karstifiés, mais plutôt une convergence de plusieurs systèmes indépendants. Le réseau de drainage superficiel est particulièrement dense sur le versant Sud de la vallée, où de nombreuses sources jaillissent du Famennien.

Une grande partie du travail a été consacrée à la comparaison entre les deux bassins et aux conséquences de la karstification plus développée dans le synclinal d'Anthisnes. Cette recherche s'est effectuée à deux niveaux : d'une part en caractérisant la structure du réservoir par des méthodes géophysiques, d'autre part en étudiant les réponses naturelles et provoquées du système hydrogéologique.

## 1.2. CARACTERISTIQUES LITHOLOGIQUES, GEOLOGIQUES ET STRUCTURALES

Les terrains appartiennent principalement au Dévonien supérieur (Famennien), au Carbonifère inférieur ou Dinantien (Tournaisien et Viséen) et au Carbonifère supérieur (Namurien).

Les différentes formations rencontrées dans la région sont montrées sur la fig. 1.2. Ne sont pas repris sur la colonne lithostratigraphique, ni le Namurien schisto-gréseux, présent uniquement au centre du bassin du Néblon, ni les dépôts meubles de l'Oligocène et ceux du Quaternaire. L'Oligocène n'est d'ailleurs représenté que par quelques placages argilo-sableux souvent liés aux poches de dissolution en terrain calcaire. Le Quaternaire est, quant à lui, constitué d'une importante couverture de limons dont on verra plus loin l'importance hydrogéologique.

Le Famennien comprend un ensemble schisto-gréseux, devenant plus calcaire vers le sommet (Strunien).

Le Dinantien est constitué de roches carbonatées, calcaires et dolomies du Tournaisien et du Viséen, avec quelques niveaux de schistes dans le Tournaisien. Le plus important de ces niveaux, du point de vue hydrogéologique, est celui des schistes du Pont d'Arcole, appartenant au Tn2a.

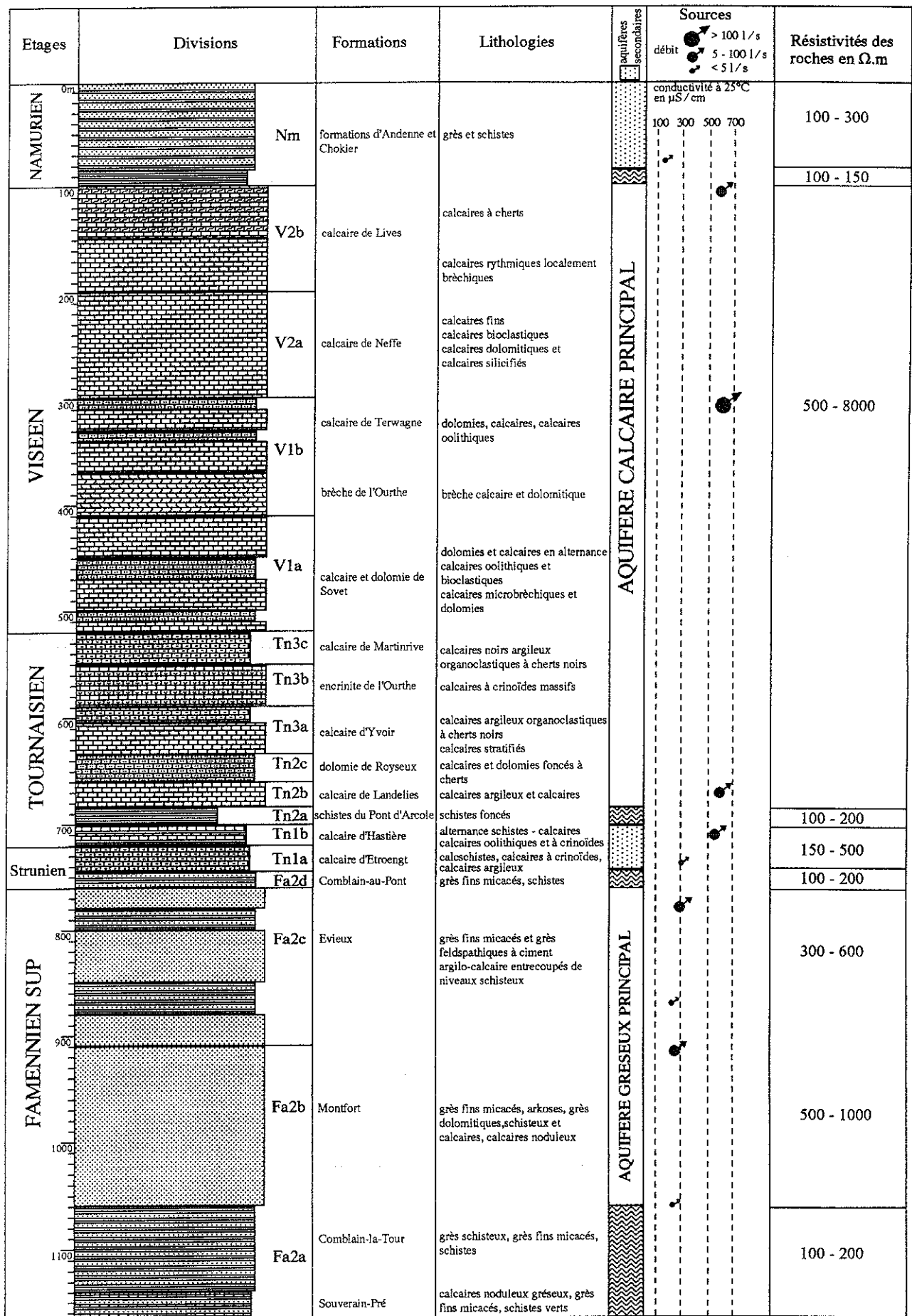


Fig. 1.2 : Lithostratigraphie de la région Anthisnes-Néblon. Caractéristiques des principaux aquifères.

Différentes sortes de calcaires sont présentes : calcaires à cherts, calcaires bioclastiques, calcaires à crinoïdes, calcaires oolithiques et calcaires bréchiques. Les bancs du Viséen sont en général plus purs. Ils sont par conséquent plus karstifiables. Il est important de signaler que la région comporte une multitude de carrières dans les calcaires à crinoïdes du Tn3 ("petit granit"), intensivement exploités comme pierre de taille. Ces excavations, atteignant parfois la zone noyée et utilisées ultérieurement comme décharges, jouent un grand rôle en matière de pollution de la nappe.

La carte géologique est représentée sur la fig. 1.3 <sup>1</sup>. Elle constitue la synthèse de toutes les mesures et de toutes les observations réalisées au cours des différentes études dans la région : données géologiques du Service Géologique de Belgique, levés géologiques complémentaires, examen des photographies aériennes et prospections géophysiques (électriques, électromagnétiques VLF et MELOS, sismique).

Le synclinal d'Anthisnes, de direction NE-SW à hauteur de Ouffet, s'incurve pour prendre la direction E-W à hauteur de Comblain-au-Pont. Une flexure de l'axe du synclinal à hauteur de Ouhar, un peu à l'Est d'Anthisnes, a été mise en évidence par le levé géologique et les levés de fracturation. Le synclinal est un pli droit à faiblement déjeté, qui, par endroit, est dédoublé en son centre par un anticlinal secondaire. Il est limité au Nord par les grès et les schistes de l'anticlinal de Vien, lui-même interrompu au Nord par une faille longitudinale faisant réapparaître les calcaires du Tournaisien. Il est bordé au Sud par l'anticlinal famennien d'Ouffet. Ce dernier est dédoublé à la faveur d'un petit synclinal de calcaires tournaisiens. Plus au Sud encore, les calcaires réapparaissent à nouveau le long d'une bande qui s'étend depuis Ouffet jusque l'Ourthe et qui est interrompue sur son bord Sud par la faille d'Ouffet (faille longitudinale). Cette bande est recoupée transversalement par le ruisseau du Blokai. Enfin, au Sud d'Ouffet, une double digitation des calcaires s'étend jusque la zone des sources de Rénale.

La prise en relais des plis et le prolongement des synclinaux par des anticlinaux est une des caractéristiques de la région, principalement dans le bassin du Néblon où les correspondances entre les différents plis sont difficiles à établir.

On peut distinguer, dans la partie Sud du bassin du Néblon, un premier synclinal calcaire très étroit, celui de Chardeneux, relié par un isthme au synclinal principal, celui de Bende, dont le coeur est occupé par les grès du Namurien. Le synclinal de Bende comprend la majeure partie de l'impluvium calcaire du bassin. Son axe prolonge celui de l'anticlinal d'Ouffet. Le seul affluent pérenne du Néblon dans la partie calcaire du synclinal de Bende est le ruisseau d'Ocquier qui prend sa source au coeur du pli, soit par vidange de l'aquifère des grès namuriens, soit par débordement de la nappe calcaire au contact de ces derniers. Au Nord du synclinal de Bende, dont il est séparé par un léger anticlinal, on trouve le grand synclinal de Bois-et-Borsu, se prolongeant à l'Est par le synclinal d'Anthisnes et à l'Ouest par les terrains calcaires appartenant au bassin du Hoyoux. Alors que la limite Nord du bassin hydrogéologique du Néblon est principalement une limite hydraulique au milieu des calcaires viséens, la limite Sud se trouve, quant à elle, dans les formations schisteuses de l'anticlinal famennien de Borlon.

---

<sup>1</sup>Pour la localisation des lieux cités dans le texte, on se reportera aussi à la fig. 1.1.



La région est intensément fracturée. En simplifiant, on peut diviser les accidents tectoniques en trois familles principales:

- les failles longitudinales E-W. Ce sont des failles de charriage de grande extension, à faible pendage vers le Sud, qui, vu leur rejet, mettent souvent en contact des formations de natures différentes. Elles sont très répandues dans tout le synclinorium de Dinant. La faille qui recoupe l'anticlinal de Vien, la faille d'Ouffet, ou encore la faille qui met en contact le Dinantien et le Famennien à Néblon-le-Moulin en font partie. Ces accidents sont connus grâce aux levés géologiques et aux prospections géophysiques. Lorsqu'ils affectent les bancs calcaires à l'intérieur des synclinaux, seule l'observation géologique permet de les mettre en évidence car, étant parallèles aux couches, ils ne ressortent pas suffisamment sur les profils géophysiques. C'est le cas, par exemple, de la faille de Jenneret qui, semble-t-il, affecte le Viséen du synclinal au Nord de Néblon-le-Moulin;

- les failles transversales NNW-SSE à N-S. Ce sont des failles ou des faisceaux de failles très redressées avec un rejet pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres. Leur orientation varie en fonction de la courbure des plis, tout en restant à peu près perpendiculaire à leur axe. Ce type d'accident est relativement fréquent. Quatre groupes principaux ont été mis en évidence dans le synclinal d'Anthisnes (voir aussi fig. 1.11) :

- un premier dans les grès à l'Est de Warzée;
- un deuxième à Crossée;
- un troisième passant par les pertes de Vien et parallèle à la vallée du Blokai;
- un quatrième traversant le plateau de Raideux et se prolongeant au Sud jusqu'à l'Ourthe.

On connaît également plusieurs de ces accidents dans le bassin du Néblon où ils correspondent à des linéaments observés sur photographies aériennes ou à des anomalies géophysiques (MELOS);

- les failles et fractures obliques. Ce sont des failles ou des fractures dont la plupart ont été repérées par les prospections géophysiques et dans une moindre mesure par photographies aériennes. Leur orientation est très variable mais il semble que la direction NE-SW soit prédominante. Ces failles, par les déplacements successifs qu'elles ont provoqués, pourraient expliquer la flexure du synclinal d'Anthisnes à hauteur de Ouhar. Comme pour les failles transversales, des groupes ou faisceaux plus importants ont été mis en évidence (fig. 1.11) :

1) dans le bassin d'Anthisnes :

- à hauteur de Ouhar;
- dans la zone de Crossée-Lizin;
- au Sud de Vien;
- au Nord d'Ouffet;

2) dans le bassin du Néblon:

- à l'Ouest d'Ouffet, dans le prolongement du groupe précédent;
- entre Bonsin et Ocquier (accident important traversant le synclinal de Chardeneux).

Ces dernières fractures n'ont, semble-t-il, qu'une influence mineure sur les circulations karstiques. Elles sont généralement perpendiculaires, voire obliques au gradient régional et, de ce fait, elles ne favorisent pas l'écoulement. Elles ne l'empêchent cependant pas non plus, excepté lorsque le rejet met en contact des formations imperméables en aval (schistes) avec des formations perméables en amont (calcaires).

### **1.3. FORMATIONS AQUIFERES, SYSTEMES D'ECOULEMENT ET PHENOMENES KARSTIQUES**

#### **1.3.1. Formations aquifères**

Sur la fig. 1.2, on a également indiqué les propriétés hydrogéologiques des différentes formations.

On distingue deux ensembles aquifères principaux, l'un dans les calcaires du Tournaisien et du Viséen (Dinantien), l'autre dans les grès du Famennien.

Le premier comprend les formations allant du Tn2b au V2b et constitue l'aquifère karstique principal des bassins du Néblon et d'Anthisnes. La perméabilité de fissures et de chenaux y est très élevée, principalement dans les calcaires du Tn3b, du V1b, du V2a et du V2b. Les autres formations (Tn2c, Tn3a, V1a) sont un peu moins perméables en raison de leur caractère plus argileux ou plus dolomitique.

Le second aquifère principal est logé dans les grès fracturés du Famennien supérieur (formations d'Evieux, Fa2c et de Montfort, Fa2b).

Les schistes du Pont d'Arcole (Tn2a) séparent l'aquifère calcaire principal de l'aquifère du Tn1b. Ce dernier est formé d'une alternance de schistes et de calcaires et, de ce fait, il constitue un moins bon aquifère.

Dans le bassin du Néblon, les grès du Namurien contiennent localement une nappe de fissure donnant naissance à quelques petites sources au coeur du synclinal de Bende.

Le Strunien (Fa2d et Tn1a), très schisteux à la base, joue le rôle d'imperméable pour les écoulements en provenance des grès famenniens. Il est néanmoins plus aquifère vers le sommet, là où les bancs de grès et de calcaires sont plus abondants.

Enfin, il convient de ne pas oublier le rôle de réservoir tampon joué par la couverture des limons quaternaires, rôle comparable à celui d'un aquifère "épikarstique".

### 1.3.2. Systèmes d'écoulement

On peut résumer le fonctionnement hydrogéologique de la région étudiée en se basant sur les conceptions développées par KIRALY (1973) dans l'établissement de sa carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel.

Les nappes sont formées d'un ou plusieurs systèmes d'écoulement dont il convient dans chaque cas de rechercher :

- la région d'exutoire;
- la région d'écoulement, correspondant à la zone saturée (ou noyée);
- la région d'alimentation, c'est-à-dire la surface du bassin à partir de laquelle les eaux météoriques s'infiltrent pour atteindre la nappe.

Considérons d'abord la nappe karstique principale allant du Tn2b au V2b, ensuite celle des grès du Famennien.

#### A. Nappe des calcaires karstifiés du Tn2b au V2b

1) Dans le bassin d'Anthisnes, la région d'exutoire est la vallée de l'Ourthe, point topographiquement le plus bas, vers 105 mètres d'altitude. La résurgence du Moulin à Comblain-au-Pont représente l'exutoire unique. Il est le point d'aboutissement d'un drain principal qui collecte les eaux en provenance de tous les systèmes annexes.

La région d'écoulement est constituée par la zone noyée de l'aquifère. Etant donné la structure en forme de synclinal, cette zone s'étend pratiquement partout où le calcaire est présent.

La région d'alimentation est quant à elle plus difficile à définir. En effet, l'alimentation est essentiellement hétérogène et la nappe karstique est alimentée suivant deux modes distincts :

- par infiltration diffuse, retardée des eaux météoriques à travers la couverture de limons;
- par infiltration concentrée via les nombreuses pertes du synclinal. L'eau de ces pertes a pour origine, d'une part des sources de débordement de la nappe des grès du Famennien au contact avec les schistes du Strunien, d'autre part le ruissellement sur les terrains schisto-gréseux du Famennien.

En tout état de cause, la région d'alimentation de la nappe calcaire doit donc être étendue aux crêtes famenniennes qui bordent le bassin.

2) En ce qui concerne le bassin du Néblon, la situation est plus complexe en raison des interactions possibles entre les écoulements de surface et les écoulements souterrains.

L'exutoire principal est constitué par les sources du Néblon au lieu-dit "Néblon-le-Moulin" (175 m). Trois sources principales sont captées par des galeries proches de la surface : la Grande galerie captant la source dite "de la Falaise", dans le Viséen en rive gauche, la galerie Communale captant les sources du même nom dans le Tn2 en rive droite et la galerie Tinkou captant les sources de "Favereau" en rive droite et drainant l'aquifère du Tn1b.

La région d'écoulement comprend, comme pour le synclinal d'Anthisnes, toute la zone calcaire et elle s'étend même probablement sous le Namurien.

Pour la région d'alimentation, il y a lieu de faire une distinction entre le synclinal de Bende et celui de Chardeneux parcouru par le Néblon.

En effet, dans le synclinal de Bende, la limite Nord de la région d'alimentation est avant tout formée par une crête de partage des eaux située dans les calcaires. L'alimentation est réduite à :

- des infiltrations d'eaux météoriques au travers de la couverture de limons;
- quelques pertes dont les eaux proviennent des grès namuriens (pertes du Bois de Marsée et de Bende).

Dans le synclinal de Chardeneux, l'alimentation des calcaires par les terrains famenniens a lieu aussi bien sur le flanc Nord que sur le flanc Sud.

### B. Nappe des grès fissurés du Famennien

Les régions d'exutoires sont représentées par une multitude de sources prenant naissance sur les contreforts des crêtes famenniennes et alimentant, soit les pertes dans les calcaires du Tournaisien et du Viséen (bassin d'Anthisnes), soit directement le cours du Néblon (bassin du Néblon). Ces sources correspondent à des axes plus fissurés, aisément repérables sur les photographies aériennes ou détectables par géophysique.

La région d'écoulement s'étend sur l'ensemble de l'aquifère gréseux.

La région d'alimentation est strictement limitée aux crêtes famenniennes.

Les limites des bassins hydrogéologiques sont approximativement les suivantes :

1) dans le bassin d'Anthisnes :

- à l'Est, une limite à potentiel imposé : la vallée de l'Ourthe;
- au Nord et au Sud, des crêtes hydrologiques dans les grès et des limites imperméables dans les schistes, correspondant assez fidèlement aux crêtes topographiques famenniennes;
- à l'Ouest, une limite hydraulique dans les calcaires viséens correspondant à la crête de partage des eaux entre le bassin du Néblon et celui d'Anthisnes;

2) dans le bassin du Néblon :

- au Nord et à l'Ouest, une limite hydraulique, principalement dans les calcaires viséens, correspondant aux crêtes de partage des eaux avec le bassin du Hoyoux et avec celui d'Anthisnes;
- au Sud, une limite géologique imperméable dans les schistes du Famennien de l'anticlinal de Borlon;
- à l'Est, une limite complexe, géologique, hydrologique et topographique, avec les bassins des ruisseaux de Rénale et du Blokai.

### 1.3.3. Phénomènes karstiques

Le creusement par voies chimique et mécanique conjointes, des bancs de calcaires tournaisiens et viséens, est à l'origine des phénomènes karstiques observés en surface.

Les manifestations karstiques, hormis les émergences à fort débit de Néblon-le-Moulin et de Comblain-au-Pont, sont des pertes, des vallées sèches et des dolines. Parmi les pertes, aussi appelées dans la région "aiguigeois" ou "chantoirs", certaines sont permanentes, d'autres temporaires, absorbant les trop-pleins au cours des crues.

#### *Bassin du Néblon*

Trois pertes seulement sont à signaler (fig. 1.1) : celle du Bois de Marsée, celle de Bende et celle d'Oneu. Les deux dernières ne sont pas à proprement parler des pertes mais plutôt des infiltrations diffuses. Le "chantoir" du Bois de Marsée est, quant à lui, une perte temporaire alimentée par un écoulement prenant sa source dans les grès du Namurien au coeur du synclinal de Bende. Nous y reviendrons dans le chapitre consacré aux traçages.

A l'Est de Bende, prend naissance le vallon sec le plus important du bassin du Néblon, celui de Paire ou "Fond de Bende" (fig. 1.1). Il s'agit d'un affluent du Nesson, parcouru par un écoulement dans sa partie aval uniquement lors des périodes très pluvieuses. Deux autres vallées sèches convergent également vers le Nesson : le ravin de Himbe au NE et le ravin d'Ouffet au Nord<sup>1</sup>. Partant du Bois de Marsée, un autre vallon sec, appelé de l'amont vers l'aval, "Fond de Marsée", "Fond de Sarte" puis "Fond de Walou", rejoint le Néblon entre Ama et Jenneret.

A l'exception de quelques abris sous roche dans les falaises en bordure du Néblon et d'un puits peu profond au Sud d'Ouffet (abîme de Rénale), aucune cavité importante n'est signalée dans le bassin du Néblon.

#### *Bassin d'Anthisnes*

Les pertes sont plus nombreuses et importantes au point de vue débit. Elles sont toutes localisées sur le versant septentrional du bassin, dans les calcaires proches du contact avec les formations imperméables du Famennien. On distingue quatre groupes principaux (fig. 1.1) : Lizin, Crossée, Vien et Anthisnes. Les nombreuses dépressions, partiellement remblayées, souvent observées dans le thalweg en aval des pertes actuelles sont d'anciens points d'absorption abandonnés suite à l'érosion régressive. Un bel exemple de ce phénomène est celui décrit à Vien par VAN DEN BROECK, MARTEL et RAHIR (1910).

A Lizin, par contre, on assiste au déplacement des points de perte vers l'aval. C'est sans doute l'abondance des sédiments, obstruant les pertes, qui doit en être la cause.

---

<sup>1</sup>Ce dernier, ayant jusqu'à présent servi de collecteur aux égouts d'Ouffet, est à présent équipé d'une station d'épuration destinée à réduire les risques de pollution des galeries de captage du Néblon par des infiltrations éventuelles dans le lit du Nesson.

Peu de cavités sont connues. Les deux plus importantes, l'Abîme de Comblain (ou Grotte de Comblain) et le trou des Photophores sur le plateau de Raideux, sont des pertes fossiles qui témoignent de l'existence d'anciens écoulements de surface sur le versant Sud du synclinal d'Anthisnes.

Depuis l'amont de ce bassin, il est possible de suivre, jusqu'à hauteur de La Roke, une vallée sèche profonde, appelée aussi "chavée"<sup>1</sup>. Cette vallée débute au coeur du synclinal, longe ensuite la limite Nord des calcaires entre Lizin et Crossée, puis traverse le synclinal où elle rejoint une autre vallée sèche en provenance de Vien pour former la vallée du Blokai. A l'aval de cette confluence, l'aquifère du Tournaisien se décharge via quelques sources au contact Tournaisien-Famennien. Les traçages ont montré que le collecteur souterrain principal suivait à peu près le même tracé que la vallée sèche jusque La Roke. Plus à l'Est, en direction de Comblain, il devient difficile de le suivre. Seules plusieurs grandes dolines et les deux cavités fossiles signalées sur le plateau de Raideux peuvent suggérer le passage d'un collecteur en profondeur sous le flanc Sud du synclinal. Quoi qu'il en soit, l'exutoire final de ce collecteur se trouve sur le flanc Sud du synclinal, au contact du Viséen inférieur avec le Viséen supérieur.

#### 1.4. STRUCTURE DU RESERVOIR CALCAIRE

La distribution et l'organisation des vides créés par la karstification est déterminante pour le fonctionnement de l'aquifère.

Vu l'impossibilité d'un accès direct au milieu rocheux en profondeur, on doit avoir recours à des méthodes indirectes pour étudier la structure.

On connaît plusieurs exemples (KIRALY, 1978) où le champ des perméabilités a pu être reconstitué à partir de levés de fissuration en surface, mais ces levés exigent la continuité des affleurements sur la majeure partie du bassin. Dans la région qui nous intéresse, les nombreuses carrières dans les calcaires du Tournaisien permettent ce type d'approche mais l'extrapolation sur toute la surface du bassin - ainsi qu'en profondeur - de l'ouverture et de l'extension des fissures observées sur les fronts de taille demeure assez aléatoire.

Les discontinuités dans la perméabilité du réservoir peuvent aussi être étudiées, à diverses échelles, par des méthodes géophysiques (BENDERITTER et ROBIN, 1987).

Dans les bassins du Néblon et d'Anthisnes, un éventail assez large de ces méthodes a pu être mis en oeuvre pour repérer les zones les plus fracturées et les plus karstifiées. Il s'agit principalement des méthodes géoélectriques et électromagnétiques, et accessoirement des méthodes microsismiques et microgravimétriques.

---

<sup>1</sup>Vallon sec où s'observent encore temporairement des pertes en période de hautes eaux.

Les mesures ont consisté en :

1) dans le bassin du Néblon :

- 4 profils électriques transversaux totalisant 15 km
- 50 sondages électriques
- 8 profils électromagnétiques MELOS longitudinaux totalisant 18 km
- 5 sondages sismiques.

2) dans le bassin d'Anthisnes (fig. 1.4) :

- 7 profils électriques transversaux et 17 longitudinaux totalisant plus de 26 km
- 27 sondages électriques
- 3 sondages électriques pluridirectionnels
- 3 rectangles de résistivité
- 47 profils électromagnétiques VLF longitudinaux totalisant plus de 50 km
- 1 sondage sismique
- 1 profil microgravimétrique.

Parmi les 18 forages existants (voir fig. 1.1), 5 ont fait l'objet de carottages géophysiques (diagraphies  $\gamma$ -ray,  $\gamma$ - $\gamma$ , Neutron et Sonic), 17 ont fait l'objet de profils des paramètres physico-chimiques de l'eau (conductivité, température, oxygène dissous et pH) et 7 ont fait l'objet de tests de pompages. Plusieurs d'entre eux ont également servi aux expériences de traçage.

Les principes des méthodes géophysiques utilisées sont repris dans l'annexe A. Il serait trop long de décrire ici tous les résultats obtenus. Aussi nous contenterons-nous de définir quels ont été les apports principaux de chacune des méthodes au travers de quelques exemples et d'une carte structurale de synthèse.

### *Méthodes électriques*

A partir des résultats des sondages électriques et des trainés électriques transversaux, on a établi des coupes géoélectriques transversales qui ont pu être corrélées entre elles. Deux de ces coupes sont montrées aux fig. 1.5 (profil TE5 dans le bassin du Néblon) et fig. 1.6 (profil T3 dans le bassin d'Anthisnes).

On distingue des zones à forte résistivité - parfois plus de 1000  $\Omega$ .m - correspondant aux calcaires viséens dans le coeur des synclinaux.

Les calcaires du Tournaisien se marquent par des zones moins résistives (moins de 400  $\Omega$ .m), parfois difficile à distinguer des formations schisto-gréseuses du Famennien. Cette résistivité parfois très faible pour les calcaires du Tournaisien peut provenir, de l'abondance des intercalations schisteuses d'une part et de l'épaisseur localement importante de la couverture de limons (poches de dissolution) d'autre part. Les résistivités apparentes au-dessus des calcaires tournaisiens sont un peu plus élevées dans le fond de la vallée du Néblon (profil TE5), étant donné l'absence de couverture limoneuse.

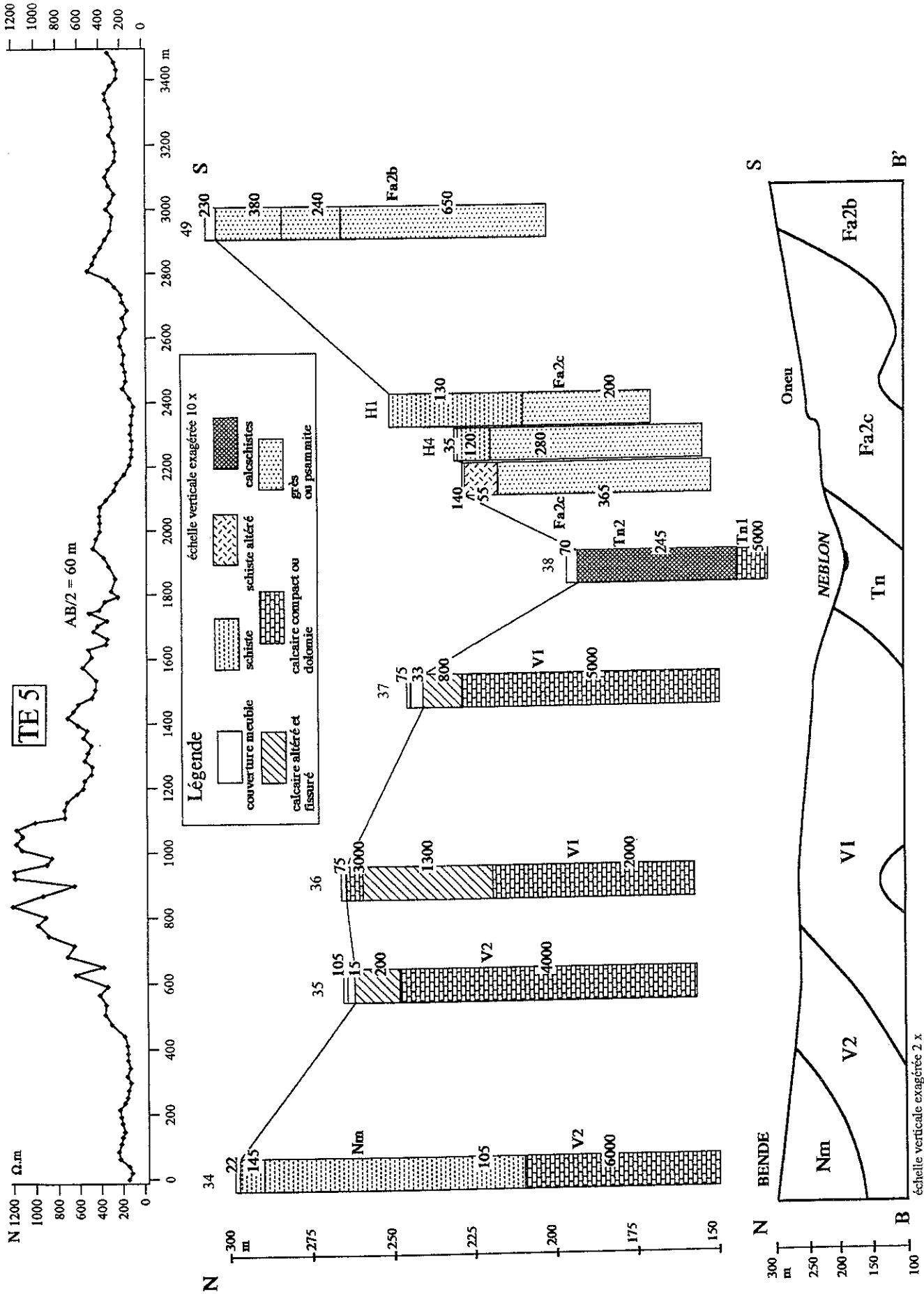


Fig. 1.5 : Coupe géoélectrique le long du profil TE5 dans le bassin du Néblon.



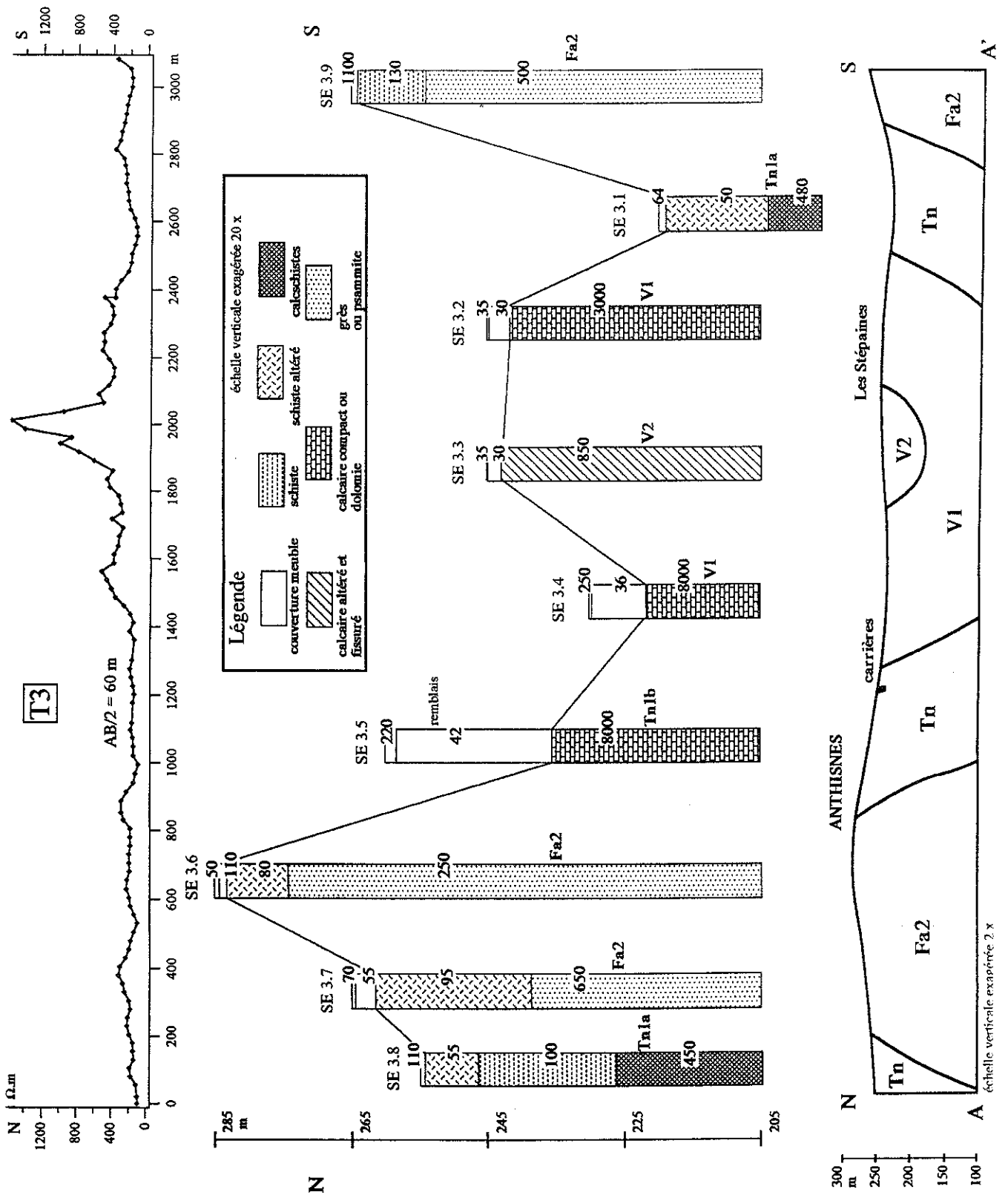


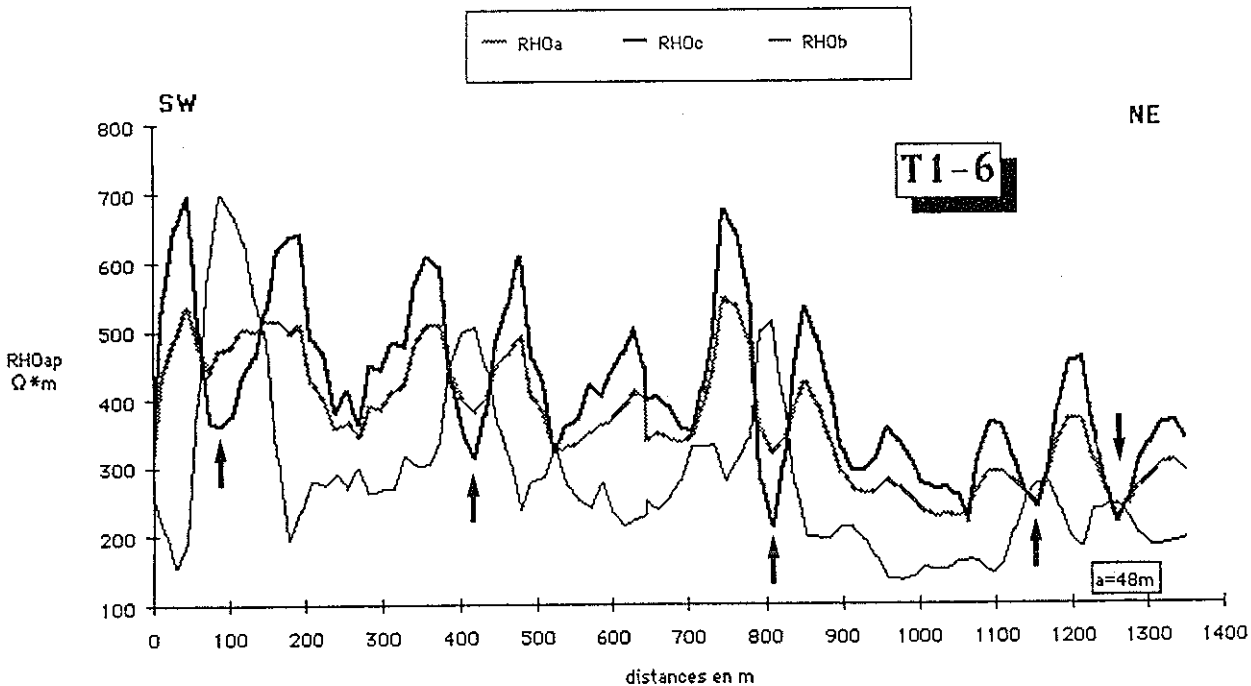
Fig. 1.6 : Coupe géoélectrique le long du profil T3 dans le bassin d'Anthises.

Le Famennien, devenant de plus en plus gréseux en passant de la formation d'Evieux (Fa2c) à celle de Montfort (Fa2b), présente, au droit de ces formations, des résistivités supérieures à celles des formations schisteuses formant la transition entre le Famennien et le Tournaisien (profil TE5).

Les corrélations entre les différents profils transversaux ont ainsi permis le tracé précis des limites géologiques telles qu'elles sont montrées sur la carte géologique de la fig. 1.3.

Les trainés électriques longitudinaux (profils Wenner) ont, quant à eux, servi à mettre en évidence les zones les plus fracturées et les plus fissurées dans les calcaires.

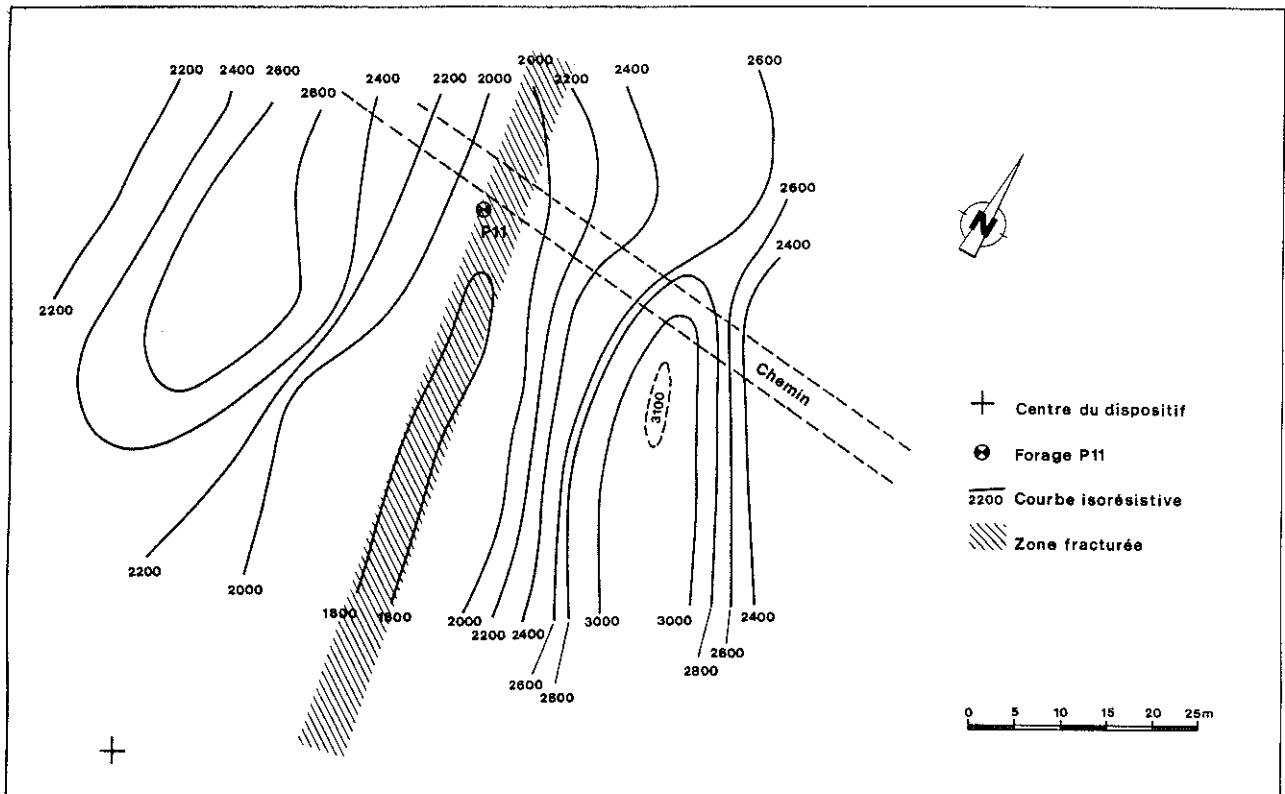
Un exemple d'un tel trainé, montrant au moins cinq zones plus fracturées dans les calcaires viséens, est donné à la fig. 1.7 (profil T1-6 au Nord d'Ouffet).



**Fig. 1.7** : Exemple de profil Wenner tripotentiel longitudinal dans les calcaires avec couverture de limons (profil T1-6, bassin d'Anthisnes). Les flèches indiquent la position des zones fracturées.

La corrélation des anomalies observées sur les profils électriques et électromagnétiques a permis le tracé de la plupart des fractures reprises sur la carte de synthèse structurale (fig. 1.11) décrite plus loin dans ce chapitre.

Les rectangles de résistivité ont permis la cartographie plus précise des anomalies repérées par les trainés électriques et électromagnétiques. Un exemple est donné à la fig. 1.8. Un axe plus fissuré, orienté Nord-Sud, se marque par une chute de résistivité importante. Le forage P11 a été implanté au droit de cette anomalie.



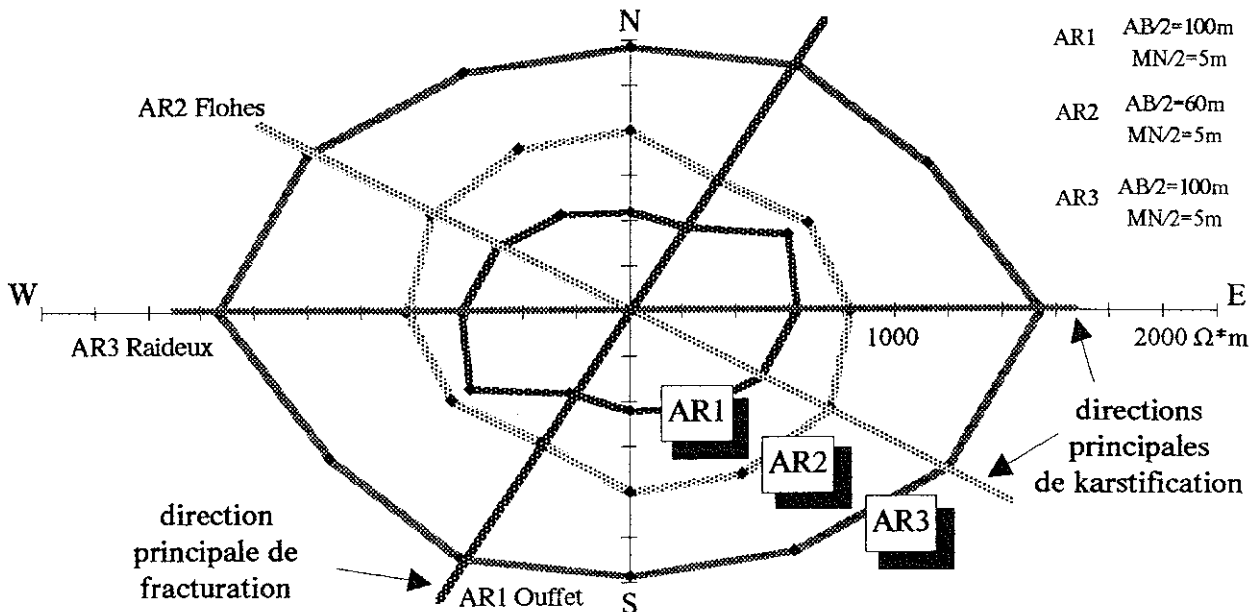
**Fig. 1.8** : Carte d'isorésistivité établie sur base des mesures effectuées suivant la méthode du rectangle de résistivité ( $AB/2 = 400$  m). Le forage P11 a été implanté au droit de la zone la plus fissurée correspondant à l'importante chute de résistivité.

Les sondages pluridirectionnels ont permis de déterminer, dans plusieurs zones, l'orientation principale de la fissuration.

Dans les bassins du Néblon et d'Anthisnes, le niveau de la nappe est rarement atteint par les sondages électriques. Sur les plateaux, les fissures sont généralement remplies de limons et de sables, ce qui en fait d'assez bons conducteurs<sup>1</sup>. Dans les vallées et dans les zones les plus karstifiées, l'inverse peut se produire (résistivité plus importante), là où les fissures, élargies suite à la karstification, n'ont pas été colmatées ou ont été dégagées par l'action érosive de l'eau.

<sup>1</sup>Les nombreuses anomalies conductrices mises en évidence par les trainés électriques et les grosses fissures colmatées observées sur les fronts de taille des carrières le prouvent.

La fig. 1.9 montre trois sondages pluridirectionnels, réalisés dans trois zones distinctes : sur le plateau de Raideux, là où plusieurs cavités sont connues en profondeur, sur le plateau des Flohes au SW de Vien et à Ouffet, à proximité de la crête de partage des eaux entre le bassin d'Anthises et celui du Néblon.



**Fig. 1.9** : Sondages électriques pluridirectionnels dans le bassin d'Anthises. Pour les sondages AR1 et AR2, l'allongement de l'ellipse de résistivité correspond à la direction principale de la karstification. Pour le sondage AR3, les fissures karstifiées sont plus conductrices que la roche encaissante et correspondent à peu près à la direction de la plus faible résistivité.

Au Raideux, la plus grande résistivité correspond au développement de la karstification dans la direction des bancs. Aux Flohes, la plus grande résistivité est orientée NW-SE et correspond aussi à des fissures karstifiées. Cette direction est la même que celle du collecteur du système, traversant le synclinal à hauteur de La Roke. A Ouffet, les fractures remplies de limons sont sans doute plus conductrices que l'encaissant et correspondent à la direction de la résistivité la plus faible, c'est-à-dire environ N-S.

#### *Méthodes électromagnétiques*

Les profils longitudinaux VLF et MELOS ont mis en évidence de nombreuses anomalies conductrices correspondant à des fractures transversales ou obliques. Dans le bassin d'Anthises, les anomalies VLF ont pu en outre être corrélées avec les anomalies mise en évidence par les trainés électriques Wenner. Les plus importantes de ces fractures sont représentées sur la carte structurale (fig. 1.11) décrite ultérieurement dans ce chapitre.

Un exemple d'utilisation de la prospection VLF, parallèlement à des mesures microgravimétriques, pour détecter des vides karstiques, est illustré à la fig. 1.10.

Le profil microgravimétrique G1 a mis en évidence une importante zone fissurée et karstifiée dans les calcaires viséens sous le plateau de Raideux. Un déficit de gravité d'environ 200  $\mu$ gal est observé vers le centre du profil. Il suggère d'importants vides karstiques à faible profondeur, sans doute le prolongement des deux cavités fossiles indiquées le long de la zone fracturée (Trou des Photophores à l'Ouest et Abîme de Comblain à l'Est). Dans cette dernière cavité, on note un développement préférentiel de la karstification dans la direction des bancs et dans la direction des fractures transversales (XHAARD, 1992). L'hypothèse suivant laquelle le réseau actif aboutissant à la résurgence de Comblain, se trouverait dans les bancs de calcaires viséens en dessous du niveau fossile, paraît très probable.

#### *Méthode sismique*

Dans le cadre de cette étude, la méthode sismique a été utilisée pour plusieurs cas particuliers. Par exemple, dans le bassin du Néblon (CILE, LGIH, INIEX, 1986), pour distinguer les calcschistes du Strunien des calcaires du Tournaisien ou, dans le synclinal d'Anthisnes, pour connaître l'épaisseur des terrains meubles au-dessus des calcaires viséens à La Roke (sondage SS1, fig. 1.4).

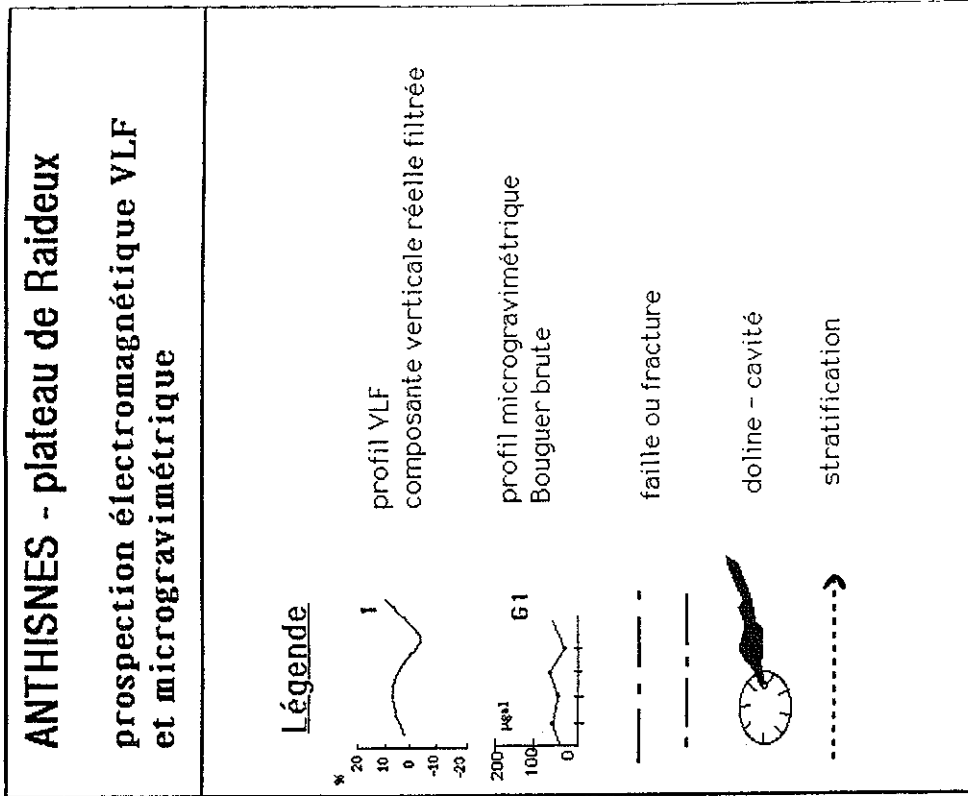
#### *Carte structurale*

Les anomalies mises en évidence par les profils électriques et électromagnétiques ont servi à dresser la carte structurale de la fig. 1.11, en complément des informations apportées par les levés géologiques et l'interprétation des photographies aériennes.

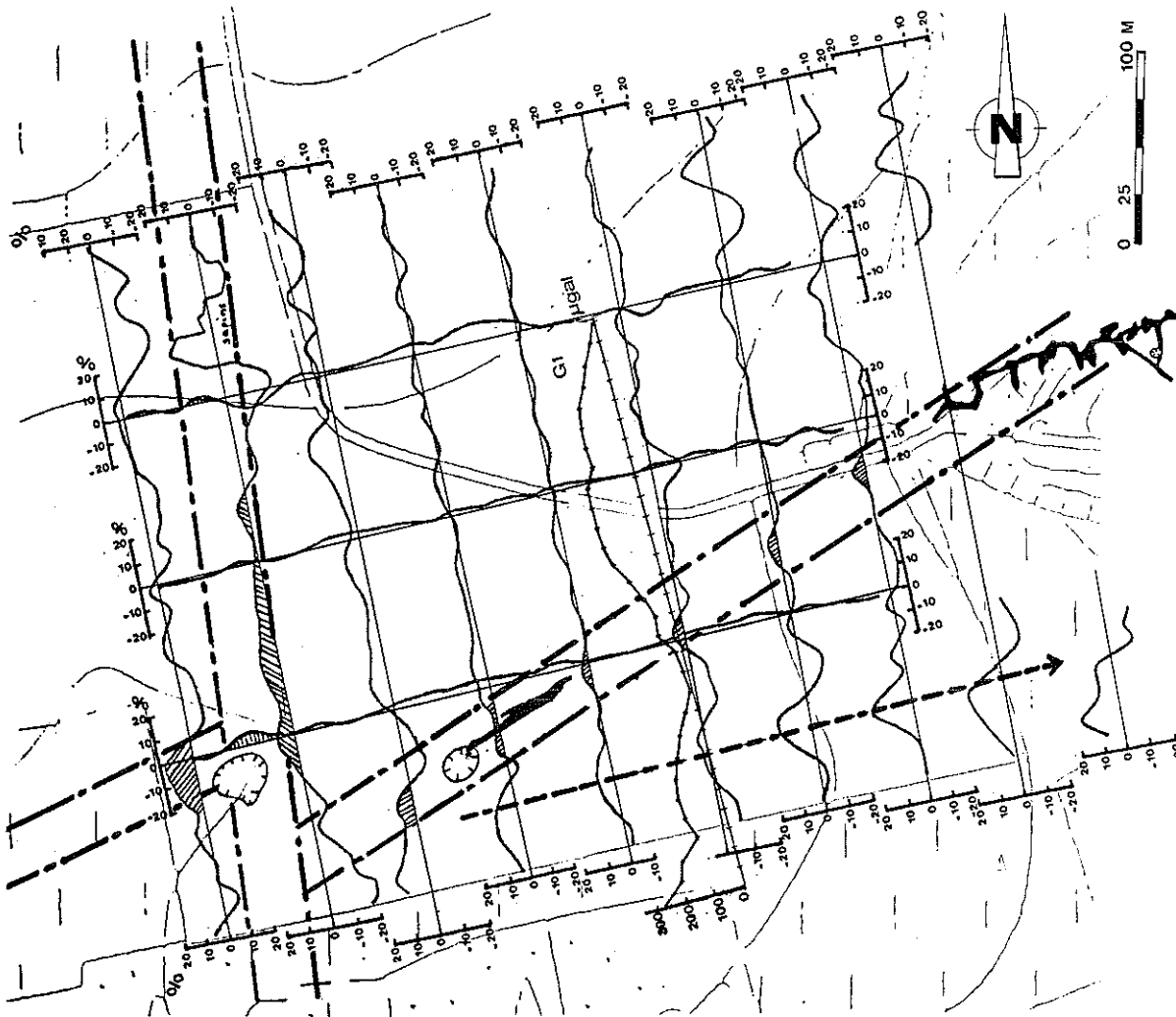
Dans le bassin du Néblon (CILE, LGIH, INIEX, 1986), on a ainsi repéré une série d'accidents transversaux susceptibles de drainer la nappe en direction de la vallée et plus particulièrement en direction de l'exutoire principal (Néblon-le-Moulin).

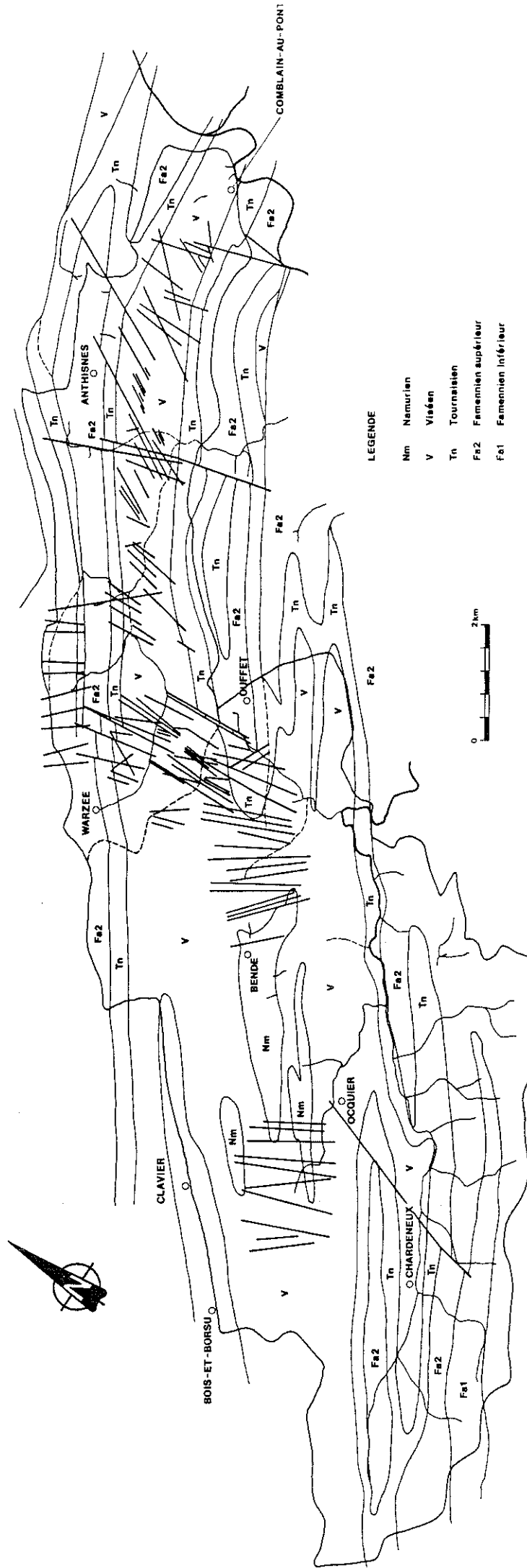
A l'Ouest d'Ouffet, plusieurs faisceaux de fractures obliques traversent la crête de partage des eaux entre le bassin du Néblon et celui d'Anthisnes, favorisant les échanges souterrains entre ces deux bassins.

Dans le bassin d'Anthisnes (CILE, LGIH, INIEX, 1989), les accidents tectoniques obliques sont particulièrement abondants. Plusieurs failles ou faisceaux de failles transversales ont été mises en évidence (voir aussi fig. 1.4) au Nord d'Ouffet, à hauteur de Crossée et de Lizin, à hauteur de Vien et traversant le plateau de Raideux au-dessus de Comblain.



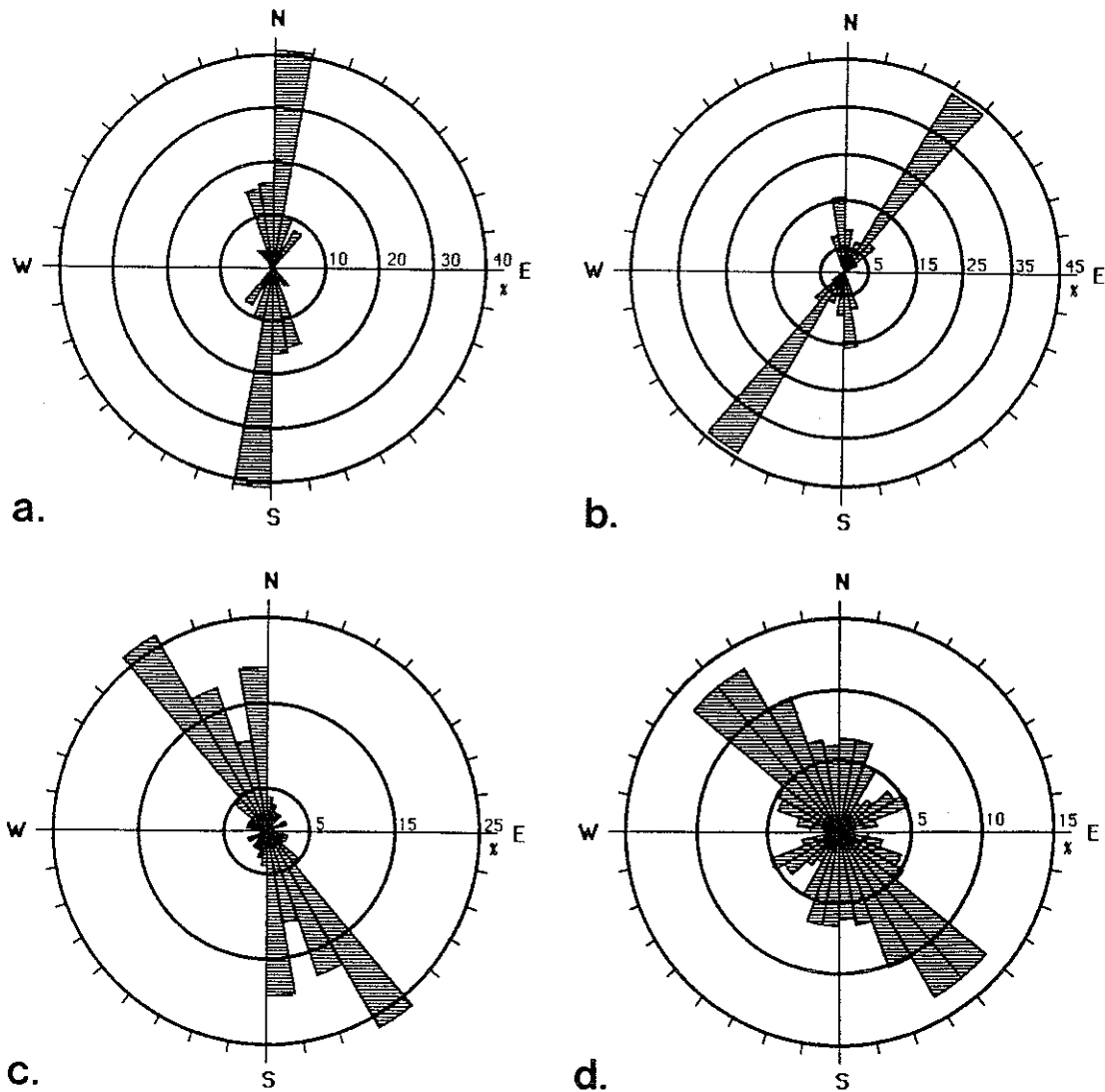
**Fig. 1.10 :** Prospection électromagnétique VLF et microgravimétrique sur le plateau de Raideux (synclinal d'Anthises). Plusieurs zones fracturées sont mises en évidence, dont certaines sont en relation avec le développement de la karstification (dolines, cavités).





**Fig. 1.11** : Carte structurale (failles et fractures) de la région Anthignes-Néblon établie sur base des levés géologiques, de l'interprétation des photographies aériennes et principalement des mesures géophysiques (géoelectriques et électromagnétiques).

Il était intéressant de comparer les directions structurales obtenues par différentes méthodes et à différentes échelles d'observation (fig. 1.12).



**Fig. 1.12** : Roses d'orientation des fractures mises en évidence par la géophysique dans le bassin d'Anthisnes, partie Ouest (a.) et Est (b.), par l'interprétation des photographies aériennes (linéaments) dans le bassin du Néblon (c.) et par le levé de fissuration sur le front de taille d'une carrière au Sud d'Anthisnes (d.).

A partir de la carte structurale (fig. 1.11), nous avons reporté sur un diagramme en "rose d'orientation" les accidents principaux du bassin d'Anthisnes (fig. 1.12 a. et b.), par classes de 10 en 10°. Un traitement séparé des parties Est et Ouest du bassin s'est avéré nécessaire en raison du changement d'orientation du synclinal à hauteur de Ouhar. Le classement des accidents a été effectué en tenant compte de leurs longueurs cumulées.



La différence entre la partie Est et la partie Ouest du synclinal apparaît nettement. A l'Ouest (fig. 1.12 a.), les fractures obliques sont orientées N-S, alors qu'à l'Est (fig. 1.21 b.), elles sont orientées NE-SW.

Dans le bassin du Néblon, la prospection géophysique MELOS n'a pas couvert l'entièreté du bassin<sup>1</sup>. De plus, aucun profil électrique longitudinal n'a été réalisé. La mise en parallèle avec le synclinal d'Anthisnes est par conséquent difficile. A titre de comparaison, nous avons cependant représenté sur la fig. 1.12 c. la rose d'orientation des linéaments observés sur les photographies aériennes (DI CLEMENTE et LAURENT, 1986). Deux groupes peuvent être distingués : le premier correspondant aux fractures obliques (N-S), le second, plus important, orienté NW-SE, correspondant aux fractures transversales, dont beaucoup ont été confirmées par la prospection MELOS.

On retrouve ces fractures transversales NW-SE, à une échelle d'observation plus restreinte, lors du levé de fissuration sur les parois d'une des carrières situées au Sud d'Anthisnes dans les calcaires tournaisiens (fig. 1.12 d.). La majorité des fractures sont orientées NW-SE. Un groupe de moindre importance correspond aux fractures transversales N-S.

Il apparaît clairement, au vu de ce diagramme, que les différentes méthodes, prises individuellement, ne mettent pas en évidence toutes les familles de fractures et que, par conséquent, pour être plus exhaustif, il est indispensable d'effectuer des recoupements.

### *Diagraphies*

Les diagraphies ont permis d'étudier le réservoir rocheux à l'échelle de volumes plus restreints, en mettant en évidence les discontinuités de perméabilité dues à la fissuration et à la karstification des bancs calcaires.

Dans les calcaires étudiés, il ne semble pas exister de relation simple entre la localisation des forages et le type de structure mis en évidence par les diagraphies. Ces diagraphies montrent bien l'hétérogénéité du milieu à une échelle d'investigation aussi locale.

De manière générale, on note cependant que les fissures sont plus développées dans la zone non saturée, ce qui entraîne un drainage assez efficace de la couverture de limons. La perméabilité des fissures dépend non seulement de leur ouverture mais aussi de la nature d'un éventuel remplissage (argile, sable dolomitique, etc.).

A titre d'exemple, on trouvera à la fig. 1.13 les diagraphies réalisées dans le forage P11, dans les calcaires viséens, à proximité de la crête de partage des eaux entre le bassin du Néblon et celui d'Anthisnes.

L'emplacement de ce forage a été choisi au droit d'une anomalie importante mise en évidence par les prospections électriques et VLF (voir fig. 1.8).

---

<sup>1</sup>La plupart des accidents mis en évidence par cette prospection sont des accidents transversaux.

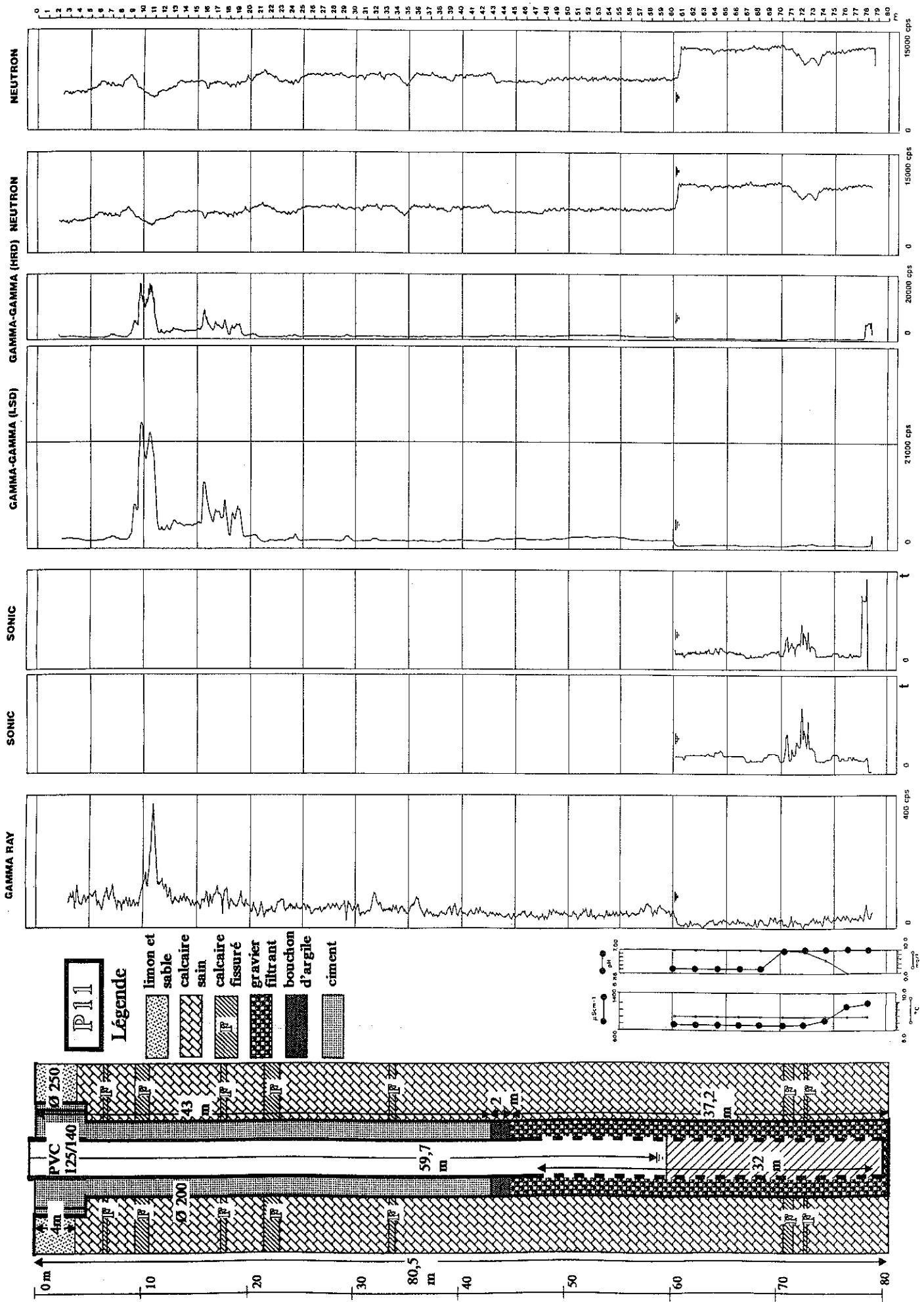


Fig. 1.13 : Diagraphies au P11

Il a recoupé une faille remplie d'argile et de sable dolomitique vers 10 mètres de profondeur, c'est-à-dire loin au-dessus du niveau de la nappe. Cette faille se marque par une très nette augmentation de l'intensité  $\gamma$ -ray due à la présence des argiles.

Une seconde zone faillée est observée entre 15 et 18 mètres de profondeur.

Jusque vers 70 mètres de profondeur, les calcaires sont très compacts.

Entre 70 et 74 mètres, une zone fissurée est à l'origine des venues d'eau observées en cours de forage. Cette zone fissurée se traduit par une diminution de la vitesse Sonic (augmentation du retard  $t$ ) et par une diminution de l'intensité Neutron (l'augmentation de la teneur volumique en eau étant compensée par la diminution de la densité des calcaires).

L'eau à l'intérieur du forage ne circule pratiquement plus en dessous de la zone fissurée. Elle est en effet beaucoup plus minéralisée et nettement plus pauvre en oxygène dissous que dans la partie supérieure.

## 1.5. HYDRODYNAMIQUE ET RECHARGE DE LA NAPPE

Il a été mentionné au chapitre précédent qu'une "unité hydrogéologique" définie sur base des écoulements semblait le mieux caractériser les aquifères dans les roches fissurées et karstifiées. Cela tient au fait que la plupart des propriétés du karst (notamment la double perméabilité) découlent de l'organisation des circulations souterraines. L'idéal, pour comprendre le fonctionnement de ce type d'aquifère, serait par conséquent de déterminer directement le champ des potentiels hydrauliques et les vitesses d'écoulement, ce qui est illusoire vu le manque de points d'observation de la nappe.

KIRALY (1978) a suggéré de calculer les potentiels et les vitesses d'écoulement à partir de modèles mathématiques déterministes. Ce type d'approche suppose connus :

- les champs des paramètres  $K$  (perméabilité) et  $S_s$  (coefficient d'emmagasinement spécifique) en tout point,
- les conditions initiales et aux limites.

Elle suppose également que l'on ait à disposition :

- des lois d'écoulement valables pour chaque élément du modèle,
- des observations en un nombre suffisant de points et sur une période assez longue pour permettre la calibration du modèle.

Malheureusement, si le choix des conditions aux limites ne pose pas trop de problèmes, la détermination de  $K$  et  $S_s$  en tout point n'est pas aussi simple<sup>1</sup>.

Les deux seules possibilités de détermination de ces paramètres sont :

- l'interpolation à partir des valeurs obtenues directement par la géophysique ou par des tests de pompage,
- l'évaluation indirecte à partir du champ des variables géologiques en surface.

La seconde approche repose sur l'analyse statistique de la fissuration et n'est pas applicable dans notre cas étant donné la rareté et la distribution irrégulière des affleurements.

C'est la raison pour laquelle nous avons axé notre étude au départ sur les méthodes géophysiques.

Cette étude de la structure nous a cependant fait prendre conscience de la complexité de l'aquifère et de la difficulté de réaliser un modèle déterministe sans des connaissances plus approfondies du fonctionnement du système.

Nous nous sommes dès lors tournés vers une approche systémique, considérant uniquement les relations entre les "entrées" et les "sorties" du système, dans le but de définir un schéma abstrait qui rende compte le mieux possible de son fonctionnement (modèle du type "boite noire"<sup>2</sup>)

L'analyse systémique des aquifères karstiques fait classiquement appel à quatre types de grandeurs, liées directement ou indirectement aux mouvements de l'eau :

- les débits aux exutoires (ou les niveaux piézométriques), fonction de la recharge de la nappe (étude hydrodynamique);
- les constituants chimiques de l'eau en tant que traceurs naturels (étude hydrogéochimique);
- les isotopes de l'eau, principalement le tritium et l'oxygène 18 (étude isotopique);
- les traceurs artificiels (étude par traçages).

Le présent chapitre est consacré à l'étude hydrodynamique tandis que les deux suivants traiteront, l'un de l'hydrogéochimie, l'autre des traçages. L'étude isotopique n'a pas pu être abordée dans le cadre de ces recherches.

Nous avons déjà pressenti des différences de karstification entre le bassin du Néblon et celui d'Anthisnes en examinant la fréquence des phénomènes karstiques en surface (§ 1.1).

Ces différences apparaîtront de façon encore plus nette en comparant le comportement des exutoires.

<sup>1</sup>Selon Kiraly, la simulation mathématique des aquifères karstiques pourrait représenter une technique intéressante pour la détermination indirecte des champs de perméabilités et de coefficients d'emmagasinement (méthode "inverse").

<sup>2</sup>Notons ici que certains chercheurs utilisent actuellement l'analyse fractale, basée sur une représentation statistique du réseau (construite à partir d'un minimum de paramètres) pour tenter de donner une légitimité physique à ce type de modèle (JEANNIN, 1992).

L'étude hydrodynamique va en effet nous permettre de traduire ces différences en terme de réserves de l'aquifère, approche qui nous amènera à replacer les bassins étudiés dans le contexte d'une classification générale des aquifères karstiques (MANGIN, 1975).

A titre de comparaison, nous présenterons également les résultats obtenus concernant le bassin karstique du "vallon des chantoirs". Ce bassin est situé dans les calcaires dévoniens de l'extrémité Est du synclinorium de Dinant (Frasnien et Givétien), dans un contexte géographiquement et géomorphologiquement assez semblable à celui des bassins du Néblon et d'Anthisnes. Son exutoire principal est une rivière souterraine (le Rubicon), qui parcourt la grotte de Remouchamps sur plus de 500 mètres. Les données de débits ont été obtenues grâce à une série de jaugeages (au micromoulinet et par dilution chimique) et à un limnigraphe placé à la sortie du siphon amont de la grotte.

L'hydrogramme du Rubicon est repris à la fig. 1.14, avec le débit en ordonnée normale et logarithmique. Les fig. 1.15 et 1.16 représentent les hydrogrammes des deux autres exutoires étudiés : la résurgence du Moulin à Comblain-au-Pont et les galeries de captages de Néblon-le-Moulin.

Le manque de régularité de ces deux dernières courbes est principalement lié aux difficultés d'obtention des valeurs réelles de débits. En ce qui concerne la résurgence du Moulin, l'émergence (ensemble d'au moins quatre griffons) a lieu dans un étang et le niveau de cet étang est réglé par un barrage. Le limnigraphe a par conséquent été placé dans le canal menant à l'Ourthe, en aval de cet étang. Le niveau mesuré par l'appareil s'est trouvé cette fois influencé par les crues de la rivière. A ces problèmes, il faut ajouter les modifications du lit du canal, survenues suite à la vidange de l'étang et à la prolifération des plantes aquatiques. La situation est encore plus complexe dans le cas des captages de Néblon-le-Moulin. Les seules données dont nous disposions étaient les débits captés journalièrement par l'ensemble des galeries (rejets temporaires non compris). Un déversoir, placé au niveau de la venue d'eau principale, en amont de la grande galerie, a permis de vérifier que le débit total capté par l'ensemble des galeries (fig. 1.16) suivait la vidange de la nappe karstique aux fluctuations rapides près.

Les périodes d'observation considérées sont :

- du 18/11/89 au 21/12/91 pour le Rubicon,
- du 13/04/88 au 8/10/91 pour la résurgence du Moulin,
- du 12/02/89 au 7/01/92 pour les galeries de Néblon-le-Moulin.

En ce qui concerne les bilans dans le bassin du Néblon, l'année 85-86 est la seule pour laquelle nous disposions à la fois des débits de la rivière et des débits captés à Néblon-le-Moulin.

On peut schématiser la composition des exutoires en fonction de l'importance des trois composantes principales de l'écoulement :

- le ruissellement de surface  $Q_s^1$ ,
- l'écoulement souterrain rapide via les conduits karstiques  $Q_d^2$ ,
- l'écoulement de base des réserves  $Q_b$ .

<sup>1</sup>Y compris les écoulements hypodermiques.

<sup>2</sup>Y compris le ruissellement de surface alimentant les pertes.

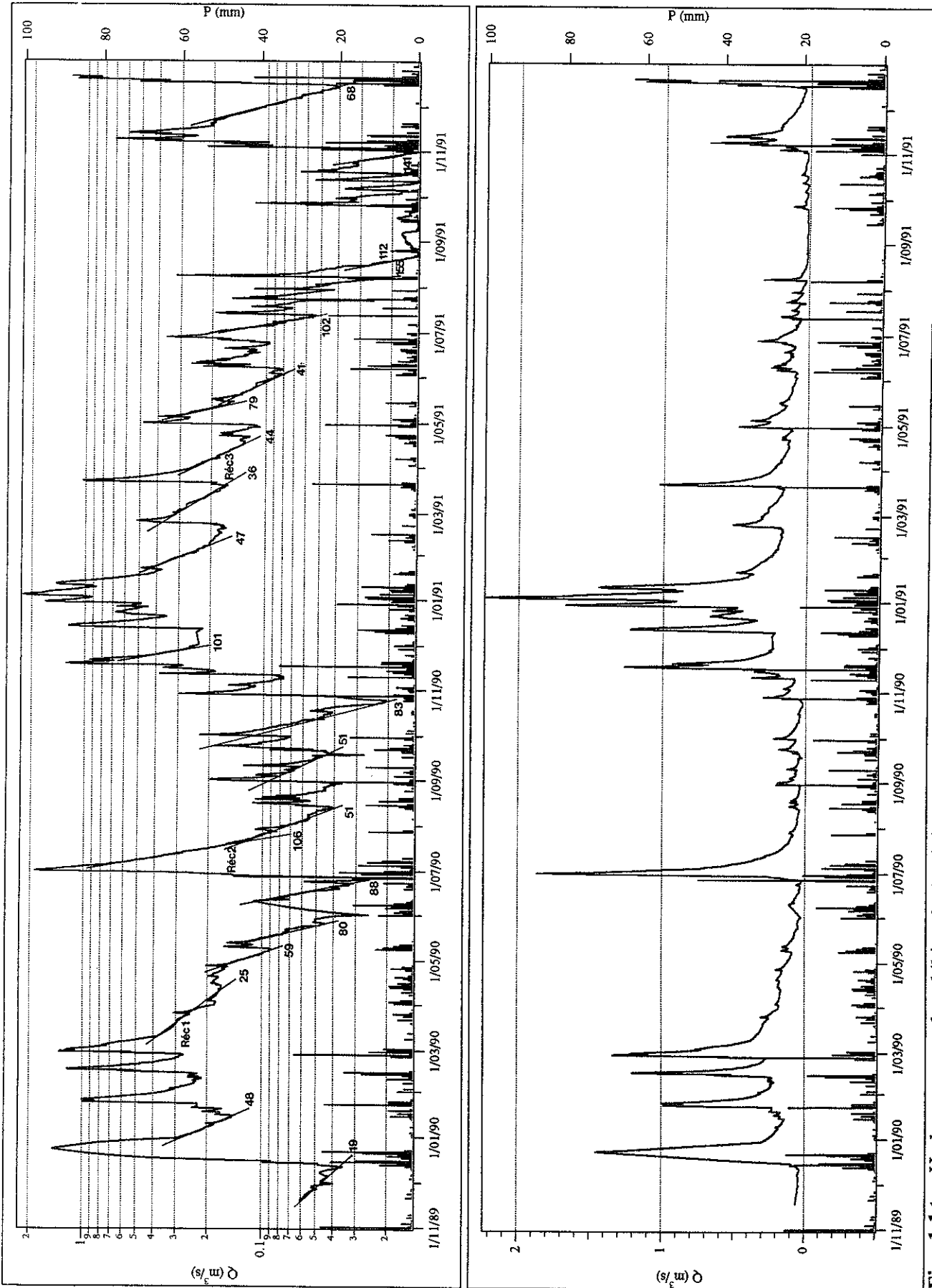
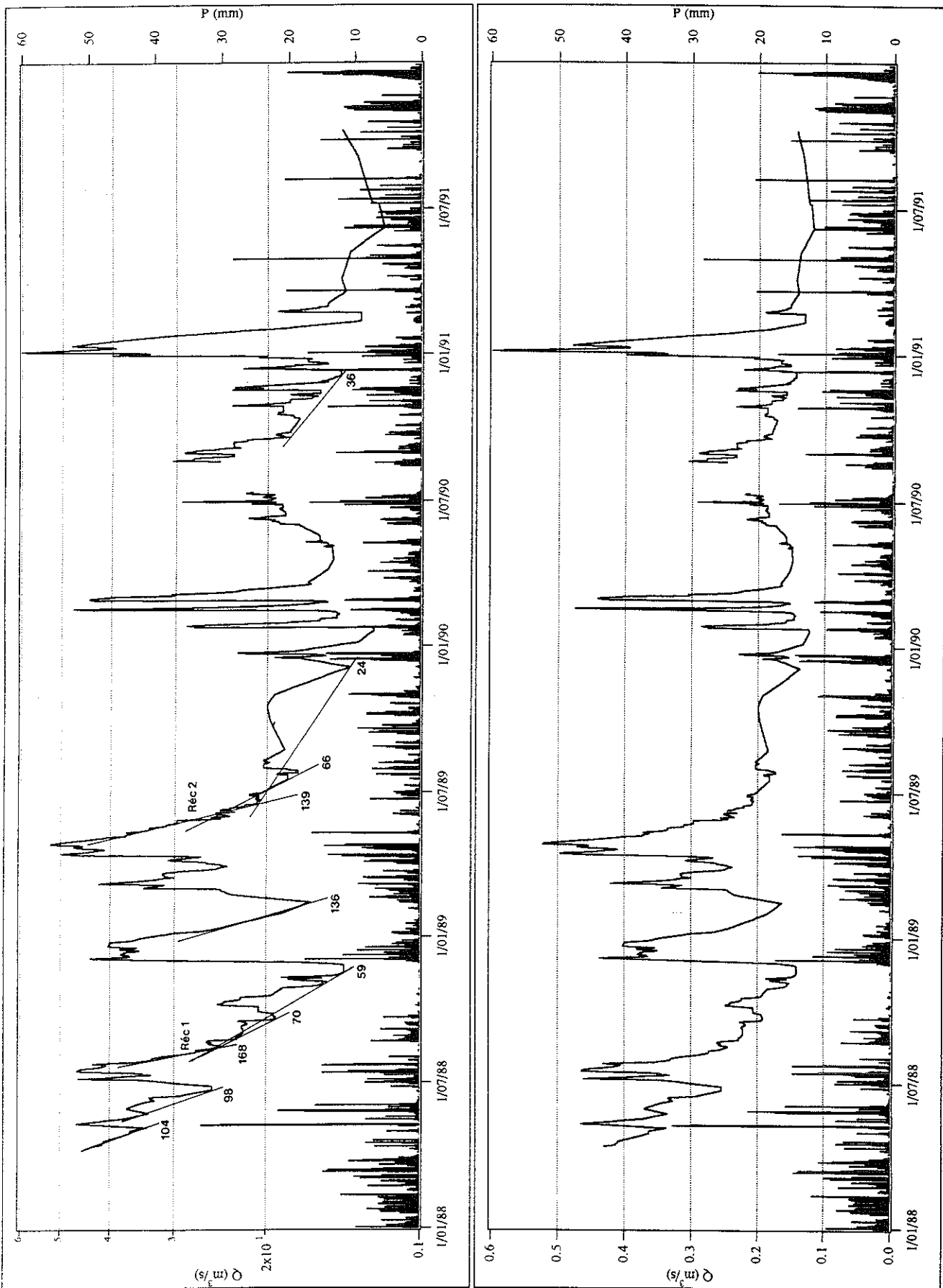
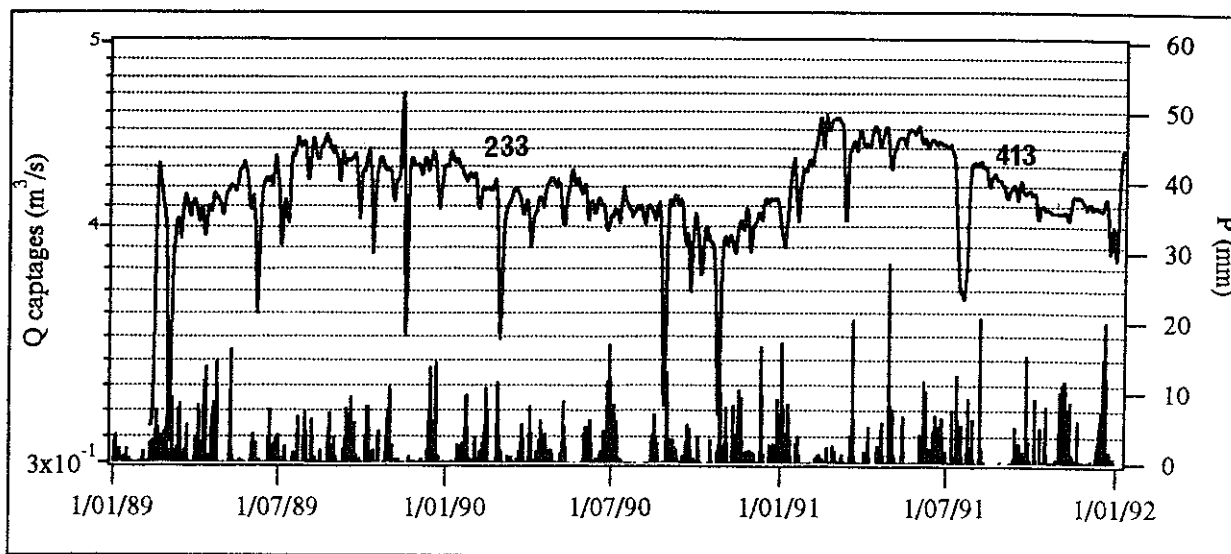


Fig. 1.14 : Hydrogramme des débits de la rivière souterraine de Remouchamps, en ordonnée normale et logarithmique pour la période du 18/11/89 au 21/12/92. Figurent également les précipitations à Cornemont (échelle de droite), les droites de tarissement avec leurs coefficients exprimés en  $10^{-3} \text{ j}^{-1}$  ainsi que la position des courbes de récession étudiées (Réc 1, Réc 2 et Réc 3).



**Fig. 1.15 :** Hydrogramme des débits à la résurgence du Moulin à Comblain-au-Pont, en ordonnée normale et logarithmique pour la période du 13/04/88 au 8/10/91. Figurent également les précipitations à Ouffet (échelle de droite), les droites de tarissement avec leurs coefficients exprimés en  $10^{-4} \text{ j}^{-1}$  ainsi que la position des courbes de récession étudiées (Réc 1 et Réc 2).



**Fig. 1.16** : Hydrogramme des débits captés à Néblon-le-Moulin, en ordonnée logarithmique pour la période du 12/02/89 au 7/01/92. Figurent également les précipitations à Ouffet (échelle de droite) ainsi que les coefficients de tarissement apparents exprimés en  $10^{-6} \text{ j}^{-1}$ .

En ce qui concerne les bassins étudiés, la situation est résumée dans le tableau suivant :

BASSIN	EXUTOIRE	Qs	Qd	Qb
Néblon	Néblon	élevé	faible	moyen
	sources captées à Néblon-le-Moulin	-	faible	élevé
Anthisnes	résurgence du Moulin	-	moyen	élevé
Remouchamps	Rubicon	-	élevé	moyen

Si on considère les exutoires exclusivement souterrains (captages de Néblon-le-Moulin, résurgence d'Anthisnes et Rubicon), on note, dans l'ordre, une importance croissante de la composante rapide par rapport à l'écoulement de base. Cette importance croissante de la composante rapide est liée au degré de karstification des bassins : le bassin de Remouchamps a atteint le stade de maturité tandis que ceux d'Anthisnes et du Néblon sont toujours au stade de jeunesse.

Plusieurs aspects de l'hydrodynamique seront envisagés :

- l'examen des caractéristiques de l'écoulement permettra de mesurer l'importance de la karstification;
- l'étude des bilans permettra de caractériser l'importance des réserves et la recharge de la nappe;



- l'étude des hydrogrammes et de la piézométrie apporteront également des informations sur les réserves et leur renouvellement. Il est en effet établi (KIRALY, 1978) que les courbes de décrue des sources karstiques sont les indications indirectes les plus importantes sur la structure du champ des perméabilités d'un aquifère karstique. L'allure des courbes de récession et de tarissement sera prise en compte pour calculer les paramètres intervenant dans la classification des aquifères karstiques établie par MANGIN (1975). Ces paramètres caractérisent les réserves et les modalités de l'infiltration;

- l'étude des courbes de débits classés nous renseignera sur le fonctionnement de la source en tant que trop-plein, sur l'existence de trop-pleins inconnus et sur d'éventuels apports temporaires en provenance des systèmes voisins;

- l'analyse corrélatoire et spectrale (MANGIN, 1984), appliquée aux chroniques des pluies, des débits et des niveaux d'eau dans les piézomètres, s'avérera très intéressante car elle mettra en évidence l'importance relative des réserves et le pouvoir régulateur des différents systèmes;

- enfin, l'étude comparative des transmissivités et des perméabilités, obtenues par des tests de pompage sur différents sites dans les calcaires carbonifères, nous donnera un aperçu de la variabilité de ces paramètres. Cette variabilité est liée à l'hétérogénéité du milieu calcaire.

### 1.5.1. Caractéristiques de l'écoulement

- Le bassin versant du Néblon a une superficie de 66,24 km<sup>2</sup>, dont 75 % environ sont occupés par les calcaires dinantiens. Les exutoires sont : d'une part le Néblon, d'autre part les sources captées à Néblon-le-Moulin. La nappe calcaire se décharge partiellement dans le cours du Néblon, dont la composante principale reste cependant le ruissellement. La majeure partie de la décharge souterraine a lieu via les galeries de captage. Durant l'année 85-86, l'écoulement par les galeries de captage a représenté environ 65 % de l'écoulement total du bassin.

Les caractéristiques de l'écoulement du Néblon (rivière), calculées pour une période d'un an (85-86), sont les suivantes :

$$Q_m \text{ (débit moyen)} = 340 \text{ l/s (écart-type} = 266 \text{ l/s)}$$

$$Q_{\max} \text{ (débit maximal)} = 1472 \text{ l/s} \quad Q_{\min} \text{ (débit minimal)} = 98 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 15$$

Le volume annuel écoulé dans la rivière atteint 10,708.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, ce qui, rapporté à la superficie du bassin, représente une lame d'eau annuelle de 161 mm.

Si on ajoute à ce volume celui des captages, en considérant le débit moyen de 35726 m<sup>3</sup>/j durant un an, on obtient un volume total écoulé (Néblon + captages) de 23,748.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, soit une lame d'eau de 358 mm.

Les pluies, pour la même période, en considérant la moyenne de toutes les stations du bassin, représentent une lame d'eau de 805 mm.

Le rapport Q/P (coefficient d'écoulement) du volume total écoulé à celui des précipitations vaut donc dans ce cas :

$$Q/P = 0,45$$

Il dépend non seulement du climat et des caractéristiques physiologiques du bassin, mais également de l'infiltration efficace. Cette infiltration efficace dépend de la perméabilité de la zone d'infiltration et de la fréquence des points de perte.

Si on considère à présent, non plus une période d'un an mais l'année hydrologique (un tarissement ayant généralement lieu en automne), le coefficient d'écoulement devient :

$$Q/P = 0,35 \quad (Q = 231 \text{ mm}, P = 664 \text{ mm})$$

Pour la période du 12/2/89 au 7/1/92 (fig. 1.24), les caractéristiques de l'écoulement dans les galeries de captage sont les suivantes :

$$Q_m = 417 \text{ l/s} \quad (\text{écart-type} = 22 \text{ l/s})$$

$$Q_{\max} = 456 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 380 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 1,19$$

Les variations de débit exceptionnellement faibles témoignent de la vidange lente des réserves et de l'absence d'une composante rapide de l'écoulement<sup>1</sup>.

L'écoulement souterrain spécifique  $Q_s^2$  vaut pour la même période, en considérant la superficie du bassin occupée par les calcaires :

$$Q_s = 8,39 \text{ l/s/km}^2$$

Cette valeur est faible en comparaison des valeurs rencontrées dans la littérature (de 15 l/s/km<sup>2</sup> pour l'aquifère de Fontaine de Vaucluse à 66 l/s/km<sup>2</sup> pour celui de la Pierre-St-Martin, in GIBERT, 1986).

Elle est sous-estimée car on n'a pas tenu compte de la vidange de la nappe le long du Néblon. Dans l'hypothèse peu réaliste où le débit de celui-ci proviendrait entièrement de la nappe, l'écoulement spécifique n'atteindrait encore que 14,7 l/s/km<sup>2</sup>. Une valeur aussi faible est liée d'une part au climat (peu de précipitations), d'autre part aux facteurs limitant l'infiltration efficace (couverture de limons, faible taux de karstification).

<sup>1</sup>Cette constatation doit être nuancée. En effet, à la composante lente peut temporairement se superposer une composante rapide rendant la source très vulnérable comme cela a été observé au cours du traçage entre la perte du bois de Marsée et la galerie Communale (voir § 1.7.7.2.). Cette composante est toutefois négligeable en dehors des périodes de hautes eaux.

<sup>2</sup>Débit moyen rapporté à la superficie du bassin.

Pour l'année hydrologique 89-90 (du 12/12/89 au 24/10/90), les caractéristiques de l'écoulement dans les galeries sont :

$$Q_m = 410 \text{ l/s (écart-type 16 l/s)}$$

$$Q_{\max} = 427 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 380 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 1,12$$

Le volume écoulé est de  $1,121 \cdot 10^7 \text{ m}^3$  pour un volume des précipitations de  $3,822 \cdot 10^7 \text{ m}^3$

Pour l'année hydrologique 90-91 (du 25/10/90 au 11/9/91), les caractéristiques sont :

$$Q_m = 425 \text{ l/s (écart-type 24 l/s)}$$

$$Q_{\max} = 456 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 389 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 1,17$$

Le volume écoulé est de  $1,184 \cdot 10^7 \text{ m}^3$  pour un volume des précipitations de  $3,974 \cdot 10^7 \text{ m}^3$

Les caractéristiques varient peu d'un cycle à l'autre, montrant le pouvoir régulateur de la nappe. Les précipitations, plus abondantes durant le cycle 90-91, sont responsables d'un débit moyen plus élevé, ce qui n'a pas empêché la nappe de continuer la descente entamée depuis 88 (voir fig. 1.17 au § 1.5.3.1.). Il s'agit d'une des caractéristiques majeures de la nappe des calcaires dans la région étudiée, à savoir sa grande inertie. Cette inertie sera mieux définie lorsque nous calculerons des temps de séjour dans l'aquifère (§ 1.5.3.1.) et lorsque nous ferons appel à l'analyse corrélatrice et spectrale (§ 1.5.5.2.).

- Le bassin versant d'Anthisnes a pour exutoire principal la résurgence du Moulin à Comblain-au-Pont. Sa superficie est de  $26,01 \text{ km}^2$ . Les terrains famenniens occupent environ 20 % de cette superficie. A un écoulement de base correspondant à la vidange lente des réserves vient cette fois se superposer une composante d'écoulement rapide ( $Q_d$ ). Cette composante dépend surtout des infiltrations dans les chantoirs situés en amont.

Les caractéristiques de l'écoulement, pour la période du 13/4/88 au 8/10/91, sont les suivantes :

$$Q_m = 217 \text{ l/s (écart-type = 88 l/s)}$$

$$Q_{\max} = 599 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 118 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 5,08$$

Les variations de débit sont plus importantes que dans le cas des sources du Néblon (1,19, écoulement de base prépondérant) mais moins importantes que dans le cas du Néblon lui-même (15, ruissellement prépondérant).

L'écoulement souterrain spécifique  $Q_s$ , en tenant compte uniquement de la superficie occupée par les calcaires vaut :

$$Q_s = 10,42 \text{ l/s/km}^2$$

Il est un peu plus élevé que celui du bassin du Néblon, du fait de l'infiltration efficace plus importante causée par un plus grand nombre de pertes.

L'année hydrologique 88-89 (du 26/11/88 au 5/12/89) est caractérisée par :

$$Q_m = 247 \text{ l/s (écart-type 86 l/s)}$$

$$Q_{\max} = 521 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 137 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 3,8$$

Le volume écoulé est de  $8,041.10^6 \text{ m}^3$  (309 mm) et celui des précipitations (station de Ouffet) de  $18,985.10^6 \text{ m}^3$  (730 mm).

Le coefficient d'écoulement  $Q/P$  vaut :

$$Q/P = 0,42$$

Pour l'année hydrologique 89-90 (du 6/12/89 au 11/12/90) on a :

$$Q_m = 190 \text{ l/s (écart-type 51 l/s)}$$

$$Q_{\max} = 486 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 124 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 3,9$$

Le volume écoulé est de  $6,068.10^6 \text{ m}^3$  (309 mm) et celui des précipitations (station de Ouffet) de  $18,217.10^6 \text{ m}^3$  (700 mm).

Le coefficient d'écoulement  $Q/P$  vaut :

$$Q/P = 0,33$$

L'année 89-90 est une année plus sèche que 88-89.

Les coefficients d'écoulement (0,33 à 0,42) sont du même ordre de grandeur que celui observé pour l'année hydrologique 85-86 dans le cas du bassin du Néblon (0,35). On peut cependant difficilement comparer des valeurs correspondant à des années hydrologiques différentes.

- Le système karstique du "vallon des chantoirs" a un bassin versant hydrologique d'une superficie de  $27,33 \text{ km}^2$  (superficie au niveau du siphon amont où se trouve placé le limnigraphe), dont seulement 20 % comportent des terrains calcaires. L'exutoire est la rivière souterraine dont les eaux parcourent la grotte de Remouchamps. Les réserves sont peu importantes. L'essentiel du débit provient de l'alimentation par les nombreux chantoirs ( $Q_d$ ).

Ceux-ci sont eux-mêmes alimentés par des aquifères superficiels dans les formations non karstiques. En 1990, la rivière s'est trouvée complètement asséchée à l'intérieur de la cavité.

Les caractéristiques de l'écoulement, pour la période du 18/11/89 au 21/12/91, sont :

$$Q_m = 230 \text{ l/s (écart-type} = 285 \text{ l/s)}$$

$$Q_{\max} = 2200 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 14 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 158$$

Le débit est très variable et le rapport  $Q_{\max}/Q_{\min}$  est très élevé en comparaison des bassins du Néblon et d'Anthistes. La karstification est à l'origine de conduits karstiques très développés.

L'écoulement souterrain spécifique  $Q_s$ , en tenant compte de la proportion des terrains calcaires, vaut :

$$Q_s = 42 \text{ l/s/km}^2$$

Il est nettement plus élevé que ceux des bassins d'Anthistes et du Néblon, confirmant le caractère plus karstique du bassin de Remouchamps.

L'année hydrologique 89-90 (du 12/12/89 au 24/10/90) montre les caractéristiques suivantes :

$$Q_m = 239 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max} = 1866 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 21 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 89$$

Le volume écoulé est de  $6,536.10^6 \text{ m}^3$  (239 mm) et celui des précipitations (station de Cornemont) de  $20,251.10^6 \text{ m}^3$  (741 mm).

Le coefficient d'écoulement  $Q/P$  vaut :

$$Q/P = 0,32$$

L'année hydrologique 90-91 (du 25/10/90 au 11/09/91) est caractérisée par :

$$Q_m = 270 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max} = 2222 \text{ l/s} \quad Q_{\min} = 14 \text{ l/s}$$

$$Q_{\max}/Q_{\min} = 158$$

Le volume écoulé est de  $7,516.10^6 \text{ m}^3$  (275 mm) et celui des précipitations (station de Cornemont) de  $18,748.10^6 \text{ m}^3$  (686 mm).

Le coefficient d'écoulement  $Q/P$  vaut :

$$Q/P = 0,40$$

Si le volume écoulé est plus important en 91 qu'en 90, les précipitations sont par contre plus faibles. Cela peut être dû à la surestimation des volumes précipités au cours des averses orageuses durant le cycle 89-90. Par exemple, la crue la plus importante de toute la période d'observation (fig. 1.14) fait suite à une série d'averses exceptionnelles fin juin 90 (85 mm en 6 jours). Ces averses estivales, étant très localisées, ont pu faire surestimer la quantité d'eau effectivement tombée sur le bassin.

On notera pour terminer que les précipitations en 90 et 91 sont sensiblement plus importantes dans le bassin de Remouchamps (741 et 686 mm) que dans la région d'Ouffet-Anthisnes (577 et 600 mm).

On trouvera un résumé des principales caractéristiques de l'écoulement dans les trois bassins étudiés dans le tab. 1.2 présenté comme conclusion du chapitre (§ 1.5.7.).

Dans le même paragraphe, on trouvera également la classification établie par DODGE (1984) sur les aquifères karstiques du Causse Comtal. DODGE (fig. 1.32) fait intervenir le rapport  $Q_{max}/Q_{min}$ , ainsi que d'autres paramètres tels que l'écoulement spécifique d'étiage, le coefficient de tarissement et le débit maximum.

Cette classification nous a paru intéressante car elle tient compte du fait que la karstification est généralisée à l'ensemble du système ou qu'elle est, au contraire, limitée dans l'espace.

Les rapports  $Q_{max}/Q_{min}$  annoncés par DODGE sont largement supérieurs (minimum 13) à ceux rencontrés dans le cas des sources du Néblon ou de la résurgence de Comblain. Le système de Remouchamps, avec un  $Q_{max}/Q_{min}$  de 158, rentre dans la catégorie des aquifères les plus karstifiés ( $Q_{max}/Q_{min}$  jusqu'à 556).

MATHEY (1976) compare les rapports  $Q_{max}/Q_{min}$  de plusieurs émergences jurassiennes dans le Jura neuchâtelois. Ce rapport vaut 181 pour la source de l'Areuse, 82 pour celle de la Noiraigue et moins de 60 pour la source de la Serrière. Selon l'auteur, le rapport  $Q_{max}/Q_{min}$  dépend principalement de la perméabilité du réseau karstique à proximité de l'exutoire. MATHEY fait aussi remarquer que le "tamponnement" d'une source karstique peut provenir de l'existence de trop-pleins (débits de pointe réduits) ou de réserves importantes (débit d'étiage soutenu), éventuellement non karstiques.

### 1.5.2. Bilans hydrologiques

Le bilan hydrologique d'un bassin peut être exprimé par la relation suivante :

$$P = Q + ETR + \Delta R + \Delta \text{stock} + \varepsilon$$

où

P = les précipitations

Q = l'écoulement

ETR = l'évapotranspiration réelle

$\Delta R$  = la variation des réserves d'eaux souterraines

$\Delta \text{stock}$  = la variation du stock d'humidité du sol

$\varepsilon$  = l'écart de fermeture

Il peut être exprimé en volume ou en lame d'eau, mais doit dans tous les cas tenir compte de la superficie du bassin d'alimentation au point considéré pour les mesures de débit. Ainsi le bilan peut également être calculé par sous-bassin versant.

La différence  $P - \text{ETR} - \Delta \text{stock}$  est parfois appelée "eau utile". C'est l'eau encore disponible pour alimenter l'infiltration vers la nappe et le ruissellement, déduction faite de l'évapotranspiration et de l'alimentation des réserves du sol.

Les précipitations sont évaluées à partir des pluies enregistrées aux différentes stations météorologiques du bassin, en appliquant éventuellement la méthode des polygones de Thiessen lorsqu'on dispose d'un nombre suffisant de stations.

L'écoulement est évalué à partir des débits aux différents exutoires (cours d'eau de surface et souterrains).

L'évapotranspiration réelle peut être calculée suivant diverses méthodes, depuis les formules empiriques simples comme celle de TURC (en fonction des pluies et de la température moyenne annuelle) jusqu'à des méthodes plus élaborées telles que la méthode de THORNTHWAITE, qui tiennent compte de l'évolution du stock d'humidité disponible du sol, généralement calculé par décades.

La variation des réserves est calculée à partir des coefficients de tarissement, sur base du modèle de MAILLET (décroissance exponentielle des débits), en tenant compte des tarissements successifs observés durant la période du bilan.

La variation du stock d'humidité est calculée parallèlement au calcul de l'ETR en prenant une valeur fixe du stock d'humidité au départ. Cette valeur peut varier suivant la nature du sol ou suivant les régions mais elle est prise en général voisine de 100 mm dans nos régions.

Un écart de fermeture différent de zéro permettra de conclure à la mésestimation d'un des paramètres du bilan ou à la non concordance entre le bassin versant topographique et le bassin hydrogéologique.

Celui-ci doit être calculé sur la période la plus longue possible. Il doit, pour bien faire, débiter après une période sans pluie et se terminer à la fin d'une période de tarissement. De cette manière, on est certain de ne prendre en compte que l'écoulement correspondant aux pluies effectivement tombées durant la période sur laquelle s'étend le calcul. En pratique, on prend souvent pour période l'année hydrologique (de la fin d'un tarissement automnal à la fin du tarissement automnal suivant).

GHYSEL (in CILE, LGIH, INIEX, 1986) a calculé les bilans hydrologiques du bassin du Néblon et de tous ses sous-bassins, pour différentes périodes, dont la plus longue s'étend du 1/11/85 au 20/10/86. Il distingue ainsi trois types de sous-bassins, suivant les écarts de fermeture des bilans :

- des bassins à très petites réserves comme ceux à substrat essentiellement famennien, dont les déficits d'écoulement sont importants (pouvant atteindre jusqu'à 239 mm comme celui de l'Abîme),
- des bassins à perméabilité intermédiaire, dont les bilans ferment assez bien (ex. Guévelettes),
- des bassins à substrat essentiellement calcaire, pour la plupart desquels on enregistre un excédent (ex. Vervo).

Le bilan général du bassin, à l'exutoire de Néblon-le-Moulin, en tenant compte des débits captés et des mesures au limnigraphe, accuse un excédent d'écoulement de 30 mm alors que le bilan calculé en tenant compte des débits hebdomadaires (lectures sur une échelle limnimétrique) ferme plutôt bien ( $\epsilon = 8$  mm). Ce dernier bilan semble plus fiable car il couvre une année hydrologique complète, contrairement au premier (7 mois). L'auteur admet une assez bonne concordance entre les limites du bassin versant hydrologique et celles du bassin versant hydrogéologique, malgré quelques échanges probables avec les deux bassins voisins (Hoyoux et Anthisnes) via les zones les plus fracturées des calcaires.

A titre indicatif, le bilan du bassin du Néblon, calculé pour l'année hydrologique 85-86 en utilisant la formule de TURC<sup>1</sup> et en négligeant les variations de réserve de l'aquifère et de stock d'humidité du sol, s'établit de la manière suivante (en mm) :

$$P - Q - ETR = \epsilon = 664 - 231 - 425 = 7 \text{ mm}$$

Le déficit, du même ordre de grandeur que celui obtenu par la méthode de THORNTHWAITE (sans négliger ni variation de réserve, ni variation de stock), peut provenir aussi bien de la négligence de ces deux paramètres que de la surestimation de la superficie du bassin versant hydrogéologique ou de la sous-estimation de l'évapotranspiration. On verra plus loin (§ 1.5.3.1.) qu'en raison de l'inertie de la nappe, les variations interannuelles des réserves ne sont pas négligeables.

BERGER (in CILE, LGIH, INIEX, 1989) a calculé les bilans hydrologiques du bassin d'Anthisnes et de tous ses sous-bassins selon la même méthode que GHYSEL. Le bassin d'Anthisnes se distingue du précédent par le fait que l'écoulement y est presque entièrement souterrain et collecté par une émergence unique. Les bilans, calculés pour la période de mai à novembre 88, montrent un déficit systématique pour tous les sous-bassins, de même que pour le bassin pris dans son ensemble (85 mm).

<sup>1</sup>La formule de Turc  $ETR = P \times (0,9 + P^2/L^2)^{-1/2}$  avec  $L = 300 + 25 \times T + 0,05 \times T^3$  et T la température moyenne annuelle, est en principe utilisée pour l'année civile et en prenant des valeurs moyennes sur un grand nombre d'années. L'appliquer à une année hydrologique en particulier permet seulement de fixer les idées.



Selon nous, ces déficits systématiques pourraient provenir de la période de calcul pour laquelle, par exemple, la diminution des réserves et celle du stock d'humidité du sol auraient été surestimées. Il est également possible que l'imprécision des mesures de débit ait conduit à sous-estimer le volume total écoulé. Les mêmes bilans, calculés sur une année complète (8 avril au 28 mars), sans tenir compte de la variation de réserve, montrent à nouveau un déficit de 34 mm pour le bassin pris dans son ensemble. Les excès et les déficits des sous-bassins versants, quant à eux, se compensent. Le déficit du bassin pris dans son ensemble ne peut plus, cette fois, s'expliquer par la diminution exagérée des réserves. Il n'en a en effet pas été tenu compte dans le calcul du bilan annuel. Les enregistrements des niveaux piézométriques (§ 1.5.3.1) indiquent une baisse très importante de la nappe. Il est plus vraisemblable que le déficit calculé provienne de la sous-estimation des débits à l'exutoire. Cette sous-estimation pourrait provenir d'une part de sorties occultes dans le lit de l'Ourthe, d'autre part de l'imprécision des jaugeages.

A titre de comparaison, les écarts de fermeture des bilans calculés pour les années hydrologiques 88-89 et 89-90 avec la formule de TURC valent respectivement -76 et -22 mm. Il s'agit cette fois d'un excès d'écoulement qui pourrait être dû à la surestimation de l'évapotranspiration. En effet, une partie de l'écoulement échappe directement à l'évapotranspiration en s'enfouissant dans les pertes.

Pour le bassin de Remouchamps, la formule de TURC permet de calculer les bilans suivants :

$$\text{pour 89-90} \quad P - \text{ETR} - Q = \varepsilon = 741 - 491 - 239 = 11 \text{ mm}$$

$$\text{pour 90-91} \quad P - \text{ETR} - Q = \varepsilon = 686 - 475 - 275 = -64 \text{ mm}$$

Nous avons vu que la pluie, en 89-90, avait sans doute été surestimée. Le bilan pour cette année devrait donc en réalité donner un écart plus faible, voire négatif comme c'est le cas pour le bilan de 90-91. L'excès d'écoulement pourrait alors à nouveau être dû à la surestimation de l'évapotranspiration, les eaux étant drainées efficacement par les nombreuses pertes vers les profondeurs du massif.

En ce qui concerne les variations interannuelles de la recharge, les niveaux piézométriques (§ 1.5.3.1.) constituent une bien meilleure indication que le calcul des bilans car ils montrent de manière directe l'évolution des réserves. La traduction en termes de volumes d'eau, en fonction de la porosité effective, n'est toutefois pas évidente étant donné l'hétérogénéité de cette porosité. C'est la raison pour laquelle nous aurons recours, dans le paragraphe suivant, aux courbes de tarissement afin de quantifier la vidange des réserves.

### 1.5.3. Etude des hydrogrammes

Contrairement aux autres types d'aquifères qui ne possèdent pas de conduits transmissifs, le débit aux exutoires des systèmes karstiques est la superposition de deux composantes d'écoulement, l'une rapide ( $Q_d$ , écoulement de crue, "conduit flow"), l'autre lente ( $Q_b$ , débit de base, "diffuse flow").

La composante rapide peut souvent être assimilée à un ruissellement souterrain. Des méthodes utilisées en hydrologie de surface ont, pour cette raison, été appliquées au karst. Dans le détail, cependant, le fonctionnement est bien plus complexe et une partie de cet écoulement rapide peut avoir lieu dans la zone noyée (cas des sources vauclusiennes).

Un modèle conceptuel simple permet de tenir compte de la "double perméabilité". Il considère l'aquifère comme formé de deux réservoirs interconnectés, l'un rapide et l'autre lent (le réservoir lent alimentant le rapide). Ce modèle a toutefois conduit à des interprétations erronées, notamment lors de l'utilisation de la chimie et des isotopes pour effectuer la décomposition de l'hydrogramme. Souvent, en effet, la fonction "capacitive" des drains (leur inertie en quelque sorte) a été négligée. Il faut par conséquent bien distinguer la "réponse hydrodynamique" (transfert de charge) du "temps de passage" (transit de matière).

Des modèles conceptuels à caractère déterministe ont été développés, d'une part en supposant un minimum d'hypothèses sur la physique des transferts, d'autre part en explicitant au mieux la dynamique de ces transferts. MANGIN (1975) a particulièrement étudié le problème des pertes de charges et la validité d'application des lois d'écoulement en milieu poreux au cas des aquifères karstiques.

L'hydrogramme de crue est divisé en :

- la montée de la crue (augmentation du débit),
- la récession de la crue (diminution du débit).

La récession est elle-même divisée en :

- la décrue (influence persistante de l'infiltration rapide,  $Q_d + Q_b$ ),
- le tarissement (vidange des réserves,  $Q_b$ ).

En ce qui concerne la vidange des réserves (tarissement), le modèle de MAILLET, basé sur une décroissance exponentielle du débit suivant :

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{où } \alpha \text{ est le coefficient de tarissement,} \quad (1)$$

a toujours donné entière satisfaction dans le cas des aquifères karstiques. Le modèle physique correspondant est celui d'un aquifère libre drainé par un exutoire poreux où le débit suit la loi de DARCY (COLLIGNON, 1988).

D'après COLLIGNON (1988), l'intérêt de ce modèle tient à sa simplicité et à son efficacité pour décrire le tarissement, après la décrue. Il ne faudrait cependant pas en tirer la conclusion que les écoulements dans les drains karstiques suivent la loi de DARCY (ce que contredisent toutes les observations). En fait, c'est le comportement global du système karstique qui répond assez bien au modèle, en intégrant les écoulements dans toute une série de conduits.

Le modèle de MAILLET est mis à profit dans le calcul du volume des réserves en eau - réserves écoulables ou encore volume dynamique<sup>1</sup> - de l'aquifère, en intégrant l'expression (1) depuis le début du tarissement jusqu'à l'infini.

<sup>1</sup>Le volume dynamique est défini comme le volume du karst noyé dont l'écoulement détermine les variations de débit à l'exutoire.

D'autres formules peuvent être utilisées pour décrire le tarissement telles que celle de TISON :

$$Q(t) = \frac{Q_0}{(1+\alpha t)^2}$$

ou celle de FORKASIEWICZ et PALOC, généralisée par DROGUE (1972), et applicable cette fois à l'ensemble de la courbe de récession :

$$Q(t) = \frac{Q_0}{(1+\beta t Q_0^{1/n})^n}$$

SCHOELLER, cité par MANGIN (1975), utilise, quant à lui, des formules basées sur la superposition des vidanges de plusieurs réservoirs, afin de tenir compte à la fois du réseau de fentes et du réseau de conduits. Nous avons déjà souligné le danger de tels modèles qui ne prennent pas en compte, ou très mal, les relations existant entre les deux réservoirs.

Un modèle idéal serait celui qui tient compte à la fois de la vidange de la zone saturée et de l'alimentation de celle-ci par la zone d'infiltration. Partant de cette idée, MANGIN (1975) utilise comme expression du débit :

$$Q(t) = \varphi(t) + \psi(t)$$

où  $\varphi(t)$  et  $\psi(t)$  sont des fonctions se rapportant respectivement au karst noyé et à l'infiltration.

Pour la fonction  $\varphi(t)$ , il utilise la formule de décroissance exponentielle de MAILLET (1) et, pour  $\psi(t)$ , il utilise une fonction homographique du type :

$$\psi(t) = q_0 \frac{1-\eta' t}{1+\varepsilon t}$$

où

$q_0$  = le débit dû à la crue (infiltration) au début de la décrue

$\eta'$  = un paramètre reflétant la durée (ou vitesse) d'infiltration

$\varepsilon$  = le "coefficient d'hétérogénéité", caractérisant la manière suivant laquelle la décrue ralentit.

L'imprécision sur les paramètres obtenus provient de la difficulté de fixer le début du tarissement, l'infiltration retardée pouvant agir très longtemps.

Il est rare que l'on trouve un seul et unique jeu de valeurs des paramètres. Ceux-ci varient suivant l'importance et la position de la crue dans le cycle hydrologique.

### 1.5.3.1. COURBES DE TARISSEMENT ET EVOLUTION DE LA PIEZOMETRIE

Pour l'exutoire du bassin du Néblon pris dans son ensemble, l'hétérogénéité du bassin, composé de plusieurs aquifères (Dinantien, Famennien, Namurien), et le décalage dans le temps des tarissements respectifs, rendent le calcul des réserves écoulables particulièrement difficile.

GHYSEL (in CILE, LGIH, INIEX, 1986), en étudiant séparément chaque sous-bassin versant du Néblon, trouve, pour les terrains non karstiques, des réserves maximales dépassant rarement les 60 mm.

Pour les sous-bassins versants famenniens dans le bassin d'Anthisnes, BERGER (in CILE, LGIH, INIEX, 1989) trouve des valeurs nettement plus élevées, atteignant par exemple 234 mm à Lizin.

Les différences de réserves entre les deux régions pourraient provenir de la situation géographique des sous-bassins. A Anthisnes, ces derniers sont limités au flanc Nord du synclinal, alors que dans le bassin du Néblon, ils occupent principalement le flanc Sud de la vallée. Cela pourrait également à nouveau être lié à la différence d'érosion entre ces deux secteurs (voir § 1.1.). Les grès du flanc Nord du synclinal d'Anthisnes auraient subi une dissolution plus importante que ceux du flanc Sud de la vallée du Néblon. Cette dissolution serait principalement due à la karstification de la fraction carbonatée de la matrice des grès (EK, 1969), ayant pour conséquence l'augmentation de la porosité de l'aquifère.

#### *Réserves karstiques dans le bassin du Néblon*

Sur la courbe de la fig. 1.16 (débits des galeries de captage du Néblon), on note une évolution très lente des débits. Chaque décroissance peut être considérée comme le tarissement des réserves de la nappe des calcaires dinantiens. Les maxima de la recharge ont lieu vers mai-juin tandis que les minima ont lieu vers septembre-octobre. En raison de la grande inertie de la nappe, on n'observe pas de minimum secondaire correspondant à la période de basses eaux en hiver.

Seuls les deuxième et troisième cycles conviennent pour le calcul des coefficients de tarissement. Pour 89-90, le coefficient de tarissement obtenu vaut :

$$\alpha = 0,000233 \text{ j}^{-1}$$

Pour 90-91, il est deux fois plus élevé :

$$\alpha = 0,000413 \text{ j}^{-1}$$

Traduits en termes de réserves maximales ( $Q_0/\alpha$ ), ces coefficients donnent des valeurs de 2474 mm ( $164 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) et 1437 mm ( $95 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) respectivement.

Ces valeurs sont très élevées et dépassent de loin les réserves renouvelables (quantité d'eau qui s'écoule annuellement dans les galeries : 170 mm pour 89-90 et 180 mm pour 90-91).

Elles sont largement surestimées pour les deux raisons principales suivantes :

- on n'a pas tenu compte de la réalimentation progressive de la nappe (infiltration efficace) durant la période considérée pour le tarissement ;
- les débits captés par les galeries ne représentent pas l'entièreté de la vidange de la nappe. Ces débits sont en quelques sorte régulés, les trop-pleins n'étant pas considérés.

Les coefficients de tarissement obtenus sont par conséquent des coefficients "apparents". Le calcul des coefficients réels nécessiterait la connaissance du débit souterrain total s'écoulant à Néblon-le-Moulin ainsi que du débit d'alimentation de la nappe par l'infiltration lente.

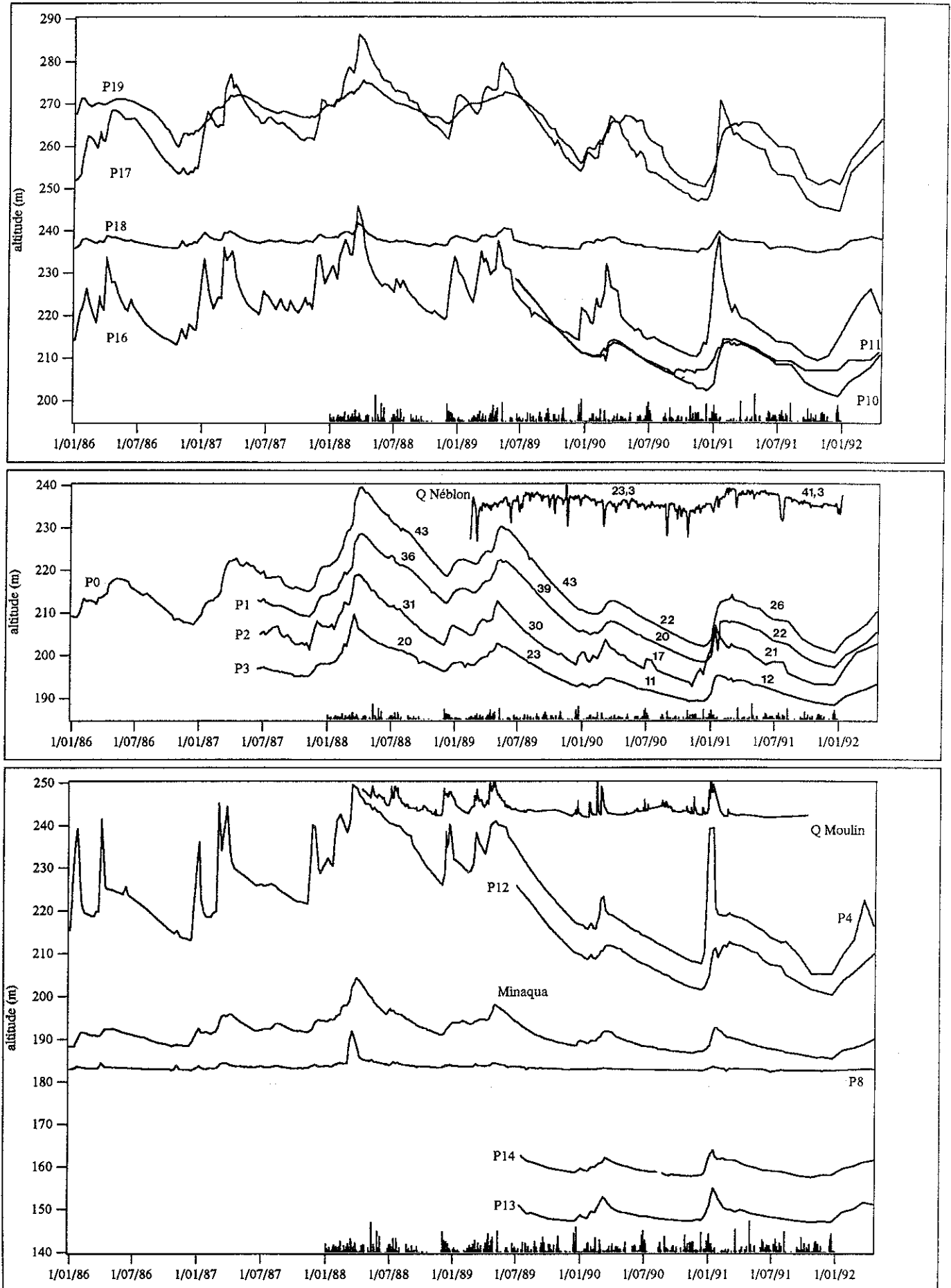
Si le modèle de MAILLET est valable, les niveaux de la nappe doivent subir la même décroissance exponentielle que les débits aux exutoires. Nous avons ainsi comparé les coefficients obtenus à partir des débits avec ceux obtenus à partir des niveaux d'eaux.

Les graphiques montrant l'évolution de ces niveaux depuis 86, comparés aux débits à la résurgence de Comblain et aux galeries de captage du Néblon, se trouvent représentés sur la fig. 1.17. Les courbes ont été séparées en trois groupes, pour plus de clarté. Les deux premiers groupes comprennent les piézomètres du Néblon, y compris ceux situés à proximité de la crête de partage des eaux (P0, P10, P11, voir fig. 1.1). Le troisième groupe comprend les piézomètres du bassin d'Anthisnes. On notera la grande diversité de comportement des piézomètres, due à l'hétérogénéité de l'aquifère. Nous reviendrons plus en détail sur ce problème dans le paragraphe consacré à l'analyse spectrale (§ 1.5.5.2.).

Pour le Néblon, les coefficients de tarissement peuvent être calculés sur base de la baisse des niveaux d'eau dans les piézomètres P0, P1, P2 et P3 pour les années 88, 89, 90 et 91. Les valeurs obtenues sont comprises entre  $0,00011 \text{ j}^{-1}$  et  $0,00043 \text{ j}^{-1}$  (fig. 1.17). Ces coefficients sont du même ordre de grandeur que ceux calculés précédemment à partir des débits. Il est important de remarquer que les coefficients déterminés à partir des niveaux sont entachés des mêmes erreurs, dues à la réalimentation de la nappe, que ceux obtenus à partir des débits.

Sur la figure 1.17, on voit que les tarissements ont été nettement plus prononcés en 88 et en 89 ( $0,00043 \text{ j}^{-1}$  au P0) qu'en 90 et 91 ( $0,00022 \text{ j}^{-1}$  et  $0,00026 \text{ j}^{-1}$  au P0). L'alimentation par l'infiltration efficace a par conséquent moins influencé les tarissements de 88 et 89 que ceux de 90 et 91. Ceci est en accord avec la baisse générale de la nappe de 88 à 91. Entre 90 et 91, la nappe continue à descendre malgré une infiltration efficace plus importante que les deux années précédentes. Cela confirme la grande inertie du système.

On remarque aussi (fig. 1.17) que les coefficients de tarissement sont d'autant plus faibles que les piézomètres sont proches de l'exutoire (en 88, de P0 à P3, on passe de  $0,00043$  à  $0,0002$ ). Ce phénomène peut être expliqué par la descente de la nappe, d'autant plus rapide que les piézomètres sont éloignés du niveau de base jouant le rôle de potentiel imposé.



**Fig. 1.17 :** Evolutions des niveaux piézométriques dans les forages entre 1986 et 1992 comparées au débits à la résurgence de Comblain (Q Moulin) et aux débits captés à Néblon-le-Moulin (Q Néblon). Les piézomètres ont des comportements très divers. Les coefficients de tarissement sont exprimés en  $10^{-5} \text{ j}^{-1}$ .

Les variations annuelles des réserves permettent une estimation de la porosité efficace (ou effective) de l'aquifère calcaire. En 89, entre le niveau maximum et le niveau minimum, la nappe a baissé d'environ 10 mètres (moyenne sur P0, P1, P2 et P3). Durant la même période, il s'est écoulé  $0,133.10^6 \text{ m}^3$  (202 mm) à l'exutoire. Le rapport entre la lame d'eau écoulée et les 10 mètres descendus donne une porosité efficace de 2 %. Le même calcul pour l'année 90 fournit 1,7 % comme valeur de porosité.

#### *Réserves karstiques du bassin d'Anthisnes*

En ce qui concerne le bassin d'Anthisnes, on a indiqué quelques coefficients de tarissement sur la fig. 1.15. Ils sont compris entre 0,0024 et  $0,0168 \text{ j}^{-1}$ , avec une grande dispersion. Les plus représentatifs de ces coefficients sont en principe les plus élevés (entre 0,0059 et  $0,0139 \text{ j}^{-1}$ ), car les plus faibles sont influencés par la réalimentation de la nappe durant le tarissement. Il se peut aussi que les coefficients les plus élevés ( $0,0168 \text{ j}^{-1}$  par exemple) soient surestimés parce que correspondant toujours à la décrue. La difficulté d'obtenir des coefficients de tarissement fiables dépend donc principalement du rôle joué par la zone d'infiltration. Plus l'infiltration est hétérogène, plus on observe de coefficients de tarissement apparents différents.

Les réserves maximales, calculées sur base des coefficients précédents, sont comprises entre 65 et 284 mm. Compte tenu des remarques précédentes, les réserves réelles sont sans doute intermédiaires, c'est-à-dire proches des 100 à 150 mm, ce qui représente un volume de  $2,6.10^6$  à  $3,9.10^6 \text{ m}^3$ .

#### *Réserves karstiques du bassin de Remouchamps*

Dans le cas du système de Remouchamps (fig. 1.14), les coefficients de tarissement sont également très variables. Ils sont compris entre 0,025 et  $0,155 \text{ j}^{-1}$ . Ici aussi, les valeurs élevées sont sans doute influencées par les décrues et les valeurs faibles par la réalimentation progressive de la nappe.

On remarque sur le graphique de la fig. 1.14 (échelle logarithmique) une rupture de pente très caractéristique aux environs de 100-140 l/s durant les mois de mai 90 et de juillet 91.

Cette rupture est sans doute due au rôle de trop-plein joué par l'émergence. Il est vraisemblable qu'une partie des réserves s'écoule via des émergences sous-fluviales jaillissant dans le lit de l'Amblève.

Une seconde hypothèse pourrait permettre d'expliquer la rupture de pente. Elle supposerait une décroissance nette de la karstification avec la profondeur à partir d'un seuil donné. Le phénomène d'étagement des grottes, en relation avec les terrasses fluviatiles, est en effet bien connu dans les vallées de l'Ourthe et de l'Amblève. Ainsi l'histoire de l'évolution de la karstification peut jouer un rôle déterminant dans la localisation des réserves au sein de l'aquifère.

Pour calculer les réserves maximales à Remouchamps, nous avons en conséquence tenu compte de deux tarissements successifs, l'un avec un coefficient de  $0,025 \text{ j}^{-1}$  (avril 90), l'autre avec un coefficient de  $0,08 \text{ j}^{-1}$ . Le volume ainsi obtenu, de  $0,96 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (soit 35 mm), indique un système karstique bien drainé, avec peu de réserves, comparé aux bassins dans les calcaires carbonifères (Néblon et Anthisnes).

A titre de comparaison nous avons repris dans le tab. 1.1 les volumes dynamiques (réserves écoulables) calculés pour différents types d'aquifères karstiques.

SYSTEMES KARSTIQUES	VOLUMES DYNAMIQUES en Mio m <sup>3</sup>	Référence
Areuse (Jura neuchâtelois)	2,9 - 9,6	MÜLLER et al (1983)
Serrière (Jura neuchâtelois)	12 - 16	MATHEY (1976)
Salles-la-Source (Causse Comtal)	1,55	DODGE (1983)
Baget (Pyrénées)	0,88 - 3,6	MANGIN (1975)
Aliou (Pyrénées)	0,04 - 0,09	MANGIN (1975)
Fontestorbes (Pyrénées)	20 - 26	MANGIN (1975)
Fontaine de Vaucluse (Provence)	80	MANGIN (1975)
Remouchamps (Ardennes)	0,96	
Anthisnes (Condroz)	2,6 - 3,9	* réserves surestimées (voir texte)
Néblon (Condroz)	95 - 163 *	

**Tab. 1.1** : Volumes dynamiques de quelques systèmes karstiques comparés à ceux des systèmes étudiés (Remouchamps, Anthisnes et Néblon).

Le volume dynamique ( $V_{\text{dyn}}$ ), calculé sur base du modèle de MAILLET, ne représente que le volume des réserves situées au-dessus du niveau de l'exutoire (réserves écoulables). Il ne permet donc pas d'estimer le volume des réserves non écoulables, susceptibles de s'accumuler dans les pièges géologiques (synclinaux, karsts barrés par des failles, etc.) sous le niveau de l'exutoire<sup>1</sup>.

Le volume total des réserves  $V_{\text{tot}}$  (volume dynamique + réserves non écoulables) peut en principe être calculé à partir du débit du réservoir  $Q$ , moyennant la connaissance de l'âge moyen de l'eau  $t_m$  (temps moyen de transit déterminé à partir des isotopes naturels), en utilisant la relation suivante (MÜLLER, 1983) :

$$V_{\text{tot}} = Q \cdot t_m$$

A l'inverse, le temps moyen de transit peut être obtenu si l'on connaît le volume total des réserves (par exemple connaissant le volume et la porosité du karst noyé).

<sup>1</sup>Le terme de réserves non écoulables s'applique à un volume géométrique et non à l'eau en tant que réalité physique, car il est bien entendu que les masses d'eau situées sous le niveau de l'exutoire peuvent également participer à l'écoulement.



En l'absence de données isotopiques, on peut cependant calculer une limite inférieure du temps moyen de transit en introduisant dans la relation précédente le volume dynamique au lieu du volume total, ce qui revient à négliger les réserves stockées sous le niveau de l'exutoire.

On obtient, pour chaque système, les valeurs suivantes :

système de Remouchamps :	$t_m = 48$ jours
système d'Anthisnes :	$t_m = 161$ à $394$ jours
système du Néblon :	$t_m = 7,2$ ans (surestimé)

### 1.5.3.2. COURBES DE DECRUE

Une méthode, décrite par MANGIN (1975), a été appliquée aux hydrogrammes des exutoires des bassins d'Anthisnes et de Remouchamps.

La méthode consiste d'abord à déduire de l'hydrogramme la fonction  $\varphi(t)$ , correspondant à la vidange des réserves<sup>1</sup> par extrapolation de la courbe de tarissement sous la courbe de décrue. On obtient de la sorte les débits initiaux  $Q_0$  (écoulement de base) et  $q_0$  (composante de décrue).

Le paramètre  $\eta'$  est l'inverse du temps  $t_i$  de début du tarissement :

$$t_i = 1/\eta'$$

Ensuite le changement de variable :

$$-Y = \frac{t_i - t}{q^*(t)}$$

où  $q^*(t)$  est le débit de la composante de décrue au temps  $t$ <sup>2</sup>

permet de linéariser la fonction

$$q^*(t) = q_0 \frac{1 - \eta' t}{1 + \varepsilon t} = \psi(t)$$

et ainsi vérifier que cette dernière expression donne un ajustement correct des valeurs de débits observées.

Une régression linéaire sur  $-Y$  permet alors de calculer le second paramètre  $\varepsilon$ , et par conséquent la fonction

$$y(t) = \frac{1 - \eta' t}{1 + \varepsilon t}$$

<sup>1</sup>Equivalent de  $Q_b$ .

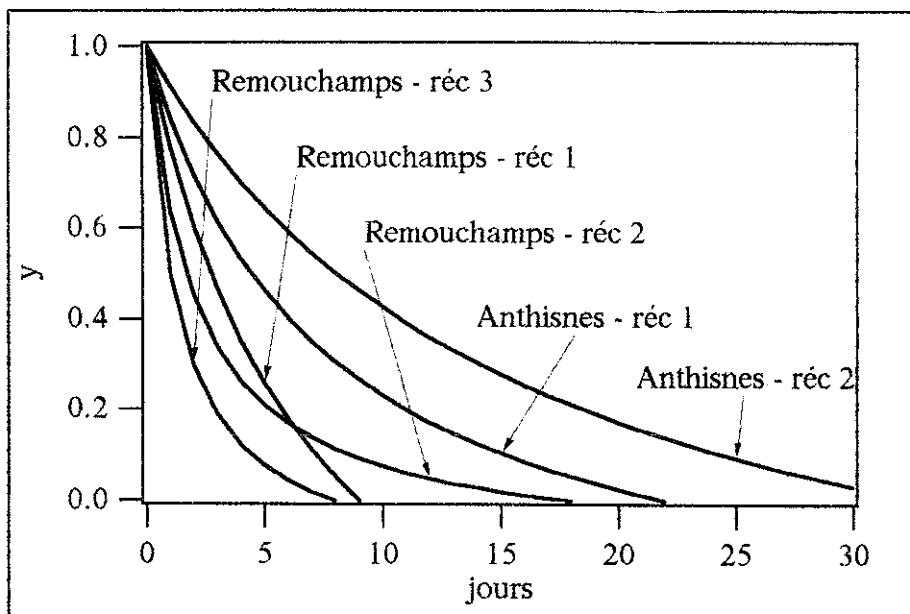
<sup>2</sup>Equivalent de  $Q_d$ .

Les courbes "y en fonction du temps écoulé depuis le début de la récession" représentent des courbes normalisées par rapport au débit.

- A Anthises, la méthode a été appliquée aux deux récessions qui ont suivi les crues de juillet 88 et mai 89 (Réc 1 et Réc 2 sur la fig. 1.15), soit une crue estivale (Réc 1) et une crue printanière (Réc 2).

Les courbes  $y(t)$ , pour les deux crues envisagées, sont montrées sur la fig. 1.18. Les paramètres  $\eta'$  obtenus valent respectivement  $0,0454$  et  $0,0303 \text{ j}^{-1}$  pour la crue estivale et la crue printanière. Les paramètres  $\varepsilon$  valent respectivement  $0,135$  et  $0,064 \text{ j}^{-1}$ .

- A Remouchamps, la méthode a été appliquée aux trois récessions (Réc 1, Réc 2 et Réc 3 sur la fig. 1.14) ayant suivi les crues de mars 90 (Réc 1), juillet 90 (Réc 2) et mars 91 (Réc 3), soit une crue estivale (Réc 2) et deux crues printanières (Réc 1 et Réc 3).



**Fig. 1.18** : Courbes de décrue (fonction "y" normalisée) à la résurgence de Comblain (bassin d'Anthises) comparées à trois décrues du Rubicon (bassin de Remouchamps). Pour la position des récessions dans le cycle hydrologique, se reporter aux hydrogrammes des fig. 1.14 et 1.15.

Les courbes  $y(t)$  correspondantes sont également reprises sur le graphique de la fig. 1.18. Elles décroissent plus rapidement que dans le cas du Néblon, témoignant de la moins grande inertie du système.

Les valeurs de  $\eta'$  sont :  $0,111 \text{ j}^{-1}$  (Réc 1),  $0,056 \text{ j}^{-1}$  (Réc 2) et  $0,125 \text{ j}^{-1}$  (Réc 3). Celles de  $\varepsilon$  sont respectivement :  $0,144 \text{ j}^{-1}$ ,  $0,486 \text{ j}^{-1}$  et  $0,760 \text{ j}^{-1}$ .

$\eta'$  caractérise la durée d'influence de l'infiltration rapide. Plus il est faible, plus l'influence se marque longtemps. A Remouchamps, on note par conséquent une plus grande influence des infiltrations lors des crues estivales.

$\varepsilon$  caractérisant l'hétérogénéité de l'infiltration et le système de Remouchamps étant particulièrement complexe de ce point de vue, il est normal que ce paramètre présente des variations aussi importantes (de  $0,144$  à  $0,760 \text{ j}^{-1}$ ).

### 1.5.3.3. PARAMETRES DE LA CLASSIFICATION DE MANGIN

La classification (fig. 1.19) repose sur deux paramètres :

- le rapport  $k$  du volume dynamique au volume annuel écoulé, caractérisant les réserves;
- la valeur  $i$  de la fonction "y" - caractérisant l'infiltration <sup>1</sup> - en  $t = 2$  jours.

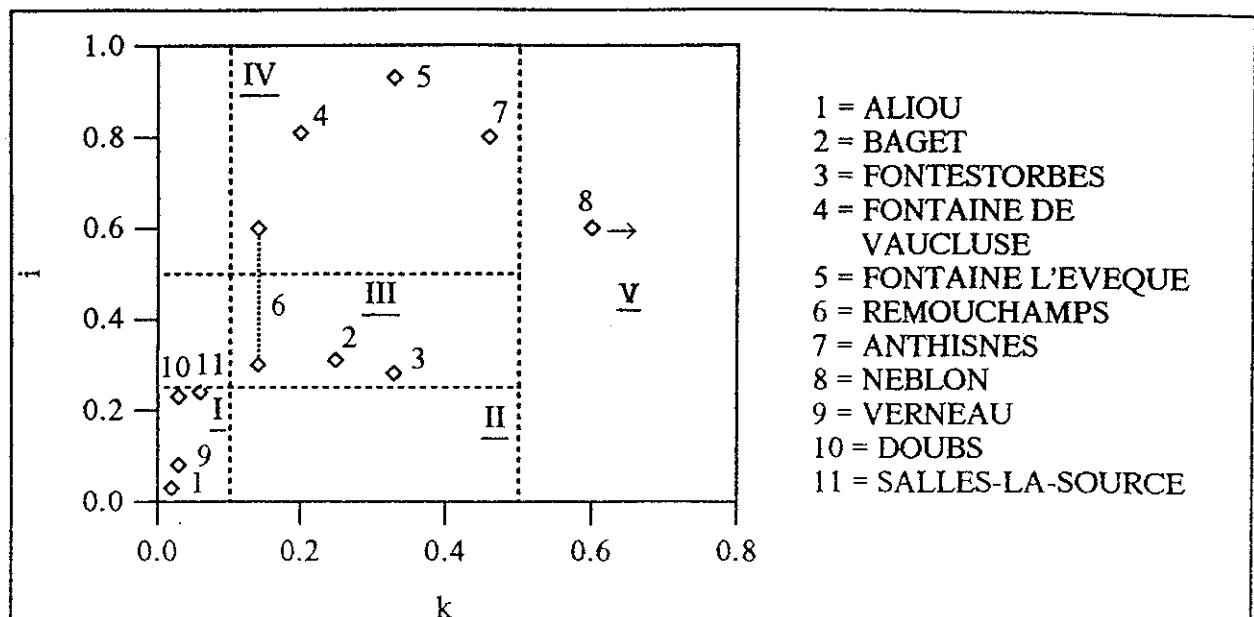
En ce qui concerne le Néblon, l'absence de crue souterraine ne permet pas de calculer le paramètre  $i$  lié à l'infiltration. Par contre, le rapport  $k$  est très élevé<sup>2</sup> ( $\gg 1$ ), vu l'important pouvoir régulateur du système.

Le bassin d'Anthisnes, avec un  $k$  aux environs de  $0,46$ , et un  $i$  entre  $0,7$  et  $0,8$ , se place, quant à lui, dans la catégorie des systèmes complexes (fig. 1.27), à grandes réserves. De ce point de vue, il se rapproche de l'aquifère du type "Fontaine l'Evêque" décrit par MANGIN (1975).

Dans le cas de Remouchamps,  $k$  vaut  $0,14$  et  $i$  varie entre  $0,3$  et  $0,6$ , ce qui le place dans les systèmes à faibles réserves, à la limite entre les systèmes complexes ( $i > 0,5$ ) et les systèmes présentant un retard à l'alimentation ( $0,25 < i < 0,5$ ). Ce retard à l'alimentation pourrait provenir de l'inertie des réserves logées dans les terrains non karstiques.

<sup>1</sup>Voir § 1.5.3.2.

<sup>2</sup>Nous avons vu que les volumes dynamiques étaient surestimés.



**Fig. 1.19** : Position des trois systèmes karstiques étudiés (Néblon, Anthisnes, Remouchamps) dans la classification de MANGIN, à partir des paramètres  $k$  et  $i$  liés respectivement au temps de séjour et aux modalités de l'infiltration, comparée à quelques systèmes karstiques de France : Baget, Fontestorbès, Aliou dans les Pyrénées (MANGIN, 1975), Salles-la-Source dans le Causse Comtal (DODGE, 1983), Fontaine de Vaucluse dans le Vaucluse (MANGIN, 1975), Fontaine l'Evêque en Provence (MANGIN, 1975), Verneau dans le Jura (TISSOT et TRESSE, 1978), Doubs dans le Jura (JEANBLANC et SCHNEIDER, 1981). MANGIN distingue cinq domaines :

I = Systèmes très karstifiés en aval. Réseau spéléologique très développé.

II = Réseau spéléologique très développé débouchant en aval sur un important karst noyé.

III = Systèmes plus karstifiés en amont qu'en aval avec des retards dans l'alimentation dus soit à des terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante.

IV = Domaine des systèmes complexes.

V = Systèmes peu ou pas karstiques.

#### 1.5.4. Débits classés

L'étude des débits classés permet de mettre en évidence l'existence de trop-pleins ou d'apports supplémentaires dus, par exemple, à l'entrée en activité de pertes en amont du système. Ces trop-pleins et ces apports, apparaissant habituellement pour un seuil de débit donné, sont responsables de paliers sur les courbes de débits. Ces paliers se marquent par des ruptures de pente caractéristiques sur les courbes cumulées des débits classés. Ces dernières sont des courbes où l'on reporte, en fonction du débit, les pourcentages de fréquences cumulées correspondant à des classes de débits croissants. L'apparition de trop-pleins provoque une diminution alors que des apports entraînent une augmentation de la pente de la courbe.

Les courbes de débits classés sont par conséquent intéressantes pour étudier les infiltrations rapides, l'arrivée à l'exutoire de ce type d'infiltration pouvant être due à un apport supplémentaire par les pertes.

D'un point de vue pratique, la détermination des seuils d'apparition d'apports supplémentaires peut constituer une indication en matière de protection des émergences. En effet, à partir de ces seuils de débit, il faut s'attendre à une augmentation de la charge polluante. Cette pollution peut provenir directement de la surface ou de la remise en circulation d'eaux restées piégées dans l'aquifère en période d'étiage.

Pour mieux faire apparaître les ruptures de pente, on tente habituellement d'ajuster les courbes de débits classés à une loi de probabilité donnée.

Nous avons utilisé la même loi de probabilité, dérivée de celle de LAPLACE, que celle utilisée par MANGIN (1975). Celle-ci est de la forme :

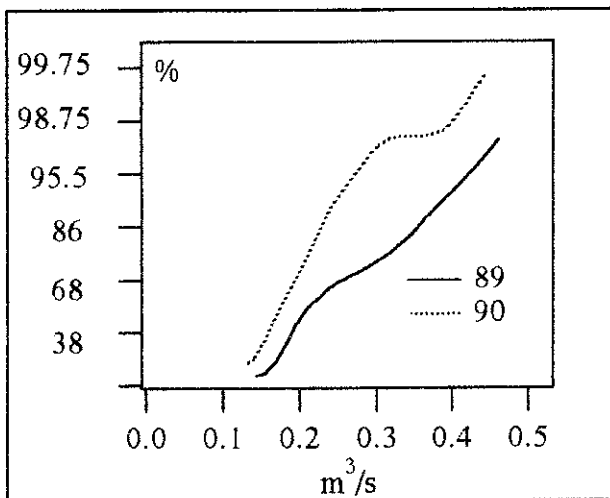
$$F(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

avec  $F(x) = \text{Prob}(X > x)$ ,  $X = a(Q - Q_0)$  et  $a > 0$

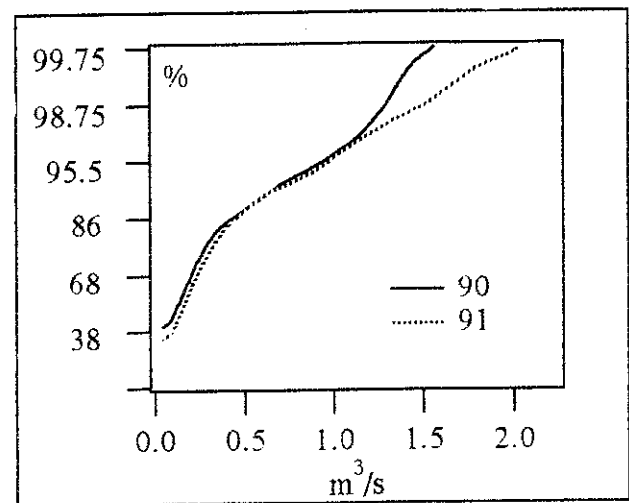
Sur les fig. 1.20 et 1.21, on a reporté les pourcentages cumulés des débits classés des exutoires des bassins d'Anthisnes et de Remouchamps, pour deux cycles considérés dans chacun des cas. L'ordonnée du graphique est en échelle de probabilité et l'abscisse en échelle normale.

- En ce qui concerne le bassin d'Anthisnes (résurgence du Moulin, fig. 1.20), les différences observées entre les deux cycles sont principalement dues aux difficultés de mesure des débits. La courbe du cycle 89-90 (90) présente de fortes irrégularités, alors que, sur la courbe du cycle 88-89 (89), on voit nettement une rupture de pente aux environs de 200 l/s. Aucune émergence de trop-plein n'est connue dans l'Ourthe, à l'extrémité du synclinal d'Anthisnes. Aussi pensons-nous que ce seuil est plutôt dû à l'existence de deux répartitions différentes des débits, l'une correspondant aux hautes eaux, avec un caractère plus aléatoire, l'autre correspondant à l'étiage avec une évolution plus déterministe des débits en raison de l'inertie des réserves du système.

- Les courbes des débits classés de la rivière souterraine de Remouchamps (Rubicon, fig. 1.21) montrent également une rupture de pente très nette, située aux environs de 300 l/s. Cette rupture de pente peut avoir une origine semblable à celle décrite pour la résurgence du Moulin (comportement différent en crue et en étiage, lié à la structure de l'aquifère) à moins qu'elle ne résulte de fuites vers l'Amblève pour des débits supérieurs à 300 l/s. Le caractère très pointu des pics de crue semble plutôt en faveur de la première hypothèse. On notera également que la rupture de pente a lieu pour un débit plus élevé que le palier mis en évidence vers 140 l/s lors de l'étude des tarissements (§ 1.5.3.1.).



**Fig. 1.20 :** Courbes des débits classés de la résurgence du Moulin à Comblain-au-Pont pour les cycles 88-89 et 89-90 (ordonnée en échelle de probabilité).



**Fig. 1.21 :** Courbes des débits classés de la rivière souterraine de Remouchamps pour les cycles 89-90 et 90-91 (ordonnée en échelle de probabilité).

Un redressement de la courbe du cycle 89-90 (90) a lieu pour les débits supérieurs à 1200 l/s. Ce fait pourrait être lié au caractère particulier des crues qui se sont déroulées cette année là (crue d'orage exceptionnelle durant le mois de juillet).

### 1.5.5. Analyses corrélatoires et spectrales

#### 1.5.5.1. BUTS ET PRINCIPES DE LA METHODE

On trouvera une description de la méthode dans l'article de MANGIN (1984). Aussi nous bornerons-nous ici à rappeler quelques particularités.

L'analyse corrélatoire et spectrale est une méthode statistique appliquée aux systèmes karstiques dans un but avant tout descriptif. Elle est destinée à tirer meilleur profit des informations apportées par les chroniques de débit aux exutoires. Deux types d'analyses sont envisagées : l'analyse simple, dont le but est de décrire la structure de l'hydrogramme pris isolément, et l'analyse croisée où les débits sont comparés au signal d'entrée quasi aléatoire de la pluie.

Les mécanismes que ces analyses permettent d'étudier sont la recharge de la nappe et l'infiltration. A condition que le signal d'entrée puisse être considéré comme parfaitement aléatoire, le corrélogramme (voir ci-après) est la réponse impulsionnelle du système.

La méthode permet de discerner, parmi les fluctuations complexes du signal, les composantes périodiques ou aléatoires, ainsi que les tendances à long terme.

Le choix du pas de discrétisation des chroniques, de leur longueur, ainsi que des coefficients de corrélation à utiliser en fonction du type de phénomène à étudier ont fait l'objet de nombreuses recherches par MANGIN (1984, 1988).

Le corrélogramme simple est calculé en comparant la série chronologique discrétisée ( $x_1, \dots, x_n$ ) avec elle-même, décalée d'un pas  $k$  croissant ( $k = 0, \dots, m$ ). Pour chaque pas  $k$ , on calcule un coefficient d'autocorrélation  $r_k$ <sup>1</sup>. La fonction  $r_k = f(k)$  est appelée la "fonction d'autocorrélation" et sa représentation graphique est le "corrélogramme".

Le fait de trop décaler la chronique par rapport à sa longueur peut entraîner des instabilités numériques. Aussi prend-on généralement une valeur de  $k$  telle que le décalage ne dépasse pas le tiers de la longueur (troncature  $m < n/3$ ).

Comme coefficient d'autocorrélation, nous avons d'abord pris l'expression suivante adaptée de DAVIS (1973) :

$$r_k = \frac{\text{COV}(x_i, x_{i+k})}{s_x^2}$$

avec  $s_x$  l'écart-type,  $k = 0, \dots, m$  et  $i = 1, \dots, n-k$ .

Cette formule présentait toutefois l'inconvénient de ne pas tenir compte de la diminution d'influence d'un événement sur les événements suivants avec leur éloignement dans le temps. Pour pallier à cet inconvénient, nous avons préféré une formule introduisant un biais : celle de JENKINS et WATTS (in MANGIN, 1984) :

$$r_k = C_k / C_0 \quad \text{avec}$$

$$C_k = n^{-1} \sum_1^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (1)$$

Pour étudier les réponses d'un système karstique, il est parfois intéressant de passer du domaine temporel (corrélogramme) au domaine fréquentiel. Ceci est réalisé en effectuant une transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation. La "fonction de densité spectrale" obtenue n'est autre que la répartition des variances suivant la fréquence. Le graphe de cette fonction est appelé le "spectre". Une expression non biaisée de cette fonction est donnée par :

$$S_f = 2(1 + 2 \sum_1^m D_k r_k \cos 2\pi Fk)$$

où

$F$  est la fréquence fondamentale, fonction du pas de temps considéré,  
 $r_k$  le coefficient d'autocorrélation et  $D_k$  une fonction de pondération.

<sup>1</sup>On utilise aussi le variogramme. Dans ce cas, la grandeur calculée est la variance (covariance pour les analyses croisées).

Comme fonction de pondération, c'est le filtre de TUKEY qui est utilisé :

$$D_k = (1 + \cos \pi k/m)/2$$

Ce filtre introduit volontairement un biais, rendant ainsi le spectre plus lisible. Il surestime de 8 % la variance totale.

Le spectre ayant pour but essentiel d'étudier l'"effet mémoire" du système, c'est-à-dire la durée d'influence d'un événement sur les suivants, on définit ce que l'on nomme habituellement le "temps de régulation". Il est l'inverse de la longueur (bande spectrale) de la base du rectangle dont la hauteur est égale à l'ordonnée maximale du spectre et l'aire égale à la surface sous le spectre. Cette grandeur est équivalente à la valeur du spectre pour  $f^1 = 0$ , divisée par 2. Elle donne une indication sur la largeur de la réponse impulsionnelle du système.

Le corrélogramme croisé est calculé de la même manière que le corrélogramme simple en comparant cette fois deux chroniques de natures différentes. Dans notre cas (et c'est la majorité des cas), la pluie est comparée au débit, la première étant sensée influencer le second. Dans le cas du corrélogramme croisé, l'expression (1) est généralisée, avec les mêmes notations que précédemment, suivant l'expression :

$$C_k = n^{-1} \sum_1^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})$$

Le seul type d'analyse réalisée jusqu'à présent sur les données dont nous disposons est une analyse à court terme, c'est-à-dire avec un  $k$  allant jusque 125.

Pour le Rubicon (bassin de Remouchamps), le pas est de 12 heures (le décalage maximal est donc de 62,5 j) alors que pour toutes les autres chroniques (y compris les niveaux d'eau dans les piézomètres), il est de 1 jour (décalage maximal = 125 j).

L'analyse est faite sur une période suffisamment courte pour que des effets de périodicité dus à l'évolution saisonnière n'apparaissent pas. Pour la même raison, il n'est pas indispensable de débiter les analyses en début de cycle hydrologique.

D'autre part, il est une règle selon laquelle tout phénomène de durée inférieure à la longueur de la fenêtre d'observation (2 fois le pas), ne peut plus être mis en évidence.

Il faut également signaler que la plupart des données journalières de piézométrie et certaines valeurs journalières de débit à la résurgence du Moulin ont été interpolées linéairement, ce qui a eu pour effet de filtrer certaines composantes à très court terme.

Le caractère pas trop karstique des bassins étudiés rend toutefois peu probable des réactions (réponses impulsionnelles) aussi rapides. Les réactions les plus rapides seront étudiées de façon plus précise en ayant recours aux traçages.

Toutes les analyses faites ici ne couvrent pas nécessairement des périodes identiques. Elles seront par conséquent comparées entre elles avec précaution.

---

<sup>1</sup>f = la fréquence = 1/k



### 1.5.5.2. APPLICATION AUX SYSTEMES KARSTIQUES ETUDIES

La durée trop courte des périodes d'observation de la plupart des débits et niveaux ne permet pas (sauf pour quelques piézomètres) d'étudier le comportement à long terme des systèmes, sans être gêné par des effets saisonniers, ni de comparer les cycles individuels entre eux.

Des analyses simples et croisées, à court terme, ont été réalisées sur les débits des principaux exutoires (sources captées de Néblon-le-Moulin, résurgence du Moulin à Comblain et Rubicon à Remouchamps) ainsi que sur les niveaux d'eaux enregistrés dans 16 piézomètres (fig. 1.17).

Les corrélogrammes simples sont calculés sur toute la période d'observation tandis que les corrélogrammes croisés ont nécessité un tri sur les dates, afin de travailler sur des périodes communes à la pluie et au débit.

Pour la pluie sur les bassins du Néblon et d'Anthisnes, la station d'Ouffet, située à proximité de la crête de partage, a été choisie. Les données y couvrent la période du 1/01/88 au 31/12/91, soit 4 années.

A Remouchamps, c'est la station de Cornemont qui a été utilisée. Elle se trouve dans la partie supérieure du bassin. La période de mesure s'étend du 1/01/89 au 31/12/91, soit 3 ans.

Les données de débits couvrent les périodes suivantes :

- du 12/02/89 au 2/01/92 pour les sources captées de Néblon-le-Moulin,
- du 13/04/88 au 9/10/91 pour la résurgence du Moulin,
- du 18/11/89 au 21/12/91 pour le Rubicon.

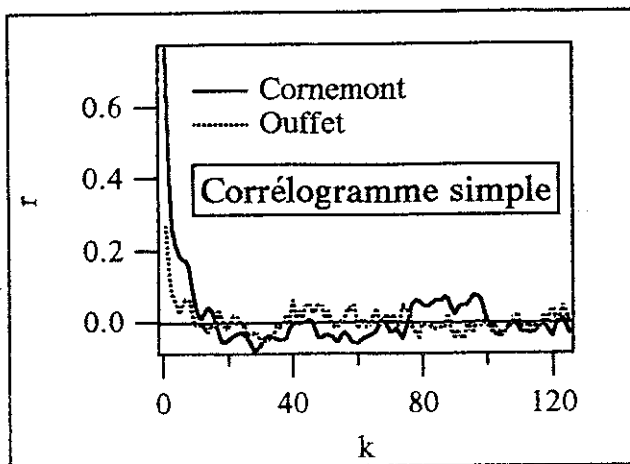
Les piézomètres possèdent les plus longues périodes d'observation :

- de 1/86 à 4/92 pour les P0, P4, P8, P16, P17, P18, P19, PM (puits Minaqua),
- de 6/87 à 4/92 pour les P1, P2, P3,
- de 6/89 à 4/92 pour les P10, P11, P12, P13, P14.

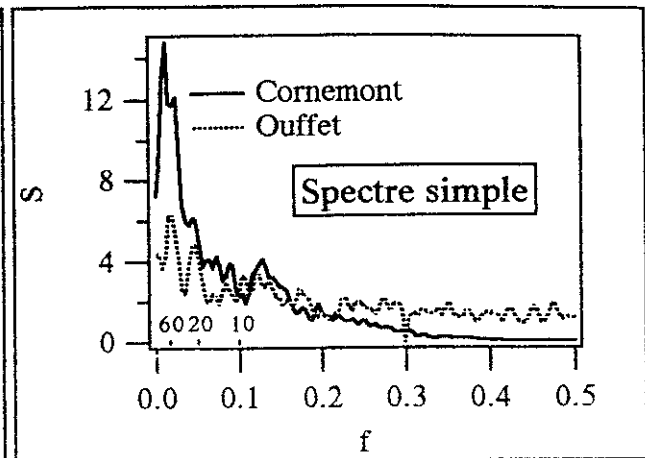
Les périodes d'observation considérées pour la pluie étant relativement courtes, un examen préalable de la structure de ces données s'est avéré nécessaire pour vérifier le caractère aléatoire. Les résultats des analyses corrélatrices et spectrales simples des pluies à la station de Cornemont et à la station d'Ouffet sont présentés sur les fig. 1.22 et 1.23.

Les corrélogrammes (fig. 1.22) décroissent très rapidement. Le coefficient d'autocorrélation devient inférieur à 0,1 après 3 jours ( $k = 3$ ) à Ouffet et après 4,5 jours ( $k = 9$ ) à Cornemont. On distingue également plusieurs oscillations pouvant être dues aux particularités des 3 années étudiées. Nous avons vu, par exemple, que le cycle 89-90 était particulier en raison de ses averses orageuses.

De même, sur le spectre (fig. 1.23), plusieurs pics d'amplitude faible viennent perturber la décroissance de la variance. Il conviendrait de refaire le même type d'analyse sur des chroniques plus longues. En attendant, nous pouvons considérer, avec une approximation suffisante, que la pluie est aléatoire pour les deux stations étudiées.



**Fig. 1.22** : Corrélogrammes simples de la pluie pour les stations de Ouffet (bassins d'Anthisnes et du Néblon, période du 1/01/88 au 31/12/91) et de Cornemont (bassin de Remouchamps, période du 1/01/89 au 31/12/91).



**Fig. 1.23** : Spectres simples de la pluie pour les stations de Ouffet (bassins d'Anthisnes et du Néblon, période du 1/01/88 au 31/12/91) et de Cornemont (bassin de Remouchamps, période du 1/01/89 au 31/12/91).

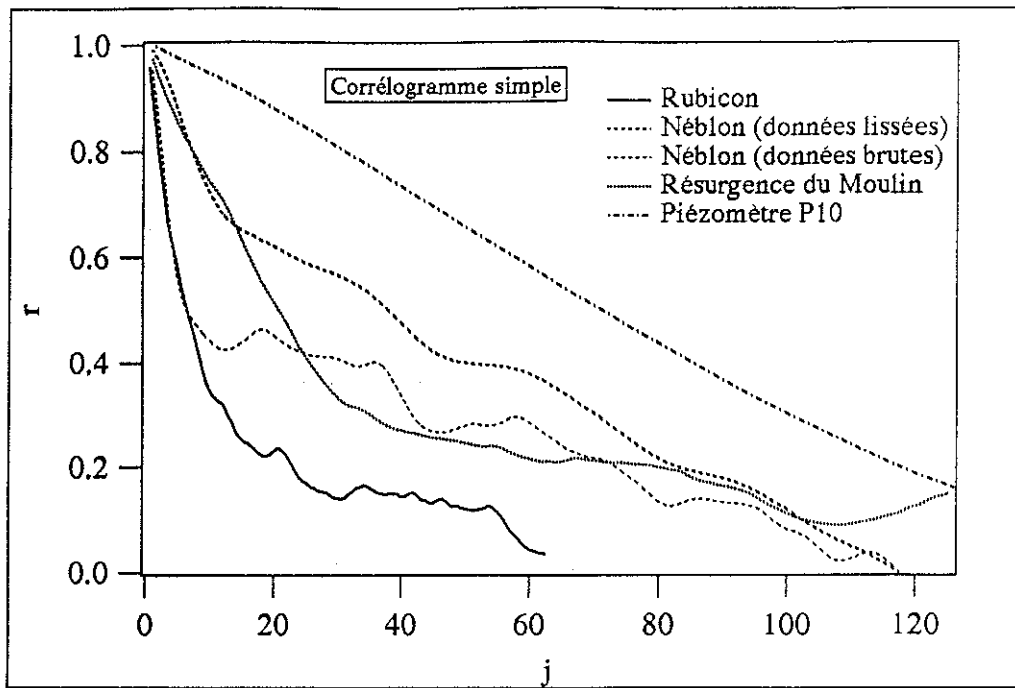
Les corrélogrammes et les spectres simples des débits (fig. 1.24 et 1.25) peuvent dès lors servir à comparer entre eux les différents systèmes karstiques.

La vitesse de décroissance du corrélogramme (fig. 1.24) est fonction de "l'effet mémoire". Plus le système conserve la mémoire des événements antérieurs, plus la décroissance du corrélogramme est lente. Cet "effet mémoire" est lié au stockage temporaire de l'eau infiltrée et donc à l'importance des réserves (pas nécessairement les réserves noyées, l'infiltration retardée jouant également un rôle).

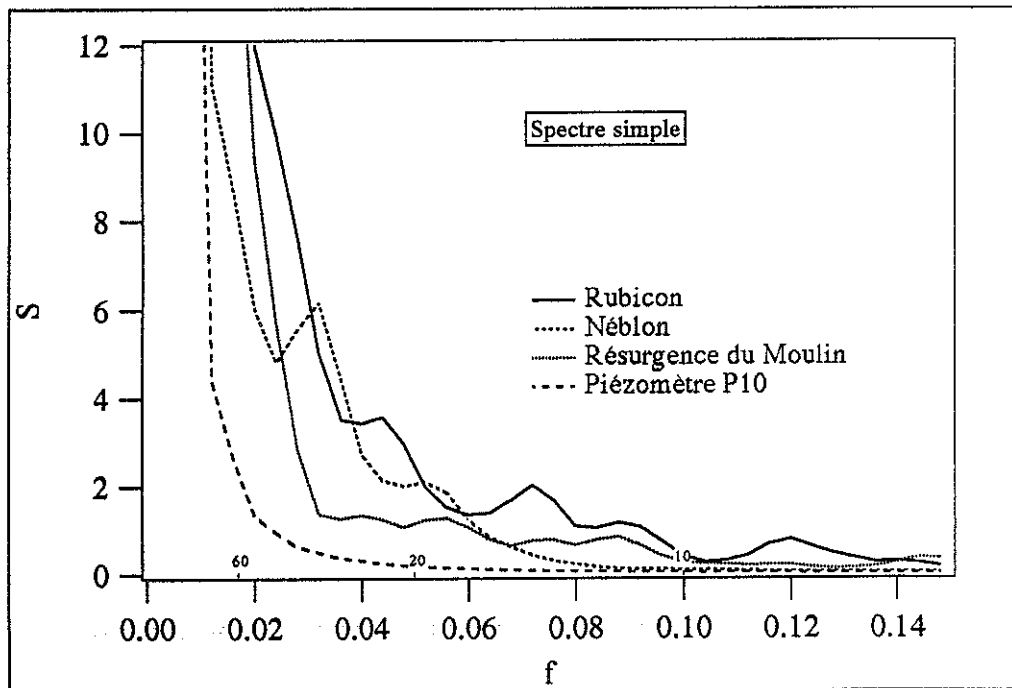
Sur le graphique de la fig. 1.24, l'abscisse est exprimée en jours et non en valeurs de pas de temps. Cela permet de comparer le corrélogramme du Rubicon, calculé sur base d'un intervalle de 12 heures, avec les autres corrélogrammes, calculés sur base d'un intervalle de 1 jour.

Le corrélogramme du Rubicon décroît très rapidement. Le système est relativement karstifié et comporte assez peu de réserves. La valeur de 0,2 de  $r$  est atteinte après un peu plus de 20 jours, alors que pour la résurgence du Moulin et les sources du Néblon (données lissées<sup>1</sup>), pour lesquels l'effet mémoire est beaucoup plus prononcé, cette valeur est atteinte après plus de 80 jours.

<sup>1</sup>Les données brutes ont été lissées avec un filtre de Gauss suivant un pas de 30.



**Fig. 1.24** : Corrélogrammes simples des débits pour les exutoires des trois systèmes karstiques étudiés (Rubicon à Remouchamps, captages du Néblon, résurgence du Moulin à Comblain). Comparaison avec le corrélogramme simple des niveaux d'eau dans le piézomètre P10.



**Fig. 1.25** : Spectres simples des débits pour les exutoires des trois systèmes karstiques étudiés (Rubicon à Remouchamps, captages du Néblon, résurgence du Moulin à Comblain). Comparaison avec le spectre simple des niveaux d'eau dans le piézomètre P10.

Ces résultats nous permettent de comparer les trois systèmes étudiés aux bassins-types mentionnés précédemment à propos des classifications basées sur les hydrogrammes : Aliou, le Baget et Fontestorbes. Pour ces derniers (période d'observation de 9 ans), MANGIN (1984) trouve des durées de décroissance jusque  $r_k = 0,2$  valant respectivement 4, 15 et 60 jours. Le système de Remouchamps est par conséquent proche de celui du Baget, alors que ceux d'Anthisnes et du Néblon dépassent le système de Fontestorbes au point de vue des réserves. Cela confirme les hypothèses formulées suite à l'examen des courbes de récession.

La rupture de pente du corrélogramme de la résurgence du Moulin indique un double comportement, à court terme et à long terme. Ce comportement confirme la superposition d'au moins deux composantes : un écoulement lent lié à la vidange des réserves et un écoulement rapide lié aux infiltrations directes.

Nous avons également repris, sur la fig. 1.24, le corrélogramme du piézomètre P10, de manière à montrer l'importance de l'effet mémoire de la nappe ( $r_k = 0,2$  atteint au bout d'environ 120 jours).

Nous avons vu précédemment les inconvénients que présentaient les données brutes des captages. Sur le même graphique (fig. 1.24), on peut voir l'influence du lissage des débits captés sur l'allure du corrélogramme. Malgré l'importance de ce lissage, il subsiste une composante à court terme. Il est déconseillé d'utiliser un lissage trop important car ce dernier pourrait introduire artificiellement des tendances sur la courbe.

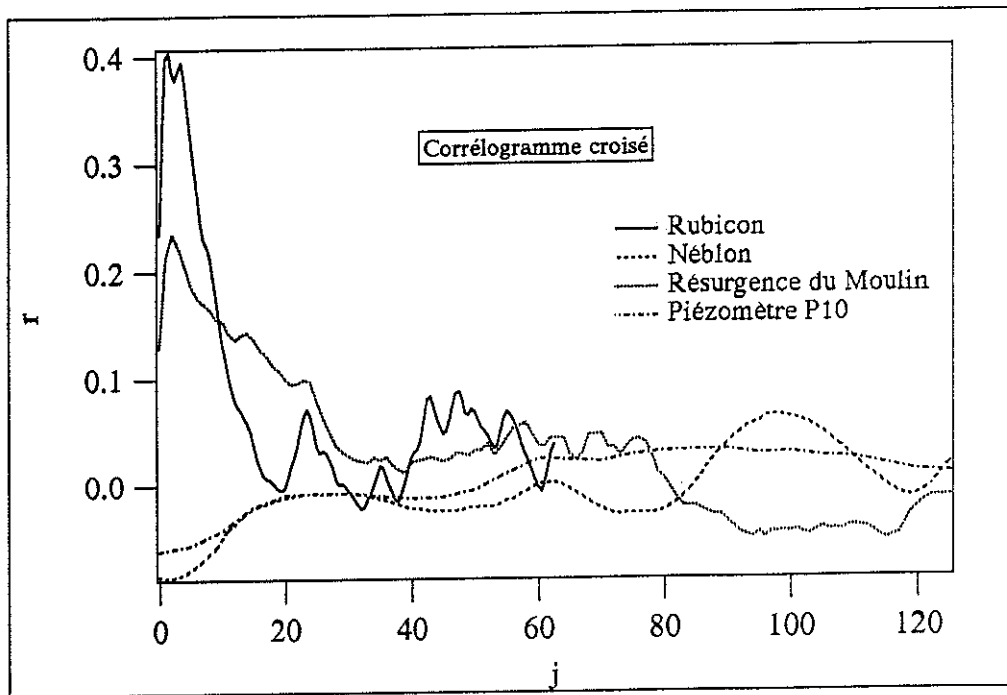
Pour les systèmes de Remouchamps, d'Anthisnes et du Néblon, les temps de régulation, valent respectivement 21, 53 et 47 jours, alors que pour Aliou, le Baget et Fontestorbes ils sont respectivement de 14, 22,5 et 50 jours. Le système de Fontestorbes est à ce point de vue fort comparable aux karsts du Carbonifère du Néblon et d'Anthisnes. Le système du Baget est, quant à lui, comparable à celui de Remouchamps.

L'importance du stockage des apports dans chacun des systèmes apparaît aussi sur les spectres de variance de la fig. 1.25. Plus le système est inertiel, plus les hautes fréquences sont filtrées au profit des basses fréquences. L'analyse spectrale fait de plus ressortir plusieurs fréquences particulières. Celles-ci sont d'autant plus marquées que le système est karstifié et que la composante rapide prend de l'importance (ex. Remouchamps). Ces pics, variables d'une période considérée à l'autre, sont sans doute aussi liés au caractère non parfaitement aléatoire des pluies.

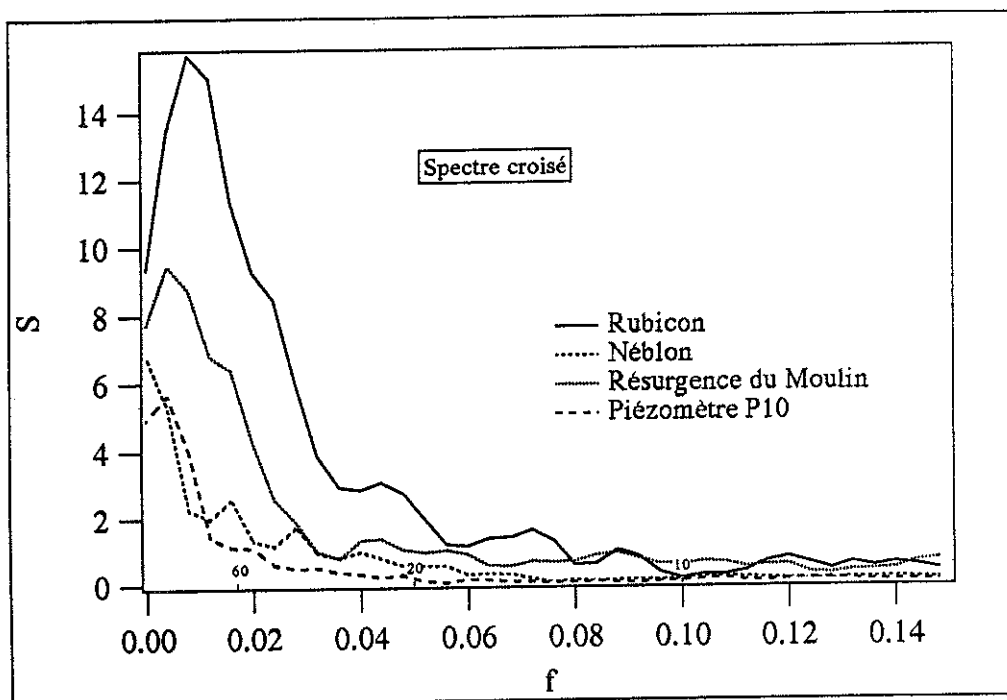
Les fig. 1.26 et 1.27 représentent les corrélogrammes et spectres croisés des débits avec la pluie pour les trois bassins étudiés.

Les corrélogrammes croisés (fig. 1.26) mettent très bien en évidence la différence entre les systèmes à deux composantes (Remouchamps<sup>1</sup> et Anthisnes) et les systèmes liés au réservoir lent uniquement (Néblon et piézomètre P10). Remouchamps et Anthisnes montrent tous deux des réactions rapides, de moins de 5 jours (le maximum se trouve à 1,5 j pour Remouchamps et à 2 j pour la résurgence du Moulin).

<sup>1</sup>L'axe des abscisses est à nouveau gradué en jours pour faciliter la comparaison lorsque les intervalles sont variables.



**Fig. 1.26** : Corrélogrammes croisés des débits avec la pluie pour les exutoires des trois systèmes karstiques étudiés (Rubicon à Remouchamps, captages du Néblon, résurgence du Moulin à Comblain). Comparaison avec le corrélogramme croisé pluie-niveaux d'eau au piézomètre P10.



**Fig. 1.27** : Spectres croisés des débits avec la pluie pour les exutoires des trois systèmes karstiques étudiés (Rubicon à Remouchamps, captages du Néblon, résurgence du Moulin à Comblain). Comparaison avec le spectre croisé pluie-niveaux d'eau au piézomètre P10.

Les irrégularités de la partie inférieure des courbes sont à nouveau dues à l'influence de la structure de la pluie, les analyses portant sur des périodes relativement courtes. On discerne cependant une remontée des courbes, due au stockage temporaire d'une partie des apports, après 40 jours pour Remouchamps et après 60 jours pour Anthisnes. Pour le système du Néblon (captage et piézomètre), abstraction faite des problèmes liés aux fluctuations rapides des débits captés, on constate une réponse maximale après environ 100 jours.

Le spectre croisé des débits avec la pluie (fig. 1.27) apporte, quant à lui, peu d'informations supplémentaires. Il montre à nouveau la différence entre les systèmes à grandes réserves (captages du Néblon et piézomètre P10) et les systèmes plus karstifiés (Remouchamps et Anthisnes). Les hautes fréquences sont en effet moins filtrées en ce qui concerne les deux derniers bassins.

L'analyse corrélatoire et spectrale s'avère aussi un moyen intéressant pour distinguer les comportements des différents piézomètres.

Les fig. 1.28 et 1.29 rassemblent les corrélogrammes simples et croisés des 16 piézomètres étudiés. La plupart d'entre eux sont caractérisés par un effet mémoire très prononcé. Suivant l'importance décroissante de cet effet mémoire, on distingue quatre groupes principaux :

- le puits Minaqua (PM) et les P0, P1, P2 et P3,
- les P17 et P19,
- les P10, P11, P12, P16 et P18,
- les P13 et P14.

Il est tentant d'expliquer les groupements observés par le rapprochement géographique des piézomètres. Si cela semble vérifié pour les P17 et P19, proches de la limite avec le bassin du Hoyoux, ainsi que pour les P13 et P14, situés au milieu du synclinal d'Anthisnes, cela n'est plus le cas pour les deux autres groupements. Les similitudes proviendraient alors des comportements hydrodynamiques propres aux piézomètres. Parmi les facteurs susceptibles d'influencer ces comportements, on trouve :

- l'épaisseur de la couverture filtrante de limons au-dessus des calcaires,
- la fréquence et l'ouverture des fissures recoupées par le forage,
- la proximité d'un éventuel conduit karstique,
- la distance par rapport à l'exutoire.

On remarquera que les groupes ainsi formés ne sont pas ceux auxquels on s'attendrait en examinant directement les chroniques de niveaux d'eau (voir fig. 1.17). L'analyse corrélatoire contient donc une part d'information qu'il est difficile de mettre en évidence autrement.

Les piézomètres P4 et P8 ont un comportement double, à court et à long terme. Dans le cas du P4, il s'agit d'un défaut de l'équipement (contamination par le ruissellement de surface) tandis qu'au P8, un chenal karstique, avec écoulement libre, expliquerait les réactions aussi rapides et d'aussi faible amplitude. Le P8 est en effet situé dans la vallée sèche qui parcourt longitudinalement le synclinal d'Anthisnes.

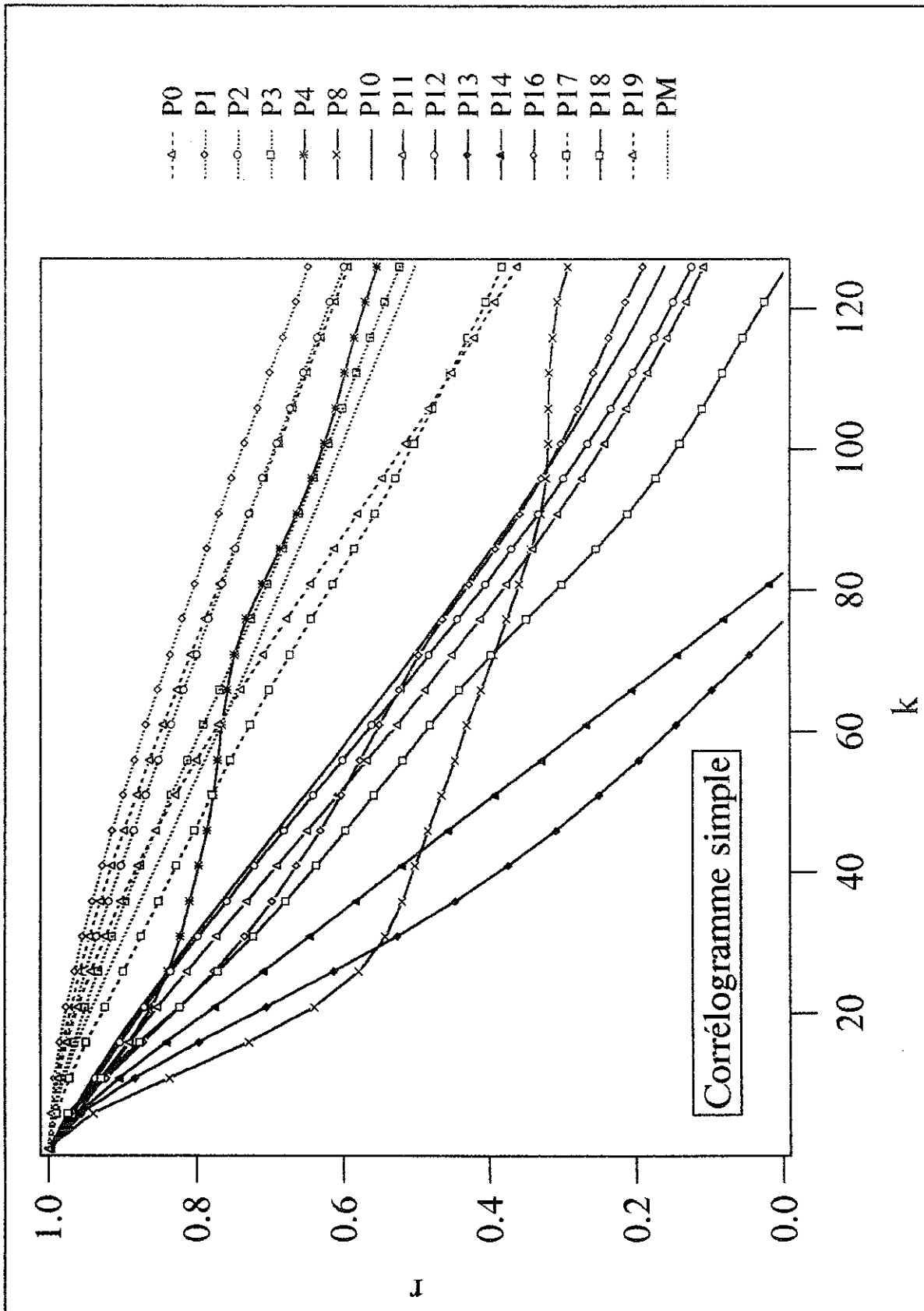


Fig. 1.28 : Corrélogrammes simples des niveaux d'eau dans les 16 piézomètres étudiés (PM = Puits Minaqua).

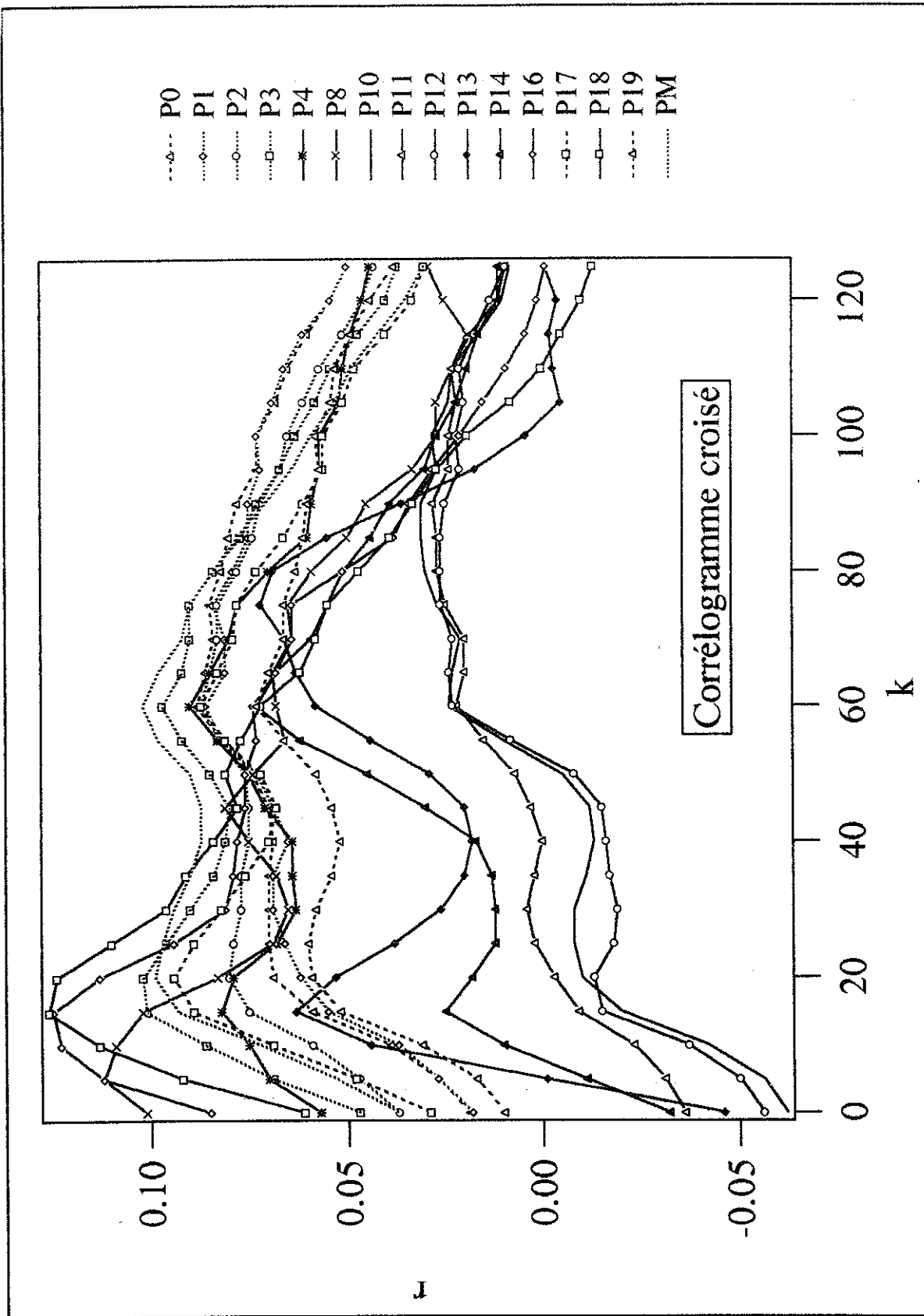


Fig. 1.29 : Corrélogrammes croisés pluie-niveaux d'eau pour les 16 piézomètres étudiés (PM = Puits Minaqua).



Les corrélogrammes croisés (fig. 1.29) montrent systématiquement deux réponses, l'une après environ 20 jours, l'autre après 60 à 100 jours, suivant les cas. La composante la plus rapide pourrait correspondre, après infiltration au travers de la couverture meuble, à un écoulement (sorte de ruissellement) dans les fissures les plus karstifiées. La composante lente proviendrait d'un écoulement au travers des plus fines fissures ou au travers du remplissage peu perméable des conduits karstiques.

### 1.5.6. Perméabilités en forage

Les mesures des niveaux statiques dans les piézomètres ne sont pas les seuls à présenter un intérêt pour l'étude de la recharge de la nappe. Les tests dynamiques (pompages d'essai) apportent, eux aussi, des indications précieuses sur la structure et sur le fonctionnement des systèmes karstiques. Bien que ce type d'approche soit en plein développement, on lui a toujours préféré des méthodes indirectes, basées sur l'analyse des réponses aux exutoires, pour les raisons suivantes :

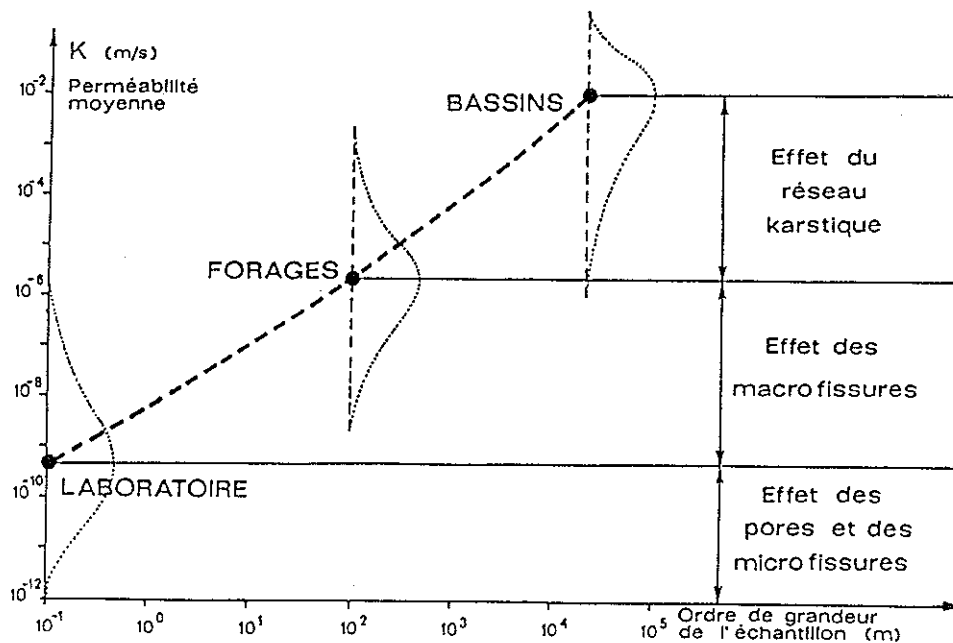
- les tests de pompage représentent une technique ponctuelle. Ils ne concernent qu'un volume très restreint de l'aquifère autour du forage, même pour un essai de longue durée. L'"effet d'échelle" (fig. 1.30), dû à l'hétérogénéité de l'aquifère, montre une probabilité négligeable de rencontrer des perméabilités élevées dans les forages. Etant le point d'aboutissement de tous les systèmes d'écoulement, l'exutoire reste encore le meilleur moyen - et en tout cas le meilleur marché - d'étudier le fonctionnement de l'aquifère pris dans son ensemble (infiltration lente, infiltration rapide, vidange des réserves etc...);

- les forages sont des vides créés artificiellement. Ils introduisent un certain nombre de perturbations dans le milieu aquifère (pertes de charges quadratiques au travers du dispositif, zones de suintement en cours de pompage), dont il est parfois difficile de tenir compte en l'absence de piézomètres supplémentaires;

- les techniques de forage, l'équipement des piézomètres et les méthodes de pompage (type de pompe, profondeur, durée des paliers etc..) manquent de standardisation;

- enfin, les valeurs de transmissivité, de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement obtenus dépendent largement du type de modèle utilisé pour l'interprétation (milieu à double porosité, milieu anisotrope (KRUSEMAN et DE RIDDER, 1973), pompage dans une fissure drainant un milieu isotrope (THIERY et al., 1983], écoulement permanent ou transitoire, conditions aux limites). Les conditions de validité des équations employées sont de plus rarement remplies.

Le problème est particulièrement complexe. Aussi nous sommes-nous contentés d'une approche statistique des transmissivités et des perméabilités, pour lesquelles nous avons recensé autant que possible de valeurs dans les calcaires carbonifères. Les transmissivités obtenues par la méthode de JACOB, en écoulement transitoire (en descente et en remontée), nous ont paru les plus représentatives.



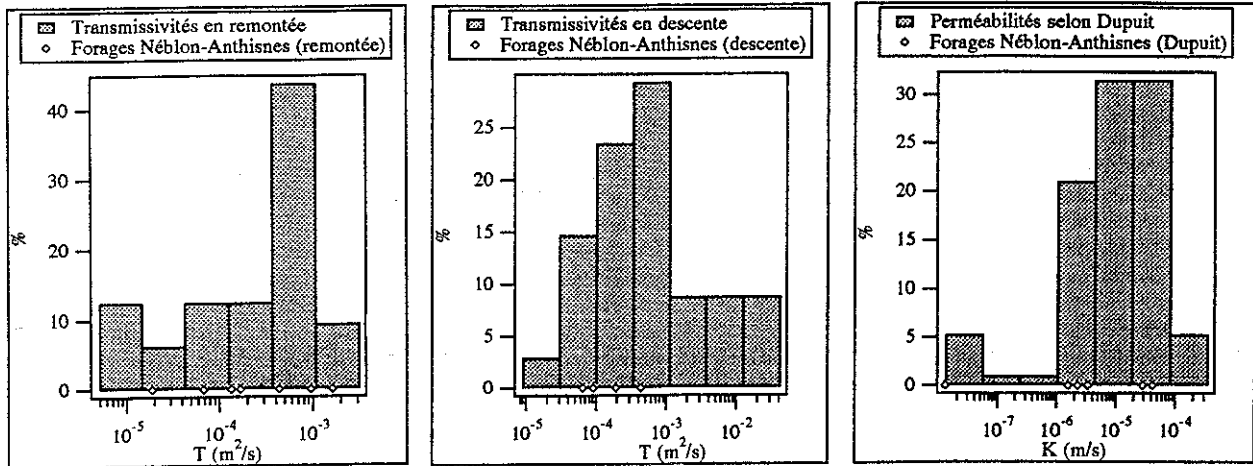
**Fig. 1.30** : Effet d'échelle sur la perméabilité dans les aquifères karstiques (d'après KIRALY, 1978).

Les résultats de cette analyse statistique sont présentés sous forme d'histogrammes aux fig. 1.31 a et b. A titre de comparaison, la fig. 1.31 c montre l'histogramme des perméabilités calculées par la méthode de DUPUIT en écoulement permanent. Sur chacune des figures, on a aussi indiqué les transmissivités et les perméabilités calculées pour les piézomètres des bassins d'Anthisnes et du Néblon. Les autres données ayant servi à l'étude proviennent d'une série de tests de pompage réalisés sur les sites suivants : Fairoule (SWDE, 1990), St-Georges sur Meuse (LGIH - DW/911, LGIH - DW/912, LGIH - DW/916, 1991), Couillet (LGIH - SOLV/88, 1988), Tournaisis, Spy et Triffroy (LAURENT, 1985), Gesves, Beez, Floreffe, Seneffe et Wiers (BIRON, 1985).

Les transmissivités les plus fréquentes sont comprises entre  $10^{-4}$  et  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. L'histogramme des transmissivités en descente (fig. 1.31 a) présente une nette dissymétrie, les transmissivités faibles étant plus fréquentes que les transmissivités élevées, sans doute en raison des pertes de charge. En ce qui concerne les transmissivités en remontée (fig. 1.31 b), on disposait de moins de données. Cela peut expliquer l'allure plus irrégulière de l'histogramme.

Les perméabilités les plus fréquentes sont, quant à elles, comprises entre  $10^{-5}$  et  $10^{-4}$  m/s.

Dans la seconde partie du travail, nous verrons que les résultats des traçages dépendent fortement de la perméabilité des forages utilisés comme points d'injection ou comme points de prélèvement des traceurs.



**Fig. 1.31** : Histogrammes des valeurs de transmissivité en descente (a) et en remontée (b) calculées à partir des pompages d'essai sur les puits et piézomètres des calcaires carbonifères en Belgique. Comparaison avec l'histogramme des perméabilités (c) calculées en régime permanent (Dupuit).

### 1.5.7. Conclusions de l'étude hydrodynamique

En guise de conclusion de l'étude hydrodynamique, le tab. 1.2 résume les différences essentielles observées entre les exutoires des systèmes étudiés.

Il montre bien l'influence de la karstification sur les écoulements : l'existence de réserves importantes dans les fines fissures du calcaire et le drainage de ces réserves par les conduits karstiques fonctionnels. Le bassin d'Anthisnes diffère de celui du Néblon par le fait que ce dernier est moins karstifié. L'aquifère du Néblon est par conséquent plus intéressant du point de vue ressources. A l'intérieur des systèmes annexes, le bassin d'Anthisnes contient cependant des réserves non négligeables. Ces réserves sont plus importantes que dans le cas des calcaires frasniens de Remouchamps.

La comparaison de ces résultats avec la classification établie par DODGE (1983) pour les aquifères karstiques du Causse Comtal (fig. 1.32) et avec celle établie par MANGIN (1975) pour les systèmes pyrénéens (fig. 1.19) amène quelques commentaires.

Les aquifères comparés par DODGE (1983) proviennent tous d'une même région mais concernent des niveaux stratigraphiques différents. Ceux étudiés par MANGIN (1975) proviennent de régions bien distinctes. Dans notre cas, la comparaison est double : d'une part entre le Dévonien de Remouchamps et le Carbonifère de la région Néblon-Anthisnes, d'autre part entre deux bassins carbonifères contenant la même nappe (Néblon et Anthisnes). Cela nous a permis de constater que l'accumulation des réserves n'est pas liée uniquement à la nature géologique de l'aquifère (les calcaires dévoniens de Remouchamps étant plus karstifiés). Il faut en effet aussi tenir compte de la manière dont ces réserves sont drainées vers la zone d'exutoire (le bassin d'Anthisnes, mieux drainé, offre de moins grandes ressources que le bassin du Néblon). Le facteur "paléogéomorphologique", responsable de la karstification, revêt donc une importance capitale.

	NEBLON	ANTHISNES	REMOUCHAMPS
Superficie (km <sup>2</sup> ) :	66.24	26.01	27.33
Type d'aquifère :	à grandes réserves avec perméabilité régionale faible en raison de l'absence d'une structure de drainage bien développée	à grandes réserves drainées par un réseau karstique bien développé	à faibles réserves du à une karstification très développée dans tout le bassin
Lithologie :	calcaires carbonifères	calcaires carbonifères	calcaires dévoniens
Exutoires :	diffus	concentrés	concentrés
Vulnérabilité à :			
- court terme :	faible	élevée	élevée
- long terme :	très élevée	élevée	faible
Q <sub>max</sub> /Q <sub>min</sub> :	1.2	3.9	90 - 160
Ecoulement souterrain spécifique (l/s/km <sup>2</sup> ) :	8.4	10.42	42
Coefficient de tarissement (j-1) :	0.0004	0.003 - 0.01	0.02 - 0.09
Réserve max. (mm) :	env. 1400	100 - 150	35
Temps moyen de transit (valeur minimale en j) :	plusieurs années	160 - 400	48
Paramètres de la classification de Mangin :			
k (réserves) :	>1	0.45	0.13
i (infiltration) :	pas de pic de crue	0.8	0.3 - 0.6
Analyses corrélatoires :			
temps de régulation (j) :	-	53	21
temps de réponse rapide (j) :	-	max. 2	1.5
Transmissivité des blocs (m <sup>2</sup> /s) :	0.0001 - 0.001	0.0001 - 0.001	-

**Tab. 1.2** : Comparaison des systèmes karstiques du Néblon, d'Anthisnes et de Remouchamps à partir de leurs caractéristiques hydrodynamiques.

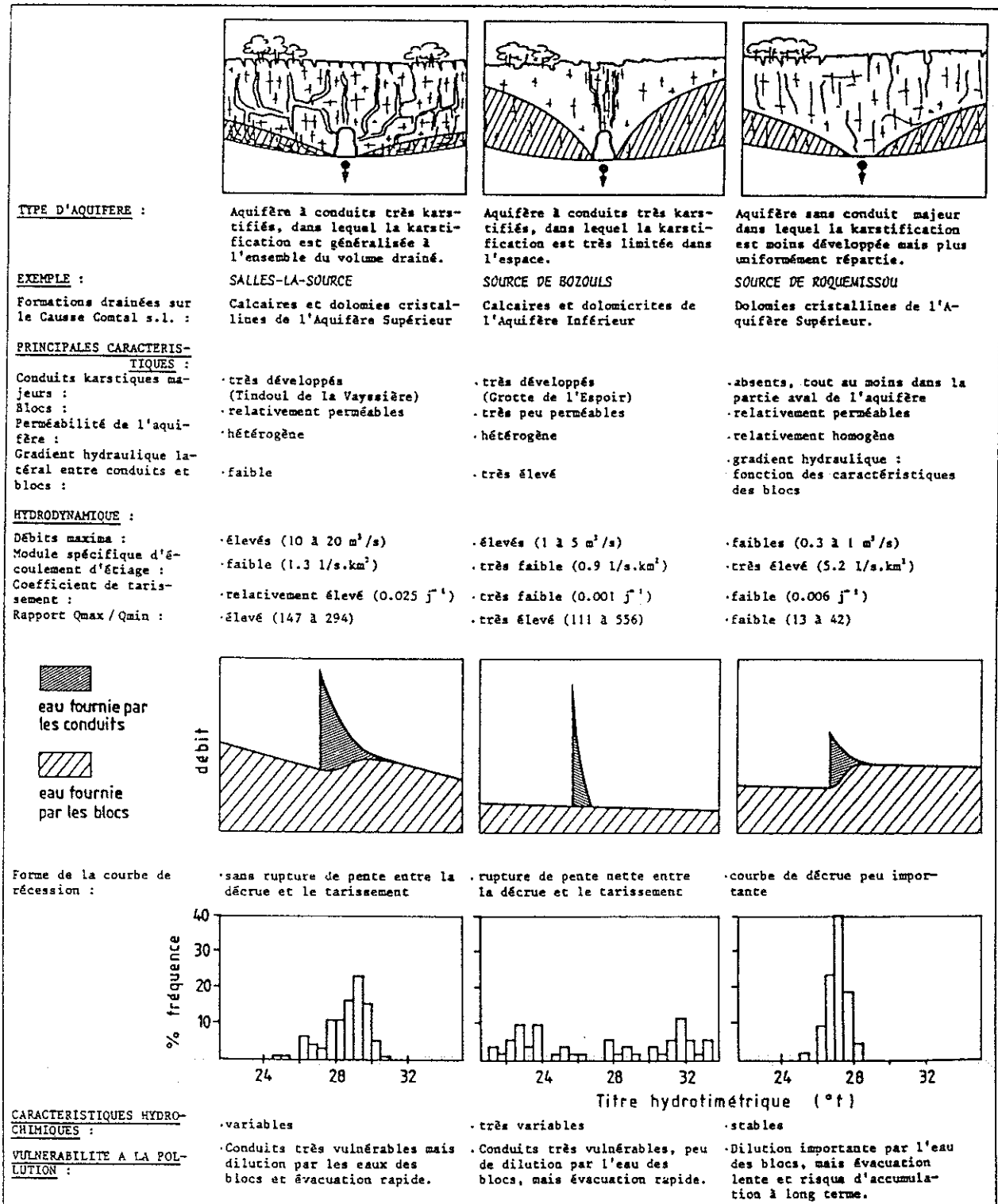


Fig. 1.32 : Classification des aquifères karstiques du Causse Comtal (d'après DODGE, 1983).

Plus les différences entre les bassins sont subtiles, plus leur étude nécessitera de points de comparaison. Il est dangereux de classer un système karstique sur base du seul rapport entre le débit maximal et le débit minimal de l'exutoire. De même, comparer des bassins sur des périodes de temps trop courtes peut aussi conduire à des erreurs de jugement.

Les différents temps de réaction ("temps de régulation" et "temps de réponse" calculés à partir de l'analyse corrélatoire, "temps moyen de transit" calculé sur base du volume dynamique, "temps moyen de séjour" déterminé par traçage) n'ont pas exactement les mêmes significations. Il convient donc de préciser, dans chaque cas, la méthode utilisée pour les obtenir.

## 1.6. HYDROGEOCHIMIE ET QUALITE DES EAUX

Au même titre qu'il a été défini une unité hydrogéologique relative aux écoulements, on peut définir d'autres unités hydrogéologiques liées au mécanisme prépondérant dans l'aquifère, à savoir la karstification. C'est le cas de l'unité "hydrogéochimique", la karstification étant essentiellement un processus chimique, basé sur la dissolution des carbonates. L'hydrogéochimie, abordée sous l'aspect de l'analyse systémique, est avant tout un moyen d'investigation du système karstique permettant de définir son fonctionnement, de révéler sa structure et de comprendre sa genèse (BAKALOWICZ, 1986).

Les processus de dissolution interviennent dans le phénomène d'auto-régulation du milieu karstique. L'hydrogéochimie est souvent envisagée suivant ses rapports avec la géomorphologie du karst, tant la dissolution, et donc la karstification, apparaissent comme les moteurs privilégiés du développement des systèmes karstiques.

Parmi les travaux réalisés dans ce domaine, on retiendra plus particulièrement ceux de MISEREZ (1973) et de BAKALOWICZ (1979) car leur approche est à la fois interprétative et très pratique.

Si les différences observées, au point de vue de la karstification, entre le bassin d'Anthisnes et celui du Néblon, sont liées à des évolutions géomorphologiques différentes, peut-être y a-t-il lieu de rechercher l'origine de ces différences dans des potentiels chimiques différents.

Les deux études réalisées sur le bassin du Néblon (CILE, LGIH, INIEX, 1986) et celui d'Anthisnes (CILE, LGIH, INIEX, 1989) étaient initialement destinées à rechercher de nouvelles ressources en eaux de bonne qualité et à étudier les risques de pollution des captages existants (galeries du Néblon). Un grand nombre d'analyses d'eau ont été effectuées. Elles apportent une "dimension" supplémentaire à notre connaissance de l'aquifère.

Ces analyses ont porté sur plusieurs groupes de substances chimiques ainsi que sur plusieurs paramètres bactériologiques :

- conductivité, pH et température in situ et au laboratoire, oxygène dissous,
- duretés temporaire et totale,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,
- chrome, cuivre, cadmium, plomb, nickel, cobalt, arsenic, strontium, zinc, manganèse;
- DCO, DBO5, PCB, phénols, pesticides organochlorés, substances extractibles au chlorure de méthylène,
- germes totaux à 22 °C et à 37 °C, streptocoques fécaux, coliformes fécaux et totaux, clostridia sulfito-réducteurs.

Les points d'eau étudiés comprennent des sources, des ruisseaux, des affleurements de la nappe dans les carrières, des piézomètres, des égouts. La situation de ces points d'eau est reprise à la fig. 1.33. Parmi eux, ceux qui nous intéresseront plus spécialement sont les sources du Famennien (et du Namurien) et les eaux des calcaires (sources et cours d'eau de surface).

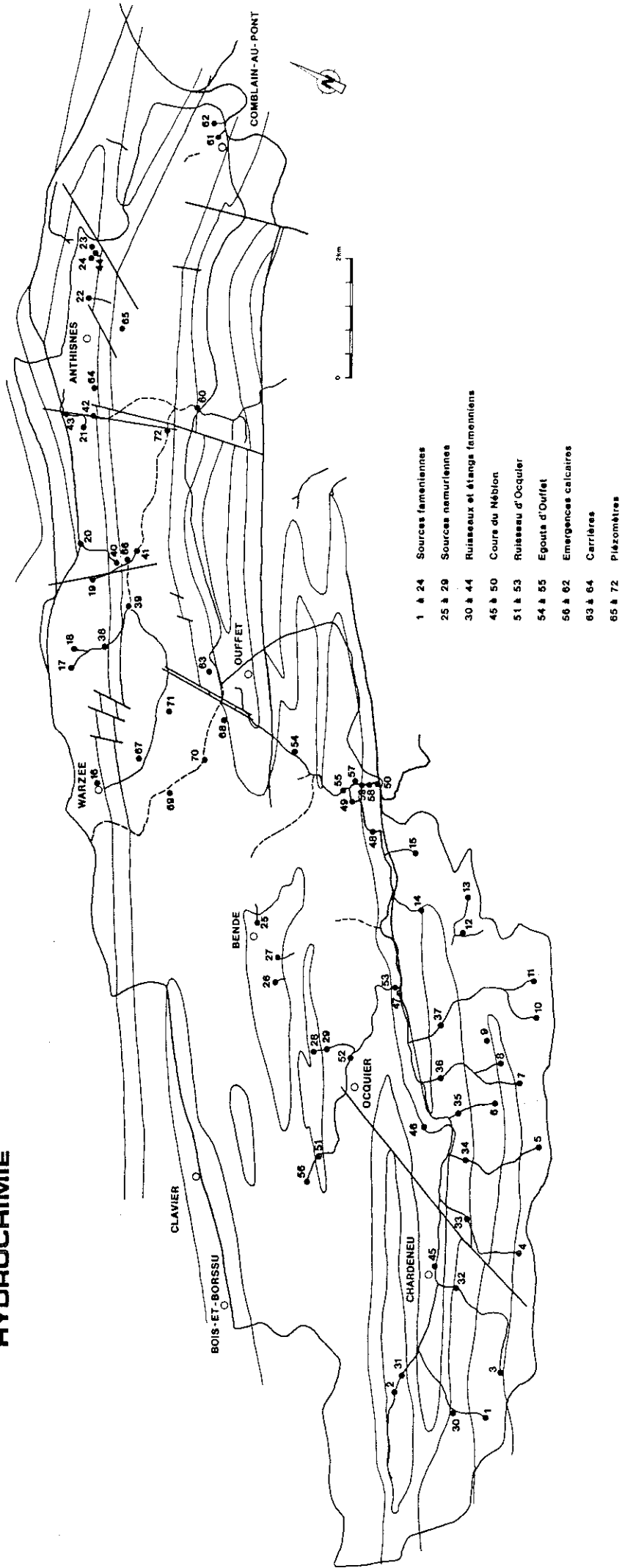
Etant donné le grand nombre de points d'eaux et de paramètres, il n'y a eu que quelques campagnes de prélèvement effectuées pour la plupart de ces paramètres (maximum 4 à Anthisnes et 6 dans le Néblon). Les variations temporelles n'ont donc pas pu être définies en détail (d'autant plus que les cycles étudiés ne correspondent pas pour les deux bassins). L'expérience montre cependant que le chimisme des eaux souterraines, à l'exception des infiltrations rapides dans le karst, peut souvent être considéré comme relativement constant.

Nous avons mesuré les variations de la conductivité, de la température et de l'oxygène dissous à la résurgence de Comblain, afin de préciser le rôle joué par la composante rapide de l'écoulement dans le fonctionnement de l'exutoire. La conductivité est en effet un paramètre très sensible. Bien qu'il dépende de manière complexe de la composition chimique, il est souvent utilisé comme indicateur du milieu où les eaux ont séjourné. La validité des résultats obtenus par cette approche sera discutée par comparaison avec les résultats obtenus par d'autres méthodes (hydrodynamique, traçages).

Nous nous intéresserons ensuite au processus de dissolution, c'est-à-dire aux équilibres calco-carboniques et à la saturation des eaux, calculée sur base de la teneur en bicarbonates et du pH.

Enfin, pour clore le chapitre, nous ferons une évaluation de la "dissolution spécifique" (aussi appelée "dénudation chimique") des différents bassins étudiés.

**HYDROCHIMIE**



**Fig. 1.33 :** Carte de situation des mesures hydrochimiques. Les numéros correspondent à ceux des analyses moyennes fournies en annexe. Les analyses concernent les sources fameniennes, les sources namurloises, les ruisseaux et étangs fameniens, divers points le long du Néblon, le ruisseau d'Ocquier et le Nesson (égouts d'Ouffet), les émergences calcaires, l'eau des carrières ainsi que celle des piézomètres.



### 1.6.1. Composition chimique des eaux

Pour les raisons évoquées ci-dessus, nous avons choisi de travailler, dans un premier temps, sur les moyennes des paramètres chimiques, de manière à caractériser la provenance de l'eau étudiée en 72 points d'eau.

Les teneurs sont représentées à l'aide d'un diagramme de SCHOELLER à la fig. 1.34. Pour construire ce diagramme, on a considéré séparément les moyennes des points d'eau de chaque provenance : sources du Famennien, du Namurien, ruisseaux famenniens, carrières dans les calcaires, cours du Néblon, ruisseau d'Ocquier (origine calcaire), émergences calcaires (résurgences, sources, galeries), forages et enfin égouts. On trouvera les valeurs précises de ces moyennes en annexe car le diagramme ne donne qu'une vue globale de la chimie des eaux.

Le fait le plus caractéristique est l'augmentation de la minéralisation de l'amont vers l'aval des bassins, depuis les sources en terrain non karstique, jusqu'aux exutoires de surface (rivière Néblon) d'une part et jusqu'aux émergences souterraines (galeries du Néblon et résurgence de Comblain) d'autre part. L'eau des forages, circulant en général très lentement, présente une forte minéralisation, parfois accentuée par des perturbations dues aux travaux d'équipement des piézomètres.

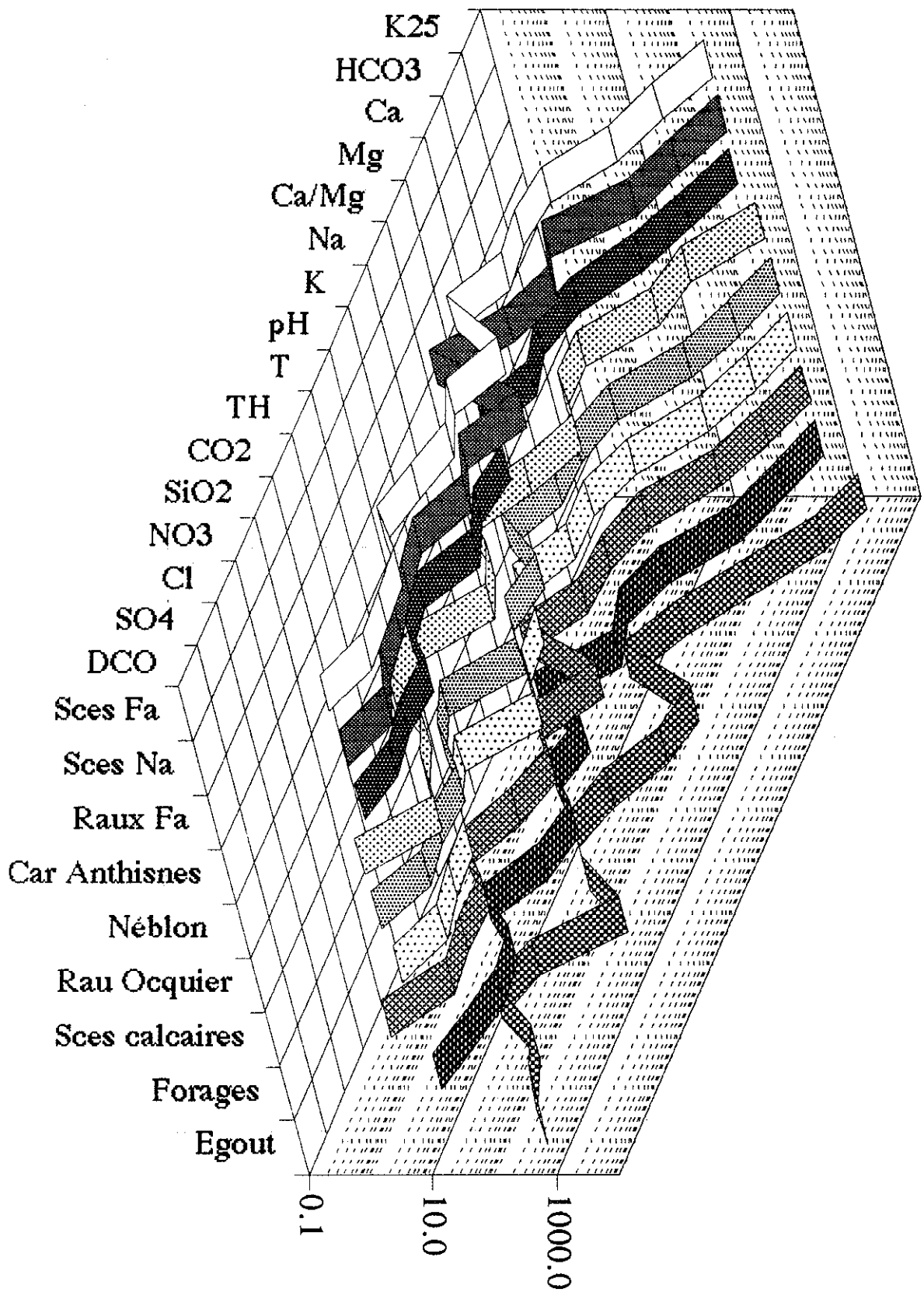
L'essentiel de la minéralisation provient des carbonates et bicarbonates de calcium et de magnésium. Sur un diagramme binaire, où l'on porte, suivant le premier axe la proportion des bicarbonates par rapport à la somme des anions, et suivant le second axe la proportion de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  par rapport à la somme des cations (fig. 1.35), la distinction entre les eaux calcaires et non calcaires apparaît de façon encore plus nette.

Les sources et ruisseaux famenniens (et namuriens) montrent une grande dispersion, en fonction de leur degré de saturation vis-à-vis de la calcite. Ce degré de saturation dépend entre autres :

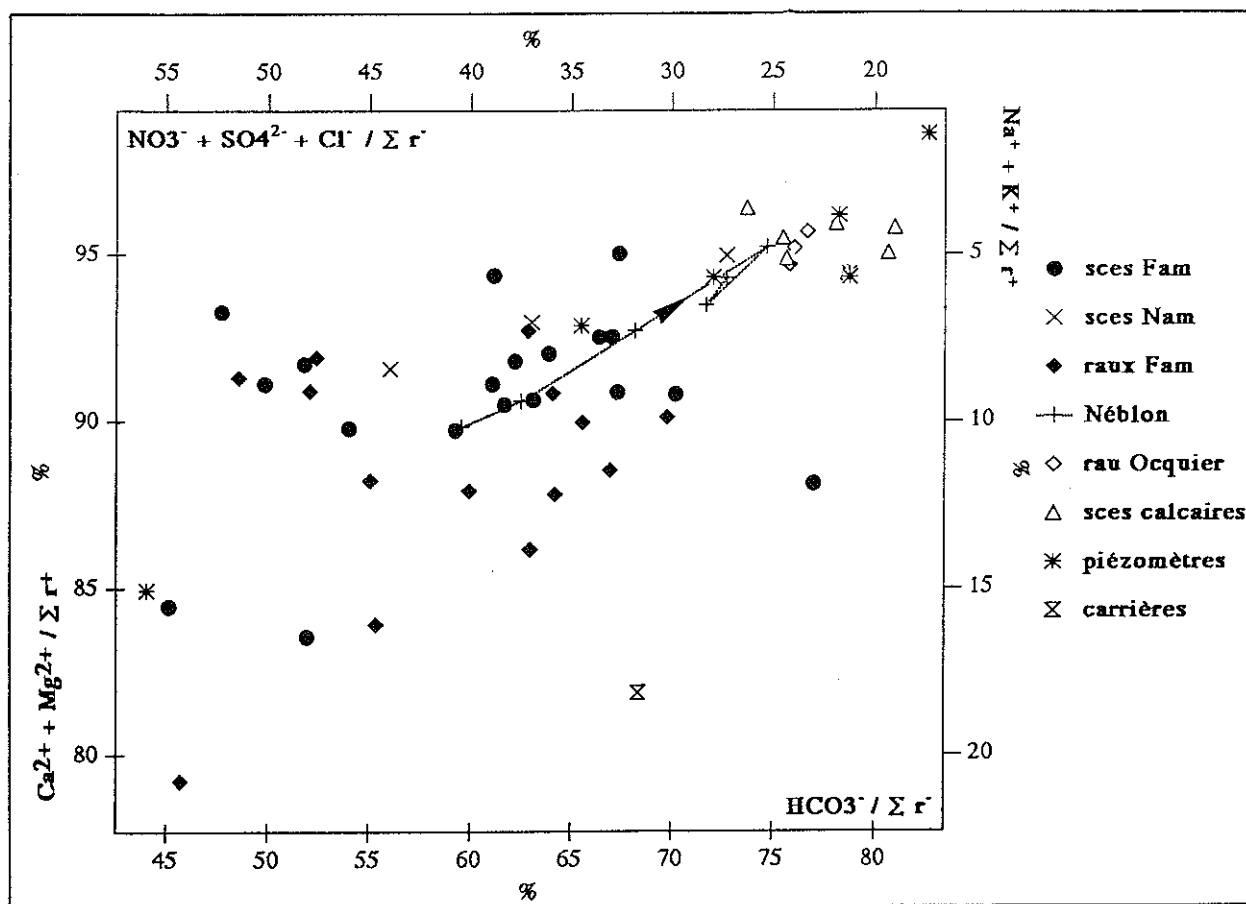
- de l'agressivité initiale de l'eau (elle même dépendante des teneurs en  $\text{CO}_2$  dans la zone d'infiltration),
- de la teneur en carbonates des roches traversées,
- du temps de contact entre l'eau et la roche (puisque la cinétique intervient),
- de la dilution par les eaux de ruissellement.

L'évolution du chimisme du Néblon, de l'amont vers l'aval (trait pointillé de la fig. 1.35), indique clairement la participation croissante de la nappe des calcaires. On voit aussi très bien l'origine calcaire du ruisseau d'Ocquier.

L'eau de la nappe affleurant dans les fonds de carrière est particulière étant donné son caractère plus ou moins stagnant en surface. Riche en bicarbonates, cette eau reste relativement pauvre en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  en comparaison de  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ .

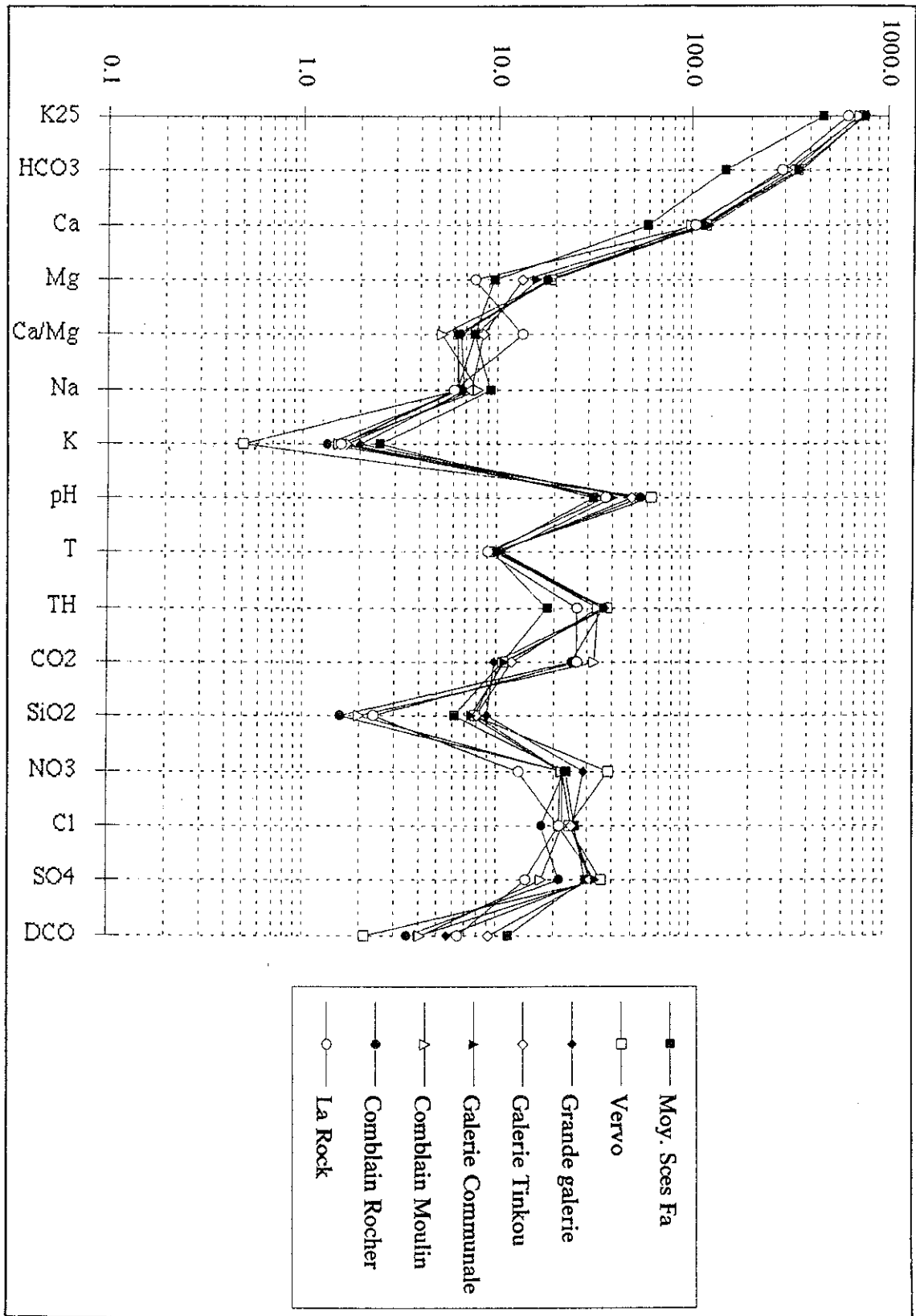


**Fig. 1.34 :** Diagramme de SCHOELLER montrant les compositions moyennes des différents types d'eau (sources fameniennes, sources namuriennes, ruisseaux et étangs fameniens, eau de la carrière d'Anthisnes, Néblon, ruisseau d'Ocquier, émergences calcaires, forages et égouts). Les moyennes ont été effectuées sur quatre à six campagnes selon les cas. Dans la colonne intitulée pH, c'est la concentration en  $H^+$  qui a été reportée en échelle logarithmique.



**Fig. 1.35 :** Compositions chimiques moyennes des différents points d'eau (sources famenniennes, sources namuriennes, ruisseaux et étangs famenniens, Néblon, ruisseau d'Ocquier, émergences calcaires, piézomètres et eaux des carrières) dans le diagramme  $(\text{HCO}_3^-)$ - $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ . Les pourcentages sont exprimés par rapport à la somme des anions et des cations. Les eaux en provenance du Famennien se distinguent des eaux calcaires. De l'amont vers l'aval, l'eau du Néblon passe progressivement du type "famennien" au type "calcaire" (trait pointillé).

Un diagramme de SCHOELLER plus détaillé a été établi (fig. 1.36) pour les sources calcaires prises séparément. La composition de ces émergences calcaires est comparée à la moyenne des sources famenniennes. Les sources du synclinal d'Anthisnes (Comblain Moulin, Comblain Rocher et La Roke) ont des teneurs en  $\text{SiO}_2$  légèrement plus faibles que les sources du Néblon. Peut-être s'agit-il à nouveau d'une conséquence de la dissolution plus intense dans le bassin d'Anthisnes. Cela mis à part, l'ensemble des sources calcaires paraît très homogène, conséquence d'un temps moyen de séjour assez long dans l'aquifère.



**Fig. 1.36 :** Diagramme de SCHELLER montrant les compositions moyennes des différents points d'eau dans les calcaires (source de Vervo = pt 56, galeries de captage de Néblon-le-Moulin = pts 58, 59 et 57, résurgence du Moulin à Comblain = pt 61, source du rocher à Comblain = pt 62, source de La Roke = pt 60). Comparaison avec la moyenne de toutes les sources du Famennien.

### 1.6.2. Variations de la conductivité aux émergences

Dans ce type d'aquifère, où la chimie est très peu contrastée, la conductivité électrique reste le moyen le plus approprié pour déceler toute variation, que ce soit dans l'espace ou dans le temps.

Les eaux souterraines des calcaires carbonifères (du moins dans le synclinorium de Dinant), sont facilement identifiables par leur conductivité typiquement située aux alentours de  $700 \mu\text{Scm}^{-1}$ . Des conductivités plus faibles sont parfois observées (jusqu'à  $500 \mu\text{Scm}^{-1}$ ) lorsqu'il s'agit de circulations plus locales, par exemple dans les formations du Strunien, ou lorsque des infiltrations directes viennent se superposer à l'écoulement de base.

VAN DEN BROECK, MARTEL et RAHIR (1910), avancent l'hypothèse suivant laquelle le Tournaisien, plus riche en crinoïdes, aurait un pouvoir filtrant supérieur à celui du Viséen, d'où une eau de meilleure qualité. D'après nous, la capacité de filtration du Tournaisien apparemment plus élevée dans la plupart des cas, viendrait plutôt du fait que les formations qui constituent l'aquifère sont plus hétérogènes (niveaux de calcschistes) et moins continues. Elles auraient par conséquent subi une karstification moins intense que l'aquifère du Viséen.

Qui dit pouvoir filtrant plus élevé, dit aussi temps de séjour plus important et donc conductivité plus élevée. Dans le bassin du Néblon, les eaux les plus minéralisées sont celles de la grande galerie, émergeant des calcaires viséens et non du Tournaisien. Nous avons en effet souligné à plusieurs reprises que ce bassin était, dans l'ensemble, peu karstifié. La valeur moyenne de conductivité à la grande galerie est  $755 \mu\text{Scm}^{-1}$  (à  $25^\circ\text{C}$ ). Elle ne présente aucune variation lors des crues, seulement une très lente variation saisonnière suivant l'état de recharge de la nappe. Malgré leur très faible proportion dans l'écoulement total, des infiltrations directes ont cependant été mises en évidence par d'autres méthodes. Ainsi, quelques crustacés en provenance des eaux de surface (les plans d'eau de la galerie et de la rivière sont très proches l'un de l'autre) ont été récoltés dans la grande galerie et des traces de fluorescéine ont été détectées lors du traçage à la perte du Bois de Marsée (§ 1.7.7.2).

La conductivité est plus faible et beaucoup plus variable (distribution de fréquence fig. 1.37) à la résurgence de Comblain étant donné la superposition à l'écoulement de base d'un écoulement rapide. La valeur moyenne est de  $709 \mu\text{Scm}^{-1}$ .

La conductivité a été enregistrée à la résurgence durant quelques mois (fig. 1.38). Les infiltrations rapides se traduisent par des chutes de conductivité, parfois de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{Scm}^{-1}$ .

Une séparation des composantes de l'hydrogramme a été effectuée sur base de ces fluctuations et en tenant compte, comme fonction d'entrée, de la conductivité moyenne de l'eau des pertes situées en amont du bassin ( $375 \mu\text{Scm}^{-1}$ ).

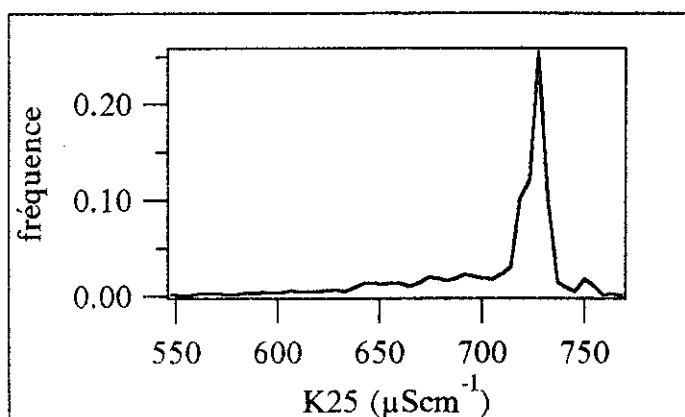


Fig. 1.37 : Distribution de fréquence de la conductivité à 25°C à la résurgence du Moulin .

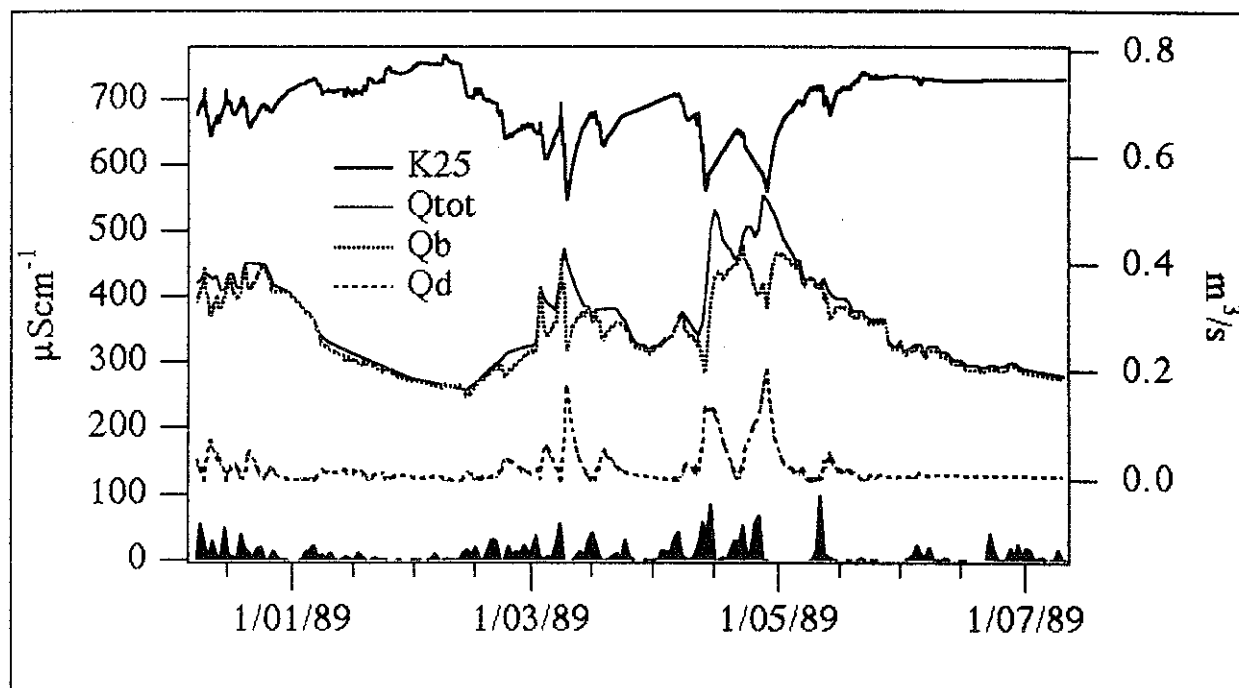


Fig. 1.38 : Séparation des composantes de l'hydrogramme de la résurgence du Moulin à Comblain d'après les variations de la conductivité de l'eau à 25°C (K25 = conductivité à 25°C Qtot = débit total Qb = débit de l'écoulement de base Qd = débit de l'infiltration directe). En bas du graphique : précipitations à Ouffet. Au début des crues, l'augmentation du débit de base correspond à l'expulsion de l'eau des drains. L'infiltration directe arrive seulement par la suite.

La formule simple suivante, exprimant le mélange, permet d'évaluer le débit de base  $Q_b$  et le débit dû aux infiltrations directes  $Q_d$  :

$$Q_b = Q_{tot} (C_{tot} - C_d) / (C_b - C_d)$$

où

$Q_{tot}$  = le débit total,

$C_{tot}$  = la concentration (dans ce cas la conductivité) à l'émergence,

$C_d$  = la concentration de l'eau d'infiltration directe,

$C_b$  = la concentration de l'eau du réservoir lent.

Les résultats sont repris à la fig. 1.38.

Rappelons que ce modèle, trop simple, ne tient pas compte des interactions entre les deux types de réservoirs ni de l'existence du volume d'eau stocké à l'intérieur du réseau karstique. Cette eau stockée dans les drains est responsable de "l'effet piston" (augmentation de la minéralisation en début de crue par chasse des eaux anciennes devant les eaux fraîchement infiltrées). Les débits  $Q_d$  obtenus sont par conséquent les débits d'infiltration et non les débits résultant de l'augmentation de la charge. Globalement, le modèle donne cependant une idée des apports supplémentaires par les pertes au cours des crues. Ce point sera précisé lors des études par traçage.

Remarquons aussi que, selon qu'on est en crue ou en décrue et selon les types de temps des semaines précédentes, à un débit donné ne correspond évidemment pas toujours la même conductivité et qu'il serait par conséquent intéressant de délimiter la gamme de ces conductivités pour un même débit (EK, communication orale).

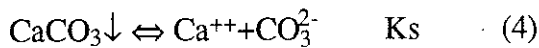
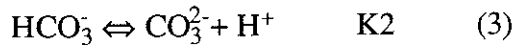
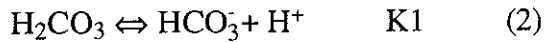
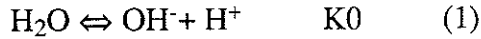
### 1.6.3. Equilibres calco-carboniques

Puisqu'il est le principal mécanisme entrant en ligne de compte dans la karstification, il est normal que nous nous attardions un instant sur la dissolution des carbonates.

De nombreux auteurs, parmi lesquels EK et ROQUES (1972), MISEREZ (1973), BAKALOWICZ (1979) et ROQUES (1990), ont tenté de définir les processus d'équilibre entre la phase carbonatée solide (la roche calcaire), la phase aqueuse (l'eau de l'aquifère) et la phase gazeuse, porteuse du  $CO_2$  agressif. Certains d'entre eux se sont plutôt attachés à la détermination expérimentale des constantes d'équilibre alors que d'autres envisageaient plutôt le problème sous l'angle de la détermination des paramètres (pH,  $pCO_2$ ,  $HCO_3^-$ ) à prendre en compte dans les calculs d'équilibre.

Du fait des temps de séjour parfois très courts dans le karst, il s'instaure une compétition entre la cinétique des réactions et le temps de contact avec la phase solide. Pour cette raison, l'examen de l'état de saturation des eaux karstiques est aussi un moyen d'étudier les écoulements.

L'état de saturation vis-à-vis de la calcite est souvent exprimé par l'écart  $\Delta\text{pH}$  entre le pH réel et le pH d'équilibre (pH<sub>éq</sub>). Le pH d'équilibre est le pH qu'aurait l'eau si elle était à l'équilibre avec les mêmes teneurs en  $\text{Ca}^{2+}$  et en  $\text{HCO}_3^-$  que celles mesurées effectivement. En première approximation, l'équilibre est régi par les constantes d'équilibre et les équations suivantes :



Ces équilibres dépendent de la température. Les tests d'agressivité montrent que les eaux naturelles n'obéissent généralement pas aux courbes d'équilibre correspondant à leur température réelle. Par exemple, MISEREZ (1973) constate que l'isotherme correspondant à l'équilibre des eaux jurassiennes est celle de 30 °C alors que la température moyenne des eaux est d'environ 10°C. Cela peut provenir du fait que l'on néglige l'effet dû à la présence d'autres ions en solution (ions communs, paires d'ions etc...) ou du fait qu'il faudrait idéalement tenir compte des écarts entre les activités et les concentrations, en fonction de la force ionique.

Pour le calcul du  $\Delta\text{pH}$ , nous avons utilisé un programme mis au point par HISSEL (1982) et adapté pour une calculatrice HP42S (listing en annexe). Ce programme tient compte de la force ionique  $J$  de l'eau. Cette dernière est exprimée en fonction de la résistivité électrique par :

$$J = 16,5 / \rho$$

où  $\rho$  est la résistivité électrique de l'eau en  $\Omega\text{cm}$  à 18°C

Les coefficients d'activité  $\gamma$  sont donnés par :

$$\log \gamma = -A \cdot z^2 \cdot J^{1/2}$$

où  $A$  est une constante dont la valeur est 0,509 à 25°C et  $z$  la charge de l'ion

Ce programme permet en outre le calcul des pH stabilisés, de la quantité de  $\text{CaCO}_3$  précipitée ou dissoute, ainsi que des concentrations des espèces  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  aux pH réel, pH d'équilibre et pH stabilisé.

Les valeurs suivantes des constantes  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_s$  à 25°C sont tirées de ROQUES (1990) :

$$K_0 = 1,825 \cdot 10^{-16} \quad K_1 = 3,72 \cdot 10^{-7}$$

$$K_2 = 4,68 \cdot 10^{-11} \quad K_s = 2,8 \cdot 10^{-9}$$

Ces valeurs sont déterminées expérimentalement.



Prenons par exemple une eau au moment de son infiltration dans les calcaires. Son agressivité dépend de la quantité de CO<sub>2</sub> en solution, laquelle est directement proportionnelle (loi de Henry) à la quantité de CO<sub>2</sub> disponible dans la phase gazeuse (CO<sub>2</sub> principalement d'origine végétale). Au cours de son trajet, l'eau va dissoudre (de moins en moins vite) une certaine quantité de calcite.

En fonction du temps de séjour et des phénomènes complexes susceptibles d'intervenir à l'intérieur de l'aquifère, on peut trouver à l'émergence une eau ayant atteint ou non l'état d'équilibre. Si l'équilibre est atteint, la pression de CO<sub>2</sub> correspondante est appelée "pCO<sub>2</sub> équilibrante".

Il se peut aussi que, suite à une modification des conditions dans l'aquifère (pCO<sub>2</sub>, température), l'eau devienne sursaturée, c'est-à-dire que la pression de CO<sub>2</sub> soit devenue telle qu'une partie de la calcite en solution pourrait précipiter.

Si l'on désire obtenir la pression équilibrante (puisque c'est elle qui règle la karstification), on se heurte à une difficulté supplémentaire liée à la représentativité de l'échantillonnage à la source. En effet, si l'eau est sursaturée, il peut y avoir départ de CO<sub>2</sub> (dégazage) et précipitation des carbonates en amont du point de prélèvement. D'autre part, si les paramètres ne sont pas mesurés in situ, le dégazage de l'échantillon (durant le transport et le stockage) va modifier le pH et les teneurs en bicarbonates.

Les conclusions que l'on peut tirer des analyses effectuées au laboratoire, sans autres précautions, sont donc fort limitées.

Le tableau ci-dessous résume les informations que l'on peut espérer retirer d'analyses au laboratoire, suivant que l'eau, à sa sortie de l'aquifère, est sursaturée, à l'équilibre ou sous-saturée, en considérant un départ possible du CO<sub>2</sub> entre le prélèvement et l'analyse (ouverture du système).

Etat initial	Système	pH source	pH <sub>éq</sub> initial	pH labo	pH <sub>éq</sub> calculé
sous-saturé	fermé	toute réaction	est impossible,	la phase rocheuse	étant soustraite
sous-saturé	ouvert	7	7,2 (>)	> 7 [CO <sub>2</sub> ]↓ <sup>1</sup> ⇒ pH↑ et CaCO <sub>3</sub> ↓	> 7 équilibre ou sous-saturée
à l'équilibre	fermé	7	7	7	7
à l'équilibre	ouvert	7	7	> 7 [CO <sub>2</sub> ]↓ ⇒ pH↑ et CaCO <sub>3</sub> ↓	> 7 équilibre ou sursaturée
sursaturé	fermé	7	6,8 (<)	entre 6,8 et 7 CaCO <sub>3</sub> ↓	6,8 équilibre ou sursaturée
sursaturé	ouvert	7	6,8 (<)	> 6,8 [CO <sub>2</sub> ]↓ ⇒ pH↑ et CaCO <sub>3</sub> ↓	> 6,8 équilibre ou sursaturée

<sup>1</sup>Le système étant ouvert, il y a dégazage du CO<sub>2</sub> entraînant la diminution de sa concentration dans la phase aqueuse.

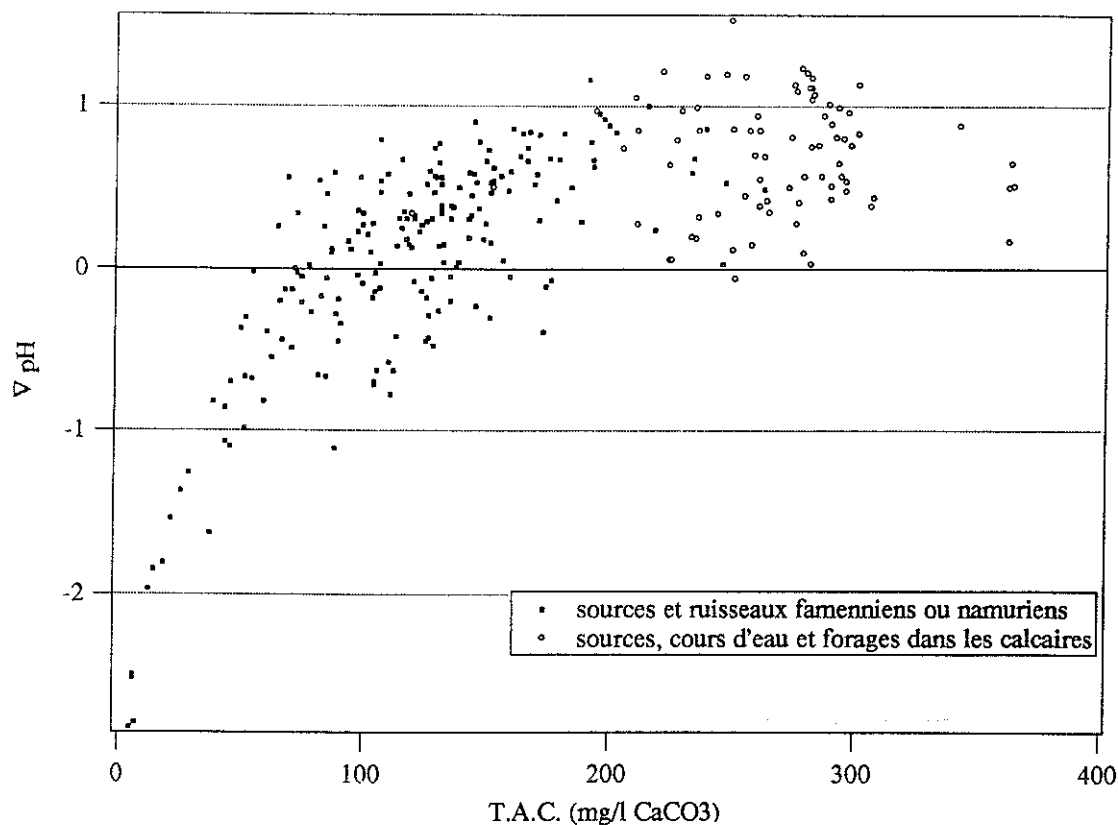
Le pH initial est pris arbitrairement égal à 7 et les autres valeurs sont prises aussi arbitrairement afin de simplement faire comprendre le sens des variations susceptibles d'être observées.

D'après le tableau, on voit que seul le cas d'une eau sous-saturée au laboratoire permet de conclure avec certitude qu'elle était sous-saturée à l'émergence. Dans les autres cas, le fait que l'eau soit à l'équilibre ou sursaturée ne permet pas de déduire son état initial.

Le calcul des saturations présente donc pour nous un intérêt limité dans l'étude des émergences calcaires, dans la mesure où, dans les bassins étudiés, il y a peu de chance de rencontrer des eaux sous-saturées, étant donné les temps de séjour élevés.

Par contre, la méthode est intéressante pour étudier le problème de l'agressivité des eaux d'infiltration.

Sur la fig. 1.39, on a reporté les indices de saturation  $\Delta pH$ , calculés à partir des mesures faites au laboratoire, en fonction de la teneur en bicarbonates, pour tous les prélèvements effectués.



**Fig. 1.39 :** Indices de saturation vis-à-vis de la calcite en fonction du titre alcalimétrique complet (T.A.C.) pour tous les prélèvements effectués dans les bassins d'Anthisnes et du Néblon. pH et T.A.C. analysés au laboratoire. Les sources et ruisseaux famenniens sont parfois sous-saturés alors que les eaux calcaires sont systématiquement sursaturées.

Les eaux des calcaires ont été séparées de celles en provenance du Famennien et du Namurien. La saturation est atteinte (ou dépassée) pour la presque totalité des eaux calcaires alors que plusieurs sources ou ruisseaux en provenance du Famennien sont agressifs. Le nombre de cas où les sources et ruisseaux famenniens ont atteint (ou dépassé) l'équilibre reste toutefois très important. Il est par conséquent logique de supposer que l'action corrosive de ces eaux, à leur entrée dans les calcaires, est assez limitée. Ce fait avait déjà été souligné par EK (1969), qui l'explique par la teneur parfois très élevée en carbonates de calcium des formations du Famennien.

#### 1.6.4. Dénudation karstique

A partir de la quantité d'eau écoulée et de la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  aux exutoires, on peut calculer la quantité de matière en solution exportée suite au processus de karstification. Cette quantité, aussi appelée "dissolution spécifique", peut être exprimée en  $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$  ou en  $\text{mm}/1000 \text{ ans}$  (BÖGLI, 1980).

En toute rigueur, il faudrait corriger ces quantités, rapportées à la surface du bassin versant, en tenant compte de la proportion de terrains non karstiques. Nous venons cependant de voir que, dans la région étudiée, une partie importante de la charge dissoute pouvait aussi provenir des terrains famenniens (excepté dans les zones décalcifiées).

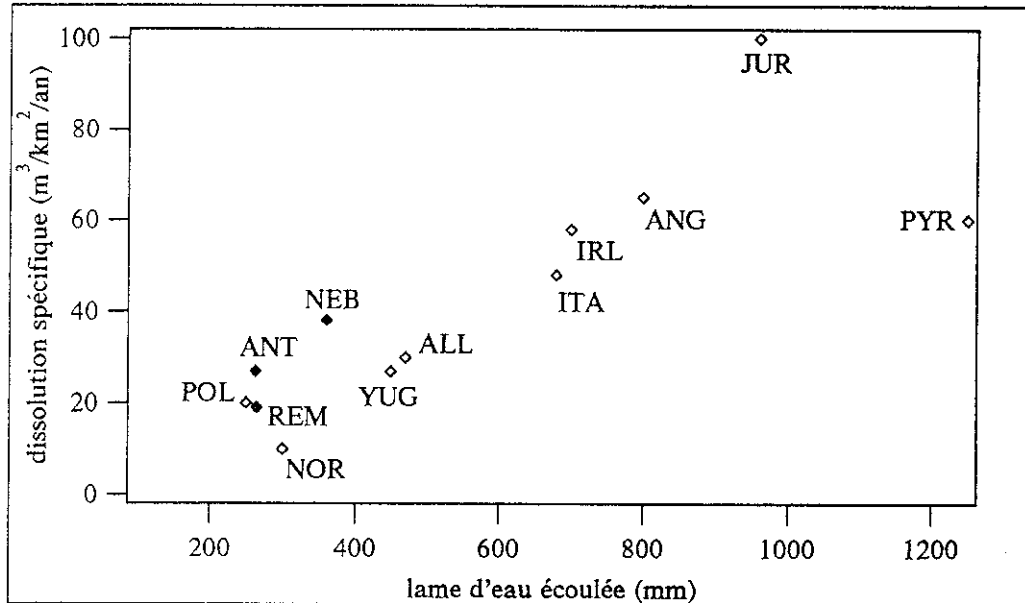
BAKALOWICZ (1986) propose d'effectuer le bilan de matière exportée, non plus en prenant des valeurs moyennes, mais des valeurs instantanées, considérées avec un pas de temps suffisamment court. Selon lui, l'absence de prise en compte des variations de débits et de teneurs en  $\text{CaCO}_3$  pourrait expliquer la grande variabilité des valeurs de dissolution spécifique rencontrées dans la littérature. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'examiner la forte variation de la dissolution spécifique (directement proportionnelle à l'écoulement spécifique) en fonction des années, pour un même bassin.

En ce qui concerne le bassin du Néblon, en tenant compte du  $\text{CaCO}_3$  exporté à la surface (Néblon, 105 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$  en moyenne) et par les exutoires souterrains (galeries de captage, 106 mg/l  $\text{Ca}^{2+}$  en moyenne), la dissolution spécifique atteindrait 38  $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$  (soit 38 mm/1000 ans) pour l'année 85-86.

En ce qui concerne le bassin d'Anthisnes, le calcul pour la période 88-91 ( $\text{Ca}^{2+}$  moyen = 103 mg/l et  $Q$  moyen = 0,217  $\text{m}^3/\text{s}$ ) donne une dissolution spécifique d'à peine 27  $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$  (soit 27 mm/1000 ans).

En ce qui concerne le bassin de Remouchamps, entre 89 et 91 ( $\text{Ca}^{2+}$  moyen = 70 mg/l et  $Q$  moyen = 0,230  $\text{m}^3/\text{s}$ ), cette valeur est encore plus basse : 19  $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$  (soit 19 mm/1000 ans).

Ces valeurs sont comparées à celles d'autres régions karstiques d'Europe (d'après JENNINGS, 1987 et BAKALOWICZ, 1986) sur le graphique de la fig. 1.40 (dissolution spécifique en fonction de la lame d'eau écoulée). La dissolution spécifique est fonction du climat, de l'altitude et du fait que le karst soit nu ou couvert.



**Fig. 1.40** : Dissolutions spécifiques (en  $m^3/km^2/an$ ) en fonction de la lame d'eau écoulée (en mm) pour les trois bassins étudiés (REM = Remouchamps NEB = Néblon ANT = Anthises) comparées à celles de systèmes karstiques en provenance d'autres pays ou régions (JUR = Jura PYR = Pyrénées ANG = Angleterre IRL = Irlande ITA = Italie ALL = Allemagne YUG = ex Yougoslavie NOR = Norvège POL = Pologne, d'après BAKALOWICZ, 1986, et JENNINGS, 1987).

Les dissolutions spécifiques des bassins étudiés peuvent être aussi faibles pour plusieurs raisons, parmi lesquelles la principale semble être l'écoulement spécifique très faible. Une étude plus précise des débits et des quantités de  $CaCO_3$  en provenance des terrains non karstiques dans les trois bassins permettrait sans doute de corriger les valeurs, afin d'obtenir une valeur plus exacte de la dissolution spécifique.

## 1.7. TRAÇAGES DANS LES BASSINS DU NEBLON ET D'ANTHISNES

### 1.7.1. Introduction

Le traçage artificiel est un des plus anciens moyens d'investigation des aquifères karstiques. Cet outil a été développé à une époque où l'on n'avait encore qu'une vision très "spéléomorphique" du karst (MANGIN, 1975). Son intérêt principal était de permettre la localisation des axes drainants du système.

La méthode a ensuite été quelque peu délaissée au profit de l'approche hydrodynamique et de l'étude des traceurs naturels car ces dernières rendaient mieux compte du fonctionnement de l'aquifère dans son ensemble (réserves et drains). Les seuls points d'injection utilisés à l'époque étaient les pertes naturelles. Celles-ci ne concernent, dans certaines régions karstiques (par exemple le Néblon) qu'une surface très limitée du bassin versant. De plus, le fait de travailler dans des conditions hydrodynamiques variables a toujours été un obstacle.

Un regain d'intérêt est apparu avec les problèmes liés au transit des polluants dans les eaux souterraines. Le traçage est devenu un moyen de simuler le transport des polluants miscibles dans l'aquifère. Depuis lors, on assiste à un développement croissant des moyens mis en oeuvre et des méthodes d'interprétation des traçages.

La détection des traceurs en très faibles teneurs et le calcul précis de leur bilan permettent d'étudier les échanges entre les parties transmissive et capacitive de l'aquifère.

La seconde partie de notre travail s'inscrira dans cette tendance actuelle des recherches sur la mise en oeuvre et l'interprétation des expériences de traçage dans les milieux fissuré et karstique. Les expériences réalisées sur l'aquifère calcaire de la région Néblon-Anthisnes ont été incluses dans la première partie en raison de leur intérêt régional. Elles seront rediscutées dans un cadre plus large au cours de la seconde partie.

Le système du Néblon posait dès le départ un problème, à cause du développement réduit de son exokarst, la seule perte digne de ce nom étant celle du Bois de Marsée au SW du village de Bende.

Dans le bassin d'Anthisnes, par contre, on connaissait trois zones importantes où les eaux pénètrent sous terre par plusieurs chantoirs : celle de Lizin-Crossée, celle de Vien et une troisième située au Sud d'Anthisnes.

L'idée d'utiliser les piézomètres pour les injections (ou la récupération) des traceurs est venue de la nécessité de mieux connaître les écoulements dans les blocs peu perméables. Des échanges entre un piézomètre et le drain karstique passant à proximité ont été mis en évidence avec certitude dans le bassin d'Anthisnes (liaison Crossée-P14).

Il était également intéressant d'étudier les modalités de passage en fonction des conditions hydrodynamiques. L'étude hydrodynamique (§ 1.5.3.2.) a en effet montré que l'infiltration et la recharge varient suivant la période considérée au cours du cycle hydrologique. Trois traçages, réalisés dans des conditions hydrodynamiques différentes à partir de la même perte (Crossée), ont permis d'étudier ce problème.

### 1.7.2. Contexte hydrogéologique

Les pertes ayant fait l'objet des traçages (fig. 1.41) ont pour origine les eaux du Namurien en ce qui concerne le bassin du Néblon (perte du Bois de Marsée) et les eaux du Famennien en ce qui concerne le bassin d'Anthisnes (pertes de Crossée, de Vien et d'Anthisnes).

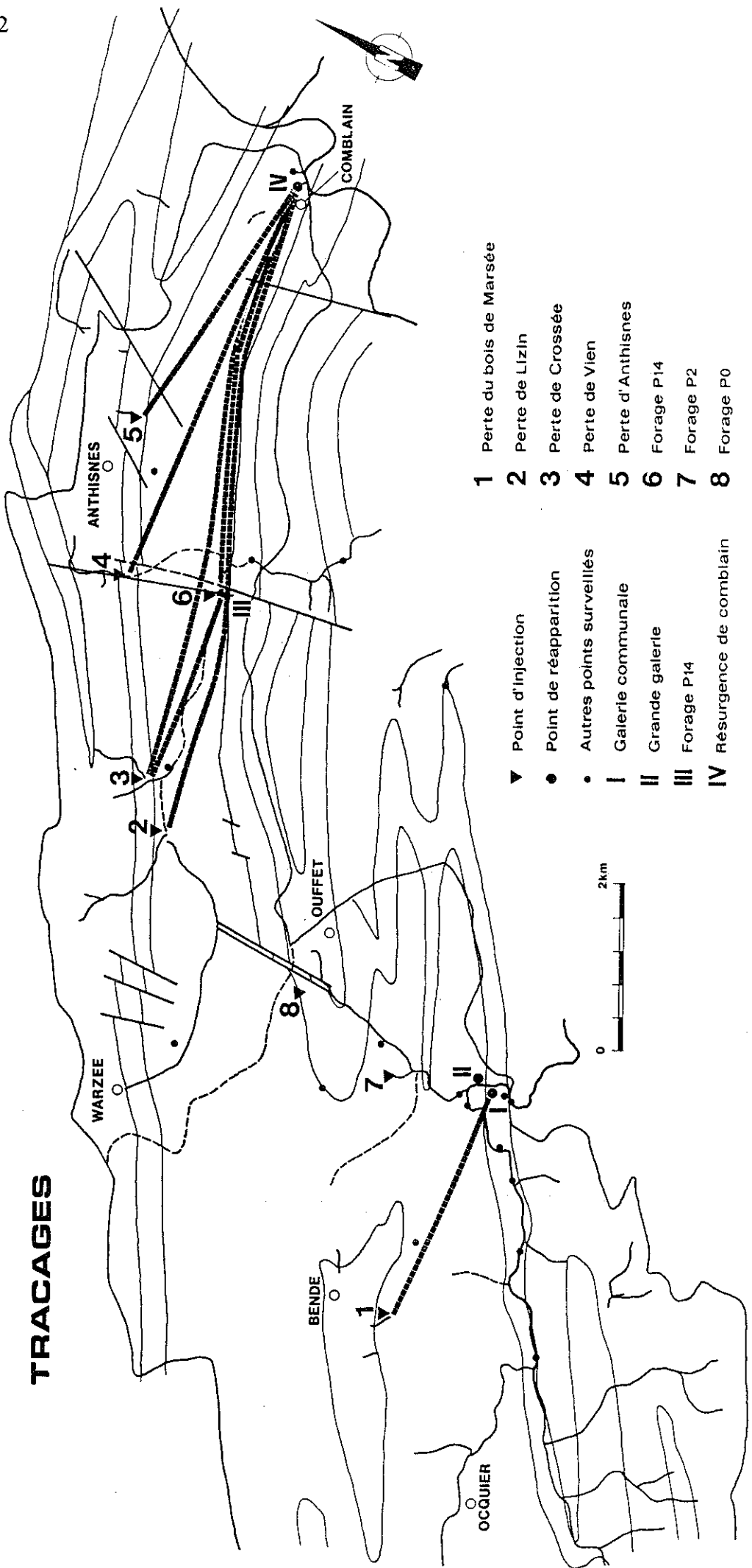


Fig. 1.41 : Carte de situation des traçages dans les calcaires carbonifères des bassins d'Anthignes et du Néblon.

Nous avons vu (§ 1.3.1.) que le niveau des schistes du Pont d'Arcole séparait l'aquifère du Tournaisien inférieur de l'aquifère sus-jacent, du Tournaisien-Viséen. Grâce à la géophysique, nous avons pu, par endroits, déterminer l'épaisseur et la continuité de ce niveau imperméable. La comparaison des traçages réalisés dans le Tournaisien et dans le Viséen nous permettra d'apporter des précisions quant au rôle hydrogéologique de ce niveau.

La perte du Bois de Marsée est située en plein coeur du synclinal viséen de Bende. Ainsi que nous le verrons, sa résurgence a lieu dans les calcaires du Tournaisien supérieur du flanc Sud du synclinal (galerie Communale).

Dans le bassin d'Anthisnes, les principales circulations parviennent, in fine, à la résurgence du Moulin, dans les calcaires viséens du flanc Sud du synclinal. Les pertes se produisent sur le flanc Nord : celle de Crossée à la limite entre le Tournaisien et le Viséen, celles de Vien et d'Anthisnes à un niveau stratigraphique plus bas dans le Tournaisien.

La principale vallée sèche traverse le synclinal du Nord au Sud entre Crossée et La Roke (fig. 1.1). A cet endroit, plusieurs petites sources jaillissent des calcaires tournaisiens. Le traçage réalisé depuis la perte de Crossée nous permettra de répondre à deux questions importantes concernant la vulnérabilité de ces sources :

- le drain principal suit-il le tracé de la vallée sèche entre Crossée et La Roke ?
- les sources de La Roke proviennent-elles du débordement de la nappe du Viséen au travers du Tournaisien ?

Les échanges entre le drain et les blocs peu perméables, dans les calcaires viséens, ont également été étudiés grâce au traçage entre la perte de Crossée et le forage P14. Le pompage effectué au P14 a cependant modifié localement l'allure des écoulements. Un traçage, utilisant cette fois le forage P14 comme point d'injection, a permis de préciser les échanges en conditions naturelles (sans pompage).

D'autres tests, réalisés à partir des forages P0 et P2, dans les calcaires viséens du bassin du Néblon, n'ont donné aucun résultat. La raison est sans doute l'absence de conduit très perméable à proximité des points d'injection.

### 1.7.3. Essais antérieurs

Dès 1897, E. BEAULIEU (in VAN DEN BROECK, MARTEL, RAHIR, 1910) conduisait plusieurs expériences de traçage dans le synclinal d'Anthisnes, notamment à Lizin (fig. 1.41) où les eaux absorbées par un chantoir important étaient suspectées d'influencer la qualité de l'eau des sources du Néblon et celle de la source du Moulin à Comblain-au-Pont.

Deux colorants furent injectés à une heure d'intervalle : un rouge dont la nature n'est pas précisée, et un vert, la fluorescéine (forme acide de l'uranine). Cette dernière réapparut à la source du Moulin après 65 heures, soit avec une vitesse apparente de 123 m/h.

Le colorant rouge n'a pas été aperçu car il serait passé durant la nuit. Le même auteur réalisa plusieurs expériences au chanoir de Vien. Il n'obtint aucun résultat positif, ni à La Roke (sources du Blokai), ni à Comblain-au-Pont (résurgence du Moulin). Les moyens de détection disponibles à l'époque étaient en effet très limités (détection visuelle).

Il y a plusieurs années, un traçage aurait été réalisé par un bureau de géologues pour le compte de la CILE à partir des égouts déversés dans une fissure de la carrière située au SE d'Anthignes. Le traceur est réapparu à la résurgence du Moulin à Comblain-au-Pont, mais nous ne disposons d'aucun détail à ce sujet.

Enfin, deux traçages à la fluorescéine ont été effectués par DI CLEMENTE et LAURENT (1986), l'un à la perte du Bois de Marsée et l'autre dans le ruisseau d'Oneu. Les résultats obtenus sont toutefois très douteux car la seule méthode de détection employée a été celle des "charbons actifs" et les seuls points d'eaux soit-disant positifs ont été plusieurs cours d'eau de surface, dont on connaît les inconvénients du bruit de fond (voir § 2.5.1.5.1.). Les traçages réalisés ultérieurement à la perte du Bois de Marsée montreront en effet que les résultats précédents étaient aberrants (§ 1.7.7.2.).

#### 1.7.4. Traceurs utilisés

Le type de traceur utilisé a, à priori, assez peu d'importance vu le peu d'interactions avec la roche calcaire (peu de phénomènes de rétention), la taille des vides en général supérieure à celle des traceurs disponibles (max. 1  $\mu\text{m}$  pour les microsphères) et surtout la rapidité de passage des traceurs (rôle de la cinétique). Des différences de comportement peuvent cependant apparaître pour des traceurs dont les coefficients de diffusion vers l'eau immobile sont significativement différents. Ces différences peuvent être mises à profit dans l'étude des problèmes de contamination de l'aquifère. Nous ne nous étendons pas ici sur ce sujet car les phénomènes susceptibles d'intervenir dans le transport des traceurs seront largement discutés dans la seconde partie du travail.

Les traceurs suivants ont été utilisés :

##### *Traceurs fluorescents*

Traceur	Dénomination	Marque	Indice de couleur
Uranine	Jaune Basacid 226	BASF	I.C. Acid Yellow 73
Naphtionate	Naphtionsaire Na-salz	FLUKA	
Rhodamine B	Rouge Basonyl S542	BASF	I.C. Basic Violet 10

##### *Traceur particulaire*

Traceur	Dénomination	Marque
Microsphères YG 1 $\mu\text{m}$	Fluoresbrite™ Plain Microspheres (2,5% solid latex)	POLYSCIENCES LTD



*Traceur salin*

Traceur	Dénomination
LiCl	chlorure de lithium

Les trois premiers ont été analysés à l'aide de spectrofluorimètres (PERKIN ELMER LS50, PERKIN ELMER MPF44B, KONTRON SFM23), ou à l'aide d'un fluorimètre à filtres (TURNER 111).

Les microsphères ont été comptées sous un axioscope ZEISS (analyses par W. KÄSS).

Le lithium a été analysé par spectrométrie d'émission de flamme (ZEISS FMP4).

### 1.7.5. Conditions hydrométéorologiques

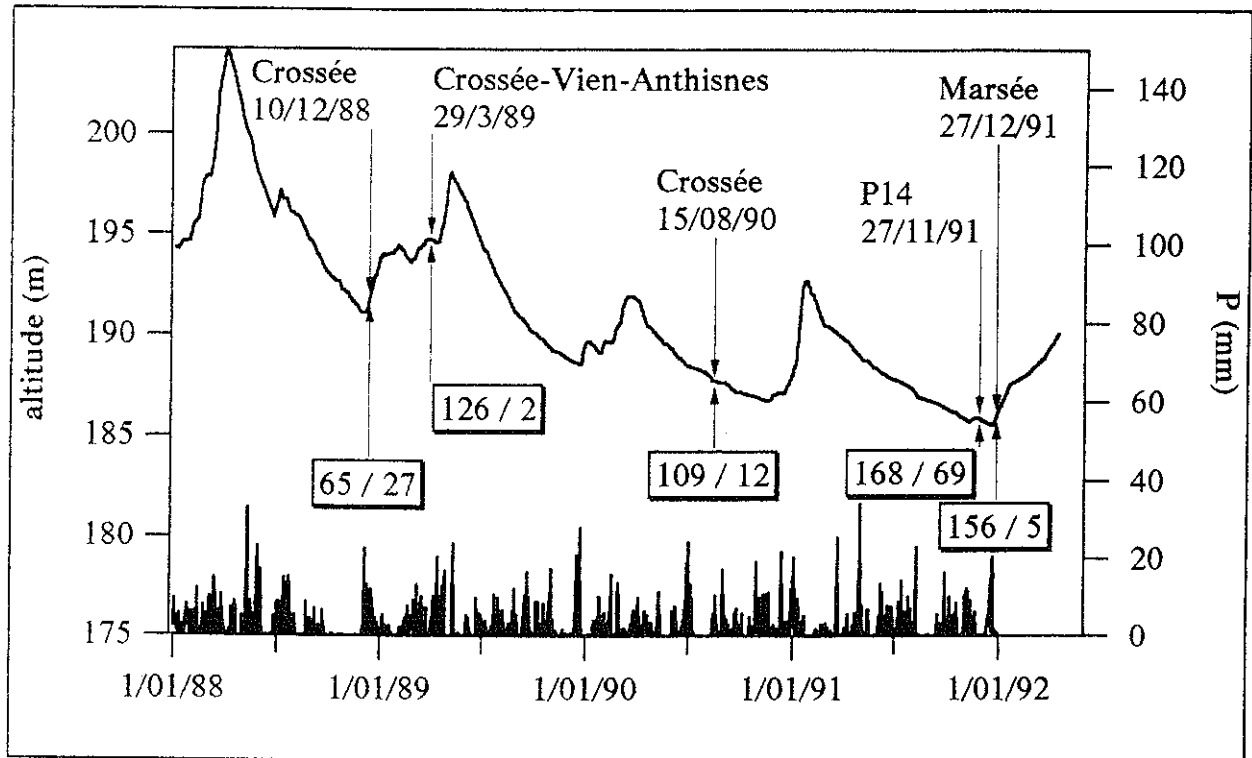
Les cinq opérations de traçage étudiées quantitativement ont été réalisées aux périodes suivantes: décembre 88 (perte de Crossée), mars 89 (pertes de Crossée, de Vien et d'Anthisnes), août 90 (perte de Crossée - P14), novembre 91 (P14) et décembre 91 (perte du Bois de Marsée).

Parmi les conditions susceptibles d'influencer le transit des traceurs, on distingue l'état de recharge du réservoir lent et celui du réservoir rapide. Chaque expérience a été resituée (fig. 1.42) par rapport, d'une part au niveau de la nappe, d'autre part au volume des précipitations durant la période précédant le traçage.

Sur la fig. 1.42, le premier des deux chiffres encadrés représente les précipitations (en mm) des 50 derniers jours précédant le maximum de la restitution. Cette durée correspond à peu près au temps de régulation mis en évidence par les analyses corrélatoire et spectrale des débits à la résurgence de Comblain. Le second chiffre est choisi de façon plus arbitraire. Il correspond aux précipitations (en mm) des 7 derniers jours. Il est sensé refléter l'état de mise en charge des drains du réseau karstique. Il semble que les vitesses de passage des traceurs soient très fortement influencées par les infiltrations récentes, mais que cette influence diminue très rapidement.

Bien que les traçages de novembre et décembre 91 aient été effectués à la période où le niveau de la nappe était minimum, le système était en crue suite à des pluies abondantes (168 et 156 mm pour les 50 derniers jours, pour les traçages de novembre et décembre 91 respectivement). En ce qui concerne la perte du Bois de Marsée (décembre 91), malgré le peu de pluie durant les 7 jours précédant le traçage (5 mm), les débits étaient toujours influencés par les crues exceptionnelles s'étant produites juste avant la période considérée.

Des trois tests réalisés à la perte de Crossée, le premier (décembre 88) est le seul pour lequel on a enregistré des pluies importantes durant la semaine précédente (27 mm). Le troisième test a eu lieu après plusieurs averses (11 mm), mais le niveau de la nappe était encore plus bas que lors des premier et deuxième tests. Ces averses n'ont dès lors eu qu'une influence négligeable sur les débits.



**Fig. 1.42 :** Conditions hydrodynamiques au moment des traçages dans les bassins d'Anthisnes et du Néblon. Altitude de la nappe au puits Minaqua (courbe) et précipitations à la station de Ouffet. Le premier chiffre encadré est la somme des précipitations (en mm) des 50 derniers jours précédant chaque traçage, le second la somme des précipitations (en mm) des 7 derniers jours.

A la résurgence du Moulin, les débits moyens ont été respectivement de 270, 375 et 310 l/s au cours des premier, deuxième et troisième traçages. Comme nous le verrons aussi plus loin lors du calcul des bilans de restitution des traceurs, ces valeurs sont à considérer avec certaines réserves étant donné les imprécisions sur les débits signalées au chapitre 1.5.

### 1.7.6. Mise en oeuvre des traçages

Le tab. 1.3 résume les caractéristiques de toutes les injections.

Les points d'eau surveillés (fig. 1.41) ont été les principales émergences karstiques (sources de Néblon-le-Moulin et résurgence de Comblain) ainsi que différentes sources dans les calcaires tournaisiens, plusieurs points le long du Néblon et plusieurs forages. Les détails concernant les injections, la localisation des points d'eau, ainsi que les méthodes de prélèvement et d'analyse, se trouvent dans le rapport de l'étude du bassin d'Anthisnes (CILE, LGIH, INIEX, 1989).

DATE	LIEU	TRACEUR	QUANTITE	CHASSE ou DEBIT
2/08/87	forage P0	Rhodamine B	1 kg	2,5 m <sup>3</sup> (+ 28 m <sup>3</sup> )
2/08/87	forage P2	Uranine	250 g	2,5 m <sup>3</sup> (+ 28 m <sup>3</sup> )
10/12/88 14:30	perte de Crossée	Uranine	2,370 kg	≈ 10 l/s
29/03/89 19:30	perte de Crossée	Naphtionate	10 kg	≈ 10 l/s
29/03/89 19:30	perte de Vien	Uranine	2,018 kg	≈ 10 l/s
29/03/89 19:30	perte d'Anthisnes	Rhodamine B	1,033 kg	≈ 5 l/s
13/05/90 10:00	forage P2	Uranine	5 kg	137 m <sup>3</sup>
15/08/90 10:15	perte de Crossée	Uranine	1,008 kg	≈ 10 l/s
15/08/90 10:15	perte de Crossée	Microsphères YG 1 µm	9,1.10 <sup>11</sup>	≈ 10 l/s
27/11/91 14:30	forage P14	Uranine	509 g	3,82 m <sup>3</sup>
24/12/91 09:20	perte de Marsée	Uranine	1987 g	≈ 5 l/s
27/12/91 09:35	perte de Marsée	LiCl	2566 g	≈ 3 l/s

**Tab. 1.3** : Caractéristiques des injections des traceurs dans les pertes et les forages des bassins d'Anthisnes et du Néblon.

Les traceurs n'ont été détectés que dans les cas suivants : à la résurgence de Comblain dans le cas de toutes les injections réalisées dans le bassin d'Anthisnes (pertes de Crossée, de Vien, d'Anthisnes, forage P14), au forage P14 lors de l'injection du 15/08/90 à la perte de Crossée, à la galerie Communale et à la grande galerie (traces) lors des injections à la perte du Bois de Marsée.

Une fois la relation établie entre la perte de Crossée et la résurgence du Moulin (traçage du 10/12/88), les autres points d'eau (à l'exception du P14 en août 90) n'ont plus fait l'objet de surveillance lors des traçages suivants. Le but poursuivi à partir de ce moment a été de préciser les modalités de passage des traceurs le long du drain mis en évidence.

Les prélèvements fréquents dans les galeries de Néblon-le-Moulin et à la résurgence de Comblain ont nécessité dans la plupart des cas l'utilisation d'échantillonneurs automatiques.

Les prélèvements dans les forages ont été réalisés statiquement, excepté lors du traçage d'août 90 à la perte de Crossée, au cours duquel un pompage au débit de 2 m<sup>3</sup>/h dans le forage P14 (fig. 1.41) a été maintenu durant 3 jours.

La méthode des charbons actifs pour la détection des traceurs fluorescents n'a été utilisée que parallèlement aux prélèvements d'eau aux sources et dans les forages pour lesquels la fréquence d'échantillonnage était relativement basse.

Les injections dans les forages ont été accompagnées d'un volume d'eau supplémentaire destiné à chasser les traceurs dans l'aquifère.

Dans tous les cas, la durée d'injection est suffisamment courte pour qu'on puisse la considérer comme instantanée (impulsion de Dirac).

### 1.7.7. Résultats des traçages dans le Néblon

#### 1.7.7.1. TRAÇAGES A PARTIR DES PIEZOMETRES

Les tests réalisés à partir des piézomètres dans la région d'Ouffet avaient pour but de définir les zones d'alimentation des sources de Néblon-le-Moulin afin de préciser les risques de pollution des captages. Ces risques de pollution proviennent :

- de l'entreposage de déchets industriels dans plusieurs carrières à proximité de la crête de partage des eaux entre le bassin du Néblon et celui d'Anthisnes,
- d'infiltrations éventuelles des égouts d'Ouffet dans le lit du Nesson.

La campagne géophysique a mis en évidence un axe de circulation préférentielle à proximité du forage P2. La transmissivité déduite des pompages d'essai est cependant relativement faible ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Une première campagne a eu lieu en août 87 (uranine au P2 et rhodamine B au P0). Elle n'a donné aucun résultat, ni du côté du Néblon, ni du côté d'Anthisnes, malgré le réseau de surveillance très complet.

Un second essai a eu lieu au P2 en mai 90. Malgré les moyens plus importants mis en oeuvre (5 kg d'uranine et  $137 \text{ m}^3$  d'eau), à nouveau aucune trace n'a pu être détectée nulle part.

Trois mois plus tard, il fut décidé de reprendre le traceur grâce à un pompage dans le piézomètre d'injection, le but étant d'appliquer la méthode dite "d'injection brève en puits unique".

Ce type d'expérience permet de déterminer  $u_0$  la vitesse effective d'écoulement naturel de la nappe à partir de  $r$  la distance parcourue par le traceur et  $t_1$  le temps écoulé avant la reprise par pompage (HANICH, 1991) :

$$u_0 = \frac{r}{t_1} \quad \text{et} \quad Q\bar{t} = \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \text{neff} \quad \text{avec} \quad \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tc(t)dt}{\int_0^{\infty} c(t)dt}$$

où

$Q$  = le débit pompé,

$t$  = le temps moyen de séjour (voir seconde partie),

$h$  = l'épaisseur de l'aquifère,

$\text{neff}$  = la porosité effective (supposée connue),

$c(t)$  = la concentration à l'instant  $t$ .

Durant les 70 heures de pompage effectuées ( $Q = 3,84 \text{ m}^3/\text{h}$ ), la concentration en uranine de l'eau extraite est restée pratiquement constante (530 ppb en moyenne), montrant une vitesse effective quasi nulle dans la nappe. La masse d'uranine restituée est de 142 g, soit 3 % de la masse totale injectée.

Tout s'est passé comme si le traceur avait subi uniquement la diffusion moléculaire jusqu'à égalisation des concentrations dans l'aquifère autour du piézomètre. En faisant l'hypothèse d'une porosité efficace de 5 %<sup>1</sup> et en supposant que le traceur se disperse de façon uniforme et isotrope, la zone atteinte ne dépasserait pas soixante mètres de diamètre. A supposer que des conduits karstiques importants se trouvent à quelques dizaines de mètres du forage, le flux de traceur y entrant serait tellement faible qu'à l'exutoire, distant d'environ 1 km, aucune trace ne pourrait être détectée, vu la dilution.

### 1.7.7.2. TRAÇAGES A LA PERTE DU BOIS DE MARSEE

La perte du Bois de Marsée est la seule perte importante dans le bassin du Néblon. Elle prend sa source dans les grès du Namurien au centre du synclinal. Son fonctionnement est temporaire.

Un premier essai a eu lieu peu après la crue des 21 et 22 décembre 91. L'uranine injectée est réapparue en moins de 50 heures dans la galerie Communale à Néblon-le-Moulin. La montée et le pic de la courbe de restitution n'ont pas pu être observés. Le seul échantillonneur automatique se trouvait en effet à ce moment dans la grande galerie. Cela a néanmoins permis de détecter l'uranine en très faible concentration ( $< 0,325 \text{ ppb}$ ) dans la grande galerie, à partir du deuxième jour suivant l'injection. Une nouvelle injection a été réalisée trois jours plus tard avec du chlorure de lithium.

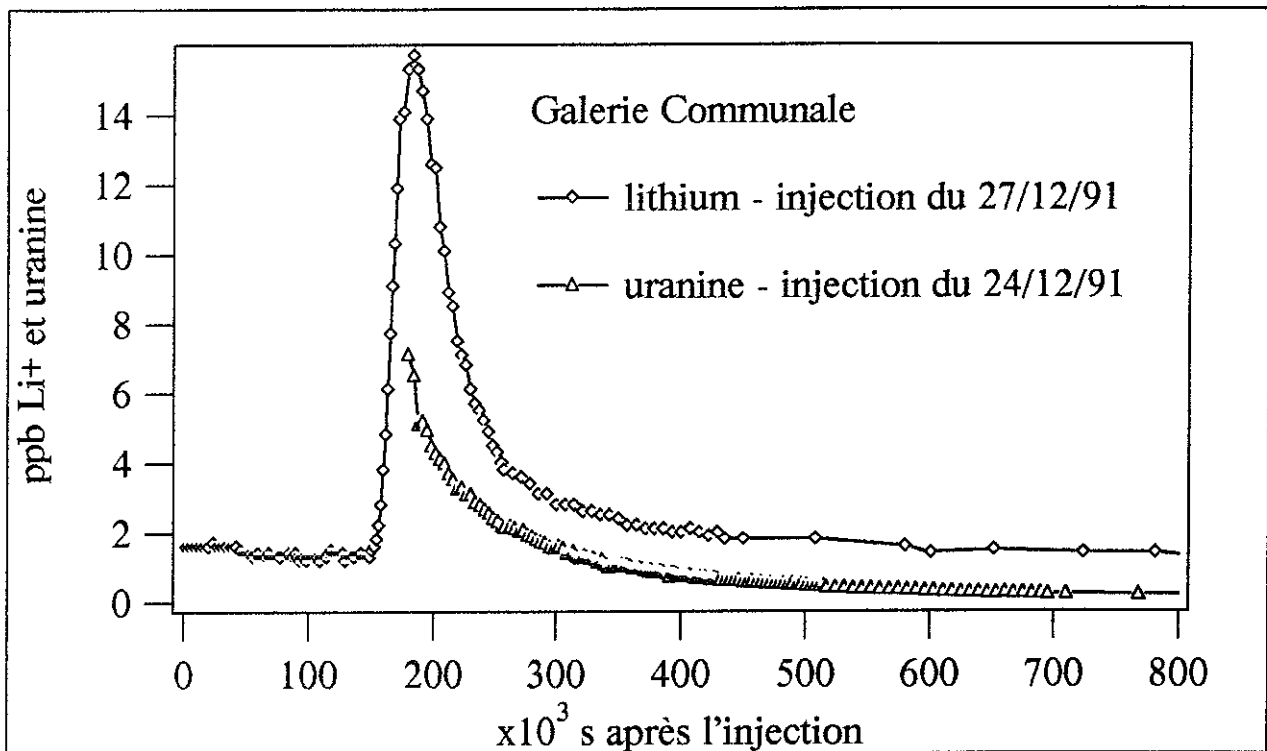
Les courbes de restitution du lithium et de l'uranine dans la galerie Communale sont présentées sur la fig. 1.43. Leurs caractéristiques sont reprises dans le tab. 1.4. Les valeurs brutes des concentrations se trouvent en annexe.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
Marsée/galerie Communale	3055	uranine	1987	100	-	61.0	-	-	3.500
Marsée/galerie Communale	3055	lithium	428	100	73.0	60.0	44.0	61.0	51.000

**Tab. 1.4** : Caractéristiques des courbes de restitution à la galerie Communale de l'uranine et du lithium injectés en décembre 91 à la perte du Bois de Marsée.

D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit approximatif au point de sortie en l/s  
 Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

<sup>1</sup>Le coefficient d'emmagasinement n'a pu être calculé de manière précise vu l'absence d'autres piézomètres.



**Fig. 1.43 :** Courbes de restitution à la galerie Communale de l'uranine et du lithium injectés à la perte du Bois de Marsée.

La réapparition des traceurs dans deux galeries de captage, l'une située sur la même rive (grande galerie), l'autre sur la rive opposée (galerie Communale) au point d'injection, témoigne, une fois de plus, de la complexité des circulations dans la zone d'exutoire du bassin du Néblon. Cette complexité est sans doute à mettre en relation avec le stade de karstification atteint par le système (stade de jeunesse, réseau de drainage peu structuré).

Le passage relativement rapide des traceurs (73 m/h pour le lithium et plus rapide encore pour l'uranine) entre la perte et les sources, distantes de plus de 3 km, apporte la preuve de l'existence d'au moins un axe de circulation karstique très transmissif au travers du synclinal calcaire. L'absence d'autres pertes en surface n'exclut pas la présence de chenaux, masqués sous la couverture limoneuse. Les anomalies mises en évidence par la géophysique en apportent la preuve. Ce sont des zones vulnérables de l'aquifère qui devraient par conséquent être prises en compte dans la délimitation des zones de protection des captages. Les traçages sont cependant difficiles à réaliser le long de ces axes. Ils nécessitent des forages implantés à très faible distance des drains. Seul le forage P14, dans le bassin d'Anthisnes, a jusqu'à présent permis de mettre en évidence une circulation depuis un forage vers l'exutoire du système.

Le taux de restitution faible à la galerie Communale (51% pour le lithium) est lié à l'existence de diffusions dans la zone proche de l'exutoire (drainage peu structuré).

Le restant du traceur a pu emprunter diverses fissures. L'une d'elles prend la direction de la grande galerie. Plusieurs autres aboutissent sans doute dans le Néblon, sans qu'on puisse détecter le traceur à cause de la dilution par l'eau de la rivière. Ce point sera réexaminé lors de la modélisation des traçages (§ 1.7.9.3.).

## **1.7.8. Résultats des traçages dans le synclinal d'Anthisnes**

### **1.7.8.1. TRAÇAGES PERTES - RESURGENCE DU MOULIN**

Les trois zones de pertes du synclinal d'Anthisnes sont (fig. 1.1 et fig. 1.41) : Lizin-Crossée (où VAN DEN BROECK, MARTEL et RAHIR (1910) ont déjà effectué des traçages avec succès), Vien, et Anthisnes (où les égouts de la commune se déversent dans un ancien chanoir, partiellement inclus dans l'exploitation de la carrière voisine).

La relation entre ces pertes et l'exutoire du système (résurgence du Moulin) a été prouvée (ou confirmée) au cours de chaque traçage. Les traçages réalisés avaient pour but principal de définir les modalités de transit le long du collecteur du système, sous différentes conditions hydrodynamiques. MOLINARI (1976) insiste sur le besoin de replacer l'ensemble d'un traçage par rapport à l'événement (et à ceux qui l'ont précédé en raison de la mémoire du système) et de répéter les expériences dans l'espace et dans le temps, pour appréhender de manière plus rigoureuse la structure, son hétérogénéité et le fonctionnement de l'aquifère karstique.

La perte de Crossée a fait l'objet de trois traçages durant des périodes distinctes (12/88, 3/89 et 8/90) tandis que les pertes de Vien et d'Anthisnes ont fait l'objet d'un multitraçage à l'occasion de la deuxième de ces expériences.

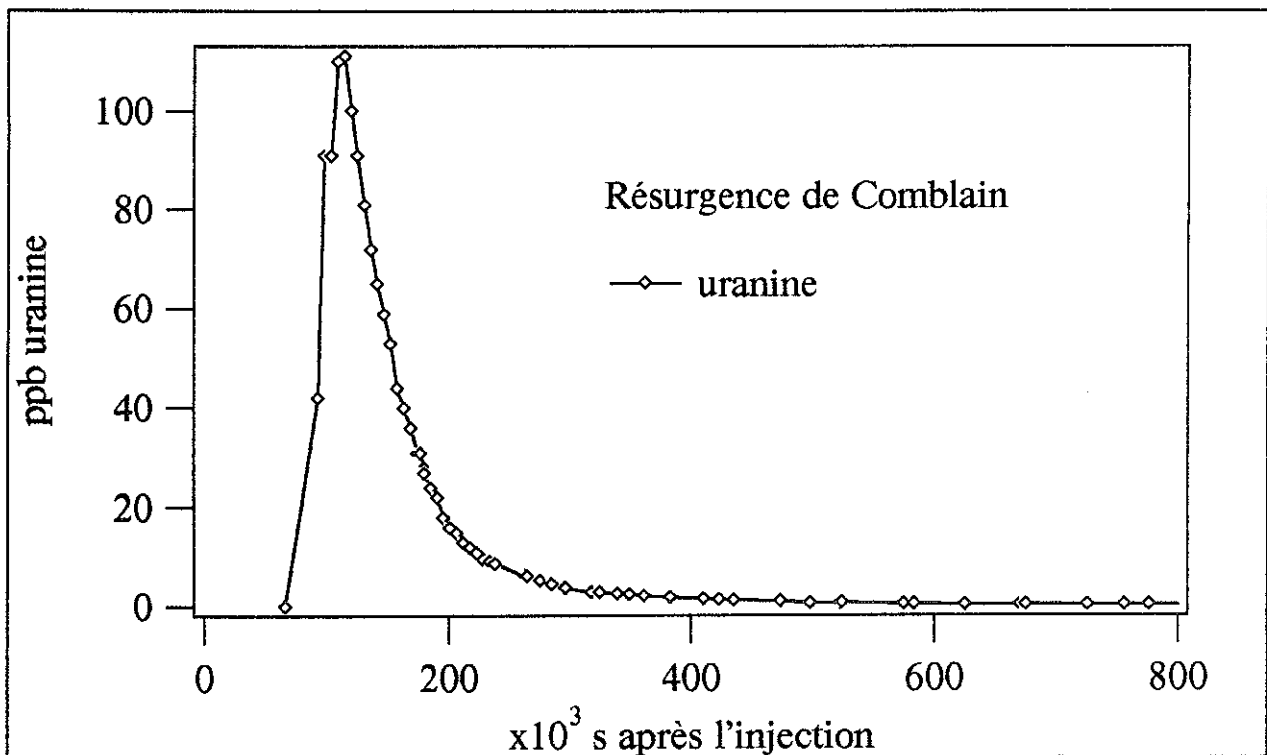
Les courbes de restitution des traceurs à la résurgence de Comblain sont présentées aux fig. 1.44, 1.45 et 1.46. Leurs caractéristiques sont rassemblées dans le tab. 1.5.

En ce qui concerne les injections à Crossée, les vitesses de passage varient entre 76 et 277 m/h. La plus grande vitesse est observée lors du premier test, dont nous avons vu (fig. 1.42) qu'il avait eu lieu après une semaine relativement pluvieuse. La vitesse la plus faible correspond au traçage d'août 90 alors que la nappe était particulièrement basse. Les vitesses apparentes de transit, calculées sur base du temps de séjour moyen (voir seconde partie), sont comprises entre 54 et 153 m/h.

Lors du multitraçage, les vitesses observées à partir des pertes de Vien et d'Anthisnes ont été moitié moindres (125 et 105 m/h pour les premières arrivées) que la vitesse observée à partir de la perte de Crossée (209 m/h). Deux hypothèses peuvent expliquer le retard à Vien et Anthisnes : soit la traversée de l'aquifère tournaisien, plus hétérogène, soit le fait que les points d'injections sont décalés par rapport au drain principal, lequel draine le flanc Sud du synclinal calcaire.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
Crossée/résurgence Comblain 10/12/88	7200	uranine	2370	270	277.0	225.0	153.0	190.0	131.000
Crossée/résurgence Comblain 29/3/89	7200	naphtionate	10000	375	209.0	164.0	124.0	142.0	64.000
Vien/résurgence de Comblain 29/3/89	5000	uranine	2018	375	125.0	89.0	53.3	73.5	69.000
Anthisnes/résurgence de Comblain 29/3/89	3000	rhodamine B	1033	375	105.0	82.0	37.0	63.0	37.000
Crossée/résurgence Comblain 15/8/90	7200	uranine	1008	310	76.0	61.0	54.0	55.0	141.000
Crossée/résurgence Comblain 15/8/90	7200	microsphères	9.1x10E11	310	76.0	61.0	55.0	56.0	15.000

**Tab. 1.5** : Caractéristiques des courbes de restitution des traçages de perte à résurgence dans le bassin d'Anthisnes. D = distance en m M = masse injectée en g ou nombre de microsphères Q = débit approximatif au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.



**Fig. 1.44** : Courbe de restitution à la résurgence de Comblain de l'uranine injectée à la perte de Crossée le 10 décembre 1988.



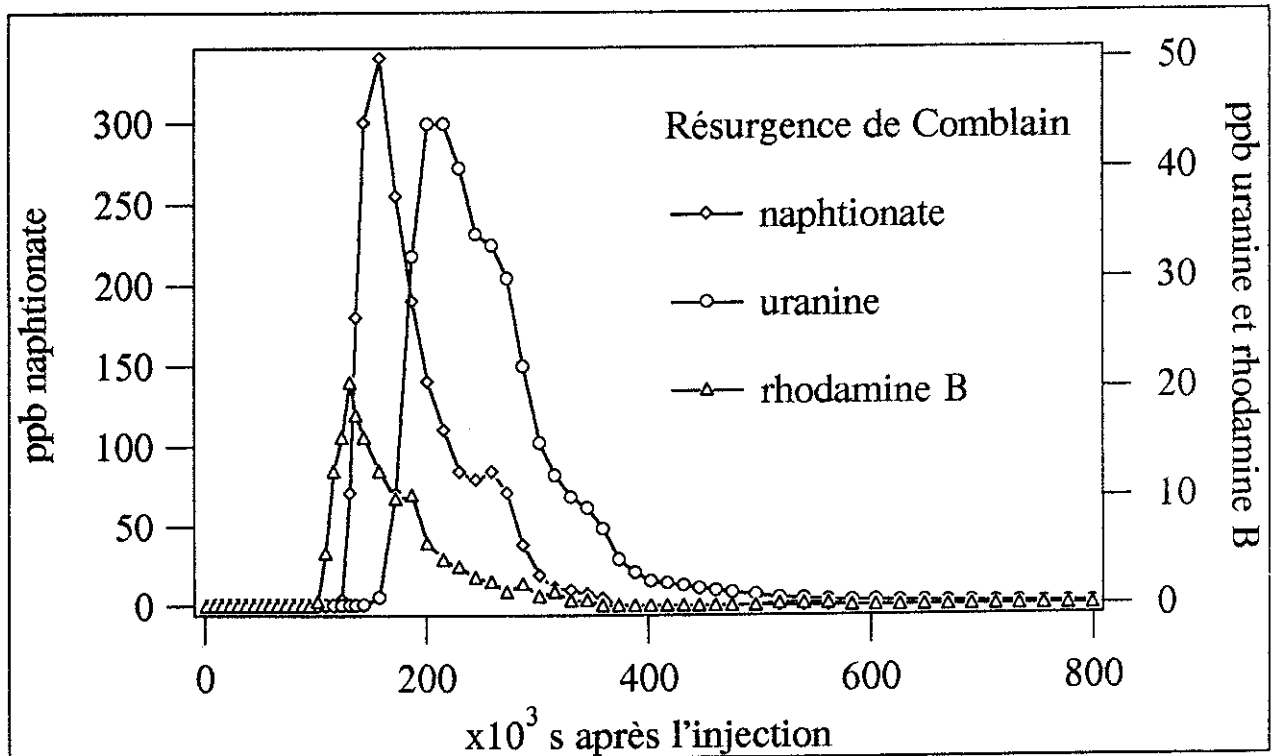


Fig. 1.45 : Courbes de restitution à la résurgence de Comblain du naphthionate, de l'uranine et de la rhodamine B injectés à Crossée, à Vien et à Anthisnes lors du multitraçage du 29 mars 1989.

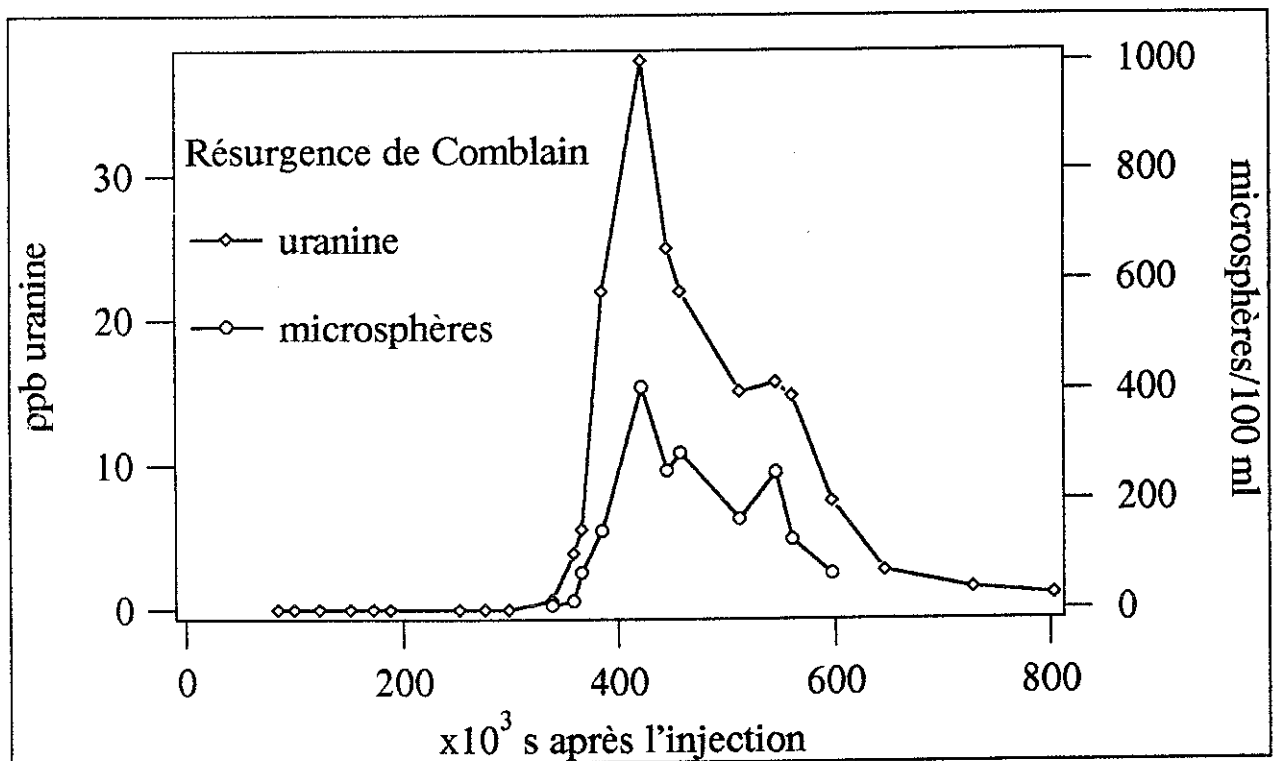


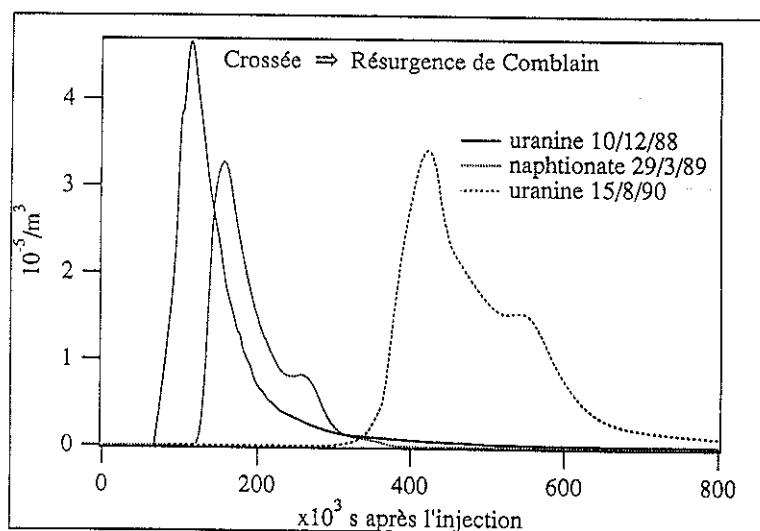
Fig. 1.46 : Courbes de restitution à la résurgence de Comblain de l'uranine et des microsphères injectées à la perte de Crossée le 15 août 1990.

Les taux de restitution supérieurs à 100 % sont dus à la surestimation des débits liée à un mauvais fonctionnement du limnigraphie. Ils ne peuvent donc être comparés que pour une même expérience. Lors du multitraçage de mars 89, la restitution fut nettement plus faible pour la rhodamine B que pour l'uranine et le naphthionate (37 % contre 69 et 64 % respectivement). La rhodamine B est en effet plus sorptive en raison de sa nature cationique (SMART et LAIDLAW, 1977). Elle peut avoir été retenue lors de la traversée des niveaux schisteux du Tournaisien ou piégée dans les sédiments argileux du réseau karstique.

Le taux de restitution faible des microsphères (15 %) est lié à la nature particulière du traceur, ayant sans doute été piégé plus facilement en raison de sa taille (1  $\mu\text{m}$ ), ou adsorbé sur le substrat rocheux. Cela mis à part, on notera la très bonne concordance entre le comportement des microsphères et celui de l'uranine.

Sur les courbes des deuxième et troisième expériences, après le pic principal, il y a systématiquement apparition d'un pic secondaire d'amplitude plus faible. Lors de la première expérience, ce pic n'est pas observé. Il doit sans doute provenir d'une diffluence le long du drain principal. Puisque ce pic affecte la restitution des traceurs en provenance des trois pertes, la diffluence se produit en aval de la confluence souterraine des trois circulations. Lors du premier traçage, la crue dans le réseau a sans doute eu pour effet de favoriser un des deux trajets par rapport à l'autre, dont la capacité d'absorption est plus limitée. Dans le réseau karstique de l'Ouyse, BEAUDOING et al. (1989) ont également observé un comportement différent entre les hautes eaux et les basses eaux, se traduisant par l'apparition de pics secondaires en période de basses eaux.

Les réponses aux trois traçages réalisés à la perte de Crossée sous différentes conditions hydrodynamiques sont comparées sur la fig. 1.47. Les courbes de restitution ont été normalisées par rapport à la masse de traceur injectée. Plus le temps de passage est long, plus la courbe de restitution est étalée.



**Fig. 1.47** : Courbes de restitution à la résurgence de Comblain, en concentrations normées par rapport à la masse injectée. Traçages à la perte de Crossée en décembre 88, mars 89 et août 90.

## 1.7.8.2. TRAÇAGES AVEC LE PIEZOMETRE P14

### 1.7.8.2.1. Traçage en direction du P14

Profond de 60 mètres, le P14 a été foré dans la vallée sèche entre Crossée et La Roke (fig. 1.1), au croisement de cette vallée avec un accident transversal mis en évidence par la géophysique. Bien que sa transmissivité soit faible ( $4 \text{ à } 8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ), le forage semblait propice à des échanges avec le collecteur souterrain longeant la vallée sèche. Si tel était le cas, un pompage dans le piézomètre créerait une inversion de gradient suffisante pour attirer le traceur injecté à Crossée et transitant le long du drain. C'est effectivement ce qui a été obtenu grâce à un pompage de 3 jours avec un débit de  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Le rabattement dans le piézomètre a été supérieur à 10 mètres.

Les deux traceurs (uranine et microsphères) ont été détectés dans l'eau du pompage 47 heures et 45 minutes après l'injection. Cela correspond à une vitesse apparente de  $50 \text{ m/h}$  pour l'ensemble du trajet (drain + fissures entre le drain et le forage).

Connaissant le temps de parcours le long du drain - la distance est d'environ  $2390 \text{ m}$  et la vitesse de  $76 \text{ m/h}$  (vitesse entre la perte de Crossée et la résurgence de Comblain) -, on obtient un temps de passage d'environ 16 heures et 30 minutes pour le trajet entre le drain et le forage. En supposant une distance de 10 mètres le long de ce trajet, la vitesse des traceurs ne dépasserait pas  $0,6 \text{ m/h}$ .

Les courbes de restitution sont présentées à la fig. 1.48. Leurs caractéristiques sont rassemblées dans le tab. 1.6.

Les masses restituées sont extrêmement faibles vu la vitesse des circulations le long du drain ( $76 \text{ m/h}$ ). Cette vitesse permet en effet au traceur de s'éloigner rapidement de la zone d'appel du pompage.

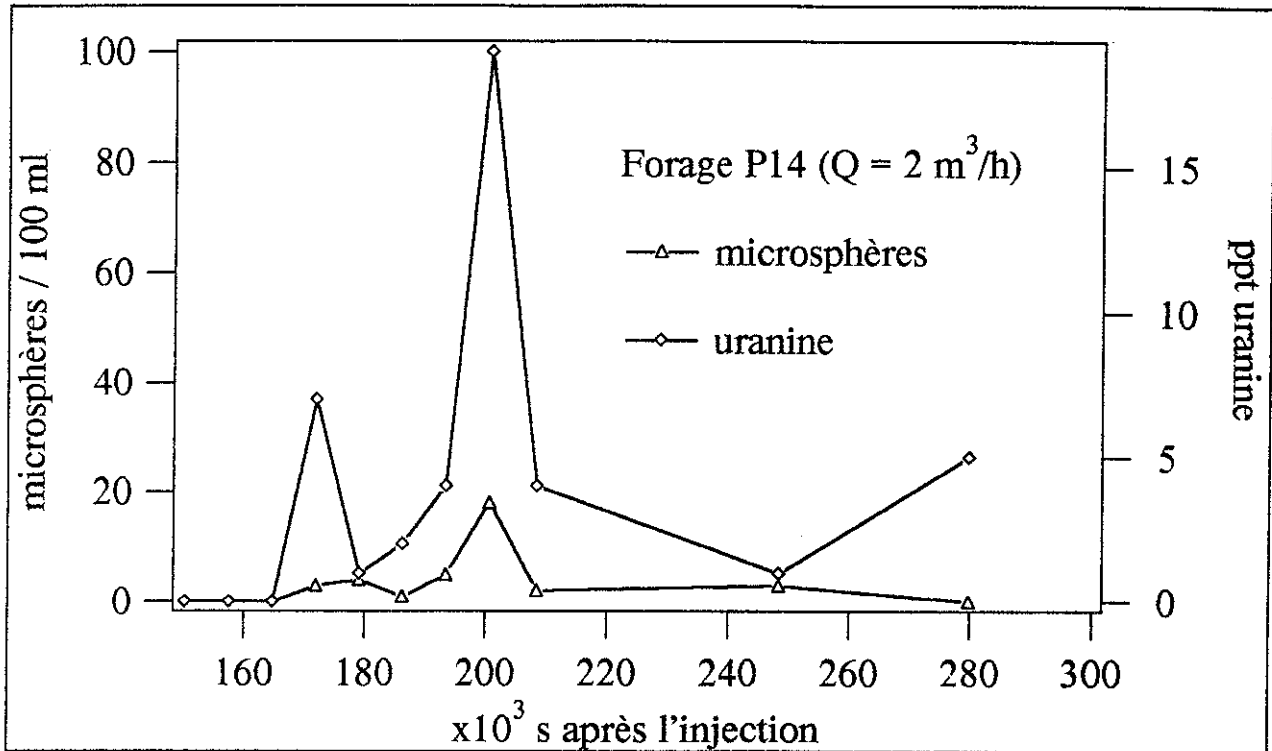
L'irrégularité de la restitution va de pair avec les faibles concentrations observées. Elle est liée, d'une part à la dispersion du traceur le long du drain, d'autre part à l'écoulement dans le réseau de fissures entre le drain et le forage.

Le comportement des microsphères est fort semblable à celui de l'uranine, excepté que la quantité de microsphères restituée est plus faible. La taille des microsphères ( $1 \mu\text{m}$ ) est sans doute un facteur limitant leur passage dans les fissures de trop faible ouverture.

Relation	D	Traceur	M	Vmax	Vm
Crossée/P14 15/8/90	2390	uranine	1008	50.0	43.0
Crossée/P14 15/8/90	2390	microsphères	$9.1 \times 10^{11}$	50.0	43.0

**Tab. 1.6** : Caractéristiques des courbes de restitution au forage P14 des microsphères et de l'uranine injectées à Crossée. Le débit de pompage est de  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Les bilans ne peuvent pas être calculés (interruptions du pompage), pas plus que les vitesses apparente et moyenne de transit.

D = distance en m    M = masse injectée en g ou nombre de microsphères    Vmax = vitesse maximale en m/h    Vm = vitesse modale en m/h.



**Fig. 1.48** : Courbe de restitution dans le forage P14 à La Roke de l'uranine et des microsphères injectées à la perte de Crossée le 15 août 1990. L'eau du piézomètre est pompée à raison de 2 m<sup>3</sup>/h. Les concentrations décelées sont extrêmement faibles.

### 1.7.8.2.2. Traçage depuis le P14

Il était intéressant d'étudier les échanges dans des conditions d'écoulement naturel en traçant depuis le forage P14 vers le drain.

Dans ce but, 509 g d'uranine furent déversés dans le P14, accompagnés d'une chasse d'eau de près de 4 m<sup>3</sup>.

L'uranine n'a pu être détectée que sous forme de traces (max. 13 ppt) à la résurgence du Moulin après 17 jours (vitesse apparente de 12,25 m/h), à l'occasion d'une crue. Ces résultats indiquent une vitesse d'écoulement très faible de la nappe à proximité du point d'injection. Le traceur est sans doute parvenu beaucoup plus tôt à la résurgence, mais à une concentration inférieure au seuil de détection. En effet, on peut imaginer que durant les quelques jours suivant son injection, le mécanisme de transport prépondérant de l'uranine a été la diffusion moléculaire. Par conséquent le flux de traceur parvenant au drain a été très faible eu égard à la dilution. Les premières crues importantes du mois de décembre ont alors provoqué une forte augmentation du gradient. L'effet piston produit a expulsé le traceur des fissures vers le drain. Le taux de restitution très faible indique qu'une grande partie de l'uranine est restée piégée dans le milieu fissuré autour du piézomètre d'injection.

## 1.7.9. Modélisation des essais de traçage

### 1.7.9.1. INTRODUCTION

Nous aurons l'occasion de revenir en détail sur cet aspect de l'interprétation des traçages dans la seconde partie du travail. Celle-ci concerne précisément la recherche de limites conceptuelles entre le milieu poreux, le milieu fissuré et le milieu karstique et la recherche des domaines de validité des modèles existants.

Les courbes de restitution des traceurs étant l'information la plus complète dont on dispose pour cerner les modalités de propagation des substances dans l'aquifère, il serait regrettable de se limiter à quelques paramètres tels que les vitesses de passage ou les taux de restitution. Aussi recherche-t-on actuellement des modèles permettant de décrire le transport des traceurs avec un nombre plus ou moins restreint de paramètres auxquels on peut, le cas échéant, donner un sens physique.

La difficulté, dans le karst, vient du fait que, dans la plupart des cas, on ne connaît pas les détails de la structure influençant le plus la restitution. Ainsi, les courbes de restitution des traçages dans le karst sont souvent caractérisées par des queues très longues dont les causes peuvent être très différentes.

Les modèles utilisés pour les milieux poreux ont souvent été appliqués au karst de manière inconsidérée, aboutissant à la calibration de paramètres n'ayant plus aucune signification physique. On trouve parfois, dans la littérature, des valeurs de dispersivité très élevées (supérieures à 1 km) et des vitesses effectives très faibles provenant de l'inadéquation du modèle employé pour la calibration.

Ce problème a largement été étudié par MALOSZEWSKI et ZUBER (1985, 1992) qui proposent trois types de modèles mieux adaptés au karst :

- le premier combine l'écoulement au travers des fissures à la diffusion vers l'eau immobile contenue dans la matrice poreuse (ou microfissurée), voire même à l'adsorption à la surface de la matrice (MALOSZEWSKI, 1990),
- le deuxième fait appel à des trajets le long de chenaux ou de fissures multiples avec superposition des restitutions à l'exutoire,
- le troisième est une combinaison des deux modèles précédents.

Il est évident que l'on peut augmenter le nombre de paramètres afin de prendre en compte le maximum de phénomènes, mais que cela se fait toujours au détriment de la facilité avec laquelle on effectue la calibration.

Nous nous sommes limités, dans un premier temps, à la comparaison des écoulements dans le karst vus sous l'angle de la simple convection-dispersion, laissant de côté les phénomènes d'échanges et de réactions avec la matrice ou avec l'eau immobile. La solution analytique utilisée a été développée par SAUTY (1977) pour l'écoulement monodimensionnel uniforme.

Une solution plus sophistiquée, tenant compte d'un stockage temporaire dans les zones d'eau stagnante, a ensuite été utilisée afin de mieux caractériser le volume d'aquifère effectivement impliqué dans le traçage et, par conséquent la vulnérabilité. Ce modèle a été développé pour des problèmes de génie chimique par VILLERMAUX et VAN SWAAIJ (1969). Il a été repris plus récemment par RAVEN et al. (1988), qui l'appliquent au cas des traçages en milieu fissuré.

Les différentes interprétations réalisées jusqu'à présent nous portent à croire que la principale difficulté dans la modélisation du transport dans ce type de milieu est la prise en compte des phénomènes transitoires liés à la rapidité du passage des traceurs le long des drains karstiques.

### 1.7.9.2. TRANSPORT DANS UN DRAIN KARSTIQUE

L'équation générale de transport, donnant la concentration  $c$  en fonction du temps, dans le cas simple de la convection-dispersion dans un milieu poreux homogène s'écrit (voir seconde partie) :

$$\text{div}([D_h] \cdot \overrightarrow{\text{grad}c} - c \cdot \vec{u}) = \frac{\partial c}{\partial t}$$

où

$\vec{u}$  = la vitesse effective

$[D_h]$  = le tenseur de dispersion hydrodynamique

Le tenseur de dispersion hydrodynamique est exprimé par :

$$[D_h] = \begin{vmatrix} D_{hL} & 0 & 0 \\ 0 & D_{hT} & 0 \\ 0 & 0 & D_{hT} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_m + D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_m + D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_m + D_T \end{vmatrix}$$

où

$D_{hL}$  et  $D_{hT}$  = les coefficients transversal et longitudinal de dispersion hydrodynamique

$D_L$  et  $D_T$  = les coefficients transversal et longitudinal de dispersion cinématique

$D_m$  = le coefficient de diffusion moléculaire

Une solution analytique exacte peut être obtenue dans le cas d'un écoulement monodimensionnel uniforme avec injection brève (injection de Dirac), à condition de négliger la dispersion transversale le long de l'axe d'écoulement (SAUTY, 1977).

Cette solution est donnée par :

$$c(x,t) = \frac{m}{neff \cdot \sqrt{4\pi\alpha_L ut}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4\alpha_L ut}\right) \quad (1)$$

où

$c(x,t)$  = la concentration au temps  $t$  pour une distance  $x$  du point d'injection

$m$  = la masse injectée par unité de section, masse totale  $M$  divisée par la hauteur  $h$  si l'on considère une tranche infinie d'aquifère d'un mètre d'épaisseur horizontale et de hauteur  $h$

$neff$  = la porosité effective (ou efficace)

$u$  = la vitesse effective (ou vitesse convective) liée à la vitesse de DARCY  $V_0$  par la relation :

$$u = V_0 / neff$$

$\alpha_L$  est la dispersivité longitudinale, donnée par :

$$\alpha_L = D_L / u \approx D_{hL} / u \quad \text{si } D_m \ll D_L$$

Cette solution correspond aux conditions aux limites et initiales suivantes :

$$c(+\infty, t) = 0 \quad \text{et} \quad c(-\infty, t) = 0 \quad \forall t$$

$$c(x, 0) = 0 \quad \forall x \neq 0$$

$$c(0, 0) = c_0 \quad \text{où } c_0 \text{ est la masse injectée par unité de section efficace dans une tranche élémentaire de l'aquifère}$$

$$c(0, t) = 0 \quad \forall t \neq 0$$

Ces dernières conditions correspondent à une injection de Dirac dans un milieu supposé infini dans les deux sens.

On caractérise habituellement un traçage par le nombre de Péclet hydrodynamique  $Pe$  :

$$Pe = x / \alpha_L$$

où  $x$  = la distance de traçage

La condition de dispersion transversale négligeable paraît être respectée dans le cas des écoulements karstiques où les circulations sont très rapides dans le sens longitudinal des drains. Par contre la loi de DARCY est rarement applicable dans les conduits élargis par dissolution et les phénomènes de turbulence compliquent singulièrement le mécanisme de la dispersion.

La solution (1) est néanmoins très pratique pour interpréter en première approximation les essais de traçage dans le karst. Lorsque les longues queues ne peuvent être ajustées, cela permet de conclure à l'existence de phénomènes secondaires tels que les échanges avec l'eau immobile ou l'adsorption.

Le second modèle utilisé (ADTS pour Advection Dispersion with Transient Storage) fait appel à un réacteur avec écoulement piston, dispersion axiale, et échange de matière avec des zones stagnantes (VILLERMAUX et VAN SWAAIJ, 1969). Ce modèle a été appliqué par RAVEN et al. (1988) au transport dans une fissure simple avec un gradient provoqué. D'après ces derniers auteurs, le modèle donnerait des dispersivités plus élevées dans le cas de l'écoulement provoqué que dans le cas de l'écoulement naturel. Cela tend à confirmer l'importance de l'aspect cinétique des échanges entre les drains et les zones d'eau immobile.

Pour plus de détails théoriques sur le modèle, on se reportera à la seconde partie du travail.

Les conditions aux limites correspondent à un milieu semi-infini. Elles reviennent à exclure toute migration du traceur en amont du point d'injection. Le type d'injection considéré est à nouveau l'impulsion de Dirac.

Exprimée sous forme de "distribution des temps de séjour E", la solution est donnée par :

$$E(\theta) = \exp\left(-\frac{N\theta}{\varphi}\right) \cdot h(\theta, \varphi) + \int_0^{\theta} g(\chi, \theta, \varphi) d\chi \quad (2)$$

avec

$$h(\chi, \varphi) = \sqrt{\frac{Pe}{\pi\varphi\chi}} \cdot \exp\left(-\frac{Pe(\chi-\varphi)^2}{4\varphi\chi}\right) - \frac{Pe}{2\varphi} \cdot \exp(Pe) \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{Pe}{\varphi\chi}} \frac{(\chi+\varphi)}{2}\right)$$

et

$$g(\chi, \theta, \varphi) = \frac{N}{\varphi} \sqrt{\frac{\varphi\chi}{(1-\varphi)(\theta-\chi)}} \cdot I_1\left(2N\sqrt{\frac{\chi(\theta-\chi)}{\varphi(1-\varphi)}}\right) \cdot \exp\left(-N\frac{(\chi-2\varphi\chi+\varphi\theta)}{\varphi(1-\varphi)}\right) \cdot h(\chi, \varphi)$$

où

$I_1$  = la fonction de Bessel modifiée du premier ordre

$\varphi$  = la proportion d'eau mobile par rapport au volume total de l'eau

$Pe = uZ/D_{hL}$  = le critère de Péclet axial

$Z$  = la distance axiale

$D_{hL}$  = le coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal

$u$  = la vitesse effective

$N = K\tau$  = le coefficient de transfert de masse adimensionnel

$K$  = le coefficient de transfert de masse

$\tau = Z/u\varphi$  = le temps convectif

$\theta = t/\tau$  = le temps adimensionnel



La fonction de distribution des temps de séjour est liée à la concentration  $c(t)$ , à la masse  $M$  injectée, et au débit  $Q$ , par la relation :

$$E(t) = c(t)Q/M$$

Le modèle est entièrement défini par les trois grandeurs  $\phi$ ,  $Pe$  et  $N$ .

La solution est fort semblable à la précédente en ce qui concerne la convection-dispersion. Elle tient compte en plus d'un phénomène de retard responsable des longues queues et du décalage du pic généralement observés. Ce retard est dû à la diffusion depuis le drain vers les zones d'eau immobile. Le principal inconvénient de la solution est sans doute de ne pas prendre en compte la nature exacte du milieu aquifère, en l'assimilant à un réacteur avec écoulement piston. En effet, si l'essentiel de la circulation a lieu au travers de chenaux relativement larges, une partie de l'eau s'écoule aussi dans des conduits plus fins, assimilables à un milieu poreux. Ces conduits plus fins sont le siège de phénomènes de diffusion et de dispersion cinématique dont le modèle ne tient pas compte. Il n'est pas tenu compte non plus de la différence entre l'eau immobile contenue dans des grands vides karstiques et celle contenue dans la matrice microfissurée autour du drain.

Selon le type de vides dans lesquels le transit et le stockage ont lieu, l'un ou l'autre des deux modèles (celui de la convection-dispersion en milieu poreux ou celui du réacteur piston avec échanges vers l'eau immobile) conviendra mieux. Indirectement, l'application de ces modèles est un moyen d'étudier l'alimentation des blocs par les drains et les risques de pollution de l'aquifère.

### 1.7.9.3. RESULTATS DES MODELISATIONS

En ce qui concerne le modèle de convection-dispersion simple en écoulement monodimensionnel uniforme, les calibrations des paramètres recherchés ont été effectuées à l'aide du code CATTI conçu par SAUTY et KINZELBACH (1988).

En ce qui concerne le modèle du réacteur piston avec diffusion vers l'eau immobile, les calibrations ont été effectuées grâce à un programme mis au point par nous-mêmes avec l'application IGOR sur Macintosh.

Certaines données (débit, masse restituée, épaisseur de l'aquifère) doivent faire l'objet d'un ajustement (dans certaines limites bien entendu) pour tenir compte de l'imprécision de leur évaluation au départ. La calibration, quant à elle, porte sur différents paramètres selon le modèle utilisé.

Dans le premier modèle, les paramètres recherchés sont : la dispersivité longitudinale  $\alpha_L$ , la porosité effective  $neff$  et la vitesse convective  $u$ , obtenue à partir de la vitesse de DARCY  $V_0$  ( $u = V_0/neff$ ).

Les données à introduire dans le calcul (et à ajuster éventuellement) sont : la distance  $x$ , la masse totale injectée  $M$ , le pourcentage de restitution  $R^1$  et la hauteur de la fissure  $h$ .

Une interprétation avec deux couches ou trajets indépendants est également possible.

Dans le second modèle, les paramètres inconnus sont : la dispersivité longitudinale  $\alpha_L$ , la proportion d'eau mobile  $\phi$  par rapport au volume total, la section du réacteur  $S$  et le coefficient de transfert de masse  $K$ . Les données (distance  $Z$ , débit  $Q$ , masse injectée  $M$ ) sont également ajustées dans une certaine mesure.

Toutes ces grandeurs (données et paramètres) sont reliées entre elles, et avec les variables  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $Pe$  et  $N$  intervenant dans la solution analytique (2), par les relations suivantes :

$$Pe = Z/\alpha_L$$

$$\theta = tQ/SZ$$

$$N = KZS/Q$$

Les courbes modélisées dans le cas des trois traçages réalisés à la perte de Crossée, dans des conditions de débits différentes, sont présentées aux fig. 1.49 a, b et c.

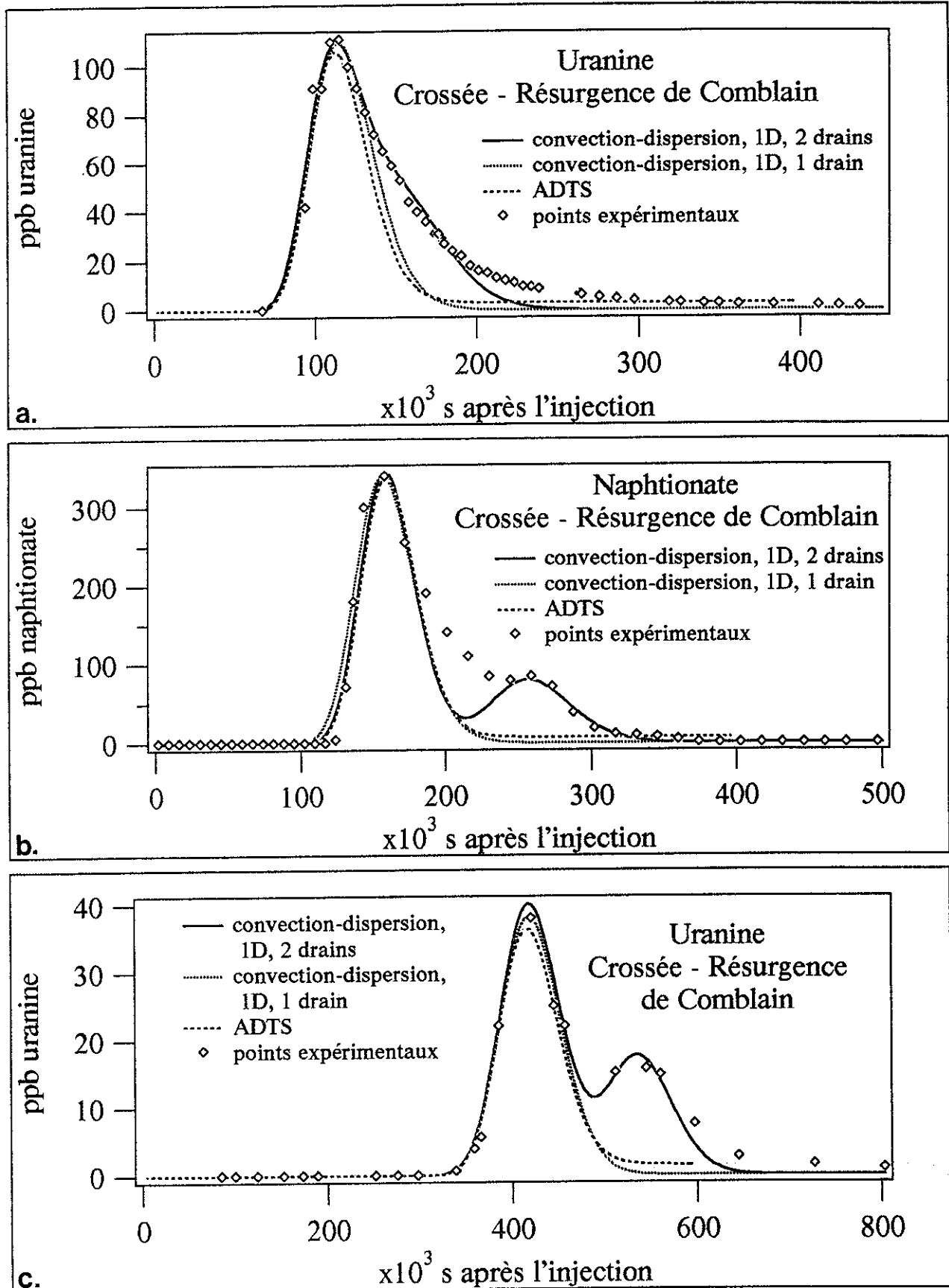
Dans chaque cas, on a eu recours à trois interprétations : avec le code CATTI (convection-dispersion 1D) en considérant d'abord un, puis deux trajets indépendants, et avec le modèle ADTS (réacteur piston avec diffusion vers l'eau immobile).

Les paramètres calibrés avec les différents modèles sont rassemblés dans le tab. 1.7.

Sur les graphiques des fig. 1.49 a, b et c, on voit que le modèle convection-dispersion simple à un seul cheminement ne permet pas d'expliquer totalement la partie descendante des courbes de restitution. L'introduction d'une diffusion vers l'eau immobile (modèle ADTS) n'apporte pas non plus de grande amélioration. Par contre, un cheminement double rend beaucoup mieux compte de la décroissance lente des concentrations ainsi que de l'apparition du pic secondaire, d'autant plus marqué que le débit est faible. Les mécanismes agissant le long du drain karstique sont par conséquent principalement la convection et la dispersion cinématique, en raison des vitesses très élevées (vitesses effectives comprises entre  $1,34 \cdot 10^{-2}$  et  $6,31 \cdot 10^{-2}$  m/s).

Plus le débit est élevé, plus les dispersivités calculées sont importantes. Elles avoisinent les 20 m pour le troisième test, 50 m pour le deuxième et 100 m pour le premier. Ces variations peuvent provenir du fait que plus le débit est élevé, plus les effets d'inertie et de turbulence interviennent, et moins la loi de DARCY et le modèle utilisé sont valables (voir seconde partie). Cela signifierait que plusieurs valeurs de dispersivité que l'on trouve dans la littérature pour les traçages dans le karst ont sans doute été surestimées, principalement lorsqu'il s'agissait de traçages en crue.

<sup>1</sup>Le programme tient également compte d'un facteur de dégradation  $L$ , dont le terme correspondant n'a pas été repris dans la solution (1). Ce facteur prend en compte la décroissance exponentielle du traceur (par désintégration radioactive par exemple) dans le cas d'un traceur non conservatif.



**Fig. 1.49** : Modélisation des traçages entre la perte de Crossée et la résurgence de Comblain (a. uranine le 10/12/88 - b. naphtionate le 29/3/89 - c. uranine le 15/8/90).

Tracage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	V <sub>0</sub> (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou φ (%)	α <sub>L</sub> (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
uranine 10/12/88	CATTI 1 drain	2,37	7200	2,60.10 <sup>-2</sup>	12	6,19.10 <sup>-2</sup>	42	100	-	70
	CATTI 2 drains	1,7	7200	2,65.10 <sup>-2</sup>	4	6,31.10 <sup>-2</sup>	42	100	-	90
		0,7	7200	1,60.10 <sup>-2</sup>	12	4,44.10 <sup>-2</sup>	36	75	-	80
	ADTS	3	7200	-	5,4	5,74.10 <sup>-2</sup>	10	90	7.10 <sup>-7</sup>	100
naphionate 29/3/89	CATTI 1 drain	10	7200	1,82.10 <sup>-2</sup>	19	4,55.10 <sup>-2</sup>	40	60	-	60
	CATTI 2 drains	7,5	7200	1,80.10 <sup>-2</sup>	10	4,5.10 <sup>-2</sup>	40	50	-	85
		2,5	7200	1,06.10 <sup>-2</sup>	20	2,79.10 <sup>-2</sup>	38	40	-	100
	ADTS	7,3	7200	-	5,9	4,41.10 <sup>-2</sup>	15	50	6.10 <sup>-7</sup>	100
uranine 15/8/90	CATTI 1 drain	1	7200	6,00.10 <sup>-3</sup>	38	1,71.10 <sup>-2</sup>	35	21	-	70
	CATTI 2 drains	0,68	7200	6,00.10 <sup>-3</sup>	20	1,71.10 <sup>-2</sup>	35	21	-	95
		0,32	7200	4,02.10 <sup>-3</sup>	20	1,34.10 <sup>-2</sup>	30	15	-	100
	ADTS	1	7200	-	10,5	1,71.10 <sup>-2</sup>	50	20	6.10 <sup>-7</sup>	100

**Tab. 1.7 :** Résultats de la modélisation des trois tracages entre la perte de Crossée et la résurgence du Moulin à Comblain. M = masse injectée x ou Z = distance V<sub>0</sub> = vitesse de Darcy h ou S = épaisseur d'aquifère ou section d'écoulement u = vitesse effective neff ou φ = porosité efficace ou fraction d'eau mobile α<sub>L</sub> = dispersivité longitudinale K = coefficient de transfert de masse entre l'eau mobile et l'eau immobile R = taux de restitution.

Le second cheminement possède des vitesses effectives et des dispersivités plus faibles que celles du trajet principal. Il est par conséquent moins sujet aux erreurs dues aux effets d'inertie et de turbulence.

Les porosités efficaces calculées<sup>1</sup> augmentent légèrement avec le débit (de 35 à 42 %). Cela peut être dû à l'augmentation du volume d'eau dans le drain.

Par contre, les épaisseurs h impliquées dans les tracages diminuent lorsque le débit augmente (de 38 à 12 m). Il est logique de penser que plus la vitesse est élevée, moins le traceur a le temps de diffuser vers les masses d'eau en contact avec le drain.

A partir des valeurs de S et φ (modèle ADTS), on peut calculer le volume d'eau immobile intervenant dans la diffusion du traceur. Ce volume passe de 37800 m<sup>3</sup> (pour 4200 m<sup>3</sup> dans le drain) lors du troisième test à 35000 m<sup>3</sup> (pour 35000 m<sup>3</sup> également dans le drain) lors du premier test. Plus le débit est faible, plus le volume d'eau immobile atteint est important car la diffusion moléculaire a d'autant plus le temps d'agir.

<sup>1</sup>Etant donné que les modèles utilisés représentent le transport le long d'un drain, il est normal d'obtenir des valeurs de porosité efficace (ou de fraction d'eau mobile) largement supérieures à celles de l'aquifère pris dans son ensemble.

La comparaison des paramètres correspondants aux deux types de modèles (ADTS et convection-dispersion) est délicate étant donné leurs significations physiques différentes. On notera cependant une assez bonne concordance entre les vitesses effectives.

Il est bon de rappeler que les taux de restitution et les masses injectées ont été ajustées par rapport aux masses effectivement injectées (ou restituées) pour tenir compte du fait qu'une partie du traceur peut avoir été piégée à proximité du point d'injection ou restituée au-delà de la période de surveillance. L'ajustement est aussi justifié par le fait que la calibration ne concerne pas l'entièreté de la courbe et que par conséquent les taux de restitutions calculés et réels sont différents.

Les courbes modélisées dans le cas du traçage à la perte du Bois de Marsée sont présentées à la fig. 1.50.

Les paramètres calibrés avec les deux modèles (CATTI et ADTS) sont rassemblés dans le tab. 1.8.

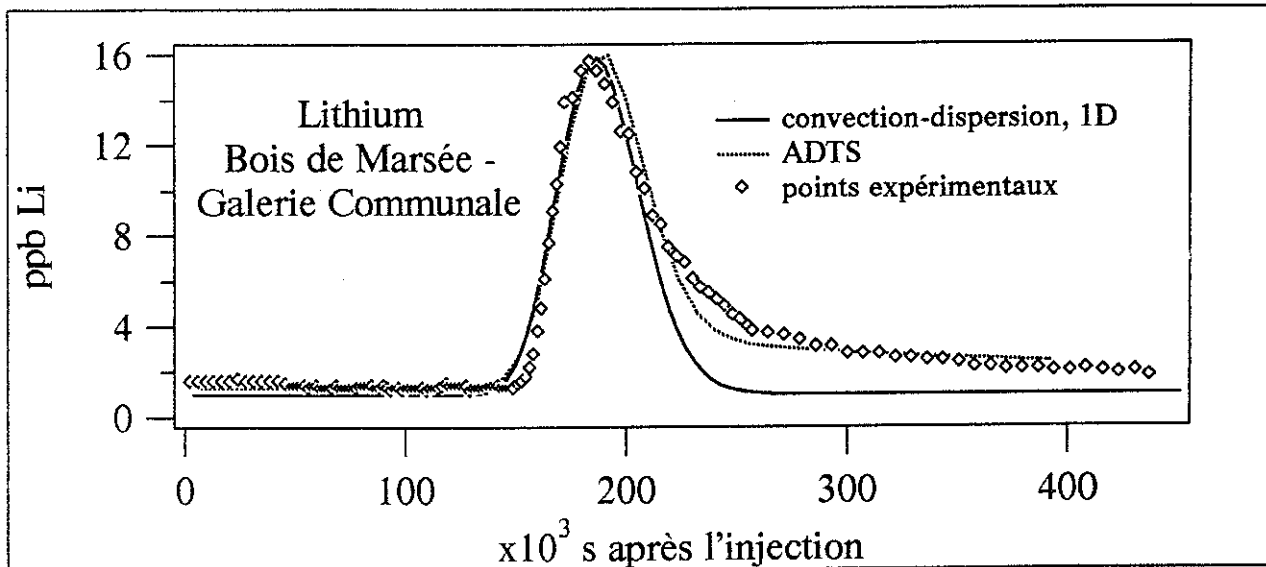
Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	$V_0$ (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou $\phi$ (%)	$\alpha_L$ (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
lithium 27/12/91	CATTI	0,43	3055	$1,55 \cdot 10^{-2}$	20	$1,63 \cdot 10^{-2}$	95	15	-	50
	ADTS	0,4	3055	-	6,25	$1,6 \cdot 10^{-2}$	60	15	$2,1 \cdot 10^{-6}$	100

**Tab. 1.8** : Résultats de la modélisation du traçage au lithium entre la perte du Bois de Marsée et la galerie Communale à Néblon-le-Moulin.

M = masse injectée x ou Z = distance  $V_0$  = vitesse de Darcy h ou S = épaisseur d'aquifère ou section d'écoulement u = vitesse effective neff ou  $\phi$  = porosité efficace ou fraction d'eau mobile  $\alpha_L$  = dispersivité longitudinale K = coefficient de transfert de masse entre l'eau mobile et l'eau immobile R = taux de restitution.

Le modèle de convection-dispersion simple ne permet pas d'expliquer la longue queue de la courbe de restitution alors que le modèle ADTS en rend beaucoup mieux compte. L'eau immobile joue par conséquent un rôle nettement plus important que dans le cas du bassin d'Anthisnes. Cela peut s'expliquer par la présence d'une zone noyée importante à proximité de l'exutoire. On a vu en effet que la karstification était moins développée dans le bassin du Néblon et que cela avait pour conséquence un réseau de drainage moins structuré et le débordement de la nappe sous forme d'exutoires diffus à hauteur du niveau de base.

La porosité efficace et la fraction d'eau mobile sont cependant plus importantes (95 et 60 % respectivement) que dans le cas des traçages dans le bassin Anthisnes. Ces valeurs pourraient être liées à l'importance de la crue au cours de laquelle le traçage s'est déroulé. Cette crue a dû mettre en mouvement de très grandes quantités d'eau.



**Fig. 1.50** : Modélisation du traçage au lithium entre la perte du Bois de Marsée et la galerie Communale (27/12/91).

Les dispersivités concordent pour les deux interprétations (15 m). Elles sont plus faibles qu'à Anthisnes, et sans doute moins surestimées, car une plus grande part des écoulements vérifie la loi de DARCY (conduits moins larges, régime laminaire).

### 1.7.10. Conclusions des traçages

1) Les traçages réalisés dans les calcaires carbonifères à partir des pertes des bassins du Néblon et d'Anthisnes ont montré l'existence de circulations très rapides le long des drains karstiques : vitesses de passage comprises entre 73 et 277 m/h.

- Dans le synclinal d'Anthisnes, suivant l'état hydrodynamique du système, la vitesse de passage entre la perte de Crossée et la résurgence de Comblain a varié entre 76 et 277 m/h.

Lors du traçage de mars 89 aux pertes de Vien et d'Anthisnes, les vitesses ont été environ moitié moindres qu'à la perte de Crossée. Cela peut être dû à une plus grande distance par rapport au collecteur principal du système ou à la traversée du Tournaisien.

- Dans le bassin du Néblon, le long de l'unique drain karstique mis en évidence (entre la perte de Bende et la source Communale), la vitesse a été plus faible (73 m/h) que pour n'importe lequel des traçages dans le bassin d'Anthisnes. Cela peut être attribué à la différence de karstification entre les deux bassins ainsi qu'à l'existence d'une zone noyée importante, avec drainage diffus, dans la partie aval du système du Néblon. Cette zone noyée est confirmée par les résultats de la modélisation des essais de traçage.

En effet, alors que pour les traçages dans le bassin d'Anthisnes, un modèle de convection-dispersion à deux trajets semble mieux convenir, dans le cas du Néblon, un modèle faisant intervenir en plus la diffusion vers les réserves d'eau immobile paraît mieux adapté.

2) La dispersivité longitudinale est plus faible dans le Néblon (15 m) qu'à Anthisnes (entre 20 et 100 m).

Pour les traçages entre la perte de Crossée et la résurgence de Comblain, les dispersivités augmentent avec le débit. Elles peuvent être surestimées lorsque l'on s'écarte du domaine de validité de la loi de DARCY. Cela se produit lorsque les vitesses deviennent suffisamment importantes pour que les phénomènes d'inertie et de turbulence ne puissent plus être négligés.

Des informations supplémentaires sur le rôle joué par l'état des eaux au moment du traçage pourraient être apportées par l'étude des taux de restitution, mais cela nécessiterait une meilleure connaissance des variations de débit aux exutoires.

3) Dans le bassin d'Anthisnes, les relations entre les blocs peu perméables et le drain principal ont pu être étudiées grâce aux traçages effectués à partir de et en direction du forage P14.

Grâce au cône d'appel créé par le pompage (rabattement = 10 m), une partie du traceur véhiculé le long du drain (injection à Crossée) a pu être attirée vers le forage.

En écoulement naturel, par contre, les vitesses de circulation depuis les blocs vers le drain semblent tellement faibles que seule la diffusion permet au traceur de parvenir au drain. Dans ce drain, la dilution est alors telle que la concentration à la sortie se trouve sous la limite de détection, excepté lorsque des crues provoquent une mise en charge suffisante pour chasser le traceur au travers des blocs par effet piston.

Les traceurs injectés dans les autres forages (P0 et P2) n'ont jamais été détectés à aucun exutoire, les fissures drainantes étant sans doute trop éloignées des points d'injection.

La reprise par pompage de l'uranine injectée trois mois plus tôt au P2 a montré que seule la diffusion avait agi. Cela implique une circulation très lente de la nappe dans un rayon minimum de 30 m.





## **SECONDE PARTIE**

### **Apport des traçages à la connaissance des milieux fissurés et karstiques**



WATER

## SECONDE PARTIE : APPORT DES TRAÇAGES A LA CONNAISSANCE DES MILIEUX FISSURES ET KARSTIQUES

### 2.1. INTRODUCTION

Dans la première partie du travail, nous avons eu l'occasion d'approfondir la connaissance d'une région karstique dans les calcaires plissés du Carbonifère à l'extrémité Est du synclinorium de Dinant.

Cette région est constituée de deux bassins (ou systèmes) que différentes approches nous ont permis de comparer. Les particularités liées à la présence d'une structure drainante de type karstique sont très vite apparues. Partant de constatations d'ordre géologique et géomorphologique, nous avons développé une approche "structurelle" (géophysique, fissuration) et une approche "systémique" (hydrodynamique, hydrogéochimie) pour tenter de caractériser les écoulements au sein de l'aquifère. Les modalités d'écoulement sont la conséquence la plus directe de la répartition des vides due à la fracturation et à la karstification. Nous avons ainsi mis en évidence des différences entre la structure du système d'Anthisnes et celle du système du Néblon. La karstification est plus développée dans le bassin d'Anthisnes. Elle est sans doute liée à l'encaissement plus important du niveau de base. Elle a eu pour conséquence le drainage plus efficace des réserves. L'aquifère possède de ce fait des ressources plus limitées, tant du point de vue stockage que du point de vue qualité des eaux.

Ces différences ont été confirmées par une série d'expériences de traçage faisant intervenir, non seulement les trajets le long des drains principaux, mais aussi les échanges entre les blocs peu perméables et les drains.

Au vu des résultats intéressants fournis par la méthode des traçages, il nous a paru nécessaire de replacer dans un contexte plus général les observations effectuées dans les bassins d'Anthisnes et du Néblon, de manière à conforter les hypothèses concernant l'effet de la double porosité et de la double perméabilité dans le karst. Ainsi, des tests supplémentaires ont été réalisés. Ils nous permettront d'effectuer des comparaisons, d'une part avec d'autres sites dans les calcaires carbonifères et dans les calcaires plus karstifiés du Dévonien, d'autre part avec des milieux fissurés peu ou pas karstifiés tels que les craies du Crétacé et avec les terrains meubles du Tertiaire.

Au cours de cette étude, nous tenterons de dégager l'influence de la structure du milieu sur l'écoulement et le transport des traceurs.

Deux approches seront envisagées : l'une purement descriptive, concernant la forme des courbes de restitution et leurs paramètres associés (distribution des temps de séjour, taux de restitution, vitesses), l'autre plus interprétative, concernant la modélisation des essais de traçage et la détermination des caractéristiques hydrodispersives de l'aquifère.

Nous introduirons le sujet en rappelant les principales lois et particularités, d'une part de l'écoulement, d'autre part du transport, dans les milieux fissurés et karstiques.

## 2.2. CIRCULATION DES EAUX EN MILIEU FISSURE ET KARSTIQUE

Dans un milieu poreux, l'écoulement de l'eau est habituellement régi par la loi de DARCY :

$$\vec{V}_0 = -\frac{k}{\mu}(\text{grad}p + \rho \cdot g \cdot \text{grad}z)$$

où

$\vec{V}_0$  = la vitesse de filtration ou vitesse de Darcy

$p$  = la pression interstitielle du fluide

$z$  = la coordonnée verticale

$g$  = l'accélération de la pesanteur

$\rho$  = la masse volumique du fluide

$\mu$  = la viscosité dynamique

$k$  = la perméabilité intrinsèque du milieu, liée au coefficient de perméabilité  $K$  par la relation :

$$K = k\rho g/\mu$$

La perméabilité exprime la facilité avec laquelle le fluide se déplace à travers la tortuosité des vides (BEAR et VERRUIJT, 1987 in DASSARGUES, 1991).

La loi de DARCY peut être généralisée pour un milieu anisotrope, à condition de remplacer le coefficient de perméabilité  $K$  par le tenseur des perméabilités  $K_{ij}$ .

Elle n'est en principe valable que dans les conditions suivantes :

- le fluide est de l'eau à la température ordinaire (quelques dizaines de degrés);
- l'écoulement est laminaire et l'énergie cinétique est négligeable;
- le milieu est homogène du point de vue de sa perméabilité;
- le milieu est saturé en eau.

Dans le cas des aquifères fissurés et karstiques, bien que la première condition soit vérifiée, il n'en va généralement pas de même pour les trois dernières.

L'ouverture des fissures, leur irrégularité et les vitesses de l'eau sont en effet telles que l'écoulement devient turbulent et que les forces d'inertie ne peuvent plus être négligées.

La répartition des conduits karstiques et des fissures ouvertes est telle que la perméabilité du milieu reste souvent hétérogène quel que soit le volume d'aquifère considéré (pas d'élément de volume représentatif).

Dans le karst, une grande partie des écoulements que l'on veut étudier ont lieu dans la zone non saturée (zone d'absorption et zone d'infiltration) ou à la limite de la nappe (ruissellement souterrain, zone épinoyée), c'est-à-dire là où l'écoulement est diphasique air-eau.

Toutes ces particularités font qu'en général la loi de DARCY n'est valable, en milieu fissuré et karstique, que pour une très faible proportion des écoulements, là où les fissures sont planes, pas trop larges, de fréquence régulière et les gradients pas trop élevés.

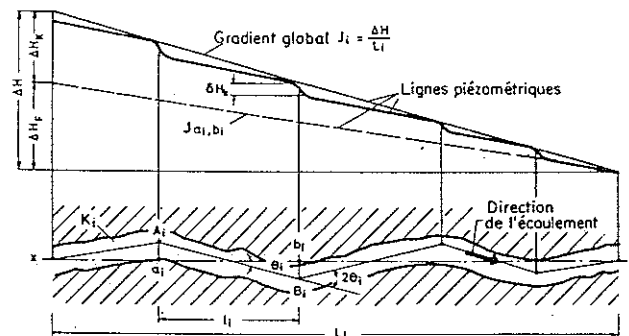
La karstification, en élargissant certaines fissures ou croisements des joints, rend le milieu de plus en plus hétérogène. Il est cependant possible de trouver des milieux fissurés, peu ou pas karstifiés (voire pas karstifiable du tout), qui, malgré leur anisotropie (ex. craie de Hesbaye), peuvent être localement considérés comme des milieux homogènes, et où la loi de DARCY reste applicable.

D'un point de vue pratique, il n'est souvent pas possible de vérifier la validité de la loi de DARCY, si ce n'est en constatant l'inadéquation des interprétations basées sur elle. Ainsi, la plupart des modèles utilisés par la suite pour interpréter les essais de traçages concernent des écoulements supposés vérifier la loi de DARCY et, dans plusieurs cas, on verra que ces modèles ne conviennent pas parce que les hypothèses de départ ne sont pas toutes remplies.

Différents auteurs (LOUIS, 1968 et 1974, KIRALY, 1978) se sont attachés à décrire les écoulements dans les fissures et les chenaux, en utilisant différentes lois de pertes de charge.

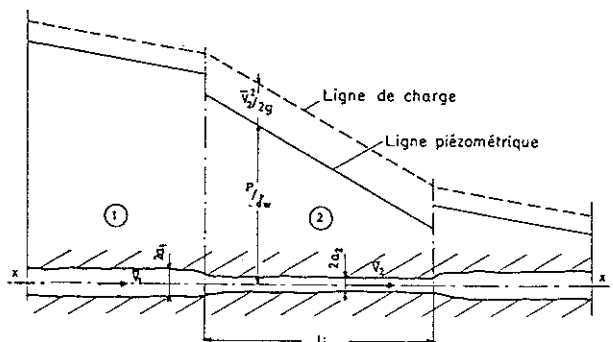
Ne plus considérer le milieu comme poreux nécessite de prendre en compte les phénomènes de turbulence et d'inertie.

La fig. 2.1 montre ce que deviennent les pertes de charge le long d'une fracture irrégulière comme on en rencontre dans le milieu karstique. Il ne faut plus seulement considérer la "micro-rugosité" des parois mais aussi la "macro-rugosité", entraînant des changements brusques de direction des filets d'eau.



**Fig. 2.1 :** Pertes de charge dues aux changements de direction le long d'une fissure irrégulière (d'après LOUIS, 1968). L'irrégularité de la fissure détermine sa "macro-rugosité".

Les pertes de charge varient également en fonction de l'ouverture des fissures (fig. 2.2).



**Fig. 2.2** : Pertes de charge dues aux variations brusques d'ouverture des fissures (d'après LOUIS, 1968).

LOUIS (1968) distingue différentes lois de pertes de charge suivant les régimes d'écoulement dans les fissures, en fonction du nombre de Reynolds (fig. 2.3) :

$$Re = u \cdot D_h / \nu$$

où

$u$  = la vitesse

$D_h$  = le diamètre hydraulique <sup>1</sup>

$\nu$  = la viscosité cinématique

et en fonction de la rugosité relative :

$$k / D_h$$

où  $k$  = la rugosité absolue, dépendant de la hauteur des aspérités.

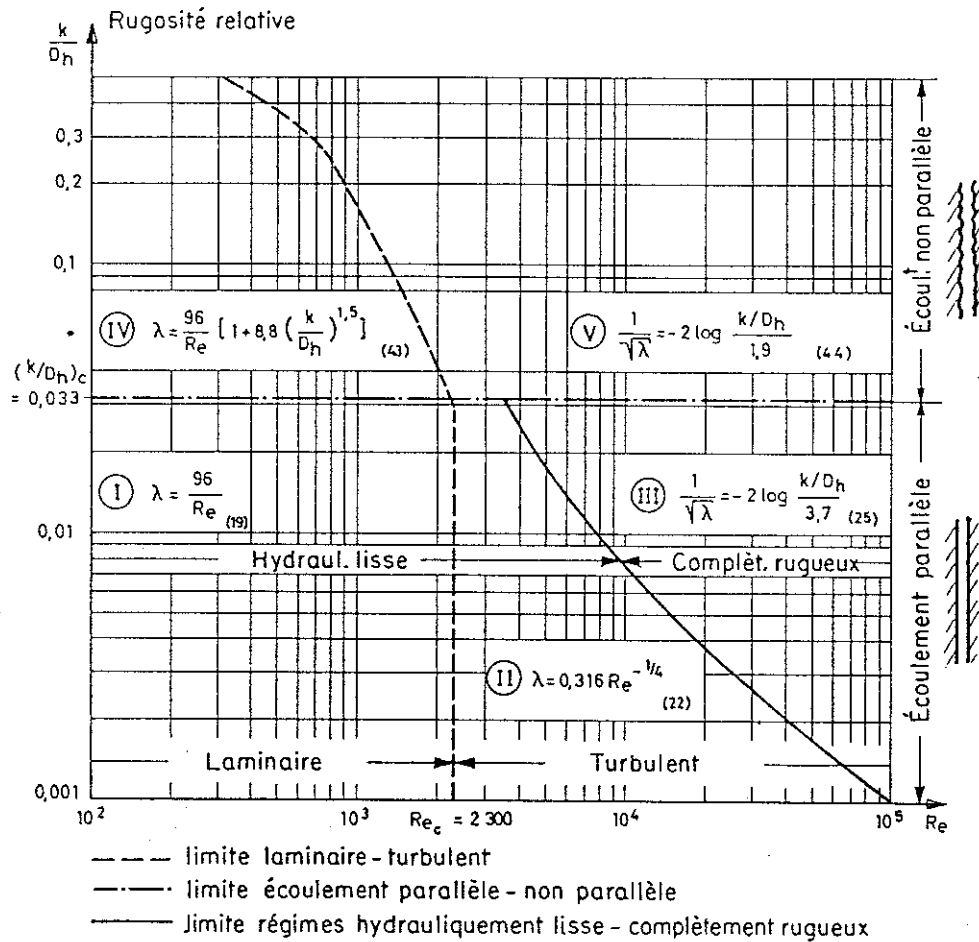
L'auteur situe la limite entre "écoulement parallèle" et "écoulement non parallèle" pour une valeur de rugosité relative de 0,033.

En écoulement parallèle, une seconde limite sépare "l'écoulement laminaire", à pertes de charge linéaires, de "l'écoulement turbulent", à pertes de charge non linéaires, pour une valeur du nombre de Reynolds de 2300. En écoulement non parallèle, cette limite s'abaisse lorsque la rugosité relative augmente.

L'auteur distingue en plus "l'écoulement hydrauliquement lisse" de "l'écoulement complètement rugueux". Ce dernier est caractérisé par un coefficient de pertes de charge  $\lambda$  ne s'exprimant plus en fonction de  $Re$ .

Le coefficient de perméabilité s'exprime aussi d'une manière différente dans chaque cas.

<sup>1</sup>A ne pas confondre avec le coefficient de dispersion hydrodynamique noté de la même manière.



**Fig. 2.3 :** Expressions du coefficient de pertes de charge dans les fissures suivant le régime d'écoulement, dans un diagramme "nombre de Reynolds ( $Re$ ) - rugosité relative ( $k/D_h$ )" d'après LOUIS (1968). Ce n'est qu'en écoulement laminaire (domaines I et IV) que les pertes de charge dépendent linéairement de la vitesse. L'écoulement hydrauliquement lisse (domaines I et II) se distingue de l'écoulement complètement rugueux (domaines III et V) par le fait que dans ce dernier les pertes de charges ne dépendent plus de la vitesse.

MANGIN (1975) a calculé les vitesses maximales admises pour des fissures d'ouverture croissante afin que le régime reste laminaire en écoulement parallèle ( $Re = 2300$ ) et que la loi de DARCY soit applicable. Ces vitesses maximales, calculées pour des fissures mouillées sur 1 m, sont données dans le tableau suivant :

Ouverture	10 $\mu$	100 $\mu$	1 mm	1 cm	10 cm	1 m
Vitesses max. (m/h)	108000	10800	1080	108	10,8	1,08

On voit par exemple que, pour les vitesses habituellement observées lors des essais de traçage dans le karst (10 à 1000 m/h), l'ouverture des fissures doit être inférieure à 10 cm, voir même 1 mm, pour que l'écoulement soit laminaire. Les plus gros conduits karstiques où circulent les traceurs ont un diamètre généralement supérieur, jusqu'à plusieurs mètres. De plus, vu la forte macro-rugosité, on risque de passer dans le domaine des écoulements non parallèles, abaissant ainsi davantage les vitesses critiques admissibles pour l'écoulement laminaire.

KIRALY (1978) envisage un milieu fissuré satisfaisant aux conditions suivantes :

- les fissures sont mutuellement perpendiculaires et d'égale importance (milieu équivalent isotrope);
- les fissures sont planes et continues à l'intérieur d'un élément de volume représentatif de l'aquifère;
- la perméabilité de la matrice entre les fissures est négligeable;
- la perméabilité est isotrope dans le plan des fissures;
- l'écoulement est laminaire dans les fissures (autrement dit, la vitesse varie linéairement avec la projection du gradient dans le plan des fissures).

Le coefficient de perméabilité est dans ce cas isotrope et il peut être obtenu à partir de la relation:

$$K = \frac{g}{12v} \cdot f \cdot d^3$$

où

f = la fréquence des fissures

d = l'ouverture des fissures

Etant donné que les écoulements ont préférentiellement lieu aux intersections des réseaux de fissures, aux endroits où la karstification est la plus développée, il est logique, comme l'a fait KIRALY (1978), de considérer ces intersections de fissures plutôt que les fissures elles-mêmes. En faisant cette fois appel à une loi d'écoulement dans les conduits cylindriques, il obtient une seconde expression de la perméabilité mieux adaptée à la situation du karst :

$$K = \frac{g\pi}{128v} \cdot F \cdot D^4$$

où

F = la densité des intersections de fissures

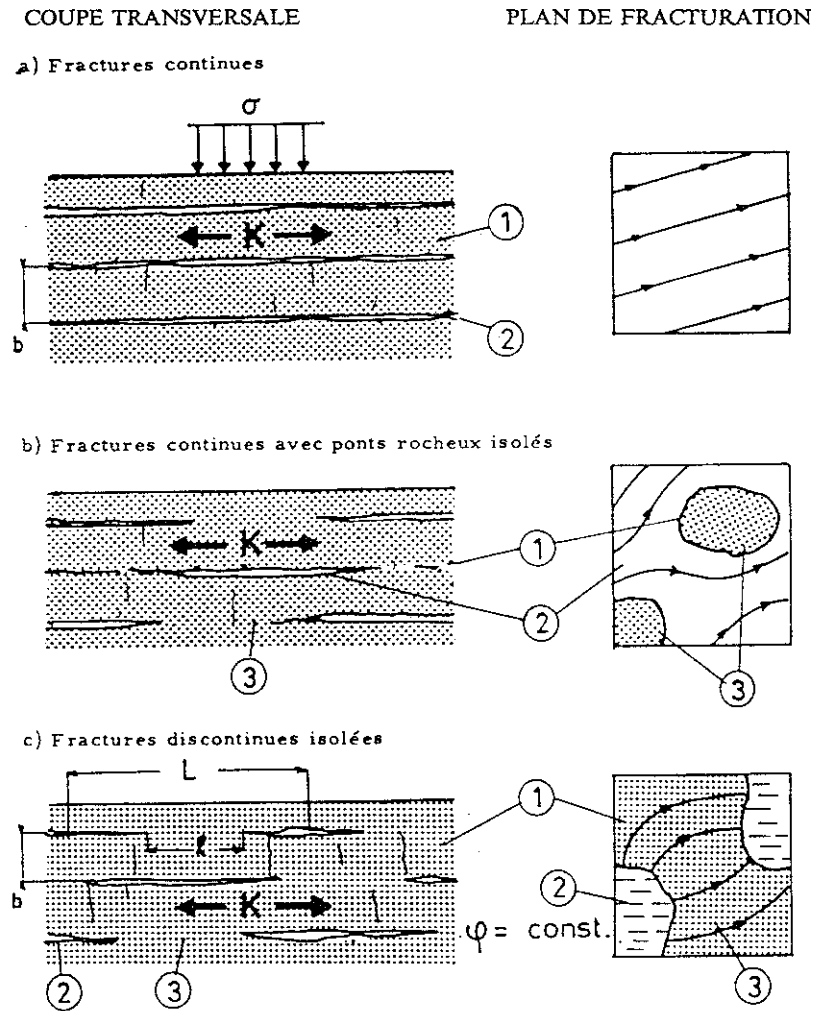
D = le diamètre des chenaux aux intersections des fissures

Dans la réalité, les perméabilités sont inférieures à celles calculées sur base de ces formules simples pour les deux raisons principales suivantes:

- la loi de DARCY n'est pas toujours vérifiée, en raison des vitesses élevées et des pertes de charge non linéaires dues aux changements de direction et d'épaisseur des fissures et des chenaux;
- les réseaux de fissures et de chenaux ne sont pas parfaitement continus.



Ce dernier point a été étudié par LOUIS (1974). Il est illustré sur la fig. 2.4 où l'on voit que le degré de séparation des fissures peut être réduit à l'extrême, au point que seul un écoulement à potentiel imposé subsiste au travers de la matrice poreuse.



**Fig. 2.4 :** Continuité et degré de séparation des fissures dans un massif rocheux (d'après LOUIS, 1974). Dans le cas de fractures isolées, un écoulement à potentiel imposé s'instaure au travers de la matrice poreuse.

Cette notion de "continuité" doit être considérée pour un volume d'aquifère donné car un "effet d'échelle" intervient ici aussi. Les seuls réseaux continus ayant été reconnus avec certitude dans les aquifères karstiques sont ceux à l'échelle du bassin entier et à l'échelle des microfissures dans les blocs calcaires (MANGIN, 1975).

LOUIS (1974) propose la formule suivante pour calculer le coefficient de perméabilité dans le cas d'un milieu à réseau de fissures discontinues :

$$K \equiv K_m \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{a}{L-a} - \frac{a}{L} \right) \right]$$

où

$K_m$  = le coefficient de perméabilité de la matrice entre les fissures

$a$  = l'extension moyenne des fissures

$L$  = la distance moyenne entre les fissures isolées ( $a/L = \kappa^{1/2}$  où  $\kappa$  est appelé le "degré de séparation" des fissures)

Cette formule est une approximation car la perméabilité dépend aussi de la fréquence des fissures. Elle est seulement acceptable pour des fréquences comprises entre 3 et 6. On remarquera que l'ouverture des fissures et leur rugosité n'interviennent pas puisque l'écoulement se fait au travers de la matrice rocheuse.

## 2.3. TRANSPORT EN MILIEU FISSURE ET KARSTIQUE

### 2.3.1. Mécanismes et lois de transport

Lors de l'étude des bassins d'Anthisnes et du Néblon, nous avons vu l'influence des phénomènes de dispersion sur l'allure des courbes de restitution des traçages. Nous avons alors considéré les échanges pouvant se produire entre les drains et les blocs peu perméables constituant les réserves de l'aquifère.

Au début, les karstologues ne s'intéressaient qu'à l'aspect convectif des traçages, se limitant à rechercher les liaisons et à mesurer les temps de passage entre les points d'injection et les points de sortie. Par la suite, ils ont cherché à tirer davantage profit des informations fournies par les courbes de restitution afin de comprendre la migration des substances dans l'aquifère. Auparavant, on avait en effet moins conscience de l'importance des réserves contenues dans les blocs et des risques de pollution à long terme. Le karst était plus réputé pour ses pollutions accidentelles et les décharges faisaient moins parler d'elles.

Les propriétés dispersives ne dépendent pas seulement des circulations, mais aussi des caractéristiques des substances considérées, un plus grand nombre de traceurs différents a été mis au point ces dernières années pour étudier la dispersion des polluants (KÄSS, 1992). Actuellement, on n'utilise pas nécessairement les traceurs idéaux, c'est-à-dire ceux qui suivent le plus fidèlement possible l'écoulement de l'eau. On recherche également des traceurs ayant un comportement propre (diffusion, adsorption, réaction) le plus proche possible des polluants que l'on désire simuler.

Dans un premier temps, nous nous placerons dans le cas d'écoulements relativement lents, pour lesquels les phénomènes de dispersion ne sont plus négligeables face à la convection et nous supposerons que les lois d'écoulement et de transport en milieu poreux sont applicables. Nous supposerons également que le traceur (ou le polluant) est miscible à l'eau (une seule concentration, caractérisant une seule phase fluide, suffit à décrire le système).

Dans ces conditions, le transfert de masse est régi par l'équation de convection-dispersion, exprimant le bilan des flux de traceur au cours du temps et servant de base à toute la théorie de la dispersion en milieu poreux :

$$\text{div}([D_h] \cdot \vec{\text{grad}}c - c \cdot \vec{u}) = \text{Rd} \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1)$$

où

$c$  = la concentration du traceur au temps  $t$

$\vec{u}$  = la vitesse effective d'écoulement

$[D_h]$  = le tenseur de dispersion hydrodynamique

$\text{Rd}$  = le facteur de retard, prenant en compte l'adsorption réversible à la surface du solide

Le premier terme sous la divergence représente tous les phénomènes de dispersion.

Le second est lié au déplacement convectif du nuage de traceur, en fonction de la vitesse effective.

La disparition du traceur suite, par exemple, à des réactions chimiques ou biologiques, à la désintégration radioactive, ou à l'adsorption irréversible, n'est pas prise en compte dans cette équation de transport (le traceur est dit conservatif). Le facteur  $\text{Rd}$  ne tient pas compte non plus des échanges avec l'eau immobile <sup>1</sup>.

L'équation de transport reste valable dans un milieu fissuré homogène, à condition de travailler à une échelle supérieure à l'élément de volume représentatif de l'aquifère.

A une dimension, en négligeant la dispersion transversale, l'équation de convection-dispersion devient :

$$-u \frac{\partial c}{\partial x} + D_{hL} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \text{Rd} \frac{\partial c}{\partial t}$$

où  $D_{hL}$  = le coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal

On trouvera de larges descriptions de la théorie de la dispersion dans plusieurs ouvrages de référence (BEAR et VERRUIJT, 1987, DE MARSILY, 1986).

Ci-dessous, nous reprenons en détail les processus susceptibles d'intervenir dans le transport du traceur afin d'en dégager les particularités dans les milieux à double porosité tels que les aquifères karstiques. Ces processus ont aussi été décrits par POREL (1988) et HANICH (1991).

<sup>1</sup>Ces derniers échanges nécessitent l'introduction du bilan de masse dans l'eau immobile (BIVER, thèse à paraître).

Le transport peut être décomposé en deux mécanismes principaux : la convection et la dispersion hydrodynamique. Cette dernière est en outre la somme des effets de la diffusion moléculaire et de la dispersion cinématique. A côté de la convection et de la dispersion hydrodynamique, d'autres processus prennent plus ou moins d'importance suivant la nature du milieu et celle du traceur : l'adsorption à la surface du solide, les échanges par diffusion avec l'eau immobile, les réactions chimiques et biologiques ou encore la décroissance radioactive.

La convection est liée au déplacement de l'eau, entraînant le traceur suivant sa vitesse propre. Le flux de traceur résultant  $\phi_c$  est directement proportionnel à la vitesse effective  $u$ , à la porosité efficace  $n_{eff}$  et à la concentration  $c$ .

On verra au paragraphe suivant que le temps caractérisant le mieux la vitesse convective (ou effective) du traceur en écoulement naturel uniforme est le temps de séjour moyen correspondant au centre de gravité de la courbe de restitution.

Pour un écoulement karstique, où la convection prend le pas sur la dispersion, le temps du maximum de restitution est en général une approximation satisfaisante du temps de séjour moyen. Elle est en tout cas plus commode à utiliser. Plus la dispersion cinématique et la diffusion moléculaire sont importantes, plus le temps du maximum s'écarte du centre de gravité de la courbe de restitution.

La vitesse convective  $u$  est liée à la vitesse de filtration ou vitesse de DARCY  $V_0$  par la relation :

$$V_0 = n_{eff}.u$$

où  $n_{eff}$  est la porosité efficace ou porosité cinématique <sup>1</sup>

La dispersion hydrodynamique inclut à la fois la diffusion moléculaire et la dispersion cinématique.

La diffusion moléculaire résulte des gradients de concentration entre les différents points du fluide dont les concentrations tendent à s'égaliser grâce à l'agitation moléculaire. Le flux de traceur par diffusion s'exprime par la relation suivante dérivée de la loi de Fick :

$$\phi_d = - D_m \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

où  $D_m$  est le coefficient de dispersion moléculaire dans le milieu poreux

---

<sup>1</sup>MANGIN (1975) distingue la porosité effective (ou porosité efficace), correspondant à la contenance en eau gravitaire, de la porosité utile (ou porosité ouverte), comprenant la totalité des vides en communication les uns avec les autres.

La diffusion moléculaire agit sur l'ensemble de la phase fluide, aussi bien sur l'eau gravitaire que sur la phase liée. Dans le milieu poreux, elle est influencée par la tortuosité des pores et on définit conventionnellement un "facteur de formation"  $F$  à partir du rapport entre les coefficients de diffusion dans le fluide seul  $D_0$  et dans l'aquifère  $D_m$  :

$$F = \frac{D_0}{D_m} \text{ neff}$$

Le rapport  $D_0/D_m$  est appelé la "tortuosité".

Bien que la diffusion moléculaire puisse dans beaucoup de cas être négligée vis-à-vis de la dispersion cinématique, le phénomène prend de l'importance lorsque les vitesses dans les pores deviennent très faibles. Cela peut être le cas à l'intérieur des blocs microfissurés très peu perméables constituant les réserves des aquifères karstiques.

Nous verrons ci-après que la diffusion intervient dans un phénomène appelé "l'effet d'eau immobile". Dans un milieu à double porosité comme le karst, celui-ci est souvent loin d'être négligeable vu la présence de grandes masses d'eau immobile dans les systèmes annexes.

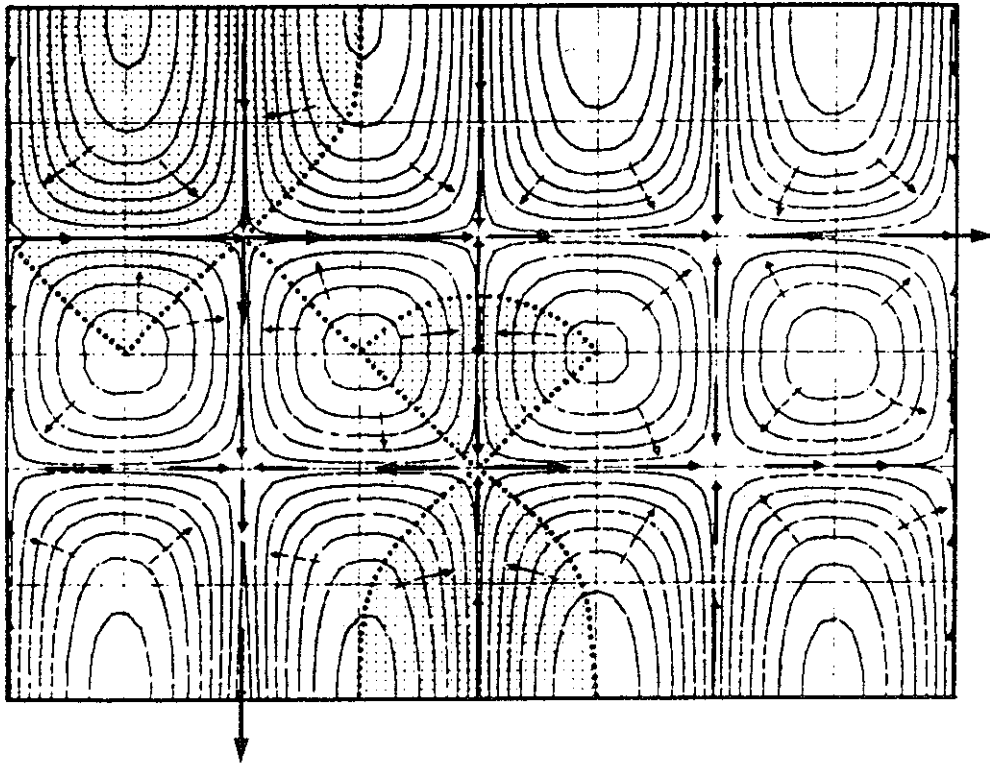
La dispersion cinématique est provoquée par l'hétérogénéité des vitesses de pores. Parmi les causes possibles de cette hétérogénéité, on distingue :

- les différences de vitesses en fonction de la distance des parois,
- les variations de vitesses dues aux changements de section,
- les diffluences à l'échelle microscopique, dues à la tortuosité des chenaux poreux.

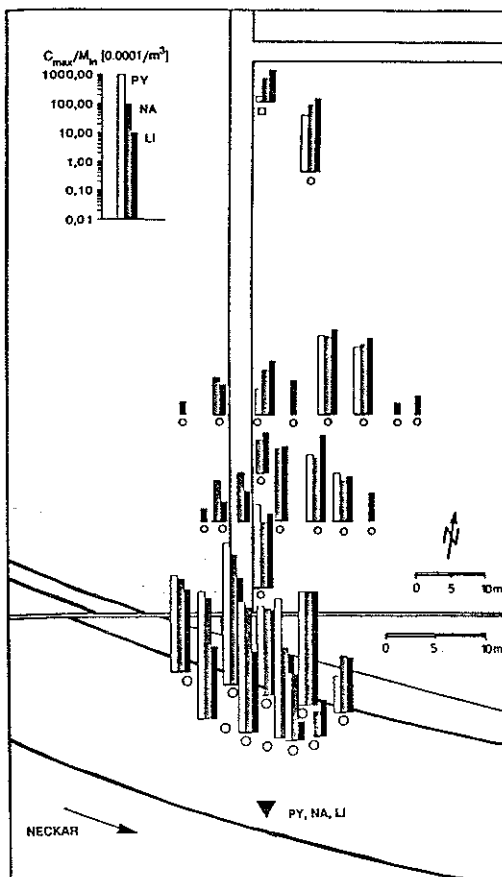
Il est clair que la structure du milieu influence fortement la dispersion cinématique et qu'en milieu fissuré et karstique, la fréquence, l'orientation et l'ouverture des fissures sont déterminantes.

Comme l'a fait remarquer KIRALY (1975), les diffluences se produisent aux intersections des différentes discontinuités (fig. 2.5). C'est aussi là que se produit par conséquent la plus grande dispersion cinématique. La karstification, en agissant préférentiellement à ce niveau, est responsable des variations de section très brusques accentuant la dispersion. La discontinuité des fissures joue également un rôle dans la dispersion cinématique.

En milieu poreux, l'hétérogénéité (verticale et horizontale) est souvent responsable d'une dispersion latérale très irrégulière. La fig. 2.6 (d'après REICHERT et HÖTZL, 1992) montre l'exemple d'un traçage en écoulement naturel pour lequel on a observé une distribution très irrégulière des concentrations maximales en pyranine, en naphthionate et en lithium dans les différents piézomètres de contrôle. La pyranine, moins diffusive, n'a été retrouvée que le long de trajets préférentiels.



**Fig. 2.5 :** Systèmes d'écoulement et phénomènes de diffluence dans un massif rocheux formé de drains et de blocs poreux (d'après KIRALY, 1978). Un traceur introduit dans l'écoulement dans les zones entourées de pointillés parviendra aux deux exutoires malgré leur éloignement.



**Fig. 2.6 :** Dispersion latérale irrégulière et variable suivant les traceurs utilisés (PY = pyranine, NA = naphthionate, LI = lithium) dans un écoulement naturel en milieu poreux hétérogène (d'après REICHERT et HÖTZL, 1992).

Par analogie avec la loi de Fick, il existe une relation entre le flux dispersif  $\phi_D$  et le gradient de concentration :

$$\phi_D = - D_L \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

où  $D_L$  = le coefficient de dispersion cinématique

On définit le tenseur de dispersion hydrodynamique comme la somme de la diffusion moléculaire et de la dispersion cinématique :

$$[D_h] = \begin{vmatrix} D_{hL} & 0 & 0 \\ 0 & D_{hT} & 0 \\ 0 & 0 & D_{hT} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_m + D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_m + D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_m + D_T \end{vmatrix} \quad 1$$

où

$D_{hL}$  et  $D_{hT}$  = les coefficients transversal et longitudinal de dispersion hydrodynamique  
 $D_L$  et  $D_T$  = les coefficients transversal et longitudinal de dispersion cinématique

Le nombre de PECLET  $Pe$  sert habituellement de critère pour la dispersion. Il existe plusieurs nombres de PECLET différents suivant les vitesses et les coefficients de dispersion considérés (PECLET numérique, PECLET de diffusion, PECLET dynamique).

Le nombre de PECLET de diffusion est exprimé par :

$$Pe_d = \frac{u \cdot l}{D_m}$$

où

$u$  = la vitesse effective  
 $l$  = le diamètre moyen des pores  
 $D_m$  = le coefficient de diffusion moléculaire

Le nombre de PECLET habituellement utilisé pour les traçages (PECLET hydrodynamique) est donné par :

$$Pe = \frac{u \cdot x}{D_h}$$

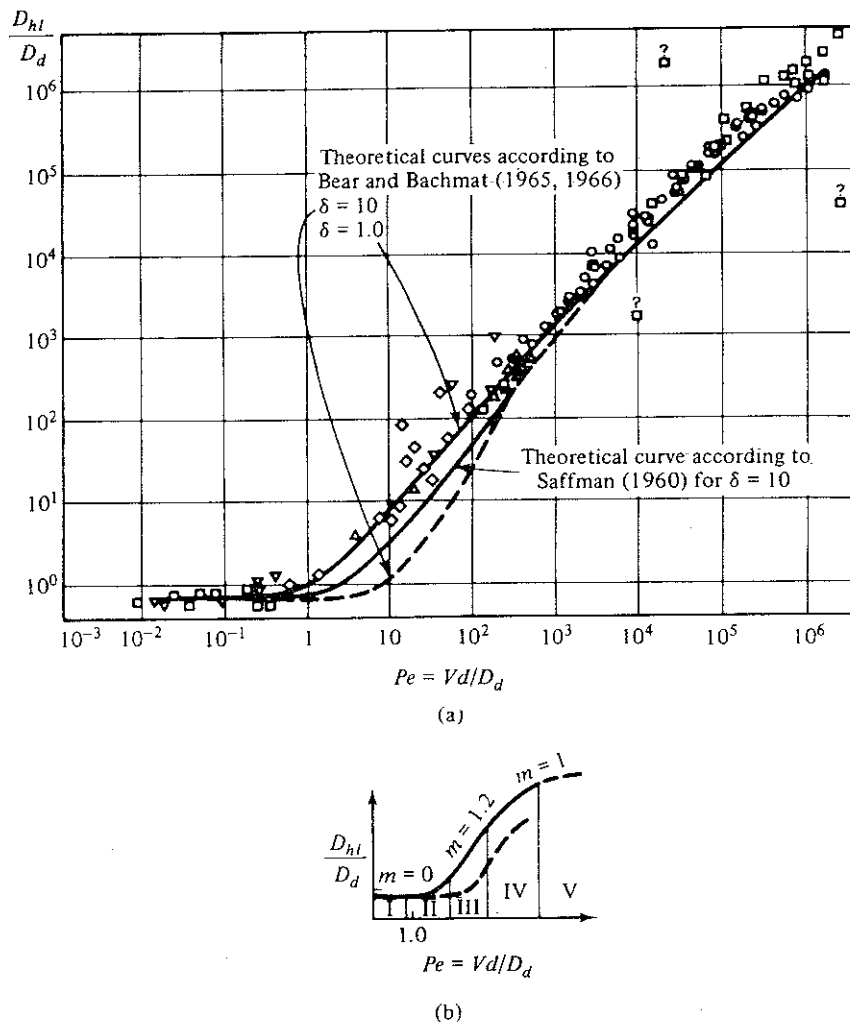
où

$u$  = la vitesse effective  
 $x$  = la distance de parcours  
 $D_h$  = le coefficient de dispersion hydrodynamique

---

<sup>1</sup>Le tenseur  $[D_h]$  n'est diagonal que dans le système d'axes liés à l'écoulement (axes de Frenet).

PFANNKUCH (in BEAR et VERRUYJT, 1987) a déterminé expérimentalement cinq domaines de dispersion en fonction du nombre de PECLLET de diffusion (fig. 2.7).



**Fig. 2.7 :** Evolution du rapport entre la dispersion hydrodynamique longitudinale ( $D_{hl}$  selon les notations des auteurs) et la diffusion moléculaire ( $D_d$  selon les notations des auteurs) en fonction du nombre de PECLLET de diffusion, d'après PFANNKUCH (in BEAR et VERRUYJT, 1987). L'auteur distingue cinq domaines avec importance croissante de la dispersion cinématique depuis un domaine où la diffusion moléculaire est prédominante (domaine I) jusqu'à un domaine où la loi de DARCY n'est plus valable (domaine V).

Ce diagramme ne concerne que la dispersion longitudinale vu le manque de données sur les dispersions transversales.

Le domaine I est celui où la diffusion moléculaire est prédominante. Dans les aquifères karstiques, cela peut être le cas par exemple des réserves quasi immobiles situées entre les drains.

Dans le domaine II, la dispersion cinématique devient aussi importante que la diffusion moléculaire.



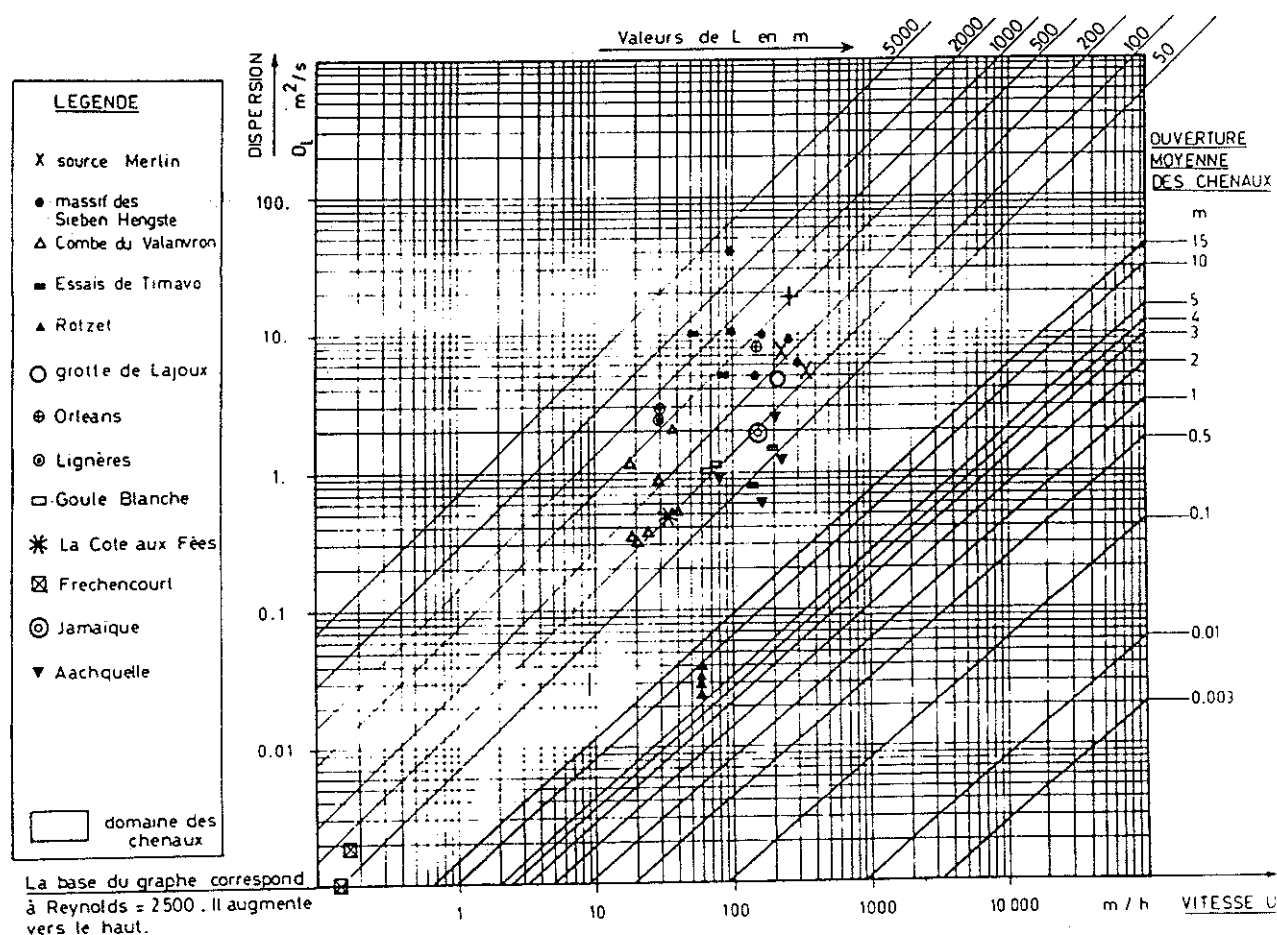
Dans le domaine III, la dispersion est causée principalement par la dispersion cinématique (ou mécanique).

Le domaine IV est celui où la diffusion moléculaire devient tout à fait négligeable.

Dans le domaine V, on s'éloigne du domaine de validité de la loi de DARCY.

La plupart des circulations rapides mises en évidence par les traçages dans le karst se situeraient plus ou moins près de la frontière entre les domaines IV et V, c'est-à-dire avec une dispersion cinématique prédominante et des vitesses dépassant même parfois la limite de validité de la loi de DARCY (écoulements turbulents).

Le diagramme de la fig. 2.8 (JAMIER, 1976) montre bien que la plupart des essais réalisés dans le karst caractérisent un écoulement en "milieu filtrant" plutôt qu'au travers de simples chenaux. Ce milieu apparemment "filtrant" est la conséquence de la complexité et la multiplicité des cheminements dans le karst. Cela justifie donc, dans beaucoup de cas, l'emploi des méthodes de détermination des dispersions basées sur les lois utilisées en milieu poreux.



**Fig. 2.8 :** Coefficients de dispersion hydrodynamiques longitudinaux en fonction de la vitesse d'écoulement pour une série de traçages réalisés en milieu karstique (d'après JAMIER, 1976). La partie inférieure droite du diagramme correspond aux valeurs théoriques dans le cas d'une dispersion dans des chenaux simples d'ouverture donnée. La position des points expérimentaux en dehors de cette zone montre que le milieu karstique s'apparente plutôt à un milieu tortueux où les lois d'écoulement en milieu poreux peuvent être utilisées.

Sur le diagramme, la partie inférieure droite correspond aux écoulements en chenaux simples (en régime turbulent lisse selon TAYLOR). Les droites expriment la relation entre la vitesse  $u$  ( $U$  pour utiliser les notations de l'auteur) et la dispersion  $D_L$  ( $D_l$ ) en fonction de l'ouverture moyenne des chenaux. La plupart des points expérimentaux tombent en dehors de cette zone. La relation entre la vitesse et la dispersion dépend alors d'une grandeur  $L$  ( $L = 2D_l/U$  selon ERIKSSON) appelée "longueur de mélange", dont les valeurs élevées caractérisent une dispersion plus complexe que dans des chenaux simples.

En milieu poreux, il y a proportionnalité entre la vitesse effective ( $u$ ) et les coefficients de dispersion cinématique ( $D_L$  et  $D_T$ ) suivant les relations (en axes de Frenet) :

$$D_L = \alpha_L \cdot u \quad \text{et} \quad D_T = \alpha_T \cdot u$$

Les coefficients  $\alpha_L$  et  $\alpha_T$  ont la dimension d'une longueur et sont appelés les "dispersivités longitudinale et transversale".

Dans le domaine des vitesses usuelles rencontrées dans les milieux poreux naturels, on néglige la diffusion moléculaire et les relations précédentes deviennent :

$$D_{hL} = \alpha_L \cdot u \quad \text{et} \quad D_{hT} = \alpha_T \cdot u \quad (D_m \ll D_L \text{ et } D_T)$$

Les dispersivités dépendent essentiellement de la structure de l'aquifère à l'échelle microscopique. Elles sont en principe des caractéristiques intrinsèques du milieu. Cependant, lorsque la diffusion n'est plus négligeable (domaines I et II de la fig. 2.7), la relation entre  $D_h$  et  $u$  n'est plus linéaire et le coefficient de proportionnalité ne varie plus seulement en fonction de la vitesse, mais aussi en fonction de la nature de la substance transportée.

D'autre part, lorsqu'on quitte le domaine de validité de la loi de DARCY, la notion de dispersivité devient discutable. C'est le cas des écoulements dans les drains karstiques, particulièrement lors des crues.

Nous avons vu au paragraphe 1.7.9.3., lors de l'étude des traçages à Crossée, que les dispersivités augmentaient avec le débit. BEAUDOING et al. (1989) font la même constatation à propos du réseau karstique de l'Ouysse pour lequel ils ont calculé des dispersivités en utilisant le modèle convection-dispersion à un seul ou à plusieurs cheminements (programme CATTI de SAUTY et KINZELBACH, 1988). Les valeurs obtenues sont très variables, de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres (max. 384 m). Généralement inférieures à 200 m en basses eaux, elles sont pour la plupart supérieures à cette valeur en hautes eaux.

JAMIER (1976) signale, dans le karst, des dispersivités comprises entre 16,9 m pour les zones à faible perméabilité et 175 m pour les zones à plus forte perméabilité.

On constate également un effet d'échelle sur les dispersivités. Les valeurs croissent avec la distance de traçage. Elles peuvent atteindre une valeur asymptotiquement constante lorsque le milieu, hétérogène à plus petite échelle, devient homogène (élément de volume représentatif atteint). Dans le karst, cela est rarement réalisable. C'est ce qui explique qu'on obtient souvent des valeurs de dispersivités de loin supérieures (plusieurs centaines de mètres) à celles mesurées dans les aquifères poreux ou fissurés homogènes (quelques dizaines de mètres au maximum).

POREL (1988) a fait une synthèse bibliographique intéressante des informations relatives au problème de la variabilité des dispersivités dans les différents types de milieu et en fonction des différents facteurs.

Des expériences de traçage menées sur colonne expérimentale, en considérant un écoulement monodimensionnel uniforme et un modèle "convection-dispersion", l'amènent à conclure que les dispersivités dans les craies varient à la fois avec la distance et le débit. Plusieurs expériences sur le terrain (site de Béthune) semblent confirmer cette hypothèse.

PTAK et TEUTSCH (1992) ont étudié le problème de l'effet d'échelle sur la dispersivité à partir d'expériences en écoulement naturel dans un milieu poreux fortement hétérogène (distances de traçage entre 10 et 200 m). Leurs comparaisons reposent sur trois types d'interprétations : les macrodispersivités sont déterminées à partir de solutions analytiques, à partir de la théorie stochastique et au moyen d'un modèle numérique stochastique à trois dimensions. Ce dernier modèle rend correctement compte de l'augmentation de la dispersivité avec la distance de traçage.

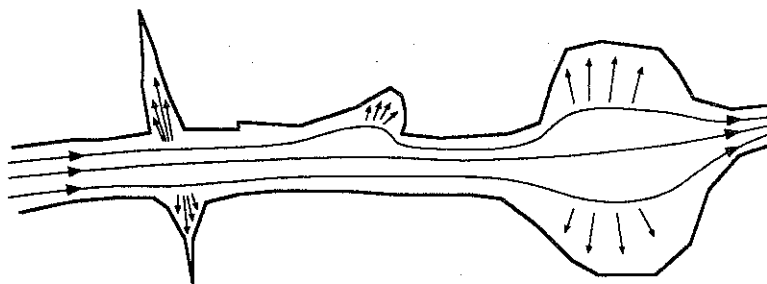
Les expériences dans les craies du Crétacé décrites au paragraphe 2.5.3. avaient entre autres pour but d'étudier cet effet d'échelle, ainsi que l'anisotropie et la variabilité régionale de la dispersivité. Pour cela, différentes distances d'injection, différentes directions par rapport au gradient de la nappe et différentes conditions hydrogéologiques ont été testées dans l'aquifère crayeux de Hesbaye.

A côté de la dispersion dans la phase mobile du fluide, plusieurs autres phénomènes sont susceptibles d'influencer l'allure des courbes de restitution. Ce sont, d'une part les échanges avec l'eau immobile et l'adsorption à la surface du solide, d'autre part la dégradation du traceur suite aux réactions chimiques et biologiques ou à la désintégration radioactive. Les premiers sont éventuellement réversibles alors que les seconds conduisent systématiquement à un déficit (traceurs non conservatifs).

Les réactions et les désintégrations sont en général négligeables dans le karst, étant donné les temps de séjour relativement courts et le caractère relativement inerte du milieu vis-à-vis des traceurs employés.

Par contre, l'adsorption (et la désorption si le phénomène est réversible) est parfois observée, notamment pour certains traceurs fluorescents (grosses molécules organiques se fixant sur le solide) et pour certains cations (échanges d'ions à la surface des argiles).

L'effet d'eau immobile dans le cas du karst (fig. 2.9) est beaucoup plus intéressant à examiner. Il résulte du fait qu'une partie du traceur circulant dans les fissures les plus larges diffuse vers l'eau immobile en contact avec l'eau mobile.



**Fig. 2.9 :** Diffusion vers l'eau immobile le long d'un drain karstique.

Dans les milieux fissurés ordinaires, l'eau immobile est localisée dans la matrice poreuse et microfissurée.

Dans les aquifères karstiques, nous avons vu que des vides importants pouvaient être occupés par de l'eau quasi immobile. Prenons, par exemple, une rivière souterraine atteignant un lac. Le passage du traceur au travers de ce lac est principalement marqué par la diffusion moléculaire vu l'absence de vitesses d'écoulement importantes. L'existence de discontinuités dans le développement de certains réseaux de fissures karstifiées est également à l'origine d'importants volumes d'eau en "cul-de-sac" où le traceur est susceptible de diffuser.

Savoir si le temps de contact de l'eau mobile avec l'eau immobile est suffisant pour qu'un équilibre s'instaure est à notre avis une des questions fondamentales à se poser lorsqu'on veut modéliser un tel processus. Ainsi, plus les vitesses dans les drains sont lentes (étiages), plus le volume d'eau immobile risquant d'être contaminé est grand.

Les écoulements, dont les vitesses et le sens peuvent changer temporairement suivant l'état du système, ajoutent encore une complication supplémentaire aux phénomènes d'échanges entre l'eau mobile et l'eau immobile. C'est entre autres pour cette raison que les échanges peuvent être irréversibles et qu'une partie du traceur est finalement piégée dans l'aquifère.

Différents modèles théoriques ont été proposés pour tenir compte de l'effet d'eau immobile dans les milieux fissurés et karstiques (RAVEN et al., 1988, MALOSZEWSKI et ZUBER, 1985 et 1990).

RAVEN et al. (1988) proposent l'utilisation, pour un milieu fissuré, du modèle de convection-dispersion avec stockage réversible dans les zones d'eaux stagnantes, développé par VILLERMAUX et VAN SWAAIJ (1969).

L'équation régissant ce type de transport est celle de la convection-dispersion simple à laquelle on adjoint un terme tenant compte de la diffusion vers l'eau immobile :

$$-u \frac{\partial c}{\partial x} + D_{hL} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \varphi \frac{\partial c}{\partial t} + (1-\varphi) \frac{\partial c_{im}}{\partial t} \quad (2)$$

où

$c_{im}$  = la concentration dans l'eau immobile

$\varphi$  = la proportion d'eau mobile par rapport au volume total d'eau

A cette équation il faut ajouter celle réglant les échanges entre l'eau mobile et l'eau immobile :

$$(1-\varphi) \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = K(c - c_{im}) \quad (3)$$

où  $K$  = le coefficient d'échange de l'eau mobile vers l'eau immobile

Le modèle proposé par MALOSZEWSKI et ZUBER (1985) est plus élaboré car il tient compte explicitement du coefficient de diffusion moléculaire dans la matrice poreuse. Il fait intervenir en plus une adsorption linéaire à la surface du solide. Les mêmes auteurs (MALOSZEWSKI et ZUBER, 1990) ont proposé une version améliorée de ce modèle, tenant compte en plus d'une adsorption non linéaire (cinétique d'ordre un). Ils l'appliquent aux cas de plusieurs traceurs différents (les uns considérés comme sorptifs, les autres non), dans un écoulement convergent en milieu crayeux, pour arriver à la conclusion que la diffusion est le mécanisme principal responsable de la dispersion observée.

## 2.3.2. Interprétation des traçages

### 2.3.2.1. PARAMETRES DES COURBES DE RESTITUTION

L'évolution des concentrations en fonction du temps, en un point d'observation donné (source, piézomètre, puits de pompage), est appelé la "courbe de restitution" du traceur. C'est l'information la plus riche dont on dispose pour étudier le passage au travers de l'aquifère. Le nombre de points d'observation dans l'espace étant limité, il est logique de chercher à extraire le maximum d'informations concernant le déplacement du nuage de traceur en partant de ses variations temporelles aux différents points de sortie.

La détermination des paramètres des courbes de restitution permet en effet de caractériser les traçages préalablement à toute évaluation des paramètres hydrodispersifs (dispersivités et porosités effectives) à partir de modèles plus ou moins sophistiqués. Connaissant les débits, on peut calculer les fonctions de "flux" et de "distribution des temps de séjour". Ces fonctions sont utiles pour comparer entre eux plusieurs traçages.

De même que l'analyse corrélatoire, les paramètres des courbes de restitution constituent un outil descriptif servant à mettre mieux en évidence certains aspects particuliers du comportement de l'aquifère. Dans le cas du karst, ils sont intéressants étant donné la grande variabilité et la grande diversité des situations rencontrées. Nous avons en effet vu que les systèmes-traçages dans le karst sont des systèmes non stationnaires, c'est-à-dire que les réponses impulsionnelles varient largement suivant les conditions hydrodynamiques. A Comblain, les vitesses d'arrivée des traceurs varient dans un rapport de 1 à 4 (§ 1.7.8.1.). Des écarts encore plus importants (1 à 15) sont signalés par LEPILLER et MONDAIN (1986). Il est clair que, mieux on définira les plages de variation des différents paramètres en fonction des conditions hydrodynamiques, mieux on appréhendera l'hétérogénéité de l'aquifère et mieux on pourra ainsi évaluer les ressources.

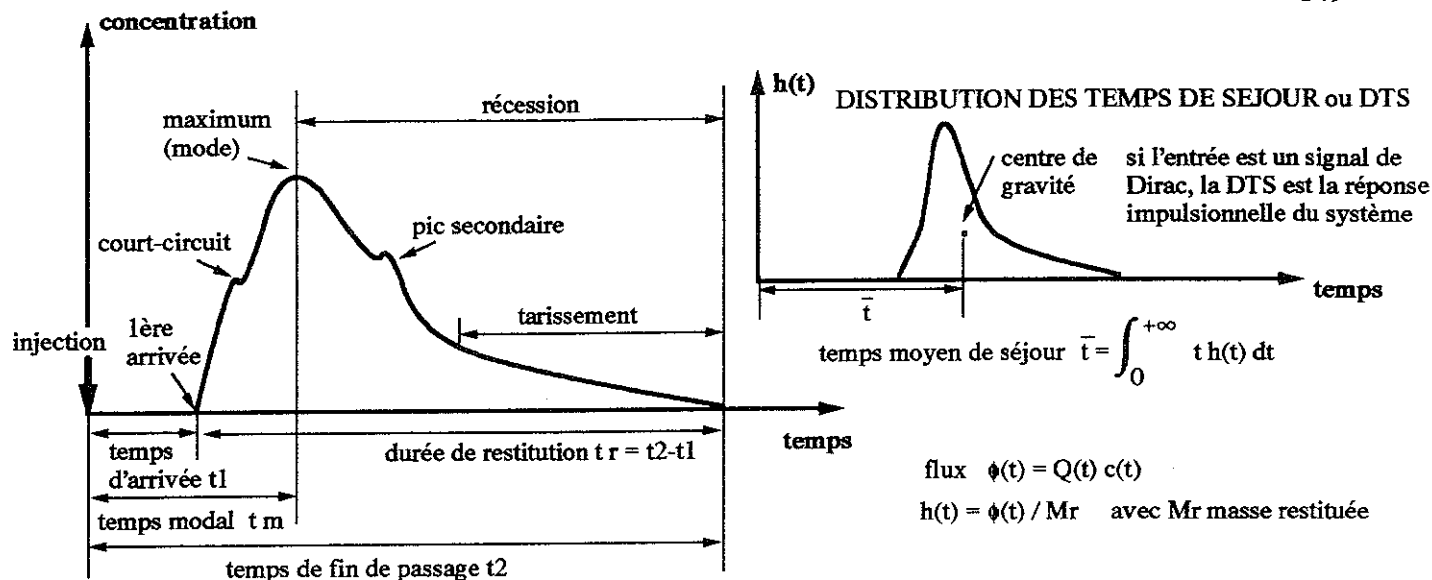
Dans le cas où les écoulements ne vérifient plus du tout la loi de DARCY, on a vu que la détermination des caractéristiques hydrodispersives n'a plus beaucoup de sens. On se limite, dans ce cas, à la simple description des courbes de restitution.

Le tab. 2.1, adapté de LEPILLER et MONDAIN (1986), reprend les paramètres essentiels que l'on peut obtenir à partir de la connaissance des concentrations et des débits aux entrées et aux sorties d'un système-traçage.

Fonctions utilisées	Paramètres calculés
Concentrations : $c(t)$  (courbes de restitution)	- temps d'arrivée $t_1$ et de fin de passage $t_2$ du traceur - vitesse maximale $V_{\max} = L/t_1$ - durée de la restitution $t_r = t_2 - t_1$ - temps modal $t_m$ - vitesse modale $V_m$ - concentration maximale $c_m$  - concentration moyenne $c_{\text{moy}} = \int_0^{\infty} \frac{c(t)}{t_r} dt$  - paramètres statistiques (variance, écart-type, coefficient de variation, coefficients de Pearson et Fisher)
Courbes de restitution normées : - concentrations normées par rapport à la masse injectée: $c(t)/M$ ( $10^{-5}/\text{m}^3$ ) - concentrations réduites $c(t)/c_m$ et temps réduits $t/t_m$	NB : présentation et comparaison des courbes de restitution, utilisation d'abaques pour la détermination des dispersivités
Débits : $Q(t)$	- volume d'eau écoulé avant la restitution - volume d'eau écoulé durant la restitution NB : les volumes peuvent être décomposés en écoulement de base et écoulement de crue
Flux massiques : $\phi(t) = Q(t).c(t)$	- masse de traceur restituée $M_r = \int_0^{\infty} \phi(t) dt$ - pourcentage de restitution $R (\%) = M/M_r$
Distribution des temps de séjour : $h(t) = \frac{\phi(t)}{M_r}$  = flux normés par rapport à la masse restituée	- temps moyen de séjour $\bar{t} = \int_0^{\infty} t.h(t) dt$ - vitesse apparente de transit $V_{\text{app}} = \frac{L}{\bar{t}}$  - temps harmonique $t_h = \int_0^{\infty} \frac{1}{t}.h(t) dt$ - vitesse moyenne de transit $V_{\text{moy}} = \frac{L}{t_h}$
Concentrations d'entrée : $c_e(t)$	- concentration maximale d'entrée - concentration moyenne d'entrée - dilution moyenne
Flux d'entrée : $\phi_e(t)$	- réponse impulsionnelle par déconvolution

**Tab. 2.1** : Fonctions et paramètres obtenus à partir des courbes de restitution d'un traçage (modifié d'après LEPILLER et MONDAIN, 1986).

Beaucoup de ces paramètres sont redondants. Aussi n'en décrivons-nous que les principaux (fig. 2.10).



**Fig. 2.10** : Courbe de restitution type d'un essai de traçage et distribution des temps de séjour (DTS). Définition du temps moyen de séjour  $\bar{t}$ .

Le temps  $t_1$  correspond à la première arrivée du traceur. Tenant compte d'une longueur apparente de trajet  $L$ , il permet de calculer la vitesse maximale  $V_{\max}$ . Cette vitesse est d'un grand intérêt dans l'étude des pollutions puisqu'elle correspond aux molécules les plus rapides, susceptibles de contaminer le point d'eau. Elle est d'ailleurs souvent prise comme critère de délimitation des zones de protection des captages. Elle dépend du type de traceur utilisé puisqu'elle est fonction de la dispersion. Dans le karst cependant, elle dépend très peu de la nature du traceur étant donné les vitesses élevées et la prédominance de la dispersion cinématique (domaines IV et V du diagramme de PFANNKUCH, voir fig. 2.3). Elle dépend bien plus de la limite de détection de la méthode d'analyse et de la présence d'un bruit de fond.

La durée de restitution  $t_2-t_1$  est un paramètre très subjectif vu la difficulté de fixer la fin de la restitution ( $t_2$ ). La fin de la courbe est en effet constituée d'une queue plus ou moins longue, résultant d'une part de la dispersion et d'autre part de tous les phénomènes de retard liés à l'adsorption et aux échanges avec l'eau immobile. La durée de restitution prise en compte dépend également de la limite de détection des analyses ainsi que des variations éventuelles du bruit de fond.

Le temps modal  $t_m$ , correspondant au pic, est un paramètre fondamental. Il permet de calculer la vitesse modale  $V_m$  correspondant au maximum de concentration  $c_m$  de la restitution. Bien qu'il ne puisse être rattaché à aucune grandeur physique caractérisant l'aquifère, il est d'une grande importance pratique puisqu'il fixe l'instant où la pollution commence à décroître.

Quand le trajet du traceur est purement convectif (ce qui peut être le cas de circulations le long des drains karstiques), la vitesse modale se rapproche de la vitesse apparente de transit (voir ci-dessous). Cette dernière est liée au déplacement du centre de gravité du nuage de traceur et par conséquent à la vitesse effective. Le temps modal fournit donc, dans le cas du karst, une bonne approximation du temps moyen de séjour du fluide dans le système.

JAMIER (1976) fait remarquer que la correspondance entre la vitesse modale et la vitesse effective est d'autant meilleure que le nombre de PECLET est élevé.

Lorsque la courbe de restitution présente plusieurs pics, on définit pour chacun d'eux une vitesse correspondant à des modes de circulation (aquifères à double porosité) ou à des trajets distincts.

Connaissant les débits  $Q$ , on peut calculer le flux de traceur :

$$\phi(t) = c(t).Q(t)$$

et la masse de traceur restituée :

$$M_r = \int_0^{\infty} Q(t).c(t)dt$$

Le rapport entre la masse de traceur injectée et la masse restituée est le taux de restitution  $R$  (en %). Dans le karst, les taux de restitution sont généralement élevés vus les temps de passage rapides. Un taux de restitution faible peut provenir de pertes liées à des échanges non réversibles avec le milieu (adsorption, eau immobile) ou à des sorties occultes (exutoires diffus, sources sous-fluviales). Le taux de restitution peut être faussé (c'est malheureusement souvent le cas), suite à la méconnaissance du débit au point de sortie. A l'inverse, les traçages dans le karst sont parfois utilisés pour jauger les débits souterrains, en supposant un taux de restitution de 100 %.

On utilise parfois les courbes de pourcentages cumulés de restitution. Ces courbes permettent d'étudier de manière plus précise les longues queues des courbes de restitution.

On a l'habitude de normer le flux de traceur par rapport à la masse de traceur restituée. On obtient de la sorte une identité entre la réponse en eau du système et la réponse en traceur (LEPILLER et MONDAIN, 1986). La fonction obtenue est appelée la "fonction de distribution des temps de séjour (DTS)" :

$$h(t) = \frac{\phi(t)}{M_r} = \frac{c(t).Q(t)}{\int_0^{\infty} c(t).Q(t)dt}$$

Elle permet de comparer entre eux n'importe quels types de traçages, la surface sous la courbe étant toujours unitaire.

Si la fonction d'entrée est une impulsion de Dirac, la distribution des temps de séjour est la réponse impulsionnelle du système. Pour des systèmes non stationnaires, la distribution des temps de séjour varie en fonction de l'état des eaux au moment du traçage.

Dans le cas de traçages à partir de pertes, il est difficile de garantir que l'impulsion soit une impulsion de Dirac. Nous avons en effet vu que le système karstique est constitué de deux sous-systèmes en série : le premier correspondant à la zone d'infiltration, le second à la zone noyée.

Le signal d'entrée du sous-système "karst noyé" n'est par conséquent généralement pas connu. Ce signal n'est en tout cas certainement plus une impulsion de Dirac.



Le temps moyen de séjour correspond au centre de gravité du nuage de traceur. Il ne dépend que du transport convectif du traceur et ne peut être influencé par les phénomènes de dispersion ou de retard liés aux interactions avec le milieu (LEPILLER et MONDAIN, 1986). Il s'exprime par la relation suivante :

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t.h(t)dt = \frac{\int_0^{\infty} t.c(t).Q(t)dt}{\int_0^{\infty} c(t).Q(t)dt}$$

Il permet d'obtenir la vitesse apparente de transit  $V_{app}$ , vitesse que l'on peut par conséquent assimiler à la vitesse effective d'écoulement  $u$ .

On définit également le temps harmonique ou moyenne harmonique pondérée des temps  $t_h$  permettant de calculer la vitesse moyenne de transit  $V_{moy}$  :

$$t_h = \int_0^{\infty} \frac{1}{t}.h(t)dt = \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{t}.c(t).Q(t)dt}{\int_0^{\infty} c(t).Q(t)dt}$$

La vitesse moyenne de transit prend cette fois en compte tous les phénomènes susceptibles d'affecter le transport du traceur, y compris l'adsorption, les échanges avec l'eau immobile et les dégradations (LEPILLER et MONDAIN, 1986). Elle est généralement supérieure à la vitesse apparente de transit et inférieure à la vitesse modale.

Les courbes de restitution peuvent également être décrites par des paramètres statistiques caractérisant l'étalement de la courbe (variance, écart-type et coefficient de variation), sa dissymétrie et son aplatissement (coefficients de PEARSON et de FISHER).

En ce qui concerne la comparaison des traçages, il existe plusieurs manières de normer les courbes de restitution.

La manière la plus commode, et généralement satisfaisante, consiste à diviser les concentrations par la masse de traceur injectée. Le résultat est en général exprimé en  $10^{-5}/m^3$  (BENISCHKE in BEHRENS et al., 1992, MALOSZEWSKI et ZUBER, 1990). Ce type de représentation permet de comparer des traçages réalisés aux mêmes endroits avec différents traceurs afin de mettre en évidence leur comportement propre.

Les distributions des temps de séjour (DTS) sont une manière un peu plus sophistiquée de présenter les résultats.

Elles tiennent compte non seulement de la masse injectée, mais aussi du pourcentage de traceur effectivement restitué.

Les variations de flux liées aux variations de débit sont également prises en compte. On utilisera les distributions des temps de séjour pour comparer des traçages réalisés dans des conditions hydrogéologiques très différentes.

Une dernière méthode consiste à travailler en coordonnées réduites. Le temps est divisé par le temps modal  $t_m$  et les concentrations sont divisées par la concentration modale  $c_m$ . Ce type de représentation est destiné à permettre la comparaison avec des abaques pour le calcul des dispersivités (SAUTY, 1977).

Aucun mode de représentation ne permet de s'affranchir des variations de forme des courbes de restitution dues aux variations de débit d'une expérience à l'autre. La concentration est en effet une fonction non linéaire de la vitesse effective variant elle-même en fonction du débit. Il serait d'ailleurs dommage de masquer ces effets car ils sont le reflet de la structure du milieu.

### 2.3.2.2. SOLUTIONS ANALYTIQUES DES EQUATIONS DE TRANSPORT

Moyennant des conditions initiales et aux limites particulières, il est possible de trouver des solutions analytiques exactes ou approchées aux équations de transport (1) et (2) du paragraphe précédent. Grâce à ces solutions, on peut effectuer assez simplement un calage des courbes calculées sur les courbes expérimentales de façon à obtenir les paramètres hydrodispersifs (dispersivité et porosité efficace).

Ces solutions ont été établies dans le cas de géométries simples d'écoulement (écoulement uniforme, écoulement radial convergent), à une seule ou deux dimensions, avec une injection de Dirac ou une injection continue, avec un seul ou plusieurs trajets, avec<sup>1</sup> ou sans<sup>2</sup> interaction entre les trajets.

Alors qu'en milieu fissuré homogène on tient compte d'un écoulement à deux dimensions, en milieu karstique, on utilise plus volontiers un modèle d'écoulement à une seule dimension, en fissure ou en chenal, quitte à introduire une diffusion supplémentaire vers la matrice poreuse ou vers les zones d'eau immobile (MALOSZEWSKI et ZUBER, 1985, RAVEN et al., 1988).

Les modèles que nous avons utilisés pour interpréter les tests effectués sont les suivants (en considérant des injections de Dirac :

- écoulement monodimensionnel uniforme avec convection-dispersion (SAUTY, 1977 et 1988),
- écoulement monodimensionnel uniforme avec convection-dispersion suivant deux trajets distincts (SAUTY, 1988),
- écoulement bidimensionnel uniforme avec convection-dispersion (SAUTY, 1977 et 1988),
- écoulement radial convergent avec convection-dispersion (SAUTY, 1977 et 1988),

<sup>1</sup>Cas des milieux à double porosité.

<sup>2</sup>Cas des aquifères multicouches.

- écoulement monodimensionnel uniforme avec convection-dispersion et échanges avec des zones d'eaux stagnantes (modèle ADTS<sup>1</sup>, VILLERMAUX et VAN SWAAIJ, 1969, RAVEN et al., 1988).

Trois de ces solutions (les deux premières et la dernière) ont été utilisées précédemment (§ 1.7.9).

*Écoulement monodimensionnel uniforme en convection-dispersion*

Pour un écoulement monodimensionnel uniforme, les différentes solutions sont reprises dans le tab. 2.2 extrait de la thèse de POREL (1988).

Injection	Milieu	Conditions initiales et aux limites	Solutions explicites	Appellation ZUBER (1986)	Auteurs
continue	infini	$C(x,0) = 0 \quad \forall x$ $\int_{-\infty}^{\infty} \omega C(x,t) dx = C_0 \cdot \omega \cdot u t \quad \forall t > 0$ $C(+\infty,t) = 0 \quad \forall t > 0$	$C = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{x-ut}{\sqrt{4 \cdot Dt}} \right) - \exp \left[ \frac{u \cdot x}{D} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x+ut}{\sqrt{4 \cdot Dt}} \right) \right\}$		SAUTY, 1977
	semi-infini	$C(x,0) = 0 \quad \forall x > 0$ $C(0,t) = C_0 \quad \forall t > 0$ $C(+\infty,t) = 0 \quad \forall t > 0$	$C = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{x-ut}{\sqrt{4 \cdot Dt}} \right) + \exp \left[ \frac{u \cdot x}{D} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x+ut}{\sqrt{4 \cdot Dt}} \right) \right\}$	C <sub>CF</sub>	OGATA et BANKS, 1961
instantanée	infini	$C(x,0) = \frac{m}{\omega \cdot S} \cdot \delta(x)$ $C(x,t) = 0 \quad \forall t > 0$	$C = \frac{m}{\omega \cdot S \sqrt{4 \pi Dt}} \cdot \exp \left\{ - \frac{(x-ut)^2}{4 \cdot Dt} \right\}$	C <sub>IRR</sub>	CRANK, 1956 BERAN, 1957 BEAR, 1972 KREFT et ZUBER, 1978
	semi-infini	$C(x,0) = 0 \quad \forall x > 0$ $C(0,t) = \frac{m}{Q} \cdot \delta(t) \quad \forall t > 0$ $C(+\infty,t) = 0 \quad \forall t > 0$	$C = \frac{m \cdot x}{\omega \cdot \omega \cdot S \sqrt{4 \pi Dt^3}} \cdot \exp \left\{ - \frac{(x-ut)^2}{4 \cdot Dt} \right\}$	C <sub>IFF</sub>	SAUTY, 1977 ZUBER, 1974 ZUBER, 1986
		$C(x,t) = \frac{D}{u} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \Big _{x=0} = \frac{m}{Q} \cdot \delta(t) \quad \forall t > 0$ $C(+\infty,t) = 0 \quad \forall t > 0$	$C = \frac{m}{\omega \cdot S} \left\{ \frac{2}{\sqrt{4 \pi Dt}} \cdot \exp \left( - \frac{(x-ut)^2}{4 \cdot Dt} \right) - \left[ \frac{u}{2 \cdot D} \right] \exp \left[ \frac{u \cdot x}{D} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x+ut}{\sqrt{4 \cdot Dt}} \right) \right\}$	C <sub>IFR</sub>	DE VRIES, 1973 ZUBER, 1986

**Tab. 2.2 :** Solutions analytiques de l'équation de transport en écoulement monodimensionnel uniforme pour quelques cas simples de conditions aux limites et initiales (d'après POREL, 1988).

Parmi ces solutions, seul le cas de l'injection instantanée dans un milieu supposé infini dans les deux directions a retenu notre attention. A grande distance, elle diffère peu de l'injection en milieu semi-infini.

Les conditions aux limites et initiales correspondantes sont les suivantes :

$$c(+\infty,t) = 0 \text{ et } c(-\infty,t) = 0 \quad \forall t$$

$$c(x,0) = 0 \quad \forall x \neq 0$$

$$c(0,0) = c_0 \quad \text{où } c_0 \text{ est la masse injectée par unité de section efficace dans une tranche élémentaire du milieu}$$

$$c(0,t) = 0 \quad \forall t \neq 0$$

<sup>1</sup>ADTS pour "Advection-Dispersion with Transient Storage model"

La solution est donnée par :

$$c(x,t) = \frac{m}{\text{neff} \cdot \sqrt{4\pi\alpha_L u t}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4\alpha_L u t}\right)$$

où

$c(x,t)$  = la concentration au temps  $t$  à une distance  $x$  du point d'injection

$m$  = la masse injectée par unité de section (masse totale  $M$  divisée par la hauteur  $h$  si l'on considère une tranche infinie d'aquifère d'un mètre d'épaisseur horizontale et de hauteur  $h$ )

$\text{neff}$  = la porosité efficace (ou effective)

$u$  = la vitesse effective (ou vitesse convective), liée à la vitesse de DARCY  $V_0$  par la relation:

$$u = V_0 / \text{neff}$$

$\alpha_L$  = la dispersivité longitudinale, liée au coefficient de dispersion hydrodynamique  $D_{hL}$  par la relation (voir § 2.3.1.) :

$$D_{hL} = \alpha_L u$$

Le code CATTI (SAUTY et KINZELBACH, 1988) permet le calage des courbes calculées à partir de la solution sur les courbes expérimentales afin d'obtenir les paramètres  $V_0$ ,  $\text{neff}$  et  $\alpha_L$ .

Il est possible de tenir compte de plusieurs trajets en introduisant les concentrations propres à chaque trajet et en tenant compte de la dilution à la sortie du système, là où ces trajets se rejoignent.

La solution utilisée ne permet cependant d'introduire que deux trajets, la masse totale pouvant être répartie indifféremment suivant chacun d'eux.

MALOZWESKI, HARUM et BENISCHKE (in BEHRENS et al., 1992) proposent un modèle similaire basé sur un nombre quelconque  $N$  de trajets et un mélange complet du traceur avant et après sa séparation en plusieurs cheminements. Ce type de modèle permet d'expliquer la décroissance lente de certaines courbes. Il est cependant très approximatif car dans la réalité, la longueur et les emplacements des drains sont beaucoup plus aléatoires qu'il n'est supposé.

### *Écoulement bidimensionnel uniforme en convection-dispersion*

Les conditions aux limites et initiales sont à nouveau celles de l'injection de Dirac dans un milieu infini dans les deux directions.

La solution fait cette fois intervenir la dispersivité transversale  $\alpha_T$  et la coordonnée  $y$  transversalement à l'écoulement :

$$c(x,y,t) = \frac{M}{4\pi \cdot h \cdot \text{neff} \cdot \sqrt{\alpha_L \alpha_T}} \frac{1}{ut} \cdot \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4\alpha_L ut} - \frac{y^2}{4\alpha_T ut}\right)$$

avec les mêmes notations que précédemment

Le code CATTI (SAUTY et KINZELBACH, 1988) a également été utilisé pour la détermination des paramètres  $n_{eff}$ ,  $\alpha_L$  et  $\alpha_T$ .

### *Écoulement radial convergent avec convection-dispersion*

L'écoulement radial en direction d'un puits de pompage est considéré dans un milieu à deux dimensions. Le traceur est injecté dans un piézomètre latéral et récupéré dans le puits de pompage (en régime permanent).

Contrairement aux tests en écoulement bidimensionnel uniforme, les tests en écoulement radial convergent permettent de calculer le taux de restitution. Ce dernier est un moyen de contrôle de la fiabilité des résultats ainsi qu'un moyen d'identification du comportement (conservatif ou non) du traceur.

Les conditions aux limites sont imposées par l'écoulement radial permanent vers le puits de pompage. Les conditions initiales sont imposées par l'injection de Dirac.

Dans ces conditions, il n'existe pas de solution exacte. Une solution approchée est donnée par :

$$c(t) = \frac{M.r}{2Q\sqrt{\pi\alpha_L u}} t^{-1,5} \cdot \exp\left(\frac{(r-ut)^2}{4\alpha_L ut}\right)$$

où

- M = la masse totale injectée
- r = la distance radiale
- Q = le débit pompé
- $\alpha_L$  = la dispersivité longitudinale
- u = la vitesse effective à la distance r

La vitesse effective est liée à la porosité efficace et au débit de pompage par :

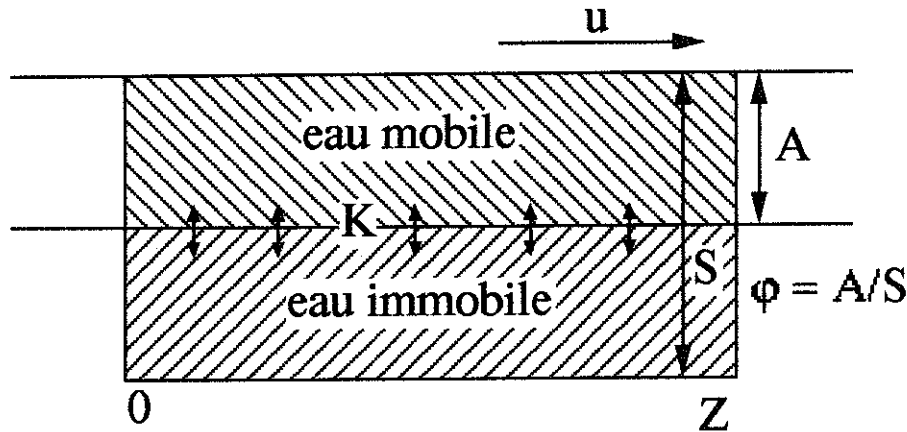
$$u = \frac{Q}{2\pi r h n_{eff}}$$

En raison de la convergence des lignes d'écoulement, la solution ne dépend plus de la dispersivité transversale .

Le code CATTI (SAUTY et KINZELBACH, 1988) a été utilisé pour la détermination des paramètres  $n_{eff}$  et  $\alpha_L$ .

### Écoulement monodimensionnel uniforme avec convection-dispersion et échanges avec des zones d'eaux stagnantes

Le modèle physique montrant les conditions aux limites est représenté à la fig. 2.11. Il s'agit d'un réacteur semi-infini dont la phase mobile est sujette à des échanges par diffusion avec une phase immobile.



**Fig. 2.11** : Modèle de réacteur semi-infini avec diffusion vers les zones d'eau stagnante (modèle ADTS).

$u$  = vitesse effective  $Z$  = distance axiale  $\phi$  = fraction d'eau mobile  $K$  = coefficient de transfert de masse entre l'eau mobile et l'eau immobile.

Toute diffusion du traceur en amont du point d'injection est interdite. Cette restriction n'est pas un inconvénient dans le cas des traçages en milieu karstique (à partir de pertes), vu l'importance de la convection.

L'eau immobile correspond aussi bien aux fissures connexes au drain qu'aux zones d'eau morte liées à la macro-rugosité du drain (voir fig. 2.9).

La solution exacte est donnée par :

$$E(\theta) = \exp\left(-\frac{N\theta}{\phi}\right) \cdot h(\theta, \phi) + \int_0^\theta g(\chi, \theta, \phi) d\chi$$

avec

$$h(\chi, \phi) = \sqrt{\frac{Pe}{\pi\phi\chi}} \cdot \exp\left(-\frac{Pe(\chi-\phi)^2}{4\phi\chi}\right) - \frac{Pe}{2\phi} \cdot \exp(Pe) \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{Pe}{\phi\chi}} \frac{(\chi+\phi)}{2}\right)$$

et

$$g(\chi, \theta, \phi) = \frac{N}{\phi} \sqrt{\frac{\phi\chi}{(1-\phi)(\theta-\chi)}} \cdot I_1\left(2N\sqrt{\frac{\chi(\theta-\chi)}{\phi(1-\phi)}}\right) \cdot \exp\left(-N\frac{(\chi-2\phi\chi+\phi\theta)}{\phi(1-\phi)}\right) \cdot h(\chi, \phi)$$

où

$E(\theta)$  = la distribution des temps de séjour :

$$E(t) = C(t)Q/M$$

$I_1$  = la fonction de Bessel modifiée du premier ordre

$\phi$  = la proportion d'eau mobile par rapport au volume total de l'eau

$Pe$  = le critère de PÉCLET axial :

$$Pe = uZ/D_{hL} = Z/\alpha_L$$

$Z$  = la distance axiale

$D_{hL}$  = le coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal

$u$  = la vitesse effective

$\alpha_L$  = la dispersivité longitudinale

$N$  = le coefficient de transfert de masse adimensionnel :

$$N = K\tau = KZS/Q$$

$\tau$  = le temps convectif :

$$\tau = \frac{Z}{u\phi}$$

$K$  = le coefficient de transfert de masse de l'eau mobile vers l'eau immobile

$\theta$  = le temps adimensionnel :

$$\theta = t/\tau = tQ/SZ$$

Le modèle est entièrement défini par les trois paramètres indépendants  $\phi$ ,  $Pe$  et  $N$ .

La solution a été programmée à partir du logiciel IGOR sur Macintosh. Ce programme permet l'ajustement des paramètres  $\alpha_L$ ,  $\phi$ ,  $S$  et  $K$  par calages successifs de la courbe calculée à la courbe expérimentale.

RAVEN et al. (1988) ont développé la solution dans le cas d'un écoulement radial convergent et dans le cas d'un système "dipôle" (injection-pompage) en considérant un nombre important de fissures d'ouverture constante. Ces auteurs utilisent alors le modèle pour interpréter des tests en milieu cristallin fracturé.

### 2.3.2.3. MODELES NUMERIQUES

Pour mieux tenir compte de la distribution hétérogène des caractéristiques de l'aquifère, on recourt souvent à la discrétisation du domaine et à la résolution numérique des équations de transport.

Lorsque la géométrie de l'aquifère et les champs des paramètres sont connus avec une assez grande précision, on utilise des modèles à différences ou à éléments finis dans un contexte déterministe.

Lorsque l'aquifère est moins bien connu, on fait appel à des lois probabilistes (modèles stochastiques). Parmi les méthodes de ce type, citons celle du Random Walk (BEAR et VERRUYT, 1987) ou celle de Monte Carlo.

La plupart de ces méthodes ont été appliquées dans le cas d'aquifères poreux ou fissurés. Pour des tests à petite échelle (quelques dizaines de mètres maximum) en milieu poreux hétérogène, SANCHEZ-VILA et al. (1992), de même que PTAK et TEUTSCH (1992), utilisent une approche stochastique tandis que BIVER (in BIVER et MEUS, 1992) fait appel à une approche par la méthode des éléments finis. BIVER utilise un modèle d'écoulement (DASSARGUES, 1992) auquel il associe des équations de transport tenant compte de la dispersion et des effets d'eau immobile. On trouvera tous les détails concernant ce modèle et son application à la craie fissurée de Hesbaye dans la thèse de BIVER (à paraître).

Dans le karst, la difficulté de trouver un élément de volume représentatif constitue un obstacle majeur. Plusieurs modélisations par éléments finis ont été réalisées en considérant l'écoulement (KIRALY, 1975, PULIDO-BOSCH et PADILLA-BENITEZ, 1988). En ce qui concerne le transport, nous ne connaissons pas d'exemple.

Peut-être des méthodes géophysiques ponctuelles permettraient-elles de préciser la structure à prendre en compte dans les modélisations des aquifères karstiques.

#### **2.3.2.4. METHODES APPROCHEES DE DETERMINATION DES DISPERSIVITES**

Signalons enfin qu'il existe des méthodes d'évaluation de la dispersivité utilisant, soit des expressions dérivées des solutions analytiques, soit des abaques construites à partir de ces solutions, soit encore des expressions basées sur de simples paramètres statistiques relatifs à la forme des courbes de restitution (POREL, 1988).

Les méthodes "inverfc" et "graphique linéaire de WANG" font partie de la première catégorie, celles des abaques de SAUTY et de CRAMPON de la deuxième, et celles de "l'écart-type" et de "la variance réduite" de la troisième.

POREL (1988) a développé une autre méthode d'interprétation dite "par détermination approchée du nombre de PECLET (D.A.P.)".

Ce dernier auteur compare les différentes méthodes dans le cas d'un écoulement monodimensionnel au travers d'une colonne expérimentale remplie de gravier ou de craie. Il applique ensuite la méthode graphique linéaire et celle des abaques de SAUTY à des expériences réalisées en écoulement radial convergent dans la craie sur le site expérimental de Béthune. Dès que d'autres phénomènes que la dispersion hydrodynamique interviennent dans le transport du traceur, seules les méthodes ne prenant en compte que la montée et le pic des courbes de restitution (abaques de SAUTY et méthode graphique linéaire de WANG) donnent des résultats satisfaisants. Les queues des courbes sont en effet fortement influencées par les phénomènes d'adsorption et d'échanges avec l'eau immobile.



Plusieurs de ces méthodes ont également été testées par HANICH (1991) et par VALENTINI (1992), respectivement dans le cadre de traçages en écoulement naturel sur le site de Marsillargues (sables et graviers du Villafranchien) et dans le cadre de traçages en écoulement radial convergent sur les sites de Grand-Hallet et Jandrain (craies du Crétacé, voir § 2.5.3.3. et 2.5.3.4.).

Toutes ces méthodes ne devraient toutefois servir qu'à une détermination en première approche des dispersivités car elles sont actuellement dépassées en précision par les déterminations à partir de solutions analytiques ou à partir de modèles numériques simples (code CATTI par exemple).

## 2.4. MISE EN OEUVRE DES TRAÇAGES ARTIFICIELS

La technique du traçage artificiel était à l'origine destinée à mettre en évidence des relations entre les pertes et les exutoires des systèmes karstiques. Les vitesses de passage étaient éventuellement prises en compte mais les résultats étaient essentiellement qualitatifs ou semi-quantitatifs.

Selon les cas, le but poursuivi était de déterminer les directions d'écoulements (différences éventuelles) depuis une perte ou inversement de préciser la zone d'alimentation d'un exutoire (bassin versant hydrogéologique).

On attachait peu d'importance au type de traceur employé pour autant qu'il soit détectable à très faible concentration. On considérait que la plupart des substances utilisées répondaient au critère du "traceur idéal", c'est-à-dire parfaitement identifiable et reflétant le plus fidèlement possible le devenir du milieu marqué (l'eau). Ainsi, malgré les phénomènes d'adsorption, de diffusion, de piégeage par flottation, filtration ou rétention, des traceurs à fort encombrement stérique (molécules organiques) voire même non miscibles (spores, bactériophages, microsphères) ont été développés, notamment afin de rendre possible les multitraçages.

On s'est jusqu'à présent peu intéressé au comportement propre des traceurs dans le karst pour plusieurs raisons supplémentaires :

- les traçages classiques entre perte et résurgence ne concernent que la partie transmissive du karst (infiltration rapide, ruissellement souterrain et chenaux karstiques), dans laquelle le transport a lieu principalement par convection;

- l'utilisation des traceurs dans le karst a été quelque peu délaissée au profit de leur utilisation dans les aquifères poreux homogènes, où il est possible de simuler, voire même de modéliser, le comportement de différents polluants (voir par exemple les travaux de SABATINI et AUSTIN, 1991, simulation du comportement des pesticides à partir de la fluorescéine et de la rhodamine WT). Les traçages en milieu poreux se font à petite échelle, sur des aquifères peu profonds (nappes phréatiques), où l'on dispose d'un nombre important de piézomètres. Par contre, les volumes à étudier dans le karst sont beaucoup plus grands, la zone noyée souvent plus profonde et les forages beaucoup plus coûteux<sup>1</sup>;

---

<sup>1</sup>Les cavités karstiques sont souvent des points d'observation précieux dans la zone d'infiltration et parfois même au niveau de la nappe.

- dans le karst, on ne peut généralement pas s'affranchir du passage au travers de la zone non saturée (zone d'infiltration). En aquifère poreux, les injections sont réalisées en zone noyée grâce à la faible profondeur de la nappe et le nombre élevé de forages.

Les faits suivants justifient cependant un regain d'intérêt pour les milieux fissurés et karstiques :

- les aquifères profonds sont de plus en plus sollicités en raison de la pollution croissante des nappes alluviales causée par la pollution croissante des eaux de surface;

- la surexploitation des aquifères meubles entraîne leur alimentation latérale (ou per ascensum) par les aquifères karstiques et fissurés;

- les problèmes de stockage des déchets dans les roches fissurés nécessitent de connaître parfaitement les modalités de migration des polluants en profondeur (voir les travaux sur l'entreposage des déchets radioactifs de la Cédra en Suisse (FRICK et al., 1988; EIKENBERG et al., 1992) ou ceux réalisés sur le site de barrage de Lindau dans la Forêt Noire (HIMMELSBACH et al., 1992, VEULLIET et HÖTZL, 1992);

- les tests réalisés dans les aquifères meubles montrent souvent que ce milieu est discontinu et hétérogène (voir fig. 2.6). Il s'apparente donc de ce point de vue au milieu fissuré et karstique;

- grâce à la meilleure connaissance de la structure des milieux fissurés et karstiques (notamment à partir de l'analyse systémique) et au nombre croissant de forages et de galeries, on peut à présent envisager d'étudier les échanges, hydrauliques ou par diffusion, entre les parties peu perméables et les drains transmissifs de l'aquifère. A ce titre, il est nécessaire de rappeler que le traçage artificiel ne fournit pas le même type d'information qu'un marquage naturel (indicateurs chimiques et isotopiques). En effet, dans le premier cas, l'injection est limitée à un point unique (perte, forage) alors que, dans le second, une zone étendue, un massif ou une région entière sont concernés. On parle, dans le premier cas, de "système scalaire" et, dans le second cas, de "système vectoriel" (MOLINARI, 1976). L'étude par traçage artificiel ne dispense donc en aucun cas de l'étude par les traceurs naturels;

- enfin, les progrès réalisés en matière de modélisation du transport dans les milieux fissurés et karstiques apportent de nouveaux points de comparaison entre les différents systèmes. De là vient d'ailleurs l'intérêt de multiplier les expériences dans différentes conditions et avec différents traceurs.

Les expériences dont la description et l'interprétation suivent (chapitre 2.5.) s'inscrivent dans cette nouvelle tendance d'utilisation des traçages artificiels. Elles avaient pour but de définir les processus affectant le transport des traceurs en relation avec la structure du milieu.

Quatre types d'aquifères, allant du moins fissuré au plus karstique, ont pour cela été étudiés :

1. les sables faiblement indurés du Landénien (milieu poreux et fissuré très hétérogène);  
site : Bertrée

2. les craies du Crétacé (milieu fissuré et faiblement poreux, éventuellement karstique, où la porosité de matrice, bien que non négligeable, influence très peu l'écoulement);

sites : Bertrée, Crisnée, Grand Hallet, Jandrain

3. les calcaires du Carbonifère (milieu moyennement karstifié, localement très karstifié);

sites : Anthisnes, Néblon, Fairoule, Mont-sur-Marchienne, Spontin, Walhorn

4. les calcaires du Dévonien (milieu très karstifié dans l'ensemble);

sites : Xhoris, Remouchamps, Surdents

En fonction du site, il a d'abord fallu rechercher les types de "système-traçage" et de traceurs les plus appropriés.

### 2.4.1. Choix du type de système-traçage

Le "système-traçage" est défini par LEPILLER et MONDAIN (1986) comme la partie du système hydrogéologique concernée par le transit et/ou la migration du traceur.

Selon que l'on a affaire à un traceur parfait ou non, le volume et la partie de l'aquifère concernés varient en fonction d'une éventuelle diffusion. Par conséquent, la notion de système-traçage dépend dans une certaine mesure du traceur utilisé.

En milieu fissuré et karstique, cinq situations peuvent se présenter selon les relations entre le système-traçage et le système hydrogéologique pris dans son ensemble (fig. 2.12).

1) Dans la première situation (fig. 2.12 A), on ne s'intéresse qu'aux entrées et aux sorties du système pris dans son ensemble. C'est le cas classique du traçage entre une perte et une émergence.

Les calcaires du Dévonien sont les seuls à n'avoir été testés que suivant ce procédé.

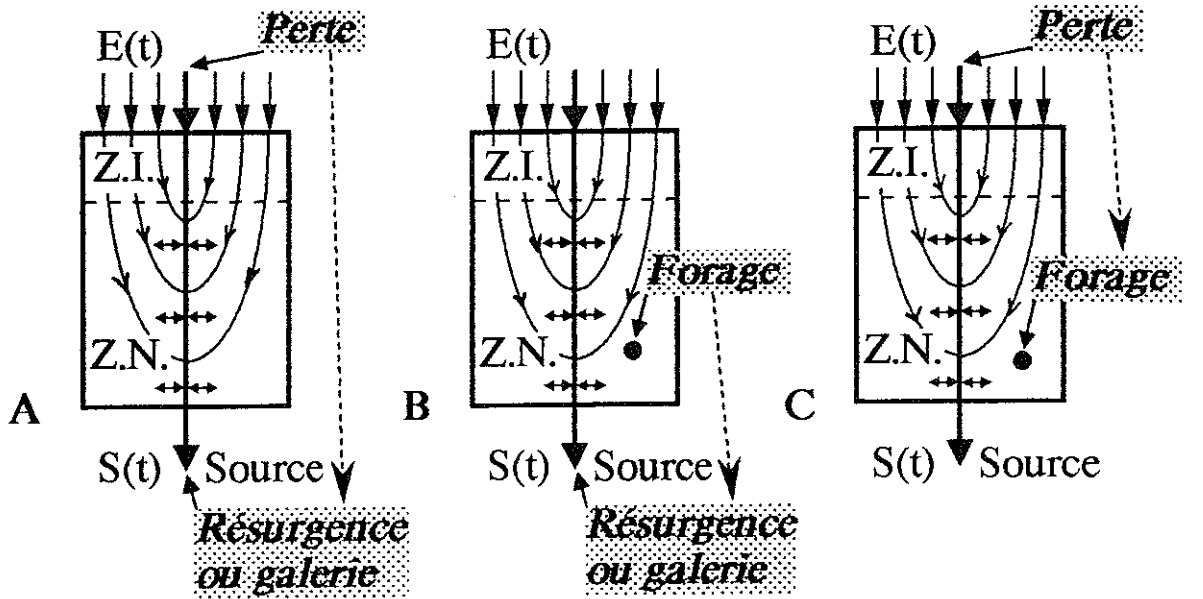
Ce type de traçage apporte relativement peu d'information sur la structure du système en dehors des drains.

Les distances de traçage sont généralement grandes (plusieurs kilomètres). Les injections peuvent cependant être réalisées à courte distance comme ce fut le cas dans les calcaires du Tournaisien à Spontin (150 m). La distance entre les points d'infiltration et le drain principal a beaucoup plus d'importance.

En outre, plus le point d'injection est éloigné de l'exutoire, plus la zone non saturée risque d'être épaisse et d'affecter la restitution du traceur.

L'écoulement le long du drain est généralement un ruissellement. Par conséquent, la présence éventuelle d'une zone noyée peut également jouer un rôle important.

Les points d'injection sont des pertes permanentes, des pertes temporaires (Spontin, Bois de Marsée) ou d'anciens points de perte artificiellement réactivés (Spontin). Les exemples de traçages à partir de dolines sont de plus en plus fréquents (délimitation des zones de protection des captages).



**PERTE-RESURGENCE**

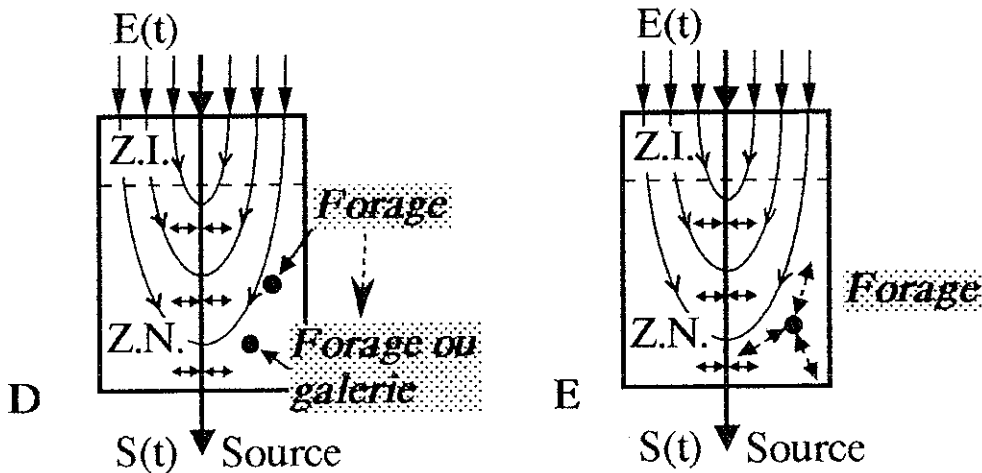
- liaisons entre points
- transfert le long du drain
- échanges entre drain et blocs

**FORAGE-RESURGENCE**

- liaisons entre points
- drainage des blocs

**PERTE-FORAGE**

- liaisons entre points
- éloignement du drain
- échanges avec les blocs



**FORAGE-FORAGE**

- liaisons entre points
  - hétérogénéités
  - paramètres hydrodispersifs des blocs
- 2 situations :
- en écoulement naturel uniforme
  - en écoulement radial convergent

**FORAGE UNIQUE**

- vitesse d'écoulement de la nappe

**Fig. 2.12** : Schématisation des cinq configurations types de système-traçage dans le cas d'un système hydrogéologique avec drainage organisé (milieu karstique ou fissuré).

$E(t)$  = entrées du système hydrogéologique (diffuses ou concentrées)  $S(t)$  = sorties du système hydrogéologique (sources) Z.I. = zone d'infiltration Z.N. = zone noyée.

Dans ce cas, un résultat négatif laisse toujours planer un doute quant à la liaison entre le point d'injection et la source car le volume d'eau ayant servi à entraîner le traceur peut avoir été insuffisant (piégeage dans la zone d'infiltration).

2) Dans la deuxième situation (fig. 2.12 B), l'injection a lieu dans un forage. Celui-ci peut être situé à une distance plus ou moins grande des axes principaux de drainage. Sa transmissivité dépend de l'ouverture et de la continuité des fissures recoupées.

Un éloignement du drain de quelques dizaines de mètres est parfois suffisant pour que le traceur ne puisse plus être détecté à l'exutoire quelles que soient les quantités injectées (voir § 1.7.7.1.). Dans le synclinal d'Anthisnes, seules quelques traces ont été détectées à la résurgence de Comblain lors du traçage au piézomètre P14 (§ 1.7.8.2.2.).

Ce genre de configuration a donné de meilleurs résultats à Fairoule, où la distance entre le piézomètre d'injection (Pz4) et les venues d'eau dans la galerie de captage (GI) n'est que de 95 mètres. La galerie ne constitue toutefois pas l'exutoire principal du système. Ce cas doit par conséquent plutôt être rattaché à la quatrième catégorie décrite ci-après (forage-forage).

La configuration forage-émergence est en principe aussi applicable à un milieu non karstique (sans perte ni doline), où le drainage est suffisamment hiérarchisé pour que les exutoires soient bien localisés. C'est par exemple le cas des craies fissurées du Crétacé, dans les vallées où la nappe se décharge sous forme de sources le long des principaux cours d'eau. Ce type de situation offre des perspectives intéressantes car il permet de tester un aquifère en condition d'écoulement naturel, à des distances relativement grandes (plusieurs centaines de mètres).

3) La troisième situation (fig. 2.12 C, perte-forage) est, comme la première, réservée au karst puisque le point d'injection est une perte (ou un point d'infiltration privilégié). Le seul cas où nous ayons pu mettre en évidence ce type de relation a été décrit au § 1.7.8.2.1. (traçage perte de Crossée-piézomètre P14).

4) La quatrième situation (fig. 2.12 D) est la configuration la plus employée pour étudier les aquifères fissurés et poreux. L'injection et la récupération du traceur se font toutes deux via des forages.

La dispersion, la dilution et les phénomènes de rétention sont tels que seuls des traçages à petite et moyenne distance (max. environ 200 m) peuvent être envisagés.

Un premier type de traçage est celui "en écoulement naturel uniforme". Si le milieu est homogène (EVR atteint), si la vitesse effective de la nappe est suffisante (dispersion cinématique prépondérante), et pour autant que le piézomètre de prélèvement soit situé en aval de l'injection (dans le nuage de dispersion du traceur), on obtient des informations équivalentes quel que soit le point de prélèvement. Le traceur se disperse en effet de manière continue. Le milieu est cependant le plus souvent hétérogène et discontinu (fig. 2.6) et les directions d'écoulement privilégiées sont à priori inconnues. Dans ce cas, les réponses sont très variables suivant le point de prélèvement considéré. Des courbes de restitution très irrégulières caractérisent ce type d'essai (HANICH, 1991, et aussi le traçage entre les forages Pz4 et Pz7 dans les calcaires de Fairoule).

C'est la raison pour laquelle on lui préfère habituellement le traçage "en écoulement radial convergent" forçant la migration du traceur en direction d'un puits de pompage.

Pour autant que le point d'injection soit situé dans le cône d'appel du pompage (débit de pompage suffisant pour s'opposer au gradient naturel de la nappe), le taux de restitution est un moyen de contrôle dont on ne dispose pas dans le cas des traçages en écoulement uniforme.

Les courbes de restitution sont plus régulières que dans le cas de l'écoulement uniforme en raison de la convergence des lignes de courants, ce qui permet de calculer plus précisément les paramètres hydrodispersifs de l'aquifère.

Etant donné les échelles de temps et d'espace différentes, il faut s'attendre à obtenir des valeurs de dispersivité variables suivant la méthode de traçage utilisée (écoulement uniforme ou écoulement radial convergent).

Les tests dans les sables du Landénien et dans les craies du Crétacé ont été réalisés à l'aide de dispositifs en écoulement radial convergent, avec des distances, des directions et des débits de pompage différents.

Les injections sont réalisées en régime permanent, c'est-à-dire lorsque les rabattements dus au pompage sont stabilisés.

Dans le cas de l'aquifère du Landénien, un seul site a été testé (Bertrée) alors que, pour la craie, on a pu comparer les résultats obtenus sur quatre sites différents, en nappe captive à semi-captive (Bertrée, Crisnée et Grand Hallet), et en nappe libre (Jandrain).

Toutes les injections, à l'exception de quelques unes à Bertrée, peuvent être considérées comme des injections de Dirac, c'est-à-dire instantanées. Les fonctions d'entrée dans les piézomètres d'injection ont d'ailleurs été étudiées dans la cadre des traçages de Grand Hallet et de Jandrain.

Des tests en écoulement radial convergent ont également été réalisés avec succès dans les calcaires carbonifères fortement fissurés de Mont-sur-Marchienne. L'hétérogénéité et les caractéristiques hydrodispersives de ce milieu ont ainsi pu être comparées à celles des craies du Crétacé et des sables du Landénien.

Signalons enfin, entrant dans la quatrième catégorie de situation, une méthode de traçage mise au point pour les milieux fissurés cristallins consistant à reprendre par un forage le traceur injecté avec le même débit dans un autre forage (méthode "dipôle", KEPPLER et DROST, 1992, VEULLIET et HÖTZL, 1992). Cette méthode permet la stabilisation rapide de l'écoulement et l'obtention d'un palier de concentration.

5) La dernière situation (fig. 2.12 E) est celle de l'injection en puits unique. Un traceur est injecté dans le puits, à partir duquel il migre naturellement en suivant l'écoulement de la nappe, pour être finalement récupéré par un pompage dans le même puits.

Bien que plus facile à mettre en oeuvre, ce dispositif est plus rarement utilisé car il ne permet pas le calcul des dispersivités ni des porosités efficaces. Il permet seulement de calculer la vitesse effective  $u_0$  de la nappe (voir § 1.7.7.1.).

On trouvera dans les tab. 2.3 et 2.3bis les principales caractéristiques et les configurations des traçages effectués dans les calcaires du Carbonifère, dans les calcaires du Dévonien, dans les craies du Crétacé et dans les sables du Landénien.

Site	Aquifère	Nappe	Configuration	Entrée	Sortie	Distance
Anthignes	calcaires du Carbonifère	libre	perte-émergence	perte de Crossée	résurgence de Comblain	7200 m
				perte de Vien	résurgence de Comblain	5000 m
				perte d'Anthignes	résurgence de Comblain	3000 m
			perte-forage	perte de Crossée	forage P14	2390 m
			forage-émergence	forage P14	résurgence de Comblain	5000 m
Néblon	calcaires du Carbonifère	libre	perte-émergence	perte du Bois de Marsée	galerie Communale	3055 m
			puits unique	forage P2	forage P2 Q = 4 m <sup>3</sup> /h	-
Spontin	calcaires du Carbonifère	libre	perte-émergence	points 1, 2, 3 et 4 (Agauches)	émergences Duchesse et Presbytère	155 à 500 m
			forage-émergence	forage F1 (zone non saturée)	résurgence Breugette	900 m
Fairoule	calcaires du Carbonifère	libre	forage-galerie	forage Pz4	galerie GI	95 m
			forage-forage écoulement naturel	forage Pz6	forage Pz3	88 m
				forage Pz4	forage Pz7	88 m
Mont-sur-Marchienne	calcaires du Carbonifère	libre	forage-forage écoulement radial convergent	forage PZ1	puits de captage Q = 125 m <sup>3</sup> /h	65 m
				forage PZ2	puits de captage Q = 125 m <sup>3</sup> /h	50 m
				forage PZ3	puits de captage Q = 125 m <sup>3</sup> /h	120 m
Walhorn	calcaires du Carbonifère	libre	perte-émergence	perte de Walhorn	source n°3	1000 m
Xhoris	calcaires du Dévonien	libre	perte-émergence	chanoir de Xhoris	résurgence sous-fluviale dans l'Ourthe	3500 m
Remouchamps	calcaires du Dévonien	libre	perte-émergence	chanoir de Sècheval	résurgence du Rubicon	600 m

**Tab. 2.3** : Configurations de système-traçage utilisées sur les différents sites expérimentaux (partim : calcaires du Carbonifère et du Dévonien).

Site	Aquifère	Nappe	Configuration	Entrée	Sortie	Distance
Bertrée	craies du Crétacé	captive	forage-forage	forage P12	puits de pompage Q = 20 m <sup>3</sup> /h	14,4 m
			écoulement radial convergent	forage P2	puits de pompage Q = 20 m <sup>3</sup> /h	13,7 m
				forage P10	puits de pompage Q = 20 m <sup>3</sup> /h	6,7 m
Crisnée	craies du Crétacé	semi-captive	forage-forage	forage PZ1	puits d'exploitation Q = 122 m <sup>3</sup> /h	55 m
			écoulement radial convergent	forage PZ2	puits d'exploitation Q = 122 m <sup>3</sup> /h	48 m
				forage PR	puits d'exploitation Q = 122 m <sup>3</sup> /h	10 m
Grand Hallet	craies du Crétacé	captive	forage-forage écoulement radial convergent	forage PZ	puits d'exploitation Q = 47 et 109 m <sup>3</sup> /h	19,6 m
Jandrain	craies du Crétacé	libre	forage-forage écoulement radial convergent	forage P1	forage P5 Q = 15 m <sup>3</sup> /h	9,6 m
Bertrée	sables du Landénien	libre	forage-forage	forage P1	puits de pompage Q = 10 m <sup>3</sup> /h	15,8 m
			écoulement radial convergent	forage P9	puits de pompage Q = 10 m <sup>3</sup> /h	4,9 m
				forage P7	puits de pompage Q = 10 m <sup>3</sup> /h	5 m

**Tab. 2.3bis** : Configurations de système-traçage utilisées sur les différents sites expérimentaux (partim : craies du Crétacé et sables du Landénien).

### 2.4.2. Choix des traceurs

Tant qu'il s'agit de déterminer les directions d'écoulement dans le karst, sans une approche quantitative rigoureuse, le choix des traceurs reste principalement dicté par des considérations de prix et de commodité. Pour autant que les circulations aient lieu dans des conduits suffisamment larges (traçages perte-résurgence), la plupart des traceurs classiques conviennent parfaitement (traceurs idéaux) : sels, produits fluorescents et matières particulaires, pour ne citer que les principaux. Cela permet d'avoir recours aux "multitraçages" pour réduire le coût des opérations.



Dès que l'on s'intéresse d'un peu plus près aux modalités de transport (filtration, flottation, adsorption-désorption, échanges avec l'eau immobile, dégradations) ou tout simplement lorsque le traçage risque d'être un échec si l'on ne tient pas compte de ces interactions, il convient de mieux sélectionner le type de traceur que l'on va utiliser.

Cela est particulièrement vrai pour les aquifères fissurés et poreux car le diamètre des conduits peut être du même ordre de grandeur que la taille du traceur et le contact entre l'eau mobile et le restant de l'aquifère est suffisamment long pour que d'autres phénomènes que la convection entrent en jeu. Ainsi, dans les aquifères à porosité d'interstice, on évite généralement les traceurs particuliers, non miscibles, et les molécules à encombrement stérique important, que leur faible solubilité repousse de la phase aqueuse vers le substrat, où elles se fixent généralement par physisorption (MOLINARI, 1976).

Les traceurs anioniques présentent l'avantage par rapport aux cationiques de moins subir les pertes et les retards dus aux échanges d'ions avec les minéraux argileux.

Si le but du traçage est la simulation des polluants, on peut avoir intérêt à utiliser des traceurs qui présentent des similarités de taille et de comportement avec ces polluants.

Le bilan permet en outre de distinguer les traceurs dits "conservatifs" de ceux qui ne le sont pas, à moins que les pertes ne soient dues au piégeage dans le forage d'injection ou à des sorties occultes, non prises en compte dans le calcul du pourcentage de restitution.

D'un point de vue pratique, le choix des traceurs est souvent guidé par les critères suivants (adapté de PARRIAUX et al., 1988) :

- le type d'aquifère (nature géologique, type de perméabilité),
- la partie d'aquifère testée (type de système-traçage, injections dans une perte ou dans un forage, récolte à l'émergence ou dans les forages),
- le nombre de communications à tester (traçage simple ou multitraçage, interférences entre traceurs),
- les moyens d'analyses à disposition (spectrofluorimètres, AAS...),
- les distances de traçage (grandes dans le cas du karst, réduites dans le cas des aquifères poreux),
- le passage éventuel au travers de la zone non saturée (retards),
- les débits aux exutoires (dilutions),

- le contenu en traceur dans l'eau avant l'essai (bruit de fond naturel, persistance des traceurs dans les nappes),
- la toxicité éventuelle <sup>1</sup> (rhodamines, traceurs radioactifs),
- l'accessibilité du point d'injection (poids de traceur, volume de chasse d'eau),
- les moyens financiers.

Le but n'est pas ici de faire la revue critique de tous les moyens de traçage actuellement disponibles mais seulement de permettre de retrouver quelques informations concernant tel ou tel type de traceur. Chaque cas de traçage est un cas particulier pouvant être utile à la connaissance du milieu et à celle du traceur lui-même.

On trouvera toutes les indications nécessaires concernant l'analyse et l'utilisation des traceurs dans le très récent traité en langue allemande de W. KÄSS (1992) ainsi que dans le guide de PARRIAUX et al. (1988).

Dans le tab. 2.4, adapté de MOLINARI (1976), se trouvent classés, par procédés de mesure, la plupart des traceurs artificiels ayant déjà fait l'objet de recherches en hydrologie. Les numéros entre parenthèses correspondent aux références concernant les différents cas d'utilisation de ces traceurs.

Nous avons, pour notre part, testé les 11 traceurs suivants :

- Na<sup>+</sup> (NaCl), K<sup>+</sup> (KI, KNO<sub>3</sub>), Li<sup>+</sup> (LiCl), Cl<sup>-</sup> (NaCl, LiCl), I<sup>-</sup> (KI), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (KNO<sub>3</sub>),
- uranine, rhodamine B, naphthionate,
- microsphères fluorescentes YG 1µm,
- bactériophages (souche de Serratia Marcescens).

Les différents cas d'utilisation des traceurs et les taux de restitution obtenus sont rassemblés dans les tab. 2.5. et 2.5bis.

---

<sup>1</sup>Le problème de la toxicité des traceurs est très complexe. Aux concentrations et aux taux de dilution habituellement rencontrés lors d'un essai de traçage normal, la plupart des traceurs, n'ayant pas d'effet nocif connu, sont tolérés. On trouvera quelques informations concernant la toxicité des traceurs dans PARRIAUX et al. (1988), et en particulier des traceurs fluorescents dans SMART et LAIDLAW (1977).

Procédé de mesure	Traceur	Application
Conductométrie	NaCl	karst, diagraphies, fonctions d'entrée
Analyses chimiques (1)  - ionométrie - absorption atomique (AAS) - émission atomique - chromatographie ionique (HPLC) - ICP	a) traceurs salins cationiques <u>Na</u> <sup>+</sup> (4), <u>K</u> <sup>+</sup> (5), <u>Li</u> <sup>+</sup> (6), Sr <sup>2+</sup> (7), Rb <sup>+</sup> (8), NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  b) traceurs salins anioniques <u>Cl</u> <sup>-</sup> , <u>I</u> <sup>-</sup> (9), <u>Br</u> <sup>-</sup> (10), NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (11), Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup>  c) gaz CFC (12), gaz nobles [He (13)]  d) autres borax (14), détergents	karst, milieux fissurés et poreux  karst, milieux fissurés et poreux   d'usage exceptionnel excepté le borax
Fluorimétrie (2)  - fluoroscopes - fluorimètres à filtres - spectrofluorimètres	a) traceurs xanthéniques anions: <u>uranine</u> (15), <u>rhodamine WT</u> (16), <u>amidorhodamine G</u> (17), <u>éosine</u> (18), amidorhodamine B (19), cations: <u>rhodamine B</u> (20)  b) azurants optiques <u>tinopal CBS-X</u> (21), photine CU  c) autres fluorescents lissamine FF (22), <u>pyranine</u> (23), <u>naphthionate</u> (24), m-TFMBA	karst, milieux fissurés et poreux mais attention à l'adsorption
Radioactivité (3)	tritium, <sup>51</sup> Cr (25), <sup>131</sup> I, <sup>82</sup> Br (26), <sup>60</sup> Co, <sup>85</sup> Kr, <sup>22</sup> Na (27)	milieux fissurés et karst (utilisation réglementée)
Radioactivation	<sup>114</sup> In-EDTA (28)	
Dénombrement  - microscope - microscope à fluorescence - analyses bactériologiques	a) spores, <u>spores colorées</u> , <u>spores fluorescentes</u> (29)  b) microsphères fluorescentes (30)  c) bactéries et bactériophages (31) Serratia Marcescens, T7, P22H5	karst, éventuellement milieu fissuré

**Tab. 2.4** : Différents traceurs artificiels utilisés en hydrologie avec leurs procédés d'analyses (adapté de MOLINARI, 1976). Les traceurs les plus communément employés sont soulignés.

Références

- (1) DAVIS et al. (1980)
- (2) SMART et LAIDLAW (1977), DAVIS et al. (1980), ROCHAT et al. (1981), BEHRENS (1986), BEHRENS et al. (1992)
- (3) DAVIS et al. (1980)
- (4) TENHAEFF et KÄSS (1987), KÄSS et al. (1986)
- (5) KÄSS et al. (1986)
- (6) KÄSS et al. (1986), BEHRENS et al. (1992), REICHERT et HÖTZL (1992), MEUS et KÄSS (1992)
- (7) DE CARVALHO DILL et al. (1992)
- (8) DE CARVALHO DILL et al. (1992)
- (9) FROST et al. (1992)
- (10) BEHRENS et al. (1992), ZAHN et BEHRENS (1992)
- (11) BIVER et MEUS (1992)
- (12) DAVIS et al. (1980)
- (13) EIKENBERG et al. (1992)
- (14) KÄSS (1986)
- (15) LALLEMAND et PALOC (1964), LAIDLAW (1982), TENHAEFF et KÄSS (1987), PARRIAUX et al. (1990), SABATINI et AUSTIN (1991), ZAHN et BEHRENS (1992)
- (16) ROCHAT et al. (1975), LAIDLAW (1982), SABATINI et AUSTIN (1991)
- (17) ROCHAT et al. (1975), LEPILLER (1976), LAIDLAW (1982)
- (18) TENHAEFF et KÄSS (1987), BEHRENS et al. (1992), HIMMELSBACH et al. (1992), VEULLIET et HÖTZL (1992), DE CARVALHO DILL et al. (1992)
- (19) ROCHAT et al. (1975), LAIDLAW (1982)
- (20) ROCHAT et al. (1975), LAIDLAW (1982), TENHAEFF et KÄSS (1987), DE CARVALHO DILL et al. (1992)
- (21) TENHAEFF et KÄSS (1987), DE CARVALHO DILL et al. (1992)
- (22) LAIDLAW (1982)
- (23) BENISCHKE et SCHMERLAIB (1986), HIMMELSBACH et al. (1992), REICHERT et HÖTZL (1992)
- (24) LEIBUNDGUT et WERNLI (1986), BEHRENS et al. (1992), LEIBUNDGUT et al. (1992), PTAK et TEUTSCH (1992), REICHERT et HÖTZL (1992), HOFMANN et al. (1992), MEUS et KÄSS (1992)
- (25) DIMITROULAS et al. (1986)
- (26) KÄSS (1986)
- (27) HOEHN et EIKENBERG (1992)
- (28) BEHRENS et al. (1992)
- (29) DAVIS et al. (1980), DECHANT et HACKER (1986), BRICELJ et al. (1986), KÄSS et REICHERT (1986)
- (30) KÄSS et HÖTZL (1988), BEHRENS et al. (1992), DE CARVALHO DILL et al. (1992), MEUS et KÄSS (1992)
- (31) ARAGNO et MÜLLER (1982), ALTHAUS et al. (1986), BEHRENS et al. (1992), ROSSI (1992)

Traceur (forme)	Aquifère	Site	Distance (m)	Quantité (g ou nbre)	Taux de restitution R (%)
Na <sup>+</sup> (NaCl)	sables du Landénien	Bertrée	15,8	4217	12 (1)
		Bertrée	5	4256	9 (1)
	craies du Crétacé	Bertrée	14,4	9914	79 (1)
		Jandrain	29,1	9914	0 (1)
K <sup>+</sup> (KI+KNO3)	craies du Crétacé	Bertrée	6,7	4369	94 (1)
		Grand Hallet	19,6	1971	80 (1)
Li <sup>+</sup> (LiCl)	sables du Landénien	Bertrée	15,8	191	17 (1)
		Bertrée	15,8	333	30 (1)
	craies du Crétacé	Bertrée	14,4	333	65 (1)
		Grand Hallet	19,6	500	67 (1)
		Crisnée	47	825	58 (1)
	calcaires du Carbonifère	Jandrain	9,6	333	23 (1)
		Spontin	175-200	500	8+1
		Spontin	500	1666	0
		Mt-sur-Marchienne	50	357	66 (1)
Cl <sup>-</sup> (LiCl+NaCl)	craies du Crétacé	Bertrée	14,4	16753	- (1)
I <sup>-</sup> (KI)	sables du Landénien	Bertrée	4,9	158	- (1)
		Bertrée	4,9	1530	60 (1)
	craies du Crétacé	Bertrée	6,7	1654	92 (1)
		Crisnée	9,7	616	93 (1)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (KNO3)	sables du Landénien	Bertrée	4,9	3149	42 (1)
		Bertrée	4,9	3072	30 (1)
	craies du Crétacé	Bertrée	6,7	6138	77 (1)
		Grand Hallet	19,6	3133	81 (1)

(1) traçage en écoulement radial convergent

(2) l'injection a lieu dans un forage

**Tab. 2.5** : Traceurs utilisés, quantités injectées et taux de restitution pour les différents sites et types d'aquifères (partim : traceurs salins).

Traceur (forme)	Aquifère	Site	Distance (m)	Quantité (g ou nbre)	Taux de restitution R (%)	
uranine	sables du Landénien	Bertrée	15,8	4	4 (1)	
		Bertrée	15,8	100	13 (1)	
	craies du Crétacé	Bertrée	13,7	50	27 (1)	
		Crisnée	54,4	50	17 (1)	
		Grand Hallet	19,6	20	34 (1)	
		Jandrain	12,7	115	0 (1)	
		Spontin	155-180	2	0,1+0,08	
	calcaires du Carbonifère	Spontin	2500	4560	0	
		Mt-sur Marchienne	120	250	38 (1)	
		Fairoule	88	150	-	
		Anthisnes	7200	2370	131 (?)	
		Anthisnes	5000	2018	69	
		Anthisnes	7200	1008	141 (?)	
		Anthisnes	5000	509	traces (2)	
		Néblon	3055	1987	3,5	
		Néblon	1000	250	0 (2)	
		Néblon	1000	5000	0 (2)	
		Walhorn	1000	300	0	
		Walhorn	1000	3000	0,76	
		calcaires du Dévonien	La Reid	1700-3050	460	14+6
			Xhoris	3500	3000	100
Remouchamps	600		150	96		
Croisiers						
rhodamine B	sables du Landénien	Bertrée	1	4,9	0 (1)	
	calcaires du Carbonifère	Anthisnes	3000	1033	37	
		Néblon	2400	1000	0 (2)	
	calcaires du Dévonien	La Reid	1700	200	6	
naphthionate	craies du Crétacé	Crisnée	9,7	75	53 (1)	
		Anthisnes	7200	10000	64	
	calcaires du Carbonifère	Spontin	900	4925	0,27 (2)	
		Fairoule	95	3000	2,7 (2)	
microsphères	calcaires du Carbonifère	Anthisnes	7200	$9,1 \cdot 10^{11}$	15	
		Spontin	160-185	$4,6 \cdot 10^{11}$	2,8+0,35	
		Spontin	500	$4,6 \cdot 10^{11}$	traces	
		Mt-sur-Marchienne	65	$4,6 \cdot 10^{11}$	0,23 (1)	
bactériophages	calcaires du Carbonifère	Spontin	175-200	$3,6 \cdot 10^{13}$	6,7+1	
		Spontin	2400	$3,6 \cdot 10^{13}$	0	

(1) traçage en écoulement radial convergent

(2) l'injection a lieu dans un forage

**Tab. 2.5bis** : Traceurs utilisés, quantités injectées et taux de restitution pour les différents sites et types d'aquifères (partim : traceurs fluorescents et particuliers).

Le sodium est relativement conservatif dans les craies ( $R = 79 \%$ ) alors qu'en raison de son caractère cationique, il subit des pertes importantes ( $R < 15 \%$ ) par adsorption (échanges d'ions) sur les argiles contenues dans les sables du Landénien. Ce comportement est bien connu. Il a été signalé entre autres par PARRIAUX et al. (1988) qui en déconseillent l'utilisation sur de trop longues distances dans les aquifères à porosité d'interstice.

Malgré son excellent comportement dans le karst, nous ne l'avons pas employé car les quantités de NaCl à transporter (de l'ordre de la tonne) en rendaient l'utilisation peu commode. Nous lui avons souvent préféré le chlorure de lithium, plus simple à mettre en oeuvre.

A Jandrain (test en écoulement radial convergent à une distance de 29 m), le taux de restitution nul montre qu'aucune relation hydraulique n'existe entre le piézomètre d'injection et le puits de pompage. Le cône de rabattement a sans doute été insuffisant pour détourner le traceur du trajet lié à l'écoulement régional de la nappe.

Bien que nous l'ayons seulement testé dans les craies, le potassium semble avoir un comportement semblable, si pas meilleur, que celui du sodium ( $R > 80 \%$ ). Le potassium est en principe moins sorptif que le sodium.

Le lithium ne peut pas être considéré dans les sables comme un traceur conservatif ( $R < 30 \%$ ).

Son comportement est un peu meilleur dans les craies ( $R \approx 60 \%$ ), à l'exception de Jandrain où, pour une raison similaire au cas du sodium, 23 % seulement ont été récupérés. Les pourcentages de restitution dans le cas des traçages en écoulement radial convergent peuvent difficilement être comparés entre eux pour plusieurs raisons :

- les masses injectées sont différentes (or l'adsorption sur le solide et la diffusion vers l'eau immobile dépendent des concentrations);
- les gradients régionaux, les débits de pompage et les rabattements provoqués sont différents (par conséquent la dispersion latérale varie);
- les piézomètres d'injections sont différents (le piégeage dans les "eaux mortes" du piézomètre dépend principalement de la transmissivité);
- selon qu'il s'agit des sables (Landénien) ou des craies (Crétacé), les causes de perte ne sont pas les mêmes (pour les sables, l'adsorption est prépondérante alors que, dans les craies, c'est le stockage dans l'eau immobile qui est déterminant).

Dans les calcaires, les causes de perte du lithium peuvent encore être différentes. A Spontin, par exemple, les taux de restitutions très faibles sont principalement dus au passage à travers la zone non saturée.

Dans les calcaires fissurés de Mont-sur-Marchienne, le taux de restitution est du même ordre de grandeur que dans les craies ( $R \approx 60 \%$ ).

Malgré sa sorptivité élevée, le lithium est intéressant pour sa teneur très basse dans les eaux naturelles et sa limite de détection de 0,1 ppb en spectrométrie d'émission de flamme.

Le chlorure a été peu étudié. Son comportement est peut être un peu meilleur que celui du sodium vu le caractère anionique. Son analyse est par contre moins aisée (électrodes spécifiques).

L'iodure est un traceur présentant peu d'interactions avec le milieu. Les taux de restitution dépassent 90 % dans les craies et 60 % dans les sables. De plus, il est absent dans les eaux naturelles. Le principal désavantage est son coût élevé.

Le nitrate est un peu moins conservatif que l'iodure (environ 80 % de restitution dans les craies et 30 % dans les sables) alors qu'il paraît moins dispersif. Il est possible qu'il subisse des dégradations suite à des réactions chimiques ou biologiques. Ces dégradations seraient fortement dépendantes du contenu bactérien de l'eau<sup>1</sup>. Des tests plus systématiques avec ce traceur apporteraient sans doute des informations précieuses concernant les nombreux cas de pollution diffuse par les nitrates rencontrés actuellement.

L'uranine est (et restera sans doute) le traceur le plus utilisé en raison des ses avantages considérables (absence dans les eaux naturelles, toxicité faible, limite de détection très basse avec le spectrofluorimètre, possibilité de contrôle visuel, détection par la méthode des charbons actifs) en comparaison de ses inconvénients (sensibilité au pH, dégradation à la lumière, rétention dans les argiles et sols organiques).

Grâce à son caractère sorptif, il peut servir à simuler le transfert de certains polluants (SABATINI et AUSTIN, 1991).

Dans les sables du Landénien, le taux de restitution ne dépasse pas 15 %.

Ce taux de restitution est un peu meilleur dans les craies, dépassant 30 % à Grand Hallet. Les pertes peuvent être dues à la fois au caractère sorptif et à la plus grande aptitude de l'uranine à diffuser vers l'eau immobile vu la taille de sa molécule (la diffusion croît avec le rayon ionique). A Crisnée, le déficit plus important (R = 17 %) est dû, comme on le verra plus loin, à l'entraînement du traceur par l'écoulement régional hors du cône d'appel du pompage (distance = 54,4 m).

En ce qui concerne les expériences dans le karst, la dispersion des valeurs de taux de restitution est nettement plus importante.

Les taux de restitution nuls sont généralement dus aux raisons suivantes :

- la sortie du traceur à des endroits inconnus ou après la période de surveillance (Spontin, Walhorn),
- le piégeage du traceur à proximité du point d'injection, dans le cas d'injections à partir de forages (Néblon, Anthisnes).

A Anthisnes, certains taux de restitution supérieurs à 100 % sont, rappelons-le, imputables aux erreurs de mesure des débits.

---

<sup>1</sup>On sait que c'est principalement dans la zone aérée que des réactions biologiques faisant intervenir les bactéries se produisent (BIVER, thèse à paraître).



Dans certains cas, les taux de restitution de l'uranine ont été pris égaux à 100 %, soit afin de reconstituer la partie manquante de la courbe de restitution lorsque celle-ci est incomplète (Remouchamps), soit afin de calculer le débit à l'exutoire lorsqu'il n'a pas pu être mesuré par un autre moyen (Xhoris).

La rhodamine B est déconseillée vu sa grande sorptivité (cation à fort encombrement stérique) et sa toxicité. Elle peut toutefois être utilisée dans le karst lorsqu'un multitraçage nécessite l'emploi de plusieurs traceurs.

Le naphtionate est intéressant car il est peu sorptif, chimiquement stable, et surtout discret dans le cas d'essais sur des nappes exploitées (il est incolore). Il présente le désavantage d'être gêné par le bruit de fond de fluorescence lors d'analyses dans des eaux polluées (rivière Breugette à Spontin).

A Spontin, le taux de restitution faible est dû à l'injection à la base d'un forage recoupant la couverture limoneuse, mais n'atteignant pas la zone saturée.

A Fairoule, la majeure partie du traceur a pu être piégée à proximité du forage d'injection (transmissivité faible) ou passer à côté de la galerie de captage.

Les microsphères fluorescentes, bien que présentant toujours des taux de restitution très faibles (diamètre 1  $\mu\text{m}$ , filtration, adsorption), sont particulièrement intéressantes en milieu karstique lorsqu'il s'agit de mettre en évidence des relations entre différents points (identification sûre).

Lors du traçage à Crossée (voir § 1.7.8.2.1.), elles ont été retrouvées dans l'eau du pompage au piézomètre P14, prouvant ainsi une relation entre le drain et les blocs moins perméables.

Lors du traçage à Spontin, elles sont parvenues, après traversée de la zone non saturée et de la zone saturée, aux émergences situées à 500 m du point d'injection, alors que le lithium injecté au même endroit (10 kg) n'a donné aucun résultat.

En milieu poreux, les microsphères ont été retrouvées jusqu'à une distance de 200 m (KÄSS et HÖTZL, 1988).

Les bactériophages de Serratia Marcescens ont été utilisés à plusieurs reprises par J.P. BAS (Institut Henrijean) dans le bassin des sources de Spontin.

Ce traceur, dont la taille est environ dix fois plus faible que celle des microsphères, devrait en principe subir moins de pertes. Sa restitution est en effet un peu meilleure (7,7 contre 3,15 %) que celle des microsphères injectées au même endroit dans le vallon situé en amont des sources minérales de Spontin.

L'identification des bactériophages à l'état de traces (traçage à la perte de Gozée à Spontin) nous a paru peu sûre. Il aurait cependant été souhaitable de pouvoir comparer avec un autre traceur injecté en même temps au même endroit.

Le rapport qualité-prix du traceur est moyennement intéressant. Son intérêt réside principalement dans la possibilité de simuler le mouvement des virus dans le sous-sol et de pouvoir utiliser plusieurs souches différentes quand les relations à tester sont nombreuses.

## 2.5. TRAÇAGES DANS LES MILIEUX FISSURES ET KARSTIQUES

### 2.5.1. TRAÇAGES DANS LES CALCAIRES DU CARBONIFERE

#### 2.5.1.1. TRAÇAGES DANS LES BASSINS D'ANTHISNES ET DU NEBLON

Ces traçages ont fait l'objet du chapitre 1.7. de la première partie. Nous n'y reviendrons que lors de la synthèse comparative des expériences de traçage (chapitre 2.6.).

#### 2.5.1.2. TRAÇAGES SUR LE SITE DE SPONTIN

##### 2.5.1.2.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Situé sur le bord Nord du synclinorium de Dinant, à une dizaine de kilomètres à l'Est de la vallée de la Meuse, le site de Spontin constitue la zone d'exutoire principale de l'aquifère des calcaires carbonifères du synclinal de Durnal (fig. 3 et 2.13). Ce dernier est un petit synclinal entouré de terrains imperméables appartenant au Famennien et drainé par le Bocq dans sa partie Sud-Ouest.

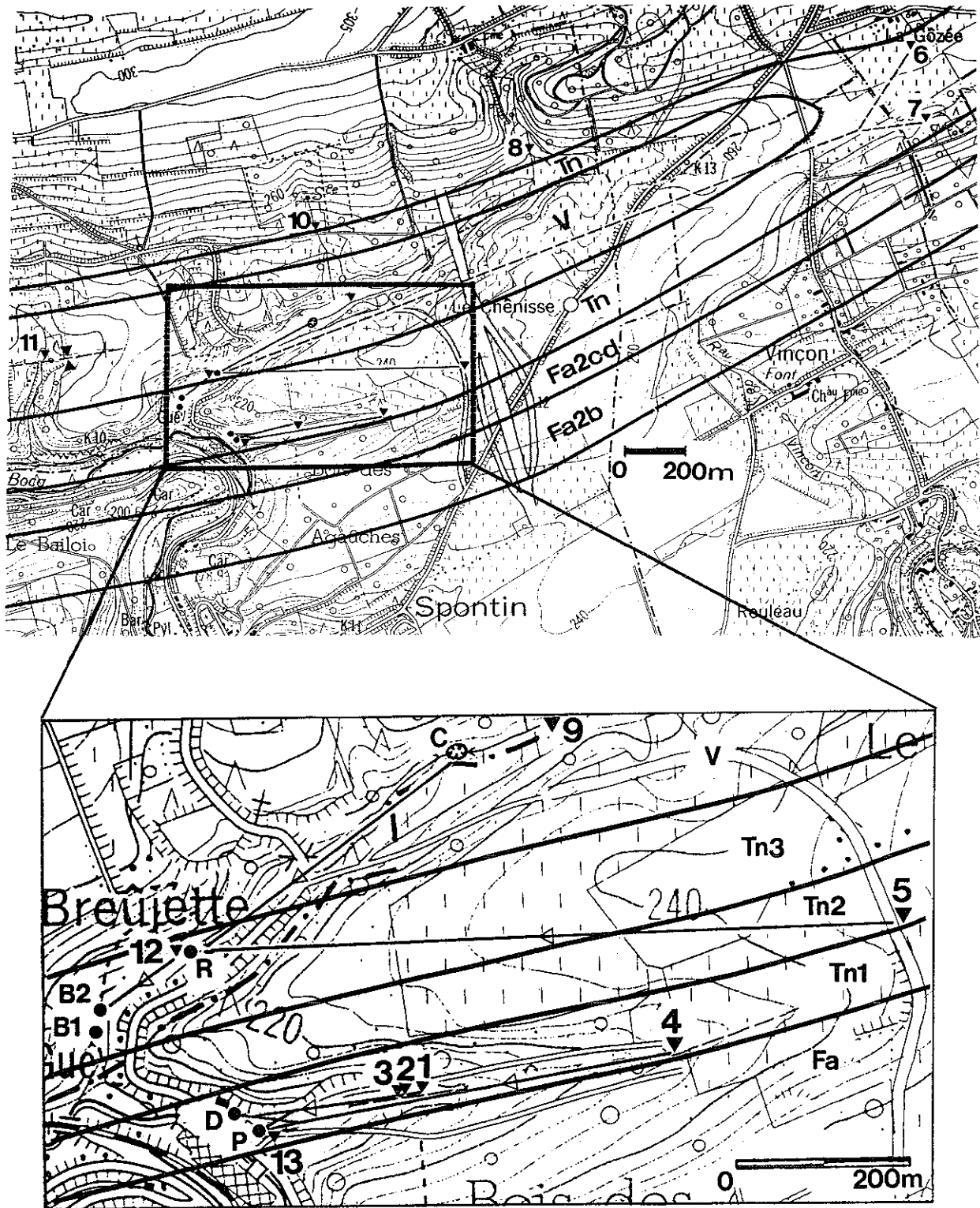
Les calcaires appartiennent aux étages Tournaisien et Viséen. Ils peuvent être divisés en deux aquifères séparés par les schistes du Tn2a :

1) Les sources Duchesse et Presbytère (sources minérales) drainent l'aquifère inférieur, constitué par le Tn1a et le Tn1b (calcaires avec intercalations de schistes). La recharge s'opère suivant trois processus distincts :

- par infiltration directe au travers de l'impluvium (calcaires Tn1a et Tn1b);
- par drainage de l'aquifère des grès fissurés du Famennien situés au Sud;
- par ruissellement sur les schistes du Tn2a au Nord.

L'étude de la fissuration a montré que les écoulements devraient se faire préférentiellement suivant la stratification (N264°E / 46°N), facilités par la présence de conduits karstiques aux intersections des bancs avec les diaclases de même direction. D'autres familles de fissures, perpendiculaires à la stratification, favorisent les échanges entre les bancs calcaires au travers des intercalaires schisteux.

Un des buts des traçages était de préciser l'extension orientale de la zone d'alimentation des deux sources Duchesse et Presbytère, en réalisant plusieurs injections le long de la bande des calcaires tournaisiens du flanc Sud du synclinal.



**Fig. 2.13 :** Situation des traçages et relations mises en évidence sur le site de Spontin (synclinal de Durnal). P = source Presbytère D = source Duchesse B1 = source Breujette I B2 = source Breujette II R = résurgence du vallon de la Breujette C = chantoir du vallon de la Breujette. Points d'injection : 1 = pt 1 du ravin des Agauches 2 = pt 2 du ravin des Agauches 3 = pt 3 du ravin des Agauches 4 = tête du ravin des Agauches 5 = forage F1 6 = perte de Gozée 7 = ruisseau de Vincon 8 = rivière Breujette en amont de l'autoroute 9 = rivière Gozée 7 = ruisseau de Vincon 8 = rivière Breujette en amont de l'autoroute 9 = rivière Breujette en amont du chantoir 10 = source Conin 11 = fossé des Livottes 12 = rivière Breujette entre résurgence et décharge 13 = canal. Géologie : V = Viséen Tn1, Tn2, Tn3 = Tournaisien Fa2c-d, Fa2b = Famennien.

2) L'aquifère supérieur, logé dans les calcaires du Viséen et du Tournaisien supérieur, occupe le centre du synclinal (fig. 2.13).

Les calcaires viséens étant plus homogènes, la karstification est plus développée que dans l'aquifère inférieur.

Le vallon de la Breujette est une importante vallée karstique qui traverse le synclinal en oblique. Les eaux en provenance des terrains famenniens du flanc Nord se perdent, toutes ou en partie selon le débit, dans un chantoir (pt C, fig. 2.13) situé environ 800 mètres en amont de la confluence avec le Bocq. La majeure partie de ces eaux résurgent quelques 600 mètres plus bas (pt R, fig. 2.13), un peu en amont de deux autres venues d'eau jaillissant en rive droite du ruisseau : les sources Breujette I et II (B1 et B2, fig. 2.13). Bien qu'une relation avec les écoulements karstiques régionaux soit prouvée dans le cas de Breujette II, l'origine de Breujette I, bien que les deux sources soient proches, reste encore inconnue.

#### **2.5.1.2.2. Mise en oeuvre des traçages**

Au total, dix-neuf injections ont été effectuées en 13 points différents comprenant des ruisseaux, des pertes, des infiltrations diffuses, une vallée sèche et un forage.

Les traceurs utilisés sont l'uranine, le naphthionate, le chlorure de lithium, le chlorure de sodium, les microsphères fluorescentes et les bactériophages.

Une première série de tests, réalisés par J.P. BAS (Institut Henrijean) avait pour buts de :

- préciser les modalités de transit dans l'aquifère viséen le long de l'axe de drainage principal que constitue le vallon de la Breujette;
- rechercher les zones d'alimentation des exutoires des deux aquifères (Breujette I et II d'une part, Duchesse et Presbytère d'autre part);
- découvrir l'origine des pollutions bactériennes et des troubles occasionnels constatés en période de crue aux sources Duchesse et Presbytère;
- tester les performances des bactériophages de *Serratia Marcescens* en tant que traceur.

Le tab. 2.6 reprend les principales caractéristiques des injections conduites par J.P. BAS dans le synclinal de Durnal (fig. 2.13).

Date	Lieu	Traceur	Quantité
24/10/82	rivière Breujette en amont de l'autoroute (pt 8)	NaCl	-
6/6/88	rivière Breujette en amont de l'autoroute (pt 8)	bactériophages	$5.10^{13}$
13/12/88	rivière Breujette en amont du chantoir (pt 9)	bactériophages	$5,6.10^{13}$
13/12/88	source Conin (pt 10)	LiCl	-
27/3/89	perte de Gozée (pt 6)	bactériophages	$5,3.10^{13}$
7/11/89	perte de Gozée et ruisseau de Vincon (pts 6 et 7)	bactériophages	$2 \times 4.10^{13}$
9/1/90	fossé des Livottes (pt 11)	bactériophages	$11.10^{13}$
9/1/90	rivière Breujette entre résurgence et décharge (pt 12)	NaCl	1 kg
6/3/90	ravin des Agauches (pt 1)	bactériophages	$3,6.10^{13}$

**Tab. 2.6** : Caractéristiques des injections réalisées par J.P. BAS dans le synclinal de Durnal (site de Spontin).

Une seconde série de tests réalisés par nous avait pour objectifs :

- de déterminer l'extension orientale des zones d'alimentation des sources Duchesse et Presbytère afin de préciser les risques de pollution liés au passage de l'autoroute au-dessus de la bande des calcaires tournaisiens (pts 4 et 5) et vérifier que les pertes de Gozée (pt 6) et Vincon (pt 7) alimentaient uniquement l'aquifère viséen ainsi que le traçage aux bactériophages du 7/11/89 semblait l'avoir montré;
- de localiser précisément les infiltrations ayant lieu dans le ravin des Agauches, à peu de distance des émergences Duchesse et Presbytère (pts 1, 2 et 3);
- de quantifier les vitesses de passage nécessaires pour délimiter les zones de protection des captages d'eaux minérales (Duchesse et Presbytère).

Les caractéristiques de ces injections sont rassemblées dans le tab. 2.7 (voir aussi fig. 2.13).

Date	Point d'injection	Niveau stratig.	Traceur	Quantité (g ou nbre)	Débit (m <sup>3</sup> /h) ou chasse
7/1/91	ravin des Agauches (pt 1)	Tn1a	LiCl	3000	2
7/1/91	ravin des Agauches (pt 3)	Tn1a	uranine	2	2
7/1/91	ravin des Agauches (pt 2)	Tn1a	microsphères	$4,55.10^{11}$	2
12/3/91	canal (pt 13)	-	uranine	60	2
12/3/91	ravin des Agauches (pt 1)	Tn1a	LiCl	200	2
15/1/92	forage F1 (pt 5)	Tn2a	naphionate	4925	10,64 m <sup>3</sup>
15/1/92	ruisseau de Vincon (pt 7)	Tn	bactériophages	$3,9.10^{13}$	1
15/1/92	perte de Gozée (pt 6)	Tn	uranine	4560	3
16/1/92	tête du ravin des Agauches (pt 4)	Tn1a	microsphères	$4,55.10^{11}$	60 m <sup>3</sup>
16/1/92	tête du ravin des Agauches (pt 4)	Tn1a	LiCl	10000	60 m <sup>3</sup>

**Tab. 2.7** : Caractéristiques des injections dans le synclinal de Durnal (site de Spontin).

Dans le ravin des Agauches, un écoulement temporaire se produit au niveau des points 1, 2 et 3, lors des périodes de hautes eaux uniquement, quand l'aquifère famennien, schisteux au sommet (Strunien), déborde via plusieurs petites sources en rive gauche du vallon.

Le fonctionnement de ces venues d'eau étant imprévisible, une amenée d'eau assurait un débit minimum de 2 m<sup>3</sup>/h dans le ravin pendant la durée de l'expérience.

De même au point 4 (d'ordinaire à sec), il a été nécessaire d'injecter de l'eau durant deux jours (un jour avant et un jour après l'injection) avec un débit d'environ 1 m<sup>3</sup>/h de manière à entraîner le traceur au travers de la zone d'infiltration.

Deux forages à la tarière situés en bordure de l'autoroute ont permis de traverser la couverture de limons, épaisse d'environ 20 mètres à cet endroit. Le plus perméable de ces forages (F1) a été choisi pour l'injection du naphthionate (pt 5) malgré sa position au-dessus des schistes du Tn2a.

Deux injections dans le ravin des Agauches (pt 3 et pt 13) ont eu lieu dans le but de vérifier l'étanchéité de l'ancien canal destiné à protéger les sources contre les infiltrations d'eaux de surface.

### 2.5.1.2.3. Résultats des traçages

Le tab. 2.8 fait la synthèse des relations mises en évidence par les traçages sur le site de Spontin.

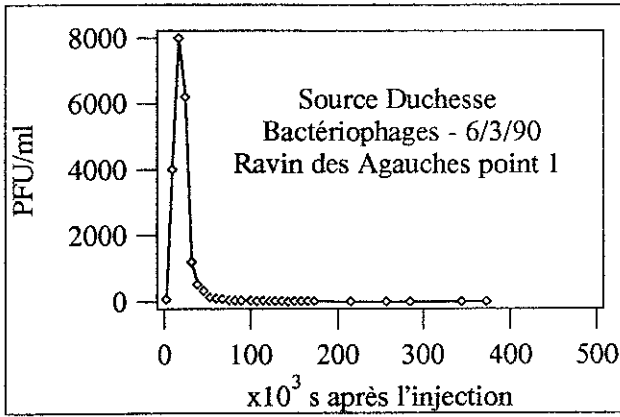
Deux axes d'écoulement préférentiel ressortent nettement (fig. 2.13) : l'un dans l'aquifère supérieur (Tn2b-V), parallèlement au vallon karstique de la Breujette (injections aux pts 8 et 9), l'autre dans l'aquifère inférieur (Tn1a-Tn1b), le long du ravin des Agauches (injections aux pts 1 à 4). Les exutoires respectifs de ces circulations sont : d'une part la résurgence du vallon de la Breujette (pt R), avec plus en aval la source Breujette II (pt B2), d'autre part les sources Duchesse et Presbytère (pts D et P).

La source Breujette II est partiellement alimentée par les pertes, dans le vallon de la Breujette, de l'eau en provenance de la résurgence (pt 12).

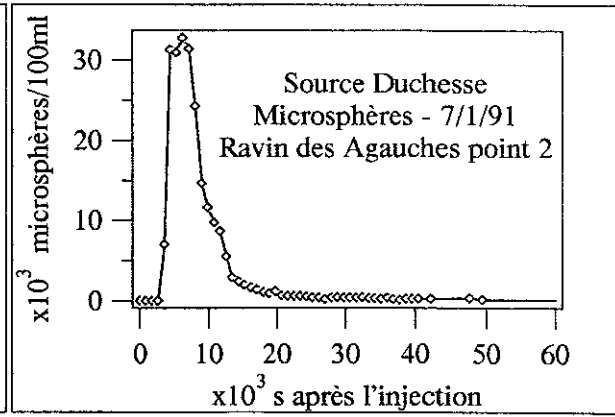
Le parallélisme des courbes de restitution (fig. 2.14 à 2.23) et l'arrivée systématique des traceurs aux deux sources Duchesse et Presbytère est la preuve de l'alimentation par un réservoir commun.

Les traçages du 15/1/92 au point 6 (perte de Gozée) et au point 7 (ruisseau de Vincon) n'ont pas confirmé leur appartenance au système de la Breujette, pas plus d'ailleurs qu'à celui des sources Duchesse et Presbytère.

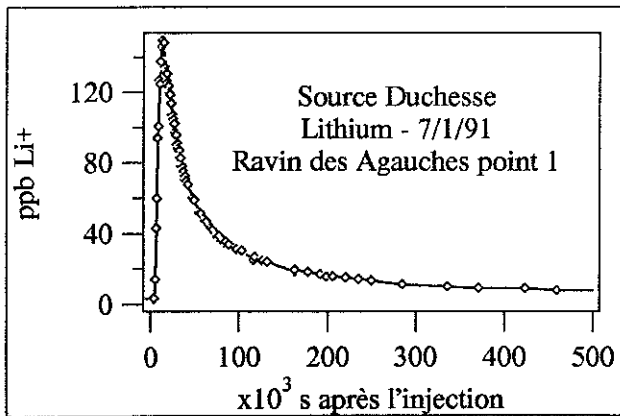
Par contre, depuis le forage F1 (pt 5), les eaux s'écoulent en direction du vallon de la Breujette (fig. 2.24).



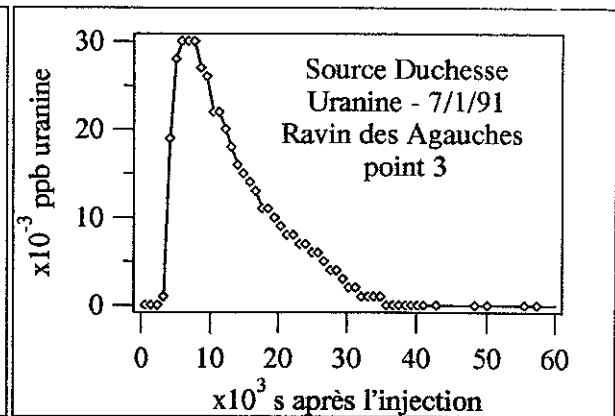
**Fig. 2.14 :** Courbe de restitution à la source Duchesse des bactériophages injectés le 6/3/90 au point 1 dans le ravin des Agauches.



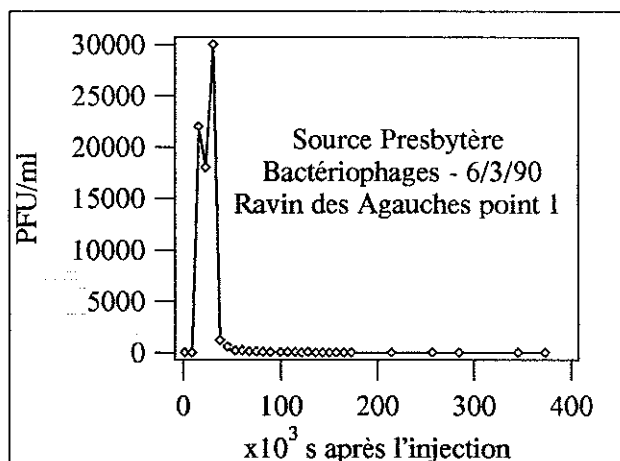
**Fig. 2.15 :** Courbe de restitution à la source Duchesse des microsphères injectées le 7/1/91 au point 2 dans le ravin des Agauches.



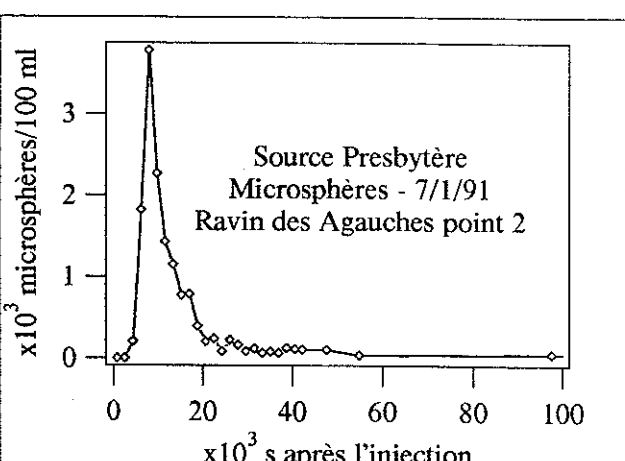
**Fig. 2.16 :** Courbe de restitution à la source Duchesse du lithium injecté le 7/1/91 au point 1 dans le ravin des Agauches.



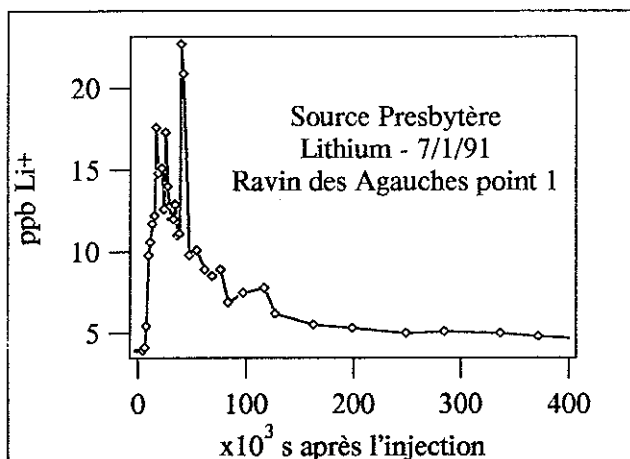
**Fig. 2.17 :** Courbe de restitution à la source Duchesse de l'uranine injectée le 7/1/91 au point 3 dans le ravin des Agauches.



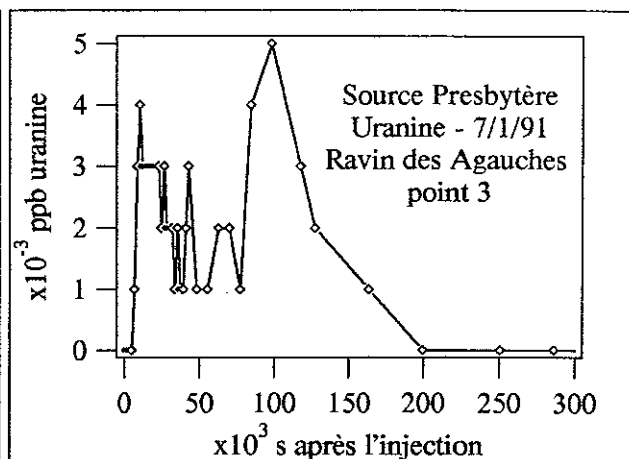
**Fig. 2.18 :** Courbe de restitution à la source Presbytère des bactériophages injectés le 6/3/90 au point 1 dans le ravin des Agauches.



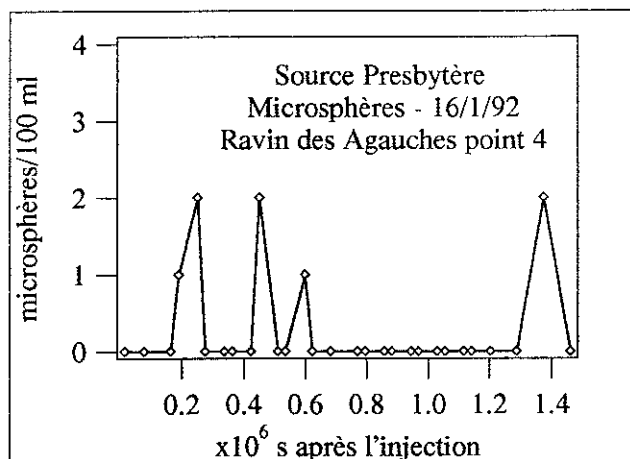
**Fig. 2.19 :** Courbe de restitution à la source Presbytère des microsphères injectées le 7/1/91 au point 2 dans le ravin des Agauches.



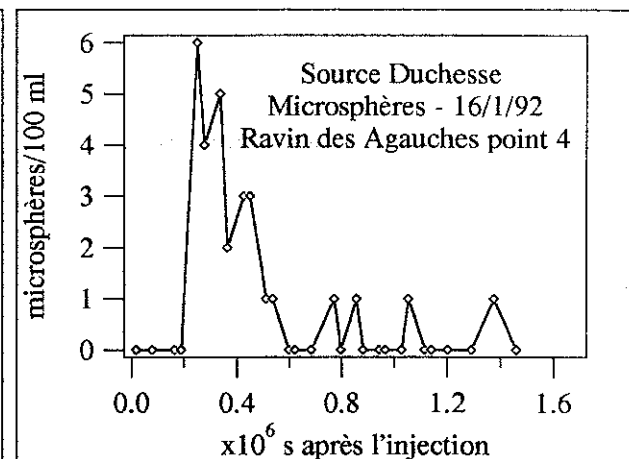
**Fig. 2.20** : Courbe de restitution à la source Presbytère du lithium injecté le 7/1/91 au point 1 dans le ravin des Agauches.



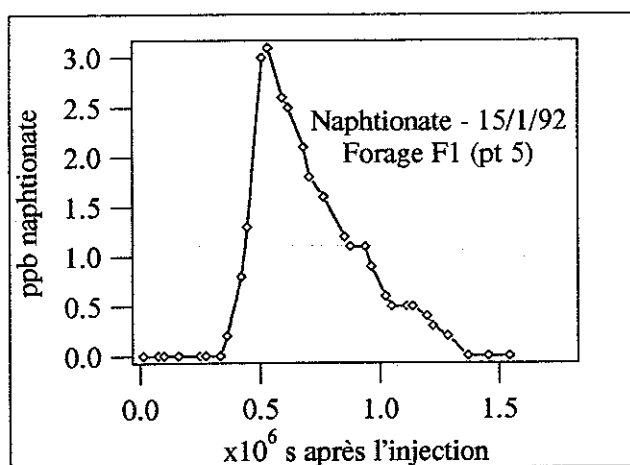
**Fig. 2.21** : Courbe de restitution à la source Presbytère de l'uranine injectée le 7/1/91 au point 3 dans le ravin des Agauches.



**Fig. 2.22** : Courbe de restitution à la source Duchesse des microsphères injectées le 16/1/92 en tête du ravin des Agauches.



**Fig. 2.23** : Courbe de restitution à la source Presbytère des microsphères injectées le 16/1/92 en tête du ravin des Agauches.



**Fig. 2.24** : Courbe de restitution dans la rivière Breujette, en aval de la résurgence, du naphthionate injecté le 15/1/92 dans le forage F1.



Point d'injection	Lieu de réapparition	Distance	Traceur
rivière Breujette en amont de l'autoroute (pt 8)	résurgence Breujette	1300 m	NaCl, bactériophages
rivière Breujette en amont de l'autoroute (pt 8)	Breujette II	1450 m	bactériophages
rivière Breujette en amont du chanoir (pt 9)	résurgence Breujette	700 m	bactériophages
rivière Breujette en amont du chanoir (pt 9)	Breujette II	850 m	bactériophages
perte de Gozée ou ruisseau de Vincon (pts 6 et 7)	résurgence Breujette	2550 m	bactériophages
perte de Gozée ou ruisseau de Vincon (pts 6 et 7)	Breujette II	2700 m	bactériophages
ravin des Agauches au point 1	Duchesse	200 m	bactériophages, LiCl
ravin des Agauches au point 1	Presbytère	175 m	bactériophages, LiCl
ravin des Agauches au point 2	Duchesse	185 m	microsphères
ravin des Agauches au point 2	Presbytère	160 m	microsphères
ravin des Agauches au point 3	Duchesse	180 m	uranine
ravin des Agauches au point 3	Presbytère	155 m	uranine
ravin des Agauches au point 4	Duchesse	500 m	microsphères
ravin des Agauches au point 4	Presbytère	500 m	microsphères
forage F1 (pt 5)	résurgence Breujette	900 m	naphionate

Tab. 2.8 : Synthèse des relations mises en évidence par les traçages sur le site de Spontin.

Les paramètres caractérisant les courbes de restitution sont rassemblés dans le tableau suivant :

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
Agauches pt 1/Duchesse	200	bactériophages	$3.63.10^{13}$	4.5	327.0	43.0	33.3	44.9	1.00
Agauches pt 1/Presbytère	175	bactériophages	$3.63.10^{13}$	4.5	286.0	20.0	23.0	27.4	6.70
Agauches pt 1/Duchesse	200	Li	500	4.5	160.0	53.0	4.9	17.5	8.00
Agauches pt 1/Presbytère	175	Li	500	4.5	100.0	37.0	4.1	12.0	1.10
Agauches pt 2/Duchesse	185	microsphères	$4.55.10^{11}$	4.5	247.0	53.0	6.4	11.5	0.08
Agauches pt 2/Presbytère	160	microsphères	$4.55.10^{11}$	4.5	128.0	71.0	7.0	41.3	0.35
Agauches pt 3/Duchesse	180	uranine	2	4.5	196.0	94.0	52.3	70.3	0.10
Agauches pt 3/Presbytère	155	uranine	2	4.5	81.0	53.0	6.4	11.5	0.35
Agauches pt 4/Duchesse	500	microsphères	$4.55.10^{11}$	4.5	7.1	7.1	3.8	4.9	0.01
Agauches pt 4/Presbytère	500	microsphères	$4.55.10^{11}$	4.5	9.4	7.1	2.3	4.0	0.00
Forage F1/Breujette	900	naphionate	4925	11.0	9.0	6.1	4.6	5.0	0.27

Tab. 2.9 : Caractéristiques des courbes de restitution des traçages sur le site de Spontin.

D = distance en m M = masse injectée en g, nombre de microsphères, ou nombre de PFU (plaques formant unité pour les bactériophages) Q = débit approximatif au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

Les taux de restitution restent très faibles, ne dépassant jamais 10 % et même rarement 1 %.

Dans le cas du naphthionate en provenance du forage F1, le taux de restitution aussi faible (0,27 %) peut être attribué au piégeage d'une partie du traceur à proximité du point d'injection, au passage sur les schistes du Tn1a (adsorption), ou encore à la traversée de la zone non saturée.

Dans le cas des injections aux points 1, 2, 3 et 4 (ravin des Agauches), le déficit provient essentiellement du fait qu'une partie du traceur a été évacuée en surface via le canal destiné à reprendre les ruissellements. La forte dilution observée aux émergences malgré la distance courte et le débit faible est la conséquence de ce "court-circuitage" en surface. La rétention dans le sol et dans la zone non saturée peuvent aussi avoir joué un rôle. On notera que le débit d'entraînement était particulièrement faible et que son maintien durant un intervalle de temps trop court a dû favoriser l'irréversibilité de la rétention.

Les vitesses correspondant aux premières arrivées ( $V_{max}$ ) atteignent environ 300 m/h dans le cas des injections dans le ravin des Agauches. Elles indiquent une circulation rapide au travers de chenaux karstiques.

Les vitesses correspondant au pics ( $V_m$ ), c'est-à-dire les vitesses les plus probables, sont comprises entre 20 et 196 m/h.

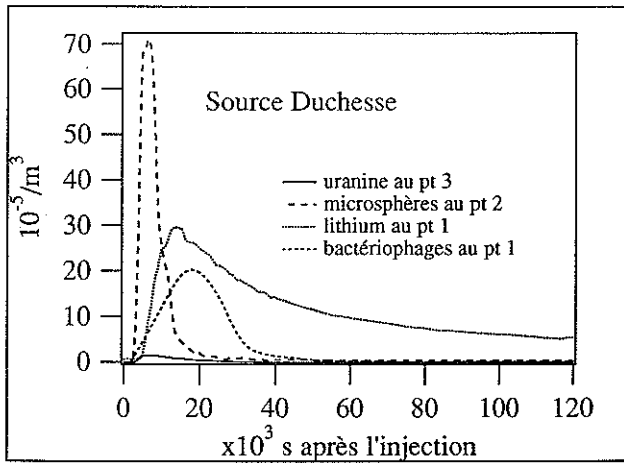
Au point 4, les vitesses sont inférieures à 10 m/h, sans doute en raison du passage au travers d'une plus grande épaisseur de zone non saturée (taux de restitution quasi nul pour les microsphères) et en raison de l'absence d'un écoulement permanent.

La comparaison des courbes de restitution en concentrations normées à Duchesse et Presbytère (fig. 2.25 et 2.26) permet de mieux se rendre compte des différences de comportement en fonction des points d'infiltration et des différents traceurs.

A la source Duchesse, le pic est atteint nettement plus tôt pour les microsphères et l'uranine ( $V_m = 106$  et  $94$  m/h) que pour le lithium et les bactériophages ( $V_m = 53$  et  $43$  m/h). Un comportement semblable est observé à la source Presbytère. Cela indique une infiltration plus directe à partir des points 2 et 3. On notera cependant que, pour la raison exposée un peu plus haut (court-circuitage par le canal), la restitution de l'uranine injectée dans le canal est plus faible que celle des microsphères injectées quelques mètres en amont de l'entrée du canal.

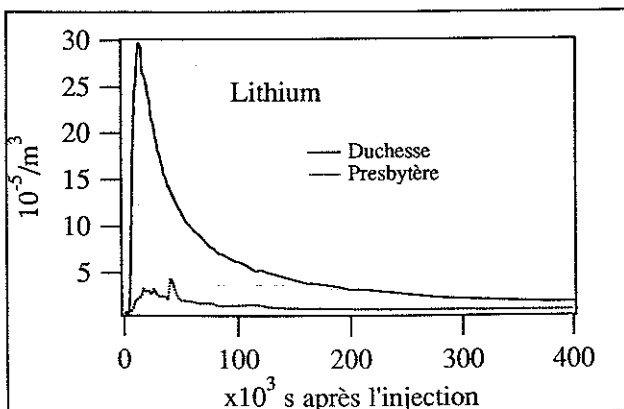
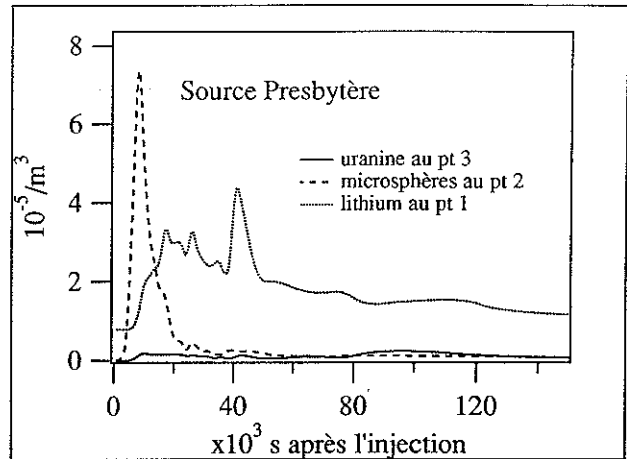
Les restitutions du lithium et des bactériophages sont également plus étalées. Les vitesses moyennes de transit ( $V_{moy}$ ), par exemple, sont environ cinq fois plus élevées pour les microsphères (et l'uranine) que pour le lithium (18 m/h). Ce retard au point 1 serait dû, selon nous, au passage plus long et plus tortueux au travers du bed-rock altéré, favorisant l'adsorption. Il peut aussi s'expliquer par des infiltrations diffuses (entrées multiples) sur le trajet entre le point 1 et le point 2.

La courbe du lithium présente une queue nettement plus prononcée que dans le cas des bactériophages injectés au même point (pt 1). Cela semble indiquer que l'adsorption du lithium est un phénomène plus réversible que la fixation des bactériophages.



**Fig. 2.25 :** Courbes de restitution à la source Duchesse, normées par rapport à la masse injectée, pour les traçages aux points 1, 2 et 3 dans le ravin des Agauches.

**Fig. 2.26 :** Courbes de restitution à la source Presbytère, normées par rapport à la masse injectée, pour les traçages aux points 1, 2 et 3 dans le ravin des Agauches.



**Fig. 2.27 :** Courbes de restitution aux sources Duchesse et Presbytère, normées par rapport à la masse injectée, pour le traçage au lithium à partir du point 1 dans le ravin des Agauches.

Ce phénomène dépend bien entendu de la manière dont l'élution est effectuée. Celle-ci peut en effet avoir été différente dans les deux cas, les traçages n'ayant pas eu lieu dans des conditions de débit semblables.

La fig. 2.27, concernant le lithium, montre que la proportion d'infiltrations rapides à la source Duchesse est environ sept fois plus élevée qu'à la source Presbytère, ce qui confirme la moins grande vulnérabilité de cette dernière.

### 2.5.1.3. TRAÇAGES SUR LE SITE DE FAIROULE

#### 2.5.1.3.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site de Fairoule se trouve sur le territoire de la commune de Walcourt, à environ 25 km au Sud de la ville de Charleroi (fig. 3).

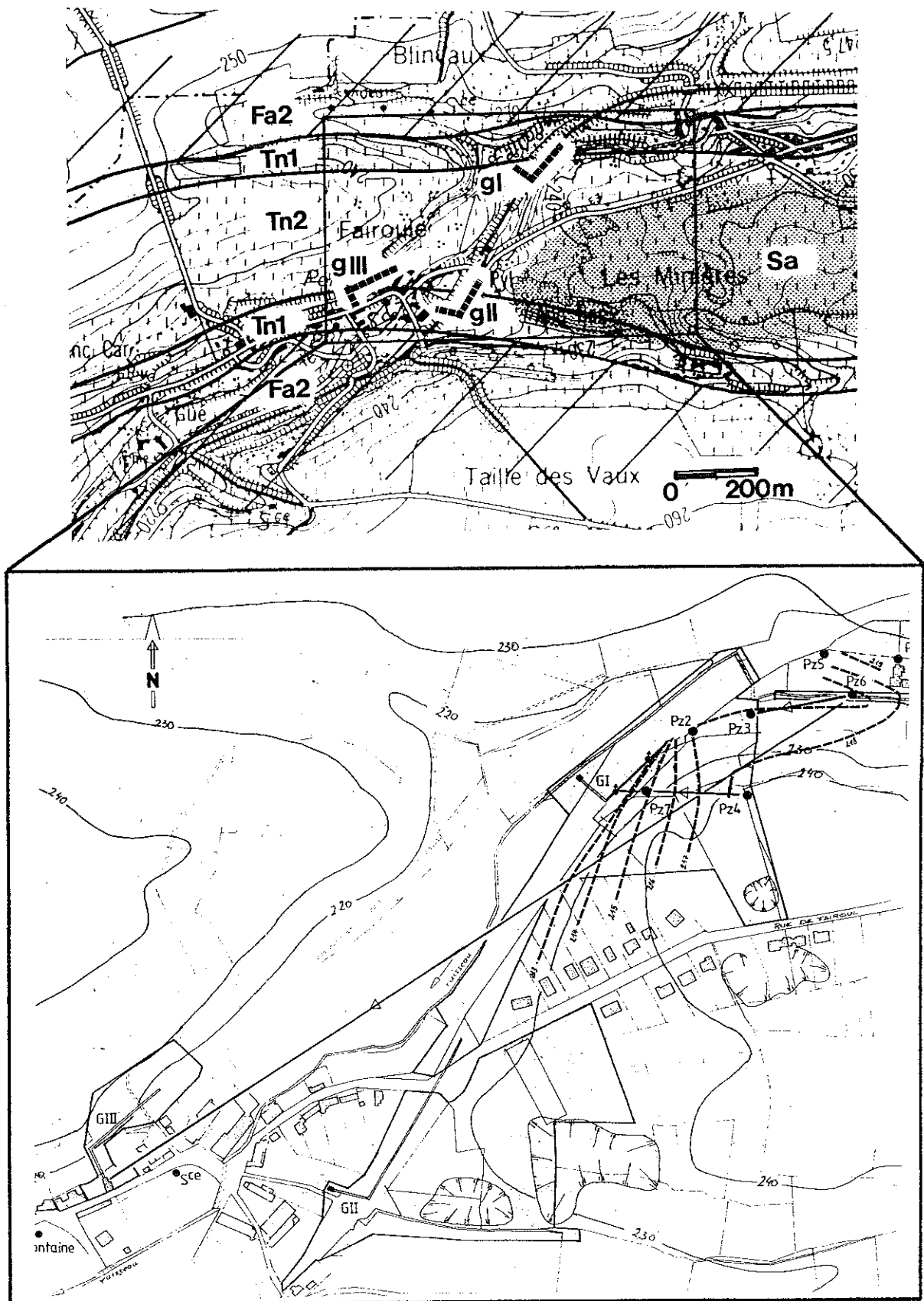
Ce site de captage est doté de 3 galeries drainantes (GI, GII et GIII) dans les calcaires du Tournaisien (fig. 2.28), le long du ruisseau de Fairoule. Les calcaires font partie d'une bande synclinale étroite située sur la bordure Ouest du synclinorium de Dinant. L'aquifère calcaire est limité par les formations schisto-gréseuses du Famennien formant les crêtes du bassin hydrologique en même temps que le mur imperméable de l'aquifère. Les calcaires du Viséen ne sont pas représentés dans la région. De nombreux placages de sables et d'argiles tertiaires peuvent jouer le rôle de réserves épikarstiques dans le premier cas et de couvertures protectrices dans le second cas.

Le débit des trois galeries réunies atteint 145 m<sup>3</sup>/h. La nappe s'écoule vers l'Ouest en direction de l'Eau d'Heure.

Suite à un accident impliquant des hydrocarbures survenu en 1988 à proximité de la galerie GI (fuite de kérozène à partir d'un pipe-line), six piézomètres ont été forés afin de mieux connaître les risques de pollution des captages.

La situation piézométrique locale pour la période de mars 1990 est représentée à la fig. 2.28. Un axe de circulation préférentielle se distingue assez nettement. Il est parallèle au lit du ruisseau (canalisé à cet endroit) et passe par le Pz6. Les circulations ont lieu principalement suivant la direction des bancs. On remarquera également la situation piézométrique du Pz4, sur une espèce de "promontoire".

L'hétérogénéité des calcaires est telle que les valeurs de perméabilités déterminées par les pompages d'essai varient entre 6.10<sup>-7</sup> et 1.10<sup>-4</sup> m/s.



**Fig. 2.28 :** Situation des traçages et relations mises en évidence sur le site de Fairoules. gI, gII, gIII (ou GI, GII, GIII) = galeries de captage Pz2 à Pz7 = piézomètres trait discontinu = piézométrie 3/90 Géologie : Tn2 = Tournaisien supérieur Tn1 = Tournaisien inférieur Fa2 = Famennien supérieur Sa = sables tertiaires.

### 2.5.1.3.2. Mise en oeuvre des traçages

Le piézomètre Pz6 est situé sur un axe de drainage. Sa transmissivité est relativement élevée ( $1.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ), malgré l'abondance des bancs schisteux (formation d'Hastière : Tn1b). La nappe est localement captive (coefficient d'emmagasinement =  $1.10^{-4}$ ) sous une épaisse couverture de terrains meubles (argiles et schistes altérés). Le niveau piézométrique est situé environ 4 m plus haut que la venue d'eau principale de la galerie GI (à 213 m d'altitude).

Au piézomètre Pz4, la nappe, libre à cet endroit, occupe les formations calcaires du Tn2b et du Tn2c. Elle est 5,5 m au-dessus du niveau d'eau de la galerie GI. La transmissivité est plus faible ( $< 7.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Les traceurs utilisés sont l'uranine, les microsphères fluorescentes et le naphthionate. Aux concentrations auxquelles ils ont été retrouvés, ils ne sont ni visibles, ni toxiques et ils restent facilement identifiables sans interférer entre eux.

Les caractéristiques des injections, réalisées le 4 février 1991, se trouvent dans le tab. 2.10.

Piézomètre d'injection	Altitude de la nappe (m)	Niveau stratigraphique	Traceur	Quantité	Chasse
Pz6	217	Tn1b	uranine	150 g	18 m <sup>3</sup>
Pz6	217	Tn1b	microsphères	$4,55.10^{11}$	18 m <sup>3</sup>
Pz4	218,5	Tn2	naphthionate	3000 g	-

**Tab. 2.10** : Caractéristiques des injections dans les piézomètres sur le site de Fairoule.

Afin de "chasser" l'uranine et les microsphères dans l'aquifère, un pompage dans le Pz5 a permis d'injecter un débit d'eau claire de  $3 \text{ m}^3/\text{h}^1$  durant 6 heures dans le Pz6.

Au Pz4, aucune chasse d'eau n'a pu être effectuée. Elle aurait sans doute eu pour effet de disperser le traceur dans toutes les directions étant donné la faible perméabilité du forage.

Des échantillonneurs automatiques étaient placés dans les galeries alors que, pour les piézomètres (Pz2, Pz3 et Pz7), les prélèvements étaient assurés par des pompes d'environ une heure au débit maximum possible.

<sup>1</sup>Débit maximum admissible sans inverser le gradient entre Pz5 et Pz6.

### 2.5.1.3.3. Résultats des traçages

Les caractéristiques des principales relations mises en évidence sont reprises dans le tab. 2.11.

Traceur	Piézomètre d'injection	Lieu de réapparition	Distance (m)	Gradient naturel apparent (%)	Vitesse maximale (m/h)
uranine, microsphères	Pz6	Pz3	88	-0,3	> 3,5
uranine	Pz6	GIII	760	1	32
naphtionate	Pz4	Pz7	88	4	1,2
naphtionate	Pz4	GI	95	6	1,6

Tab. 2.11 : Synthèse des relations mises en évidence sur le site de Fairoule.

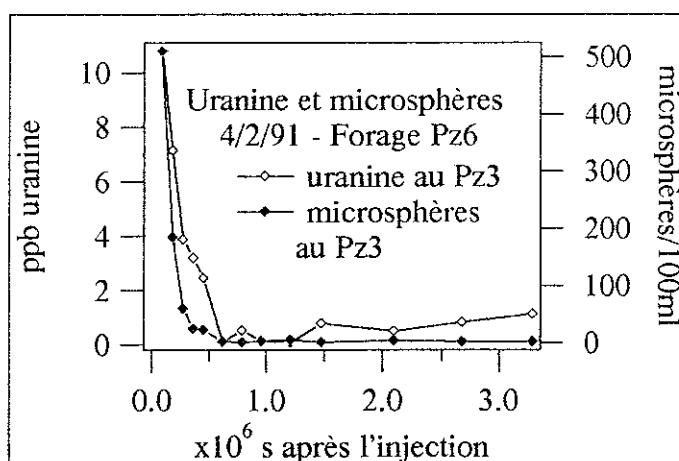


Fig. 2.29 : Courbes de restitution au forage Pz3 de l'uranine et des microsphères injectées dans le forage Pz6 le 4/2/91.

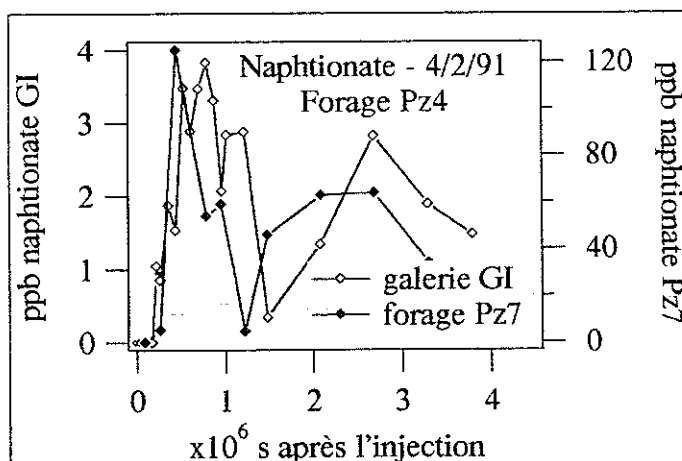


Fig. 2.30 : Courbes de restitution dans la galerie GI et dans le forage Pz7 du naphtionate injecté dans le forage Pz4 le 4/2/91.

L'uranine et les microsphères ont été détectées au Pz3 dès le lendemain de l'injection. La transmissivité du Pz3 est du même ordre de grandeur que celle du Pz6 ( $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ). En conditions normales, le niveau de la nappe au Pz3 est supérieur de quelques dizaines de centimètres à celui du Pz6. Les pompages destinés aux prélèvements ont eu pour effet d'inverser temporairement le gradient, capturant ainsi les traceurs circulant à proximité, le long de fissures plus perméables. Le phénomène est semblable à celui observé lors du traçage entre la perte de Crossée et le piézomètre P14 (§ 1.7.8.2.1.). Il est clair qu'à l'échelle du site (moins de 100 m), l'anisotropie et l'hétérogénéité de la fissuration (orientation, continuité, ouverture des fissures) influencent largement la communication hydraulique entre les forages.

L'évolution des teneurs au Pz3 (fig. 2.29) indique que la vague principale de traceur avait déjà migré vers l'aval lors du premier prélèvement. L'arrivée rapide de l'uranine (24 heures, soit une vitesse de 32 m/h) à la galerie GIII en est une preuve supplémentaire. Dans cette galerie, le traceur n'a toutefois été détecté que sous forme de traces. Elle est située sur le flanc opposé du synclinal par rapport au point d'injection et à deux reprises les circulations doivent traverser les schistes du Pont d'Arcole (Tn2a épais d'environ 15 m) pour y parvenir. Une zone faillée importante à hauteur de Fairoule permettrait d'expliquer le passage au travers des schistes.

L'uranine a également été retrouvée en traces dans la galerie GI après une semaine. Il s'agirait d'une diffusion, indépendante de la direction du gradient, au travers du milieu fissuré.

Des traces ont été observées au Pz2. Elles proviendraient de la réinfiltration de l'eau pompée au Pz3.

Les microsphères n'ont été retrouvées ni dans la galerie GI, ni dans la galerie GIII. Cela est la preuve que la diffusion à travers le réseau de fines fissures est le processus principal permettant l'arrivée de l'uranine dans les deux galeries.

Après 5 jours, le naphthionate a été détecté dans le piézomètre Pz7, ainsi qu'avec des teneurs nettement plus faibles dans la galerie GI (fig. 2.30).

Les vitesses de passage sont moins élevées (1,6 m/h en direction de GI) et les restitutions plus étalées que dans le cas de l'injection au Pz6. Elles témoignent de circulations au travers de blocs fissurés, peu ou pas karstifiés. L'étalement des courbes de restitution peut aussi être dû pour une grande part à la perméabilité très faible au point d'injection.

La courbe correspondant à la galerie GI présente un retard de quelques jours par rapport à celle correspondant au Pz7. On peut attribuer ce retard au fait que le Pz7 se trouve sur le trajet des fissures joignant le piézomètre d'injection à la galerie de captage. La venue d'eau principale de la galerie est cependant située plus en amont par rapport aux fissures contaminées (fig. 2.28). Elle causerait la dilution permettant d'expliquer les faibles teneurs observées à la sortie de la galerie (jusqu'à 30 fois moindres qu'au Pz7).

L'arrivée du naphthionate en deux vagues successives atteste de l'hétérogénéité du milieu, plusieurs trajets étant possibles au départ du point d'injection.

Un traçage entre le Pz7 et GI permettrait de mieux connaître les relations entre ce piézomètre et les venues d'eau dans la galerie.



Le tab. 2.12 reprend les paramètres caractéristiques des courbes de restitution.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
Pz4 / GI	95	naphthionate	3000	11	1.6	0.4	0.2	0.3	2.700
Pz4 / Pz7	88	naphthionate	3000	-	1.2	0.7	-	-	-
Pz6 / Pz3	88	uranine	150	-	-	3.5	-	-	-
Pz6 / Pz3	88	microsphères	4.55x10E11	-	-	3.5	-	-	-

**Tab. 2.12** : Caractéristiques des courbes de restitution des traçages sur le site de Fairoule.

D = distance en m M = masse injectée en g ou nombre de microsphères Q = débit approximatif au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

La galerie GI (40 m<sup>3</sup>/h) est le seul endroit où le flux (et donc le bilan) a pu être calculé. Le taux de restitution de seulement 2,7 % est sans doute dû au piégeage d'une grande partie du naphthionate autour du piézomètre d'injection.

## 2.5.1.4. TRAÇAGES SUR LE SITE DE MONT-SUR-MARCHIENNE

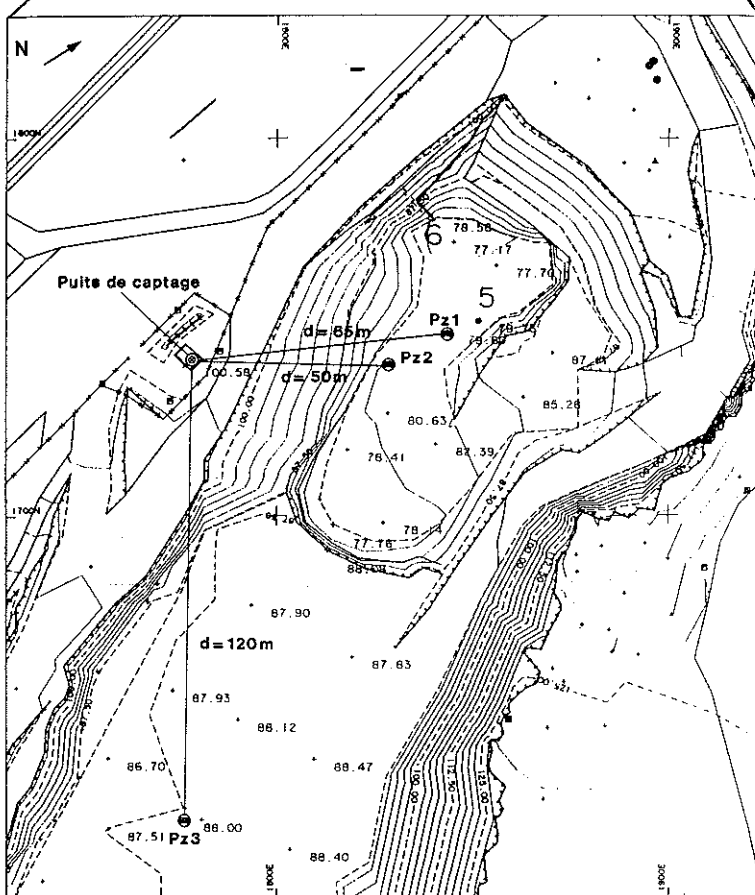
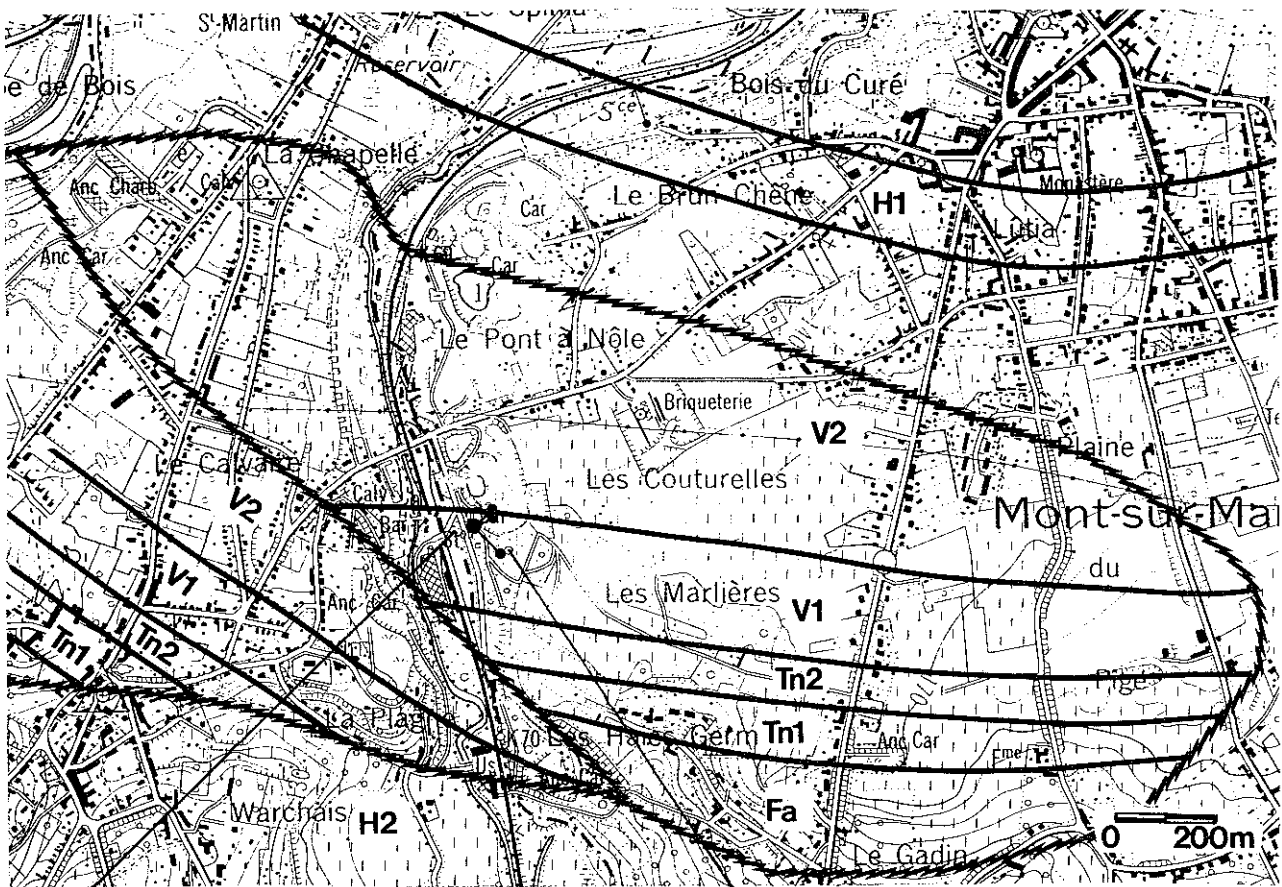
### 2.5.1.4.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site de Mont-sur-Marchienne (fig. 3) est, comme le précédent, situé dans le bassin de l'Eau d'Heure, au Sud de Charleroi.

Les calcaires (Tournaisien et Viséen, fig. 2.31) appartiennent au massif de la Tombe, un lambeau de charriage coincé entre la faille du Midi au Sud et la faille de la Tombe au Nord. Ils sont fortement tectonisés et forment des plis très serrés, voire déversés, séparés par une série de failles longitudinales très redressées. La direction générale des bancs est N65°W et ceux-ci inclinent vers le Sud avec un pendage très redressé.

Un puits de captage se trouve en bordure de la carrière Dupuis. Celle-ci exploite les calcaires viséens (fig. 2.31). Profond de 65 m, le puits recoupe, sous les calcaires du V2b en position renversée, la Grande Brèche viséenne (calcaires du V3a) aquifère.

Trois piézomètres (fig. 2.31) ont été creusés à 65 m (PZ1), 50 m (PZ2) et 120 m (PZ3), afin d'étudier l'influence de la carrière sur le captage.



**Fig. 2.31** : Situation géologique et localisation des traçages à Mont-sur-Marchienne.

H1, H2 = Houiller V2 = Viséen supérieur V1 = Viséen inférieur Tn2 = Tournaisien supérieur Tn1 = Tournaisien inférieur Fa = Famennien.

Les hauteurs piézométriques, avec et sans pompage, sont les suivantes :

	Puits	PZ1	PZ2	PZ3
altitude statique de la nappe (octobre 1991)	86,46	86,94	86,78	90,38
altitude dynamique de la nappe Q = 125 m <sup>3</sup> /h (décembre 1991)	81,38	83,49	83,90	90,00

L'application de la formule de Thiem entre les piézomètres PZ1 et PZ2 fournit une valeur de perméabilité de  $8,4 \cdot 10^{-5}$  m/s.

#### 2.5.1.4.2. Mise en oeuvre des traçages

L'expérience de traçage s'est déroulée le 16 décembre 1991, en écoulement radial convergent (Q = 125 m<sup>3</sup>/h). Un traceur différent a été injecté dans chaque piézomètre.

Les injections, à la surface de la nappe, ont été suffisamment brèves pour être considérées comme des impulsions de Dirac. Elles ont eu lieu en moins d'une heure. Les caractéristiques sont reprises dans le tab. 2.13.

Piézomètre d'injection	Gradient moyen vers le puits de pompage (%)	Distance au puits de pompage (m)	Traceur	Quantité	Chasse
PZ2	5,0	50	LiCl	2142 g	270 l
PZ1	4,1	65	microsphères	$4,55 \cdot 10^{11}$	270 l
PZ3	7,2	120	uranine	250 g	360 l

**Tab. 2.13** : Caractéristiques des injections de traceurs dans les piézomètres sur le site de Mont-sur-Marchienne.

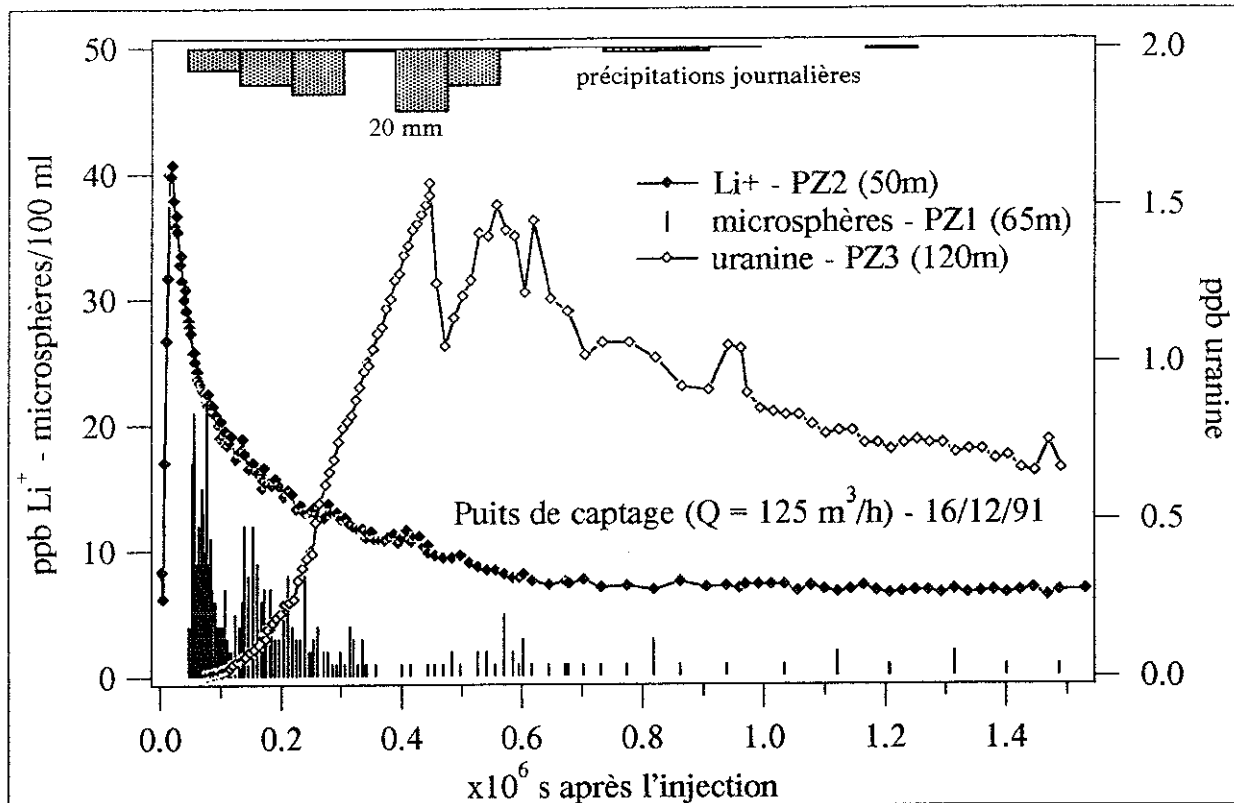
Dès le début des injections, deux échantillonneurs automatiques ont permis de récolter l'eau à la sortie du puits de pompage. La chloration avait été interrompue au préalable. Les prélèvements ont duré jusqu'au 31 janvier 1992, soit une période d'un mois et demi.

Entre le 19 et le 23 décembre, le débit de pompage a été temporairement abaissé de 125 à 110 m<sup>3</sup>/h. Ce changement a toutefois très peu perturbé la stationnarité de l'expérience en comparaison des variations importantes provoquées par les crues.

### 2.5.1.4.3. Résultats des traçages

Au vu des rabattements, les trois piézomètres se trouvent dans le cône d'influence du pompage. L'arrivée des trois traceurs au puits de captage montre que ces piézomètres se trouvent également dans le cône d'appel du pompage.

Les courbes de restitution sont présentées à la fig. 2.32 et leurs caractéristiques sont rassemblées dans le tab. 2.14.



**Fig. 2.32 :** Courbes de restitution au puits de captage du lithium, des microsphères et de l'uranine injectés respectivement dans les forages PZ2, PZ1 et PZ3, le 16/12/91, à Mont-sur-Marchienne. Le débit de pompage était de  $125 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
PZ2 / puits	50	lithium	357	34.7	26.0	9.2	0.2	1.9	66.000
PZ3 / puits	120	uranine	250	34.7	4.9	1.0	0.2	0.4	38.000
PZ1 / puits	65	microsphères	$4.55 \times 10^{11}$	34.7	4.9	4.3	0.4	1.1	0.227

**Tab. 2.14 :** Caractéristiques des courbes de restitution des traçages sur le site de Mont-sur-Marchienne.

D = distance en m M = masse injectée en g ou nombre de microsphères Q = débit approximatif au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

Le lithium a été détecté dans l'eau du puits deux heures après l'injection. Cette arrivée qui correspond à une vitesse maximale de 26 m/h. Une vitesse aussi élevée ne peut s'expliquer que par le passage au travers de fissures élargies par la karstification.

Le temps de passage est plus long dans le cas des microsphères (13 heures et 10 minutes). Il correspond à une vitesse maximale de 4,93 m/h, plus typique d'un réseau de microfissures.

En ce qui concerne l'uranine injectée au PZ3, les premières traces sont détectées après 24 heures. La vitesse maximale est de 4,88 m/h.

Les vitesses maximales sont difficilement comparables d'un piézomètre à l'autre, en raison d'une série de facteurs parmi lesquels on distingue :

- la distance au puits de pompage (le gradient, et par conséquent la vitesse, croît en direction du puits de pompage),
- la vitesse avec laquelle le traceur quitte le forage (principalement par diffusion),
- la vitesse avec laquelle le traceur se disperse autour du point d'injection et atteint les conduits plus perméables (conduits karstiques),
- la continuité et l'orientation de ces conduits par rapport au gradient provoqué en direction du puits de pompage,
- la dispersion longitudinale durant le parcours dans les conduits plus perméables.

Les vitesses modales varient aussi en fonction de la distance mais elles sont, quant à elles, plus représentatives de l'écoulement et de la dispersion à travers le massif pris dans son ensemble puisqu'elles correspondent à la probabilité maximum de séjour du traceur.

La vitesse modale des microsphères est environ 4 fois plus élevée (4,28 m/h contre 0,97 m/h) que celle de l'uranine alors que leurs vitesses maximales sont comparables. Elle est double (9,23 m/h) dans le cas du lithium, confirmant l'hypothèse de fissures plus perméables entre PZ2 et le puits.

Les taux de restitution de 66, 38 et 0,23 %, respectivement pour le lithium, l'uranine et les microsphères, sont faibles pour un test en écoulement radial convergent. Une grande partie des traceurs a sans doute été piégée dans l'eau immobile, particulièrement dans le cas des microsphères, dont la fixation et le piégeage par filtration sont plus probables en raison de la taille (1  $\mu\text{m}$ ). En ce qui concerne l'uranine injectée à une distance de 120 m, la diffusion en dehors du cône d'appel du pompage n'est pas à exclure.

La reprise de la chloration (hypochlorite de soude) dans le puits n'a plus permis (oxydation) de doser l'uranine à partir du 3 janvier. Le temps moyen de séjour et le temps harmonique ne tiennent pas compte de cette partie manquante de la courbe de restitution. Ils ont par conséquent été sous-estimés. Le taux de restitution a, quant à lui, été calculé après extrapolation de la fin de la courbe.

Les formes des courbes de restitution ne pourront être discutées en toute rigueur que sur base des paramètres hydrodispersifs (§ 2.6.2.) car ces paramètres sont en principe indépendants de la distance au puits de pompage <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>A condition que le milieu soit homogène.

Les irrégularités observées sur la courbe de restitution de l'uranine sont dues aux crues qui se sont succédées durant le mois de décembre, principalement la crue du 21.

## 2.5.1.5. TRAÇAGES SUR LE SITE DE WALHORN

### 2.5.1.5.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site de Walhorn se trouve à l'Est de la Belgique (fig. 3), au Nord de la ville d'Eupen, non loin de la frontière allemande, à la limite entre les bassins de la Vesdre et de la Gueule.

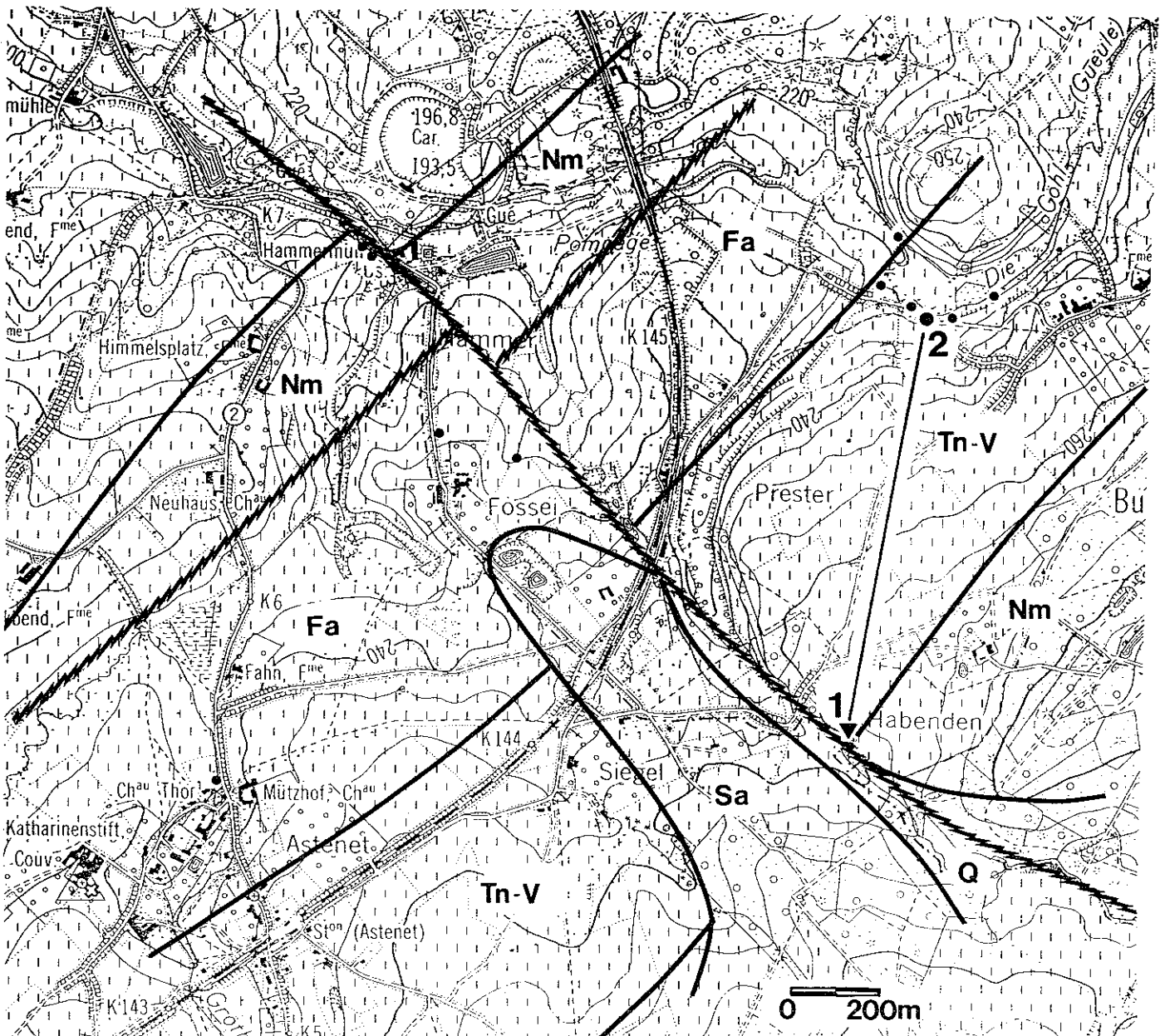
Géologiquement, la région appartient au synclinorium de la Vesdre, prolongement vers l'Est de celui de Dinant. Elle consiste (fig. 2.33) en une alternance d'écaillés de terrains appartenant au Dévonien supérieur (Famennien), au Carbonifère inférieur (Tournaisien, Viséen) et au Carbonifère supérieur (Namurien), séparées par plusieurs failles de charriage de direction NE-SW mettant en contact le Namurien et le Famennien. Des dépôts de sables appartenant au Crétacé et des loess quaternaires recouvrent par endroits les plateaux.

Quelques phénomènes karstiques affectent les calcaires du Tournaisien et du Viséen. Ils sont cependant rares en raison, d'une part du morcellement tectonique de la région, et d'autre part de l'importance des recouvrements meubles. Le "chanoir de Walhorn" (ou chanoir de Habenden) absorbe les eaux d'un petit ruisseau en provenance des grès et des schistes du Namurien situés au Sud, dès son entrée sur les calcaires viséens, à hauteur d'une importante faille transversale s'étendant au Nord jusque Hergenrath. Le niveau de base des circulations est constitué par la Gueule (die Göhl), recoupant obliquement les structures d'Ouest en Est.

Plusieurs sources jalonnent le cours de cette rivière. Les principaux exutoires se trouvent à hauteur de la faille précitée. Des minerais de Pb-Zn ont été exploités le long de cette faille (mine de Fosse) et les travaux d'exhaure ont eu pour conséquence le déplacement de certaines sources.

Un traçage au chanoir de Walhorn a été réalisé précédemment par TOUSSAINT (1974). Les résultats obtenus sont cependant douteux pour les raisons suivantes :

- la seule méthode utilisée pour mettre en évidence la fluorescéine a été celle des "fluocapteurs au charbon actif" sans aucun contrôle par analyse fluorimétrique. Il est bien connu - et notre propre expérience le confirme - que le charbon actif est susceptible d'accumuler des substances - naturelles ou non - donnant aux extraits une teinte jaunâtre que certaines personnes non averties risquent d'interpréter comme étant la fluorescéine recherchée. Ce phénomène est d'autant plus gênant que les eaux sont polluées (tous les points d'eau surveillés ici sont des eaux de surface à l'exception d'une source, seul point qui se soit révélé négatif!) et que la durée d'immersion des charbons est longue (les "blancs", immergés moins longtemps, ne peuvent ici être comparés aux autres capteurs, dont la durée d'immersion a dépassé plusieurs jours dans la plupart des cas). Les inconvénients de la méthode des charbons actifs ont été démontrés par COUTURAUD et PUIG (1992).



**Fig. 2.33 :** Situation géologique et localisation du traçage de Walhorn. Les ronds noirs indiquent les points de surveillance. 1 = chantoir de Walhorn 2 = source n°3 dans la Gueule Nm = Namurien Tn-V = Tournaisien-Viséen Fa = Famennien Sa = sables du Crétacé inférieur Q = limons quaternaires.

Nous reprenons ici la note de la rédaction de *Karstologia* faisant suite à leur article : " Une fois de plus, une analyse sérieuse de plusieurs opérations de traçage met en évidence le peu de fiabilité des résultats obtenus en utilisant des fluocapteurs. Seules les mesures au spectrofluorimètre apportent des résultats quantifiés qui peuvent permettre une bien meilleure approche du fonctionnement d'un aquifère karstique. Des comparaisons, tant sur les différentes vitesses, que sur les flux peuvent être faites avec profit. Une opération de traçage est quelque chose de lourd à mettre en oeuvre et d'onéreux. Les fluocapteurs n'apportent pas d'éléments suffisamment fiables pour justifier les économies qu'ils peuvent permettre";

- le traceur a été retrouvé, avec cette méthode, en la quasi totalité des points d'eau et durant toute la période du traçage! Par contre, dans le cas du seul test ayant donné des résultats positifs par la suite (voir ci-dessous), avec une quantité de traceur 30 fois plus importante, une seule source - qui n'avait même pas été surveillée au cours des traçages précédents - a montré des traces de fluorescéine lors de l'analyse au fluorimètre.

### 2.5.1.5.2. Mise en oeuvre des traçages

Notre premier test de traçage au chantoir de Walhorn a eu lieu le 27 juin 1991, avec 300 g d'uranine. Ce test n'a donné aucun résultat positif.

Un nouveau test a alors été réalisé, avec un plus grand nombre de points surveillés et une plus grande quantité de traceur (3000 g), le 9 avril 1992.

Les caractéristiques des injections se trouvent dans le tab. 2.15.

Date	Point d'injection	Niveau stratig.	Traceur	Quantité	Débit
27/6/91	chantoir de Walhorn	V	uranine	300 g	< 5 l/s
9/4/92	chantoir de Walhorn	V	uranine	3000 g	< 5 l/s

**Tab. 2.15** : Caractéristiques des injections au chantoir de Walhorn.

Les points surveillés (fig. 2.33) comprenaient toutes les sources et ruisseaux situés le long de la Gueule et de ses affluents, au Nord, à l'Est et à l'Ouest de la bande calcaire, ainsi que les puissantes émergences situées au centre du village de Walhorn.

### 2.5.1.5.3. Résultats des traçages

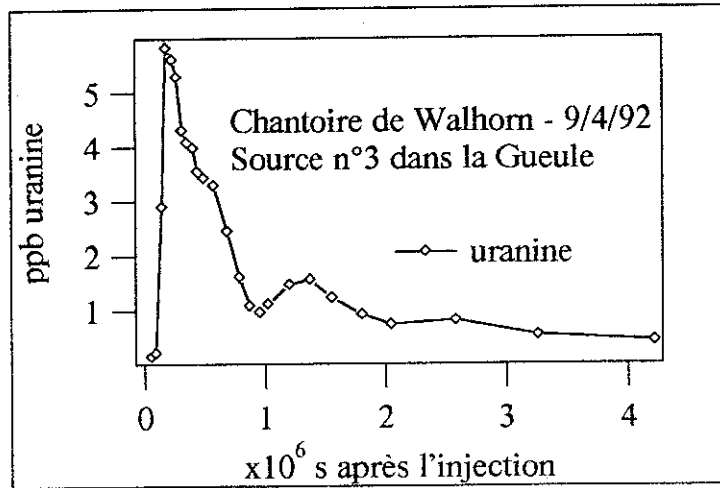
Contrairement à ce qu'on pouvait supposer, l'uranine n'est jamais réapparue à aucune des grosses sources jaillissant le long de la faille (galerie d'exhaure de la mine de Fossei). Les circulations ne traversent donc pas, à la faveur de cet accident tectonique, ni les grès du Famennien, ni encore moins ceux du Namurien.

Aucune communication n'existe non plus avec les sources de Walhorn, situées dans la bande calcaire plus au Sud et séparées du point d'injection par les formations imperméables du Namurien et du Famennien.

Le seul point où l'uranine a été retrouvée est une petite source (source n°3, point 2 sur la carte). Celle-ci jaillit en rive gauche de la Gueule, quelques dizaines de mètres en amont de la confluence avec la vallée sèche prenant naissance à hauteur du chantoir et longeant, en aval, le contact avec le Famennien.



La courbe de restitution est montrée à la fig. 2.34. Ses caractéristiques sont résumées dans le tab. 2.16.



**Fig. 2.34** : Courbe de restitution à la source n°3 (vallée de la Gueule) de l'uranine injectée le 9/4/92 au chantoir de Walhorn.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
chantoir de Walhorn / source n°3 dans la Gueule	1000	uranine	3000	5	24.7	19.8	2.9	6.7	0.760

**Tab. 2.16** : Caractéristiques de la courbe de restitution du traçage au chantoir de Walhorn.

D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit approximatif au point de sortie en l/s  
 Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

La concentration maximale (5,84 ppb) et le taux de restitution (0,76 %) sont exceptionnellement faibles, malgré la vitesse de passage relativement élevée (25 m/h). Deux hypothèses permettraient d'expliquer ces observations :

- la circulation rapide du traceur depuis le chantoir, suivie d'une dilution importante au niveau de la zone noyée et d'une décharge diffuse de la nappe dans la Gueule. Les émergences diffuses auraient pu passer inaperçues en raison de la dilution du traceur dans la rivière, d'autant plus que la pollution de celle-ci a très fortement perturbé les analyses fluorimétriques;

- une importante dilution dans la zone noyée et des fuites latérales sous forme de systèmes d'écoulements régionaux longeant la bande calcaire au NE, au-delà de la Gueule, ou au SW, vers le bassin de la Vesdre. Les distances et les temps de passage deviennent dans ce cas considérables. Ce sont par conséquent des relations difficiles à mettre en évidence. Au NE, la vidange de la nappe pourrait s'effectuer au travers du Crétacé.

## 2.5.2. TRAÇAGES DANS LES CALCAIRES DU DEVONIEN

### 2.5.2.1. TRAÇAGES SUR LE SITE DE LA REID

#### 2.5.2.1.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site de La Reid se trouve (fig. 3) à une dizaine de kilomètres au Sud de la ville de Verviers, dans le bassin du Wayai, un affluent de la Vesdre.

Les calcaires dévoniens (Frasnien-Givétien) occupent la partie centrale du massif ardennais de la "fenêtre de Theux", une entité géologique nettement individualisée par rapport aux synclinoria qui l'entourent (celui de Dinant et celui de la Vesdre).

La vallée du Turon (fig. 2.35) se développe parallèlement à la direction des couches (SW-NE), en direction du Wayai. Schématiquement, le versant NW est formé de schistes et psammites appartenant au Famennien (ROLAND et MARION, 1987), le versant SE est formé de roches imperméables appartenant au Couvinien et à l'Emsien, et le centre de la dépression d'un ensemble principalement calcaire comprenant le Givétien et le Frasnien. La base du Givétien est gréseuse. La base du Frasnien est schisteuse (Fr1).

Un faisceau de failles transversales décale les couches à plusieurs endroits. Il est à l'origine des nombreux phénomènes géomorphologiques et hydrogéologiques observés le long de la vallée.

On note au moins trois zones de pertes, les plus remarquables étant le "chantoir de La Reid", deux à trois cent mètres au Nord du village (point 1 sur la carte), et la "perte des égouts de La Reid", un peu plus à l'Est (point 2).

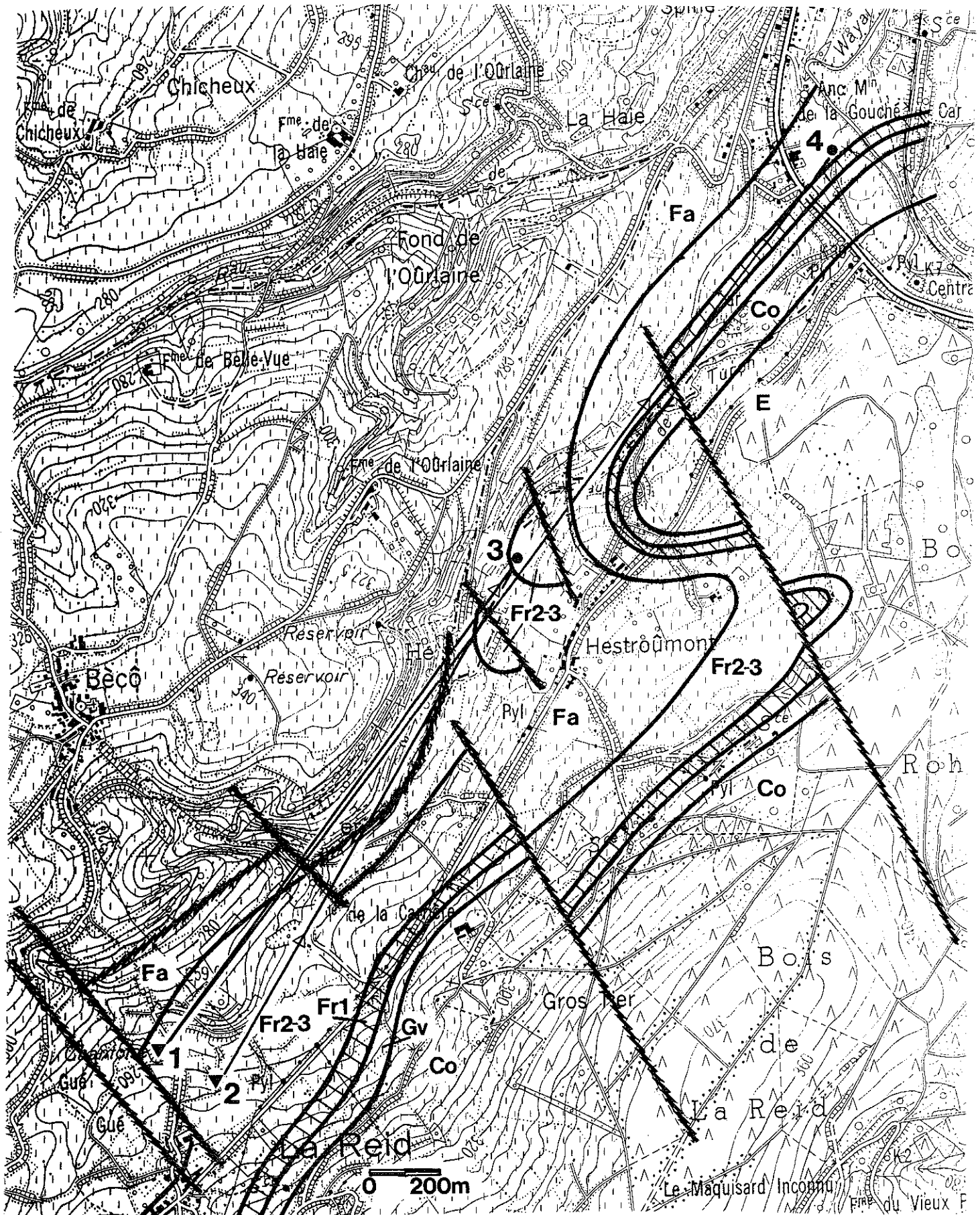
A hauteur d'Hestroumont (point 3), plusieurs sources de débordement jaillissent à la faveur d'une des failles transversales, ramenant en surface les calcaires du Frasnien au contact avec les schistes du Famennien. Le débit de ces sources augmente considérablement en période de hautes eaux.

Une seconde zone d'exutoire (point 4), également dans les calcaires frasniens, est située à Spixhe, dans le lit même du Turon, quelques dizaines de mètres en amont de la confluence de ce ruisseau avec le Wayai. Il s'agit de l'exutoire pérenne du système.

L'existence de trop-pleins (émergences d'Hestroumont) perchés aussi hauts par rapport au niveau de base est la conséquence de la faible perméabilité d'ensemble du système, due au découpage du massif par les nombreuses failles.

#### 2.5.2.1.2. Mise en oeuvre des traçages

Le besoin de connaître l'origine exacte des émergences d'Hestroumont, ainsi que les possibilités d'auto-épuration des égouts de La Reid au cours du passage sous terre, nous a amenés à réaliser des traçages à partir des deux pertes principales du système : le chantoir de La Reid (point 1) et les égouts de la Reid (point 2).



**Fig. 2.35 :** Situation géologique et localisation des traçages sur le site de La Reid. 1 = chanoir de La Reid 2 = perte des égouts de La Reid 3 = résurgence d'Hestroumont 4 = résurgence de Spixhe E = Emsien Co = Couvien Gv = Givétien Fr1 = schistes du Frasnien Fr2-3 = calcaires du Frasnien Fa = Famennien.

L'expérience s'est déroulée au mois de janvier, époque à laquelle au moins la principale émergence d'Hestroumont était en activité.

Les caractéristiques des injections sont résumées dans le tab. 2.17.

Date	Point d'injection	Niveau stratig.	Traceur	Quantité	Débit
12/1/90	chantoir de La Reid	Fr	uranine	460 g	< 10 l/s
14/1/90	perte des égouts de La Reid	Fr	rhodamine B	200 g	< 10 l/s

**Tab. 2.17** : Caractéristiques des injections sur le site de La Reid.

La surveillance des divers points d'eau (dont principalement les émergences) le long du Turon ainsi qu'à son embouchure dans le Wayai, était assurée par des prélèvements d'eau réguliers et le remplacement de capteurs au charbon actif.

Le niveau du Turon était suffisamment bas pour que les émergences de Spixhe puissent être contrôlées indépendamment du ruisseau.

### 2.5.2.1.3. Résultats des traçages

Le tab. 2.18 synthétise les relations mises en évidence sur le site de La Reid.

Point d'injection	Lieu de réapparition	Distance (m)	Traceur	Vitesse maximale (m/h)
chantoir de La Reid	résurgence d'Hestroumont	1700	uranine	20,1
chantoir de La Reid	résurgence de Spixhe	3050	uranine	28,4
perte des égouts de La Reid	résurgence d'Hestroumont	1700	rhodamine B	14,8

**Tab. 2.18** : Synthèse des relations mises en évidence par les traçages sur le site de La Reid.

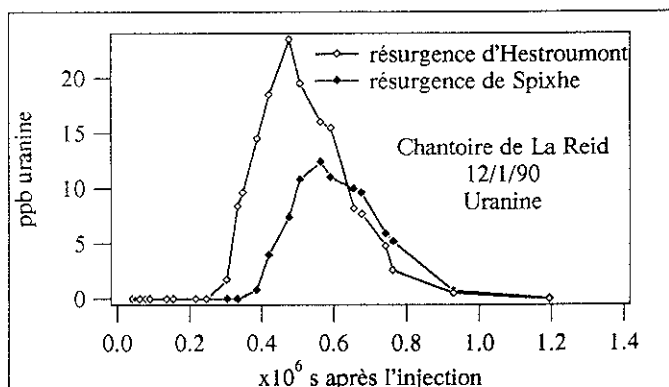
L'uranine injectée au chantoir de La Reid est réapparue d'abord à Hestroumont puis à Spixhe.

Les vitesses de passage (20,1 et 28,4 m/h) sont relativement faibles pour des calcaires frasniens. Cela semble confirmer l'hypothèse selon laquelle les écoulements sont fortement contrariés par les failles transversales.

La sortie de l'uranine à Spixhe ne paraît pas résulter de la réinfiltration du Turon en aval des émergences d'Hestroumont. Le parcours serait entièrement souterrain, dans les calcaires frasniens, et les émergences d'Hestroumont seraient le débordement de ces écoulements. En effet, d'une part aucune perte n'est constatée en aval des émergences d'Hestroumont, d'autre part la concentration maximale (tab. 2.19) à Spixhe est à peine deux fois inférieure (12,4 ppb) à celle (23,5 ppb) mesurée à Hestroumont.

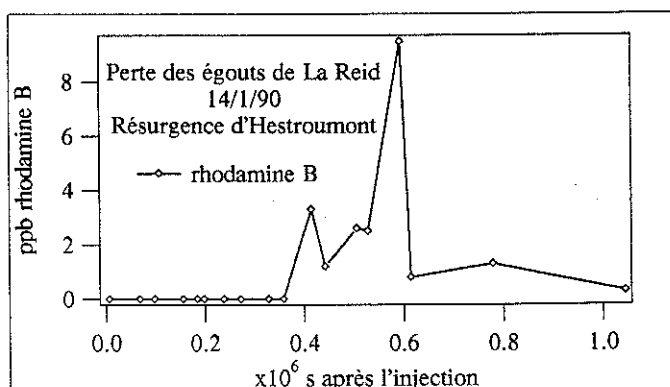
Les courbes de restitution (fig. 2.36) sont en outre fort similaires. Une réinfiltration aurait sans doute causé une dilution et un étalement beaucoup plus importants à Spixhe. Un traçage dans le Turon permettrait de le vérifier.

La masse restituée est faible (19,7 %). Cela peut être attribué à la sous-estimation des débits, mais également à des pertes par adsorption sur les formations schisteuses avec lesquelles les circulations sont en contact (Fr1).



**Fig. 2.36** : Courbes de restitution aux résurgences d'Hestroumont et de Spixhe de l'uranine injectée au chantoir de La Reid le 12/1/90.

La rhodamine B injectée à la perte des égouts de La Reid n'est réapparue qu'à Hestroumont (fig. 2.37), en proportion encore moindre que l'uranine (6,1 %). L'adsorption sur les bancs schisteux (traceur cationique), ainsi que d'éventuelles réactions avec l'eau polluée des égouts, seraient à l'origine de ce déficit important. Un traçage avec un traceur plus conservatif aurait sans doute mis en évidence la relation entre cette perte et les émergences de Spixhe.



**Fig. 2.37** : Courbe de restitution à la résurgence d'Hestroumont de la rhodamine B injectée à la perte des égouts de La Reid le 14/1/90.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
chanoir de La Reid / résurgence d'Hestroumont	1700	uranine	460	10	20.1	12.8	11.6	12.3	13.900
chanoir de La Reid / résurgence de Spixhe	3050	uranine	460	7	28.4	19.5	17.5	18.3	5.800
perte des égouts de La Reid / résurgence de Spixhe	1700	rhodamine B	200	10	14.8	10.3	10.0	10.6	6.100

**Tab. 2.19** : Caractéristiques des courbes de restitution des traçages sur le site de La Reid.

D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit approximatif au point de sortie en l/s  
Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

## 2.5.2.2. TRAÇAGE SUR LE SITE DE XHORIS

### 2.5.2.2.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site de Xhoris (fig. 3) se trouve dans le Dévonien plissé du bord Est du synclinorium de Dinant.

Les calcaires (Givétien-Frasnien) ayant fait l'objet des traçages (fig. 2.38) appartiennent à une bande limitée par deux failles longitudinales (Fanson et Xhoris), drainée à l'Ouest par la vallée de l'Ourthe et à l'Est par un affluent de l'Amblève.

Au Sud, les terrains imperméables sont constitués par les grès et les schistes des étages Siegenien, Emsien et Couvinien. Les grès et les schistes du Famennien ainsi que les schistes du sommet du Frasnien forment l'autre barrière imperméable au Nord.

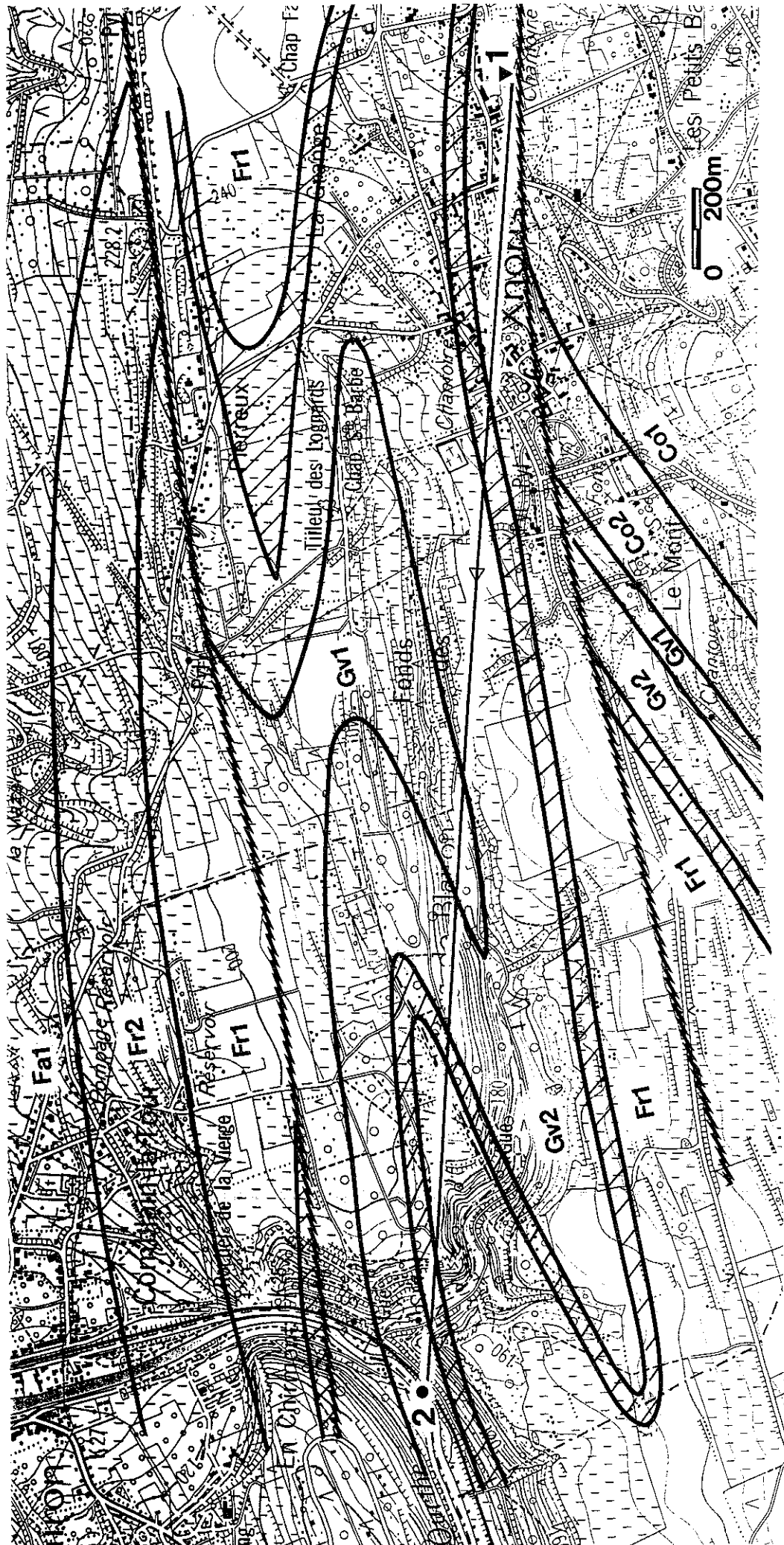
Les calcaires du Givétien (Gv1 - Gv2) sont séparés de ceux du Frasnien par les schistes de la base du Frasnien (hachures sur la carte de la fig. 2.38).

Plusieurs pertes sont situées dans les calcaires frasniens le long de la faille de Xhoris, au contact avec les roches imperméables. Les deux principales sont les chanoirs de Xhoris (Abîme) et de Piromboeuf (à l'Est en dehors de la carte de la fig. 2.38).

Il a été prouvé que le chanoir de Piromboeuf est en communication avec l'émergence du Chalet (captage S.W.D.E.) située à Aywaille. Ce chanoir est actuellement remblayé.

On ignorait par contre le lieu de sortie des eaux engouffrées au chanoir de Xhoris, à l'extrémité SE du village. La cavité fait pourtant depuis longtemps l'objet d'explorations (VAN DEN BROECK, MARTEL et RAHIR, 1910) et de travaux de désobstruction dans le but de suivre le tracé de la rivière souterraine.

En période de hautes eaux, le chanoir se noie complètement. On en conclut que la capacité d'absorption est assez limitée.



**Fig. 2.38** : Situation géologique et localisation du traçage de Xhoris. 1 = abîme ou chanoir de Xhoris. 2 = résurgence sous-fluviale dans l'Ourthe. Co1, Co2 = Couvinien. Gv1, Gv2 = Givétien. zone hachurée = schistes de la base du Frasnien. Fr1 = Frasnien inférieur. Fr2 = Frasnien supérieur. Fa1 = Famennien inférieur.

Vu la situation topographique, tout portait à croire que l'écoulement avait lieu depuis la perte en direction de la vallée de l'Ourthe. Le problème était de savoir où exactement car aucune émergence importante n'était connue dans cette région. Seules quelques petites sources avaient été repérées en aval de la vallée du Bléron<sup>1</sup>.

Une émergence sous-fluviale dans l'Ourthe était toutefois mentionnée par NYS et LINSMAN (1932), un peu en amont de la confluence avec le Bléron. Plusieurs mesures conductimétriques, effectuées par J. GODISSARD et ensuite par nous-mêmes, ont permis de localiser précisément plusieurs venues d'eau sur une distance de quelques mètres. Le débit total n'a toutefois pas pu être estimé.

#### 2.5.2.2.2. Mise en oeuvre du traçage

Profitant d'une période pluvieuse, 3 kg d'uranine ont été déversés dans le chantoir de Xhoris. Le tab. 2.20 reprend les caractéristiques de l'injection.

Date	Point d'injection	Niveau stratig.	Traceur	Quantité	Débit
12/5/90	abîme de Xhoris	Fr1	uranine	3000 g	< 10 l/s

**Tab. 2.20** : Caractéristiques de l'injection d'uranine à l'abîme-chantoir de Xhoris.

Dès le soir de l'injection, les tournées d'échantillonnage (eaux et fluocapteurs) ont débuté sur tout le pourtour du massif, côté Ourthe et côté Amblève. Le long de l'Ourthe, les prélèvements s'étendaient depuis Comblain-la-Tour jusqu'en amont de Hamoir, où la rivière recoupe la bande calcaire passant au Sud de la faille de Xhoris.

#### 2.5.2.2.3. Résultats du traçage

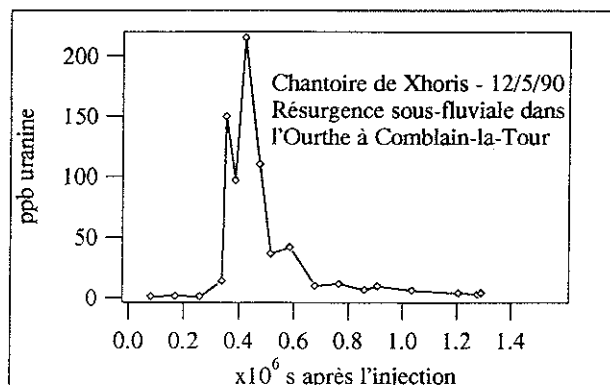
Quatres jours après l'injection, la résurgence sous-fluviale a commencé à se colorer en vert. La coloration a persisté durant trois jours. Aucune trace d'uranine n'a été détectée nulle part ailleurs.

La résurgence sous-fluviale est issue des calcaires du Givétien (Gv2). Cela implique par conséquent le passage de la circulation karstique au travers des schistes de la base du Frasnien. Ce passage peut avoir lieu à la faveur d'une faille ou d'un amincissement local de la formation schisteuse.

La courbe de restitution se trouve à la fig. 2.39 et ses caractéristiques sont rassemblées dans le tab. 2.21.

<sup>1</sup>Importante vallée karstique prenant naissance au Nord de Xhoris.





**Fig. 2.39** : Courbe de restitution à la résurgence sous-fluviale dans l'Ourthe de l'uranine injectée le 12/5/90 à l'abîme-chantoir de Xhoris.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
abîme de Xhoris/résurgence sous-fluviale dans l'Ourthe	3500	uranine	3000	90	37.2	29.9	24.6	27.2	100.000

**Tab. 2.21** : Caractéristiques de la courbe de restitution du traçage à l'abîme-chantoir de Xhoris. D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit approximatif au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

La vitesse de passage n'est pas très élevée (37,23 m/h) pour des calcaires aussi karstifiés. Cela pourrait être lié au fait que la nappe était assez basse, malgré les pluies ayant précédé la période de traçage.

Les concentrations ont été sous-estimées en raison de la dilution par l'eau de la rivière. Ne connaissant ni le débit à l'exutoire, ni les concentrations exactes, il était par conséquent illusoire de vouloir calculer le bilan. En admettant un taux de restitution de 100 %, nous avons cependant pu calculer une valeur limite de débit pour l'écoulement souterrain. La valeur obtenue, de 90 l/s, constitue la valeur maximum possible.

Les irrégularités de la courbe de restitution peuvent également être attribuées au mode de prélèvement, dans la rivière.

### 2.5.2.3. TRAÇAGE SUR LE SITE DE REMOUCHAMPS

#### 2.5.2.3.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site du "vallon des chantoirs" à Remouchamps (fig. 3) a été décrit précédemment lorsque nous avons comparé les réponses hydrodynamiques des différents systèmes karstiques (chapitre 1.5.).

Il fait partie du bassin d'alimentation de l'Amblève, sur la bordure Est du synclinorium de Dinant. Il comprend des terrains allant de l'Emsien au Famennien (fig. 2.40). Les couches, de direction Nord-Sud, inclinent principalement vers l'Ouest.

La vallée est en majeure partie orientée suivant la stratification. Les calcaires frasniens et givétiens en occupent le centre. Comme à La Reid, plusieurs failles transversales interrompent la continuité des couches et contrarient les écoulements dans le sens longitudinal.

Nous ne nous sommes intéressés qu'à la partie aval du système (fig. 2.40), c'est-à-dire au réseau situé entre le chantoir de Sècheval et la sortie de la grotte de Remouchamps (Rubicon, pt 3).

Le chantoir de Sècheval (pt 1) s'ouvre dans les calcaires du Givétien, au contact avec les roches imperméables du Couvinien (Co2).

La rivière souterraine de la grotte de Remouchamps (Rubicon) est l'exutoire de l'ensemble du système. Jusqu'il y a peu, le siphon de la rivière (pt 2) constituait le point terminal de la grotte. Les explorations post-siphon récentes ont permis de retrouver l'écoulement libre jusqu'à un point situé, semble-t-il, à hauteur du chantoir de Sècheval.

La liaison Sècheval-Rubicon est clairement établie depuis longtemps. Nous avons effectué ce traçage dans le but de caractériser quantitativement le passage du traceur.

#### 2.5.2.3.2. Mise en oeuvre du traçage

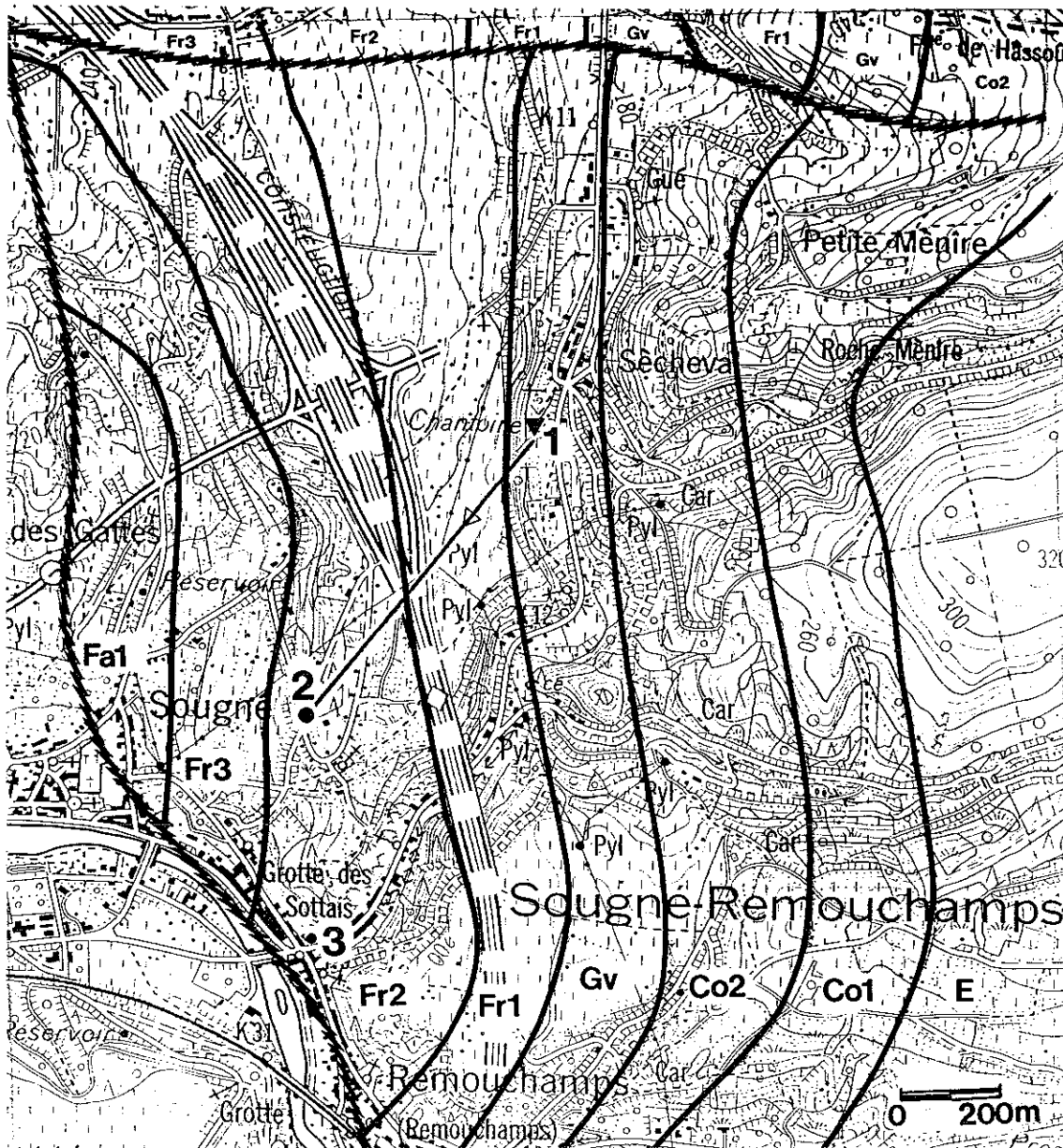
L'injection d'uranine fut réalisée en période de basses eaux. Les caractéristiques sont résumées dans le tab. 2.22.

Date	Point d'injection	Niveau stratig.	Traceur	Quantité	Débit
24/5/91	chantoir de Sècheval	Gv2	uranine	150 g	< 15 l/s

**Tab. 2.22** : Caractéristiques de l'injection d'uranine au chantoir de Sècheval (Remouchamps).

Un échantillonneur automatique était placé à la sortie du siphon, à environ 500 mètres de l'entrée de la grotte.

Le limnigraphe placé au même endroit permettait de calculer le bilan précis du traceur. Le débit moyen durant la période de traçage a été de 149 l/s. Il n'a pratiquement pas varié vu l'étiage.



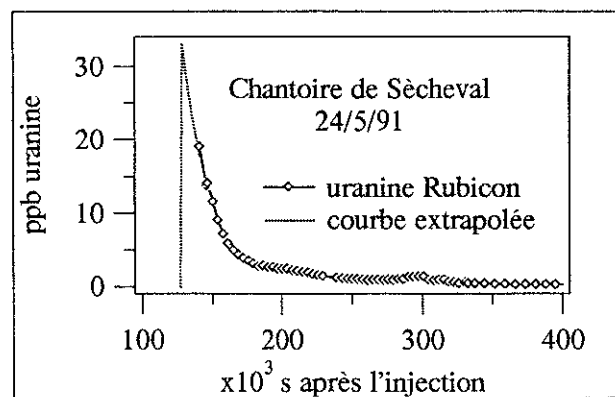
**Fig. 2.40 :** Situation géologique et localisation du traçage de Remouchamps. 1 = chœur de Sècheval 2 = Rubicon (siphon au point terminal de la grotte de Remouchamps) 3 = entrée de la grotte (résurgence) E = Emsien Co1, Co2 = Couviniens Gv = Givétien Fr1 = Frasnien inférieur Fr2 = Frasnien moyen Fr3 = Frasnien supérieur Fa1 = Famennien inférieur.

### 2.5.2.3.3. Résultats du traçage

La courbe de restitution se trouve à la fig. 2.41.

Suite à une panne d'échantillonneur, l'arrivée et le pic de restitution n'ont pas pu être mesurés. Néanmoins, en faisant l'hypothèse d'un taux de restitution proche de 100 %<sup>1</sup>, il a été possible de reconstituer, par extrapolation, la partie manquante de la courbe (trait pointillé).

Le traceur aurait ainsi franchi les 600 mètres le séparant du siphon en un jour et demi, avec une vitesse maximale de 16,77 m/h. Cette vitesse faible est sans doute liée à l'état des eaux (étiage). La lenteur d'écoulement peut aussi être en partie liée au fait que le réseau recoupe transversalement trois formations différentes (Gv, Fr1 et Fr2), parmi lesquelles se trouvent les schistes de la base du Frasnien.



**Fig. 2.41** : Courbe de restitution dans la rivière souterraine de Remouchamps (à la sortie du siphon) de l'uranine injectée au chantoir de Sècheval le 24/5/91. La montée et le pic de la courbe (en pointillés) sont reconstitués en supposant un taux de restitution d'environ 100 %.

Les caractéristiques de la restitution sont rassemblées au tab. 2.23:

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
chantoir de Sècheval / Rubicon	600	uranine	150	149	17.0	16.8	11.9	13.2	96.000

**Tab. 2.23** : Caractéristiques de la courbe de restitution du traçage au chantoir de Sècheval. Le taux de restitution 96 % est choisi arbitrairement afin d'extrapoler la partie manquante de la courbe. D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit approximatif au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

<sup>1</sup>Cette hypothèse suppose l'absence de fuite dans l'Ambève au droit du Givétien et du Frasnien.

## 2.5.3. TRAÇAGES DANS LES CRAIES DU CRETACE

### 2.5.3.1. TRAÇAGE SUR LE SITE DE BERTREE

#### 2.5.3.1.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

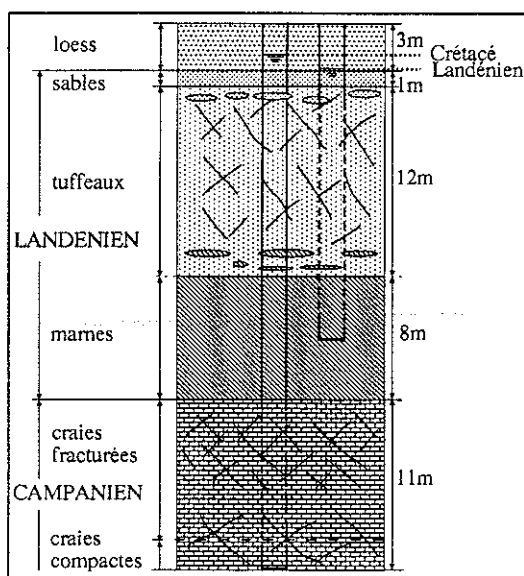
Le site de Bertrée a fait l'objet voici treize ans d'une étude concernant les possibilités de rejet dans le sous-sol des effluents d'une station d'épuration (LGIH - CEB/801, 1980 et LGIH - CEB/811, 1981). A cette occasion, une série de forages assez proches les uns des autres ont été creusés et équipés de piézomètres à deux profondeurs distinctes, de façon à étudier deux nappes superposées : celle du Crétacé (craie campanienne) en dessous, séparée de celle du Tertiaire (sables et "tuffeaux" landéniens) par environ 8 m de marnes.

Le site (fig. 3) se trouve sur le plateau de Hesbaye, à un peu plus d'un kilomètre au Nord de la ville de Hannut. Il appartient au bassin de la Petite Gette, un affluent de la Dyle (cette dernière s'écoulant vers l'Escaut). La crête de partage des eaux avec le bassin du Geer (dont fait aussi partie le site de Crisnée décrit au § 2.5.3.2.) se trouve à moins d'un kilomètre à l'Est du site.

Les craies fissurées du Crétacé, à pendages subhorizontaux, sont recouvertes par les terrains tertiaires et quaternaires.

La succession lithologique (et stratigraphique), déterminée sur base des forages, peut être schématisée comme suit (fig. 2.42) :

de 0 à 3m :	limons de couverture (Pléistocène)
de 3 à 16m :	sables et tuffeaux <sup>1</sup> (Landénien = L1b)
de 16 à 24m :	marnes (Heersien = L1a)
de 24 à 35m :	craies fissurées (Campanien)
de 35 à 65m :	craie compacte (Campanien)
à partir de 65m :	smectite ( Campanien )



**Fig. 2.42** : Coupe lithologique simplifiée montrant les deux principaux aquifères (Landénien et Crétacé) sur le site de Bertrée.

<sup>1</sup>Les tuffeaux sont des grès faiblement indurés et fissurés, plus ou moins riches en calcaire et en argile.

La prospection géoélectrique (CAJOT et MONJOIE, 1980) a permis d'étudier les variations latérales d'épaisseur des différentes formations.

Deux formations sont aquifères (fig. 2.42) :

- le Landénien (tuffeaux et sables), contenant une nappe phréatique libre, dont le niveau piézométrique s'établit à environ trois mètres sous la surface du sol. L'aquifère est à porosité de fissure et d'interstice (double porosité). Il est très hétérogène verticalement et horizontalement (variations latérales de faciès, lentilles d'argiles et de marnes);

- le Campanien (craies fissurées), contenant une nappe captive sous les marnes heersiennes (épaisses de 8m), dont le niveau piézométrique, supérieur à celui de la nappe du Landénien, est situé à environ deux mètres sous la surface du sol. Le mur imperméable de l'aquifère est formé par la smectite. La compacité des craies en profondeur limite fortement la perméabilité. L'aquifère est à porosité de fissure et d'interstice. Bien que la porosité de matrice (ou d'interstice) soit loin d'être négligeable, les fissures jouent le rôle le plus important en matière d'écoulement et de transport, l'eau dans la matrice étant quasi immobile. Les variations d'ouverture et de fréquence des fissures peuvent introduire localement des hétérogénéités dans le milieu.

A l'origine, un seul puits de pompage (P1, diamètre = 406 mm, profondeur = 20 mètres) faisait partie de l'équipement du site dans l'aquifère du Landénien. Après les deux tests de traçages réalisés dans la nappe supérieure (voir § 2.5.4.1.), un second puits (P2, diamètre = 145 mm) a été creusé en 1992 jusqu'à une profondeur de 42 mètres dans l'aquifère crétacé afin de permettre les expériences de traçage dans la nappe inférieure.

Les tests de pompage et les traçages effectués dans les craies ont fait l'objet du travail de GARCET (1992).

Les situations du puits (P2) et des piézomètres (Pz2 à Pz12) dans l'aquifère du Crétacé sont indiquées sur la fig. 2.43. Les distances des piézomètres au puits sont comprises entre 5 et 14,4 m.

La piézométrie, en l'absence de pompage, est également montrée sur la fig. 2.43. Les hauteurs piézométriques sont rapportées à un niveau arbitraire situé à 35 mètres (profondeur du contact entre les craies fracturées et les craies compactes). L'écoulement de la nappe a lieu vers le Sud, avec un gradient moyen de 3 %. Un axe de drainage préférentiel est parallèle au ruisseau qui traverse le site dans sa partie Nord.

Les valeurs de transmissivité, déterminées en régime transitoire à partir des pompages au P2, sont situées aux alentours de  $1.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. On note des valeurs plus élevées au Pz8 et au Pz2, ce qui pourrait indiquer l'existence d'un axe plus perméable perpendiculaire au gradient régional (une seconde famille de fractures ?).

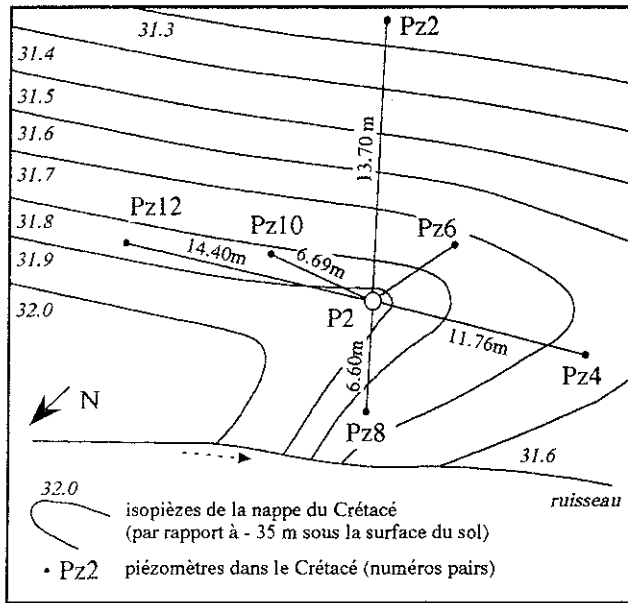


Fig. 2.43 : Situation du puits P2 et des piézomètres dans la nappe du Crétacé à Bertrée. Carte piézométrique de la nappe avant pompage.

### 2.5.3.1.2. Mise en oeuvre du traçage

Le traçage a été réalisé le 4 février 1992, en écoulement radial convergent, avec pompage au puits P2. La pompe immergée était placée à 15 mètres sous la surface du sol. Le débit de pompage était de 19,8 m<sup>3</sup>/h, produisant un rabattement stabilisé de 4 mètres au P2. Le but était principalement la détermination des caractéristiques hydrodispersives (dispersivité longitudinale et porosité efficace) dans le cas de plusieurs directions (Pz2, Pz10 et Pz12) et plusieurs distances de traçage (entre 6,69 et 14,4 m) ainsi que dans le cas de plusieurs traceurs différents : un traceur organique (uranine), trois traceurs salins cationiques (Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup>) et deux traceurs salins anioniques (I<sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Les caractéristiques des injections sont reprises dans le tab. 2.24.

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Piézomètre d'injection	Distance (m)	Traceur	Quantité (g)	Mode d'injection
19,8	Pz2	13,70	uranine	50	(1)
	Pz12	14,40	LiCl	2000	(2)
	Pz12	14,40	NaCl	25000	(2)
	Pz10	6,69	KI	2163	(2)
	Pz10	6,69	KNO <sub>3</sub>	10000	(2)

Tab. 2.24 : Caractéristiques des injections de traceurs dans les piézomètres du Crétacé sur le site de Bertrée.

Deux modes d'injection ont été utilisés :

- le premier (1) a consisté en l'injection continue (3 l/h) de la solution traçante à concentration constante pendant 9 heures et 50 minutes à l'aide d'une pompe doseuse. La sortie du tuyau d'injection était placée à environ 32 m de profondeur. La chasse était provoquée par deux injections d'eau avec des débits de 0,185 m<sup>3</sup>/h, l'une 2 m au-dessus et l'autre 2 m en dessous du point d'injection. En fin d'injection, un volume d'eau supplémentaire, déversé dans le tuyau, devait permettre de vider ce dernier du traceur encore présent entre 32 m et la surface de la nappe.

- le second mode (2) a consisté en l'injection brève (aux Pz10 et Pz12) des traceurs dilués dans environ 200 litres d'eau. La chasse était assurée par la réinjection d'eau, durant quelques secondes, depuis la conduite de refoulement du pompage (19,8 m/h). Cette opération fut suffisamment brève pour ne pas réinjecter dans le piézomètre le traceur parvenant au puits de pompage. Ce type d'injection permet la pénétration rapide des traceurs dans l'aquifère (impulsion de Dirac) mais pas nécessairement de la totalité. Une partie peut en effet rester piégée dans les eaux mortes du piézomètre en raison du mélange brutal dans toute la colonne d'eau ou en raison du phénomène de rétrodiffusion.

Les prélèvements à la sortie du puits avaient lieu des deux manières : manuellement et à l'aide d'échantillonneurs automatiques.

### 2.5.3.1.3. Résultats du traçage

Les traceurs sont parvenus très rapidement au puits de pompage (fig. 2.44 à 2.46 et tab. 2.25). Les vitesses maximales sont comprises entre 5,48 et 57,34 m/h. Elles attestent de l'existence de fissures larges. Pour une distance à peine plus courte, la vitesse maximale depuis le Pz2 (5,48 m/h) est nettement inférieure à celles depuis le Pz12 (39,27 et 43,2 m/h). L'intervention de plusieurs des facteurs suivants n'est pas à exclure :

- existence de fissures plus larges dans la direction NE-SW. On a vu en effet qu'un axe d'écoulement préférentiel existait parallèlement au ruisseau;
- trajet Pz2-puits opposé à celui du gradient régional (vers le Sud);
- injection plus lente au Pz2 (débit de chasse plus faible);
- dispersivités du Na<sup>+</sup> et du Li<sup>+</sup> supérieures à la dispersivité de l'uranine.



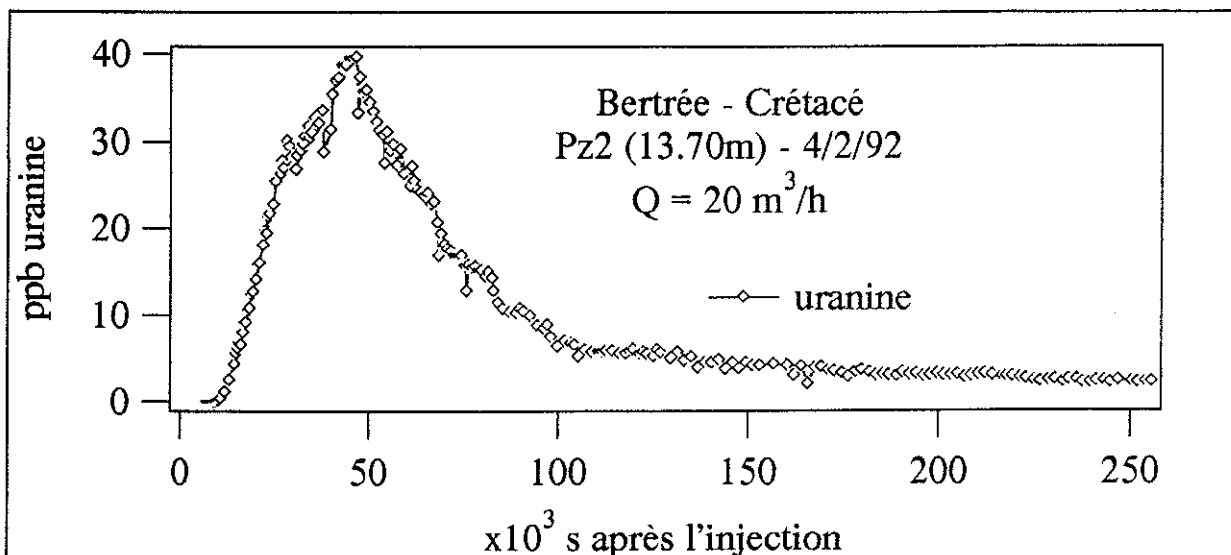


Fig. 2.44 : Courbe de restitution au P2 de l'uranine injectée au Pz2.

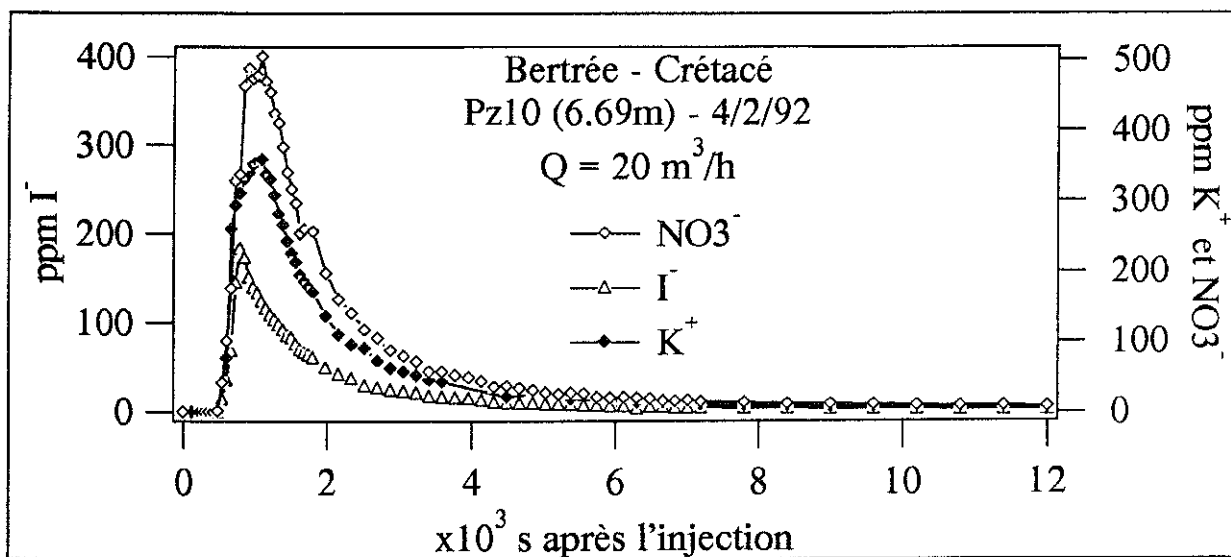


Fig. 2.45 : Courbes de restitution au P2 du potassium, de l'iodure et du nitrate injectés au Pz10.

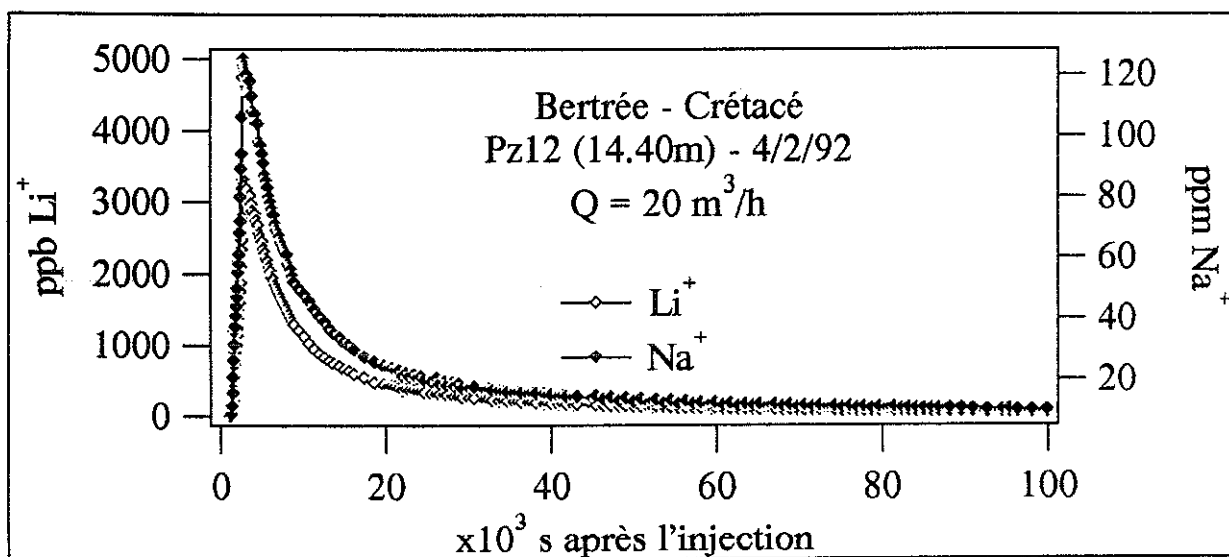


Fig. 2.46 : Courbes de restitution au P2 du sodium et du lithium injectés au Pz12.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
Pz2 / P2	13.70	uranine	50	5.5	5.48	1.06	0.63	0.96	27.000
Pz12 / P2	14.40	Na+	9914	5.5	39.27	18.78	1.43	5.93	79.000
Pz12 / P2	14.40	Li+	333	5.5	43.20	18.78	1.42	6.17	65.000
Pz10 / P2	6.69	NO3-	6138	5.5	57.34	22.30	5.51	12.26	77.000
Pz10 / P2	6.69	K+	4369	5.5	50.18	22.30	2.53	15.47	94.000
Pz10 / P2	6.69	I-	1654	5.5	57.34	30.88	4.51	14.98	92.000

**Tab. 2.25** : Caractéristiques des courbes de restitution des traçages dans les piézomètres du Crétacé sur le site de Bertrée.

D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

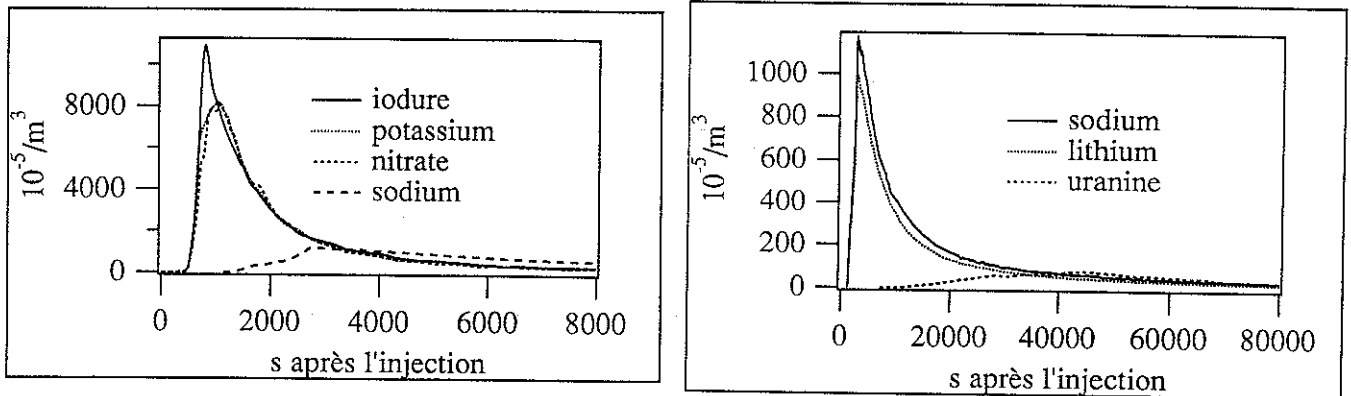
La différence est encore plus évidente si l'on considère les vitesses modales, 18 fois plus élevées au Pz12 qu'au Pz2. Dans le cas du Pz2, la vitesse modale dépend toutefois du fait que l'injection est continue sur une dizaine d'heures. On note d'ailleurs une rupture de pente sur la montée de la courbe de restitution de l'uranine (fig. 2.44) avec un tronçon moins raide correspondant à la durée de l'injection. Une rupture de pente plutôt qu'un plateau est liée à la complexité des phénomènes entrant en jeu dans le transfert du traceur entre le piézomètre et l'aquifère.

La vitesse modale de l'iodure est supérieure à celle des nitrates et du potassium injectés au même endroit. On le voit nettement sur les courbes de la fig. 2.45. Ce fait peut s'expliquer par la dispersivité plus élevée dans le cas de l'iodure (l'iode est un gros ion capable d'une forte diffusion).

Le taux de restitution faible de l'uranine (27 %) peut être lié, soit au caractère peu conservatif du traceur (adsorption irréversible), soit à la soustraction d'une partie de celui-ci en dehors du cône d'appel du pompage (gradient naturel de 3 % vers le Sud).

A l'exception des nitrates (dont on a vu au § 2.4.2. qu'ils pouvaient subir des pertes par réactions chimiques ou biologiques), les taux de restitution sont plus élevés pour les traceurs injectés au Pz10 qu'au Pz12 (92 et 94 % pour l'iodure et le potassium contre 65 et 79 % pour le lithium et le sodium). Les pertes par entraînement hors du cône d'appel du pompage (effet équivalent à la dispersivité transversale) sont en effet moindre pour le piézomètre situé à 6,69 m du puits que pour le piézomètre situé à 14,4 m. L'adsorption du lithium et du sodium, plus importante que dans le cas du potassium et surtout de l'iodure (anion), intervient sans doute aussi.

Les courbes de concentrations normées (fig. 2.47) permettent de comparer les restitutions en fonction des piézomètres et en fonction des traceurs.



**Fig. 2.47 :** Courbes de restitution, normées par rapport à la masse injectée, des traceurs injectés aux Pz2, Pz10 et Pz12 à Bertrée. Le graphique a dû être scindé en deux parties aux échelles différentes. La courbe du sodium permet le raccord entre les deux parties.

Sur le premier graphique, on voit clairement le comportement différent de l'iodure par rapport au nitrate et au potassium. Sur le second graphique, on peut voir la différence entre les injections au Pz12 (sodium et lithium) et au Pz2 (uranine).

Un traçage en écoulement uniforme (en l'absence de pompage<sup>1</sup>) a également été effectué par BIVER (thèse à paraître) et VALENTINI (1992) sur le site de Bertrée. Du LiCl et du KNO<sub>3</sub> ont été injectés au Pz12, tandis que de l'uranine a été injectée au Pz10. Les trois traceurs (Li<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et uranine) sont réapparus non seulement au Pz2, dans la direction du gradient régional (fig. 2.43), mais également au Pz8, au Pz4 et au Pz10 (Li<sup>+</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Ces résultats sont la preuve d'une grande dispersion latérale provoquée par les diffluences aux croisements des fissures. Ils démontrent une fois de plus la grande hétérogénéité des vides dans la craie. Les vitesses modales entre le Pz12 et le Pz2 (distance = 18,5 m) sont de l'ordre de 1,5 m/h, c'est-à-dire 20 à 30 fois plus faibles que les vitesses observées en écoulement radial convergent.

### 2.5.3.2. TRAÇAGES SUR LE SITE DE CRISNEE

#### 2.5.3.2.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site de Crisnée se trouve également en Hesbaye, à 8 km au NW de Liège (fig. 3). Il fait partie du bassin du Geer, affluent de la Meuse. La nappe de la craie est drainée, à moins de 1,5 km au Sud du site, par plusieurs kilomètres de galeries captantes qu'exploite la Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux (C.I.L.E.).

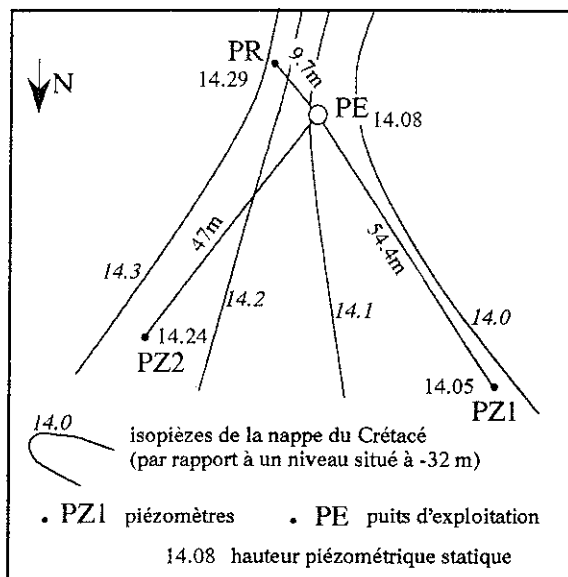
Le site a été choisi par la Société Wallonne des Distributions d'Eaux (S.W.D.E.) pour implanter un nouveau captage par puits. Il est situé en bordure d'une vallée sèche orientée NNW-SSE.

<sup>1</sup>Les prélèvements dans les piézomètres étaient effectués grâce à des pompages de courte durée avec des pompes aspirantes à petit débit.

Il est équipé (fig. 2.48) d'un piézomètre de reconnaissance (PR, profondeur = 64 m, diamètre = 115 mm) situé à 9,7 m d'un puits d'exploitation (PE, profondeur = 56 m, diamètre = 400 mm) et de deux piézomètres de contrôle (PZ1 et PZ2) situés respectivement à 54,4 et 47 m du puits.

Les forages, ainsi que les diagaphies réalisées au piézomètre de reconnaissance et au puits d'exploitation, ont permis d'établir la succession lithologique suivante (fig. 2.49) :

- de 0 à 12 m : limons de couverture (Pléistocène)
- de 12 à 22 m : conglomérat à silex (Maestrichtien)
- de 22 à 24 m : argiles (Maestrichtien)
- de 24 à 33 m : craies fissurées (Campanien)
- de 33 à 55 m : craies compactes (Campanien)
- à partir de 55 m : smectite (Campanien), surmontant les schistes du socle.

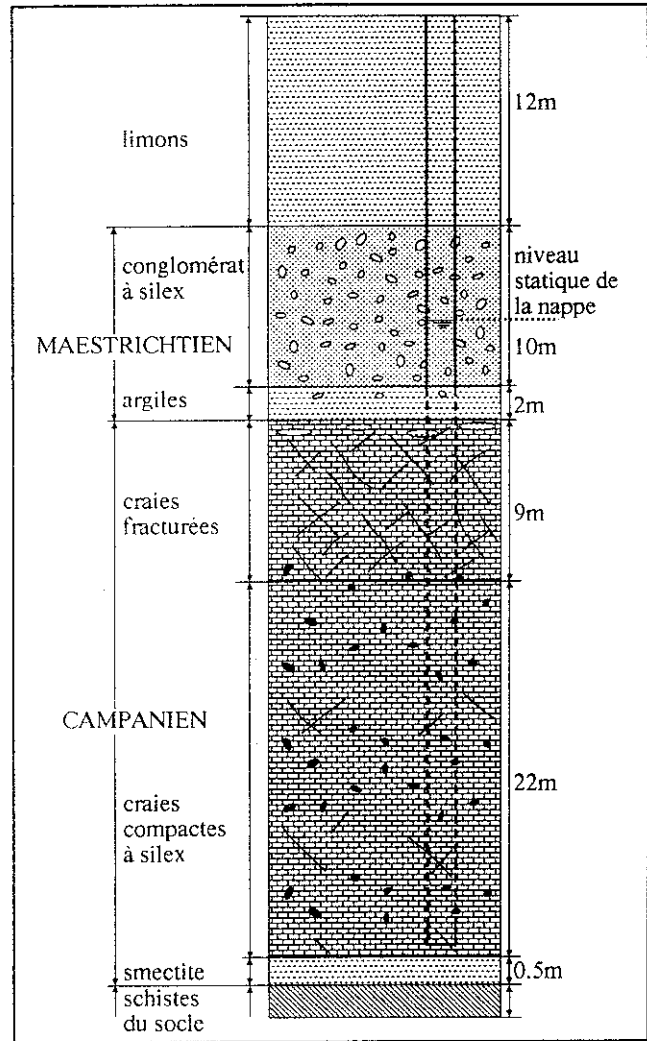


**Fig. 2.48** : Situation du puits d'exploitation (PE), du piézomètre de reconnaissance (PR) et des deux piézomètres de contrôle (PZ1 et PZ2) dans la nappe du Crétacé à Crisnée. Carte piézométrique de la nappe avant pompage.

Une prospection géoélectrique (GARCET, 1992) a permis d'étudier les variations latérales de la fissuration et de l'épaisseur des formations, notamment en fonction de la position par rapport à la vallée sèche.

Un carré de résistivité (GARCET, 1992) a permis d'établir localement une carte de résistivité autour du puits d'exploitation. Cette carte a été mise en relation avec le degré de fracturation de la craie. Une zone plus conductrice apparaît sur le bord Nord de la zone prospectée. Elle pourrait correspondre à un axe de drainage préférentiel.

La formation aquifère principale (fig. 2.49) est celle des craies fissurées (entre 24 et 33 m). Le niveau statique de la nappe s'établit toutefois vers 18 mètres de profondeur, c'est-à-dire au niveau du conglomérat à silex. La présence locale d'une passée argileuse et la perméabilité plus faible du conglomérat à silex font de cette nappe une nappe semi-captive, ce qu'ont confirmé les pompages d'essais (GARCET, 1992).



**Fig. 2.49** : Coupe lithologique simplifiée montrant l'aquifère du Crétacé (Campanien) sur le site de Crisnée.

La carte piézométrique (fig. 2.48) indique un gradient naturel d'environ 1 % vers l'Ouest, c'est-à-dire en direction de la vallée sèche. Les hauteurs piézométriques sont rapportées à un niveau arbitraire situé à 32 mètres (profondeur des injections de traceurs) sous la surface du sol au puits d'exploitation.

L'interprétation, en régime transitoire, des pompages d'essais au puits d'exploitation à 45 m<sup>3</sup>/h, 100 m<sup>3</sup>/h et 125 m<sup>3</sup>/h donne des valeurs de transmissivité comprises entre 1,5 et 2.10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s, c'est-à-dire plus d'un ordre de grandeur au-dessus de celles de Bertrée.

Les courbes de rabattement ont montré l'existence d'une limite de flux, se manifestant à des instants différents aux différents points d'observation (d'abord au P1, puis au P2, puis au PR et enfin au PE). Cette limite de flux pourrait être l'alimentation par la nappe du conglomérat à silex ou plus vraisemblablement par la zone fissurée plus perméable repérée au Nord du site. Cette zone plus fissurée, drainant la nappe en direction de la vallée sèche, expliquerait en même temps la transmissivité plus élevée (2.10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s) au PZ1 et les résultats des traçages qui seront discutés ci-dessous.

### 2.5.3.2.2. Mise en oeuvre des traçages

Un premier traçage avec le LiCl, à partir du PR (9,7 m), avec un pompage de 100 m<sup>3</sup>/h au puits d'exploitation, a montré la rapidité du transit. Cela nous a permis d'ajuster les quantités de traceur nécessaires lors de la seconde expérience.

Celle-ci a eu lieu le 29 janvier 1992, avec un débit de 122 m<sup>3</sup>/h au puits d'exploitation. Quatre traceurs ont été injectés dans les trois piézomètres (uranine au PZ1, LiCl au PZ2, KI et naphthionate au PR). Plusieurs de ces traceurs sont les mêmes que ceux utilisés pour les tests de Bertrée, afin de pouvoir comparer les deux sites.

Les rabattements stabilisés atteignent 12.04, 2.22, 0.98 et 1.21 m respectivement au PE, au PR, au PZ1 et au PZ2.

Les caractéristiques des injections sont reprises dans le tab. 2.26.

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Piézomètre d'injection	Distance (m)	Traceur	Quantité (g)	Mode d'injection
122	PR	9,7	naphthionate	75	(1)
	PR	9,7	KI	805	(1)
	PZ1	54,4	uranine	50	(1)
	PZ2	47	LiCl	4952	(1)

Tab. 2.26 : Caractéristiques des injections dans les piézomètres du Crétacé sur le site de Crisnée.

Le seul mode d'injection (1) a consisté à injecter la solution traçante via un tuyau dont l'extrémité était placée à 32 m de profondeur<sup>1</sup> avec, 1 m en dessous et 1 m au-dessus, un débit d'eau destiné à empêcher la migration du traceur dans toute la colonne en le forçant à quitter le piézomètre. La colonne restante de traceur restant dans le tuyau d'injection (entre 32 m et la surface de la nappe) a ensuite été chassée et rincée par un volume d'eau claire.

Les prélèvements avaient lieu à la sortie du puits, manuellement et à l'aide d'échantillonneurs automatiques.

### 2.5.3.2.3. Résultats des traçages

Tous les traceurs sont parvenus au puits de pompage (fig. 2.50 à 2.52 et tab. 2.27).

Malgré la position du PZ2, cinq fois plus éloignée du puits que le PR, la vitesse maximale du lithium est supérieure (141 m/h) à celle de l'iodure et du naphthionate (97 m/h). Ces vitesses élevées témoignent de l'existence de fissures largement ouvertes, voire karstifiées. Elles sont supérieures à celles observées à Bertrée (max. 57 m/h). Elles peuvent toutefois difficilement être comparées vus les différences de débit (il est six fois plus élevé à Crisnée qu'à Bertrée) et de distance de traçage.

<sup>1</sup>Profondeur de la craie la plus fissurée indiquée par les diagraphies.

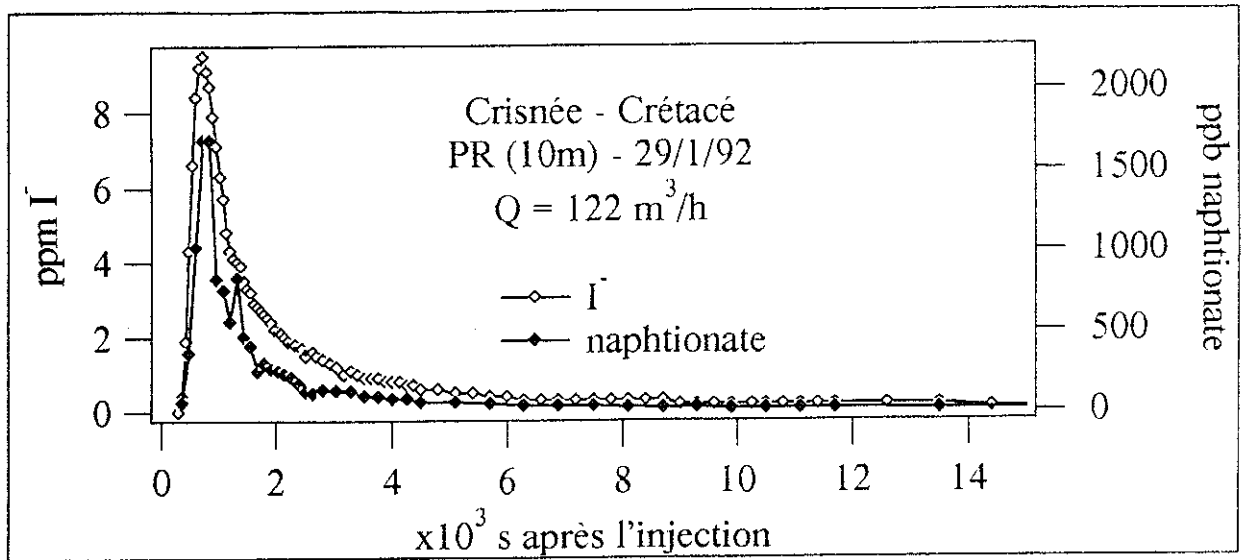


Fig. 2.50 : Courbes de restitution au PE du naphthionate et de l'iodure injectés au PR à Crisnée.

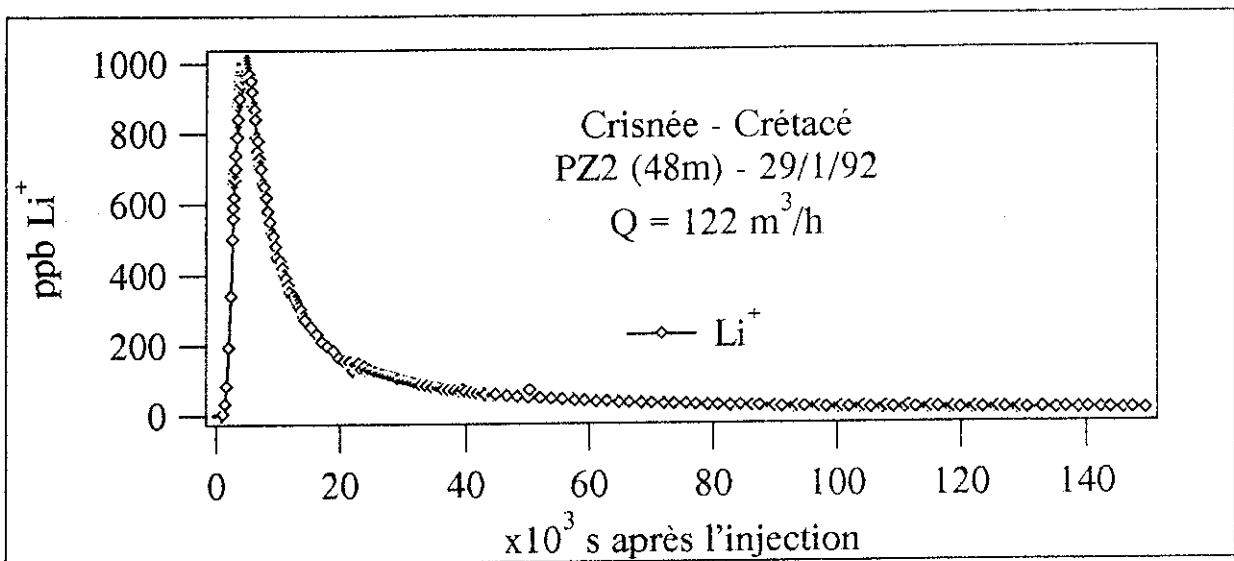


Fig. 2.51 : Courbe de restitution au PE du lithium injecté au PZ2 à Crisnée.

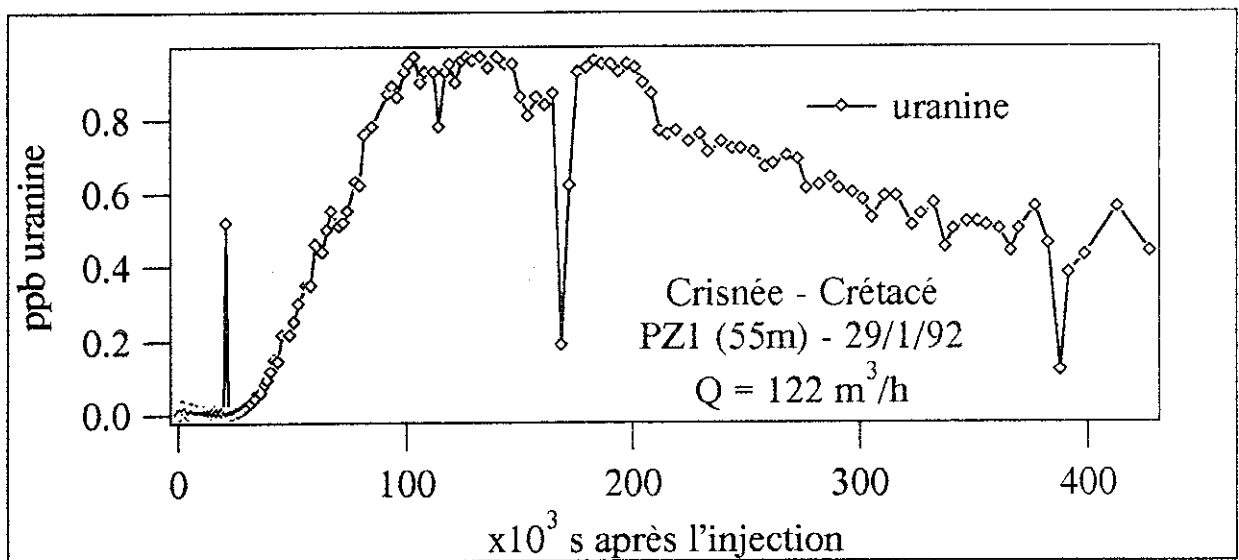


Fig. 2.52 : Courbe de restitution au PE de l'uranine injectée au PZ1 à Crisnée.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
PR / PE	9.70	I-	616	33.9	97.00	48.50	4.37	21.76	93.000
PR / PE	9.70	naphthionate	75	33.9	97.00	48.50	0.66	15.56	53.000
PZ1 / PE	54.40	uranine	50	33.9	7.10	1.89	0.89	1.21	17.000
PZ2 / PE	47.00	Li+	825	33.9	141.00	34.81	4.29	17.46	58.000

**Tab. 2.27** : Caractéristiques des courbes de restitution des traçages dans les piézomètres du Crétacé sur le site de Crisnée.

D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

La vitesse modale du lithium est légèrement inférieure (34,81 m/h) à celle de l'iodure et du naphthionate (48,5 m/h). Cela peut provenir du gradient plus faible au PZ2 qu'au PR.

L'uranine injectée au PZ1 montre, quant à elle, des vitesses nettement plus faibles (vitesse maximale = 7,1 m/h et vitesse modale = 1,89 m/h). L'hypothèse d'un conduit ou d'une zone fissurée très perméable passant au Nord et drainant la nappe en direction de la vallée sèche, permettrait d'expliquer, d'une part la lenteur de l'uranine, et d'autre part son taux de restitution très faible (17 %). En effet, la présence de cette zone plus fissurée pourrait placer non loin du PZ1 la limite du cône d'appel du pompage (fig. 2.53 d'après BIVER, à paraître), avec pour conséquence un gradient très faible autour du PZ1 et la migration d'une partie du traceur dans la direction opposée au puits de pompage.

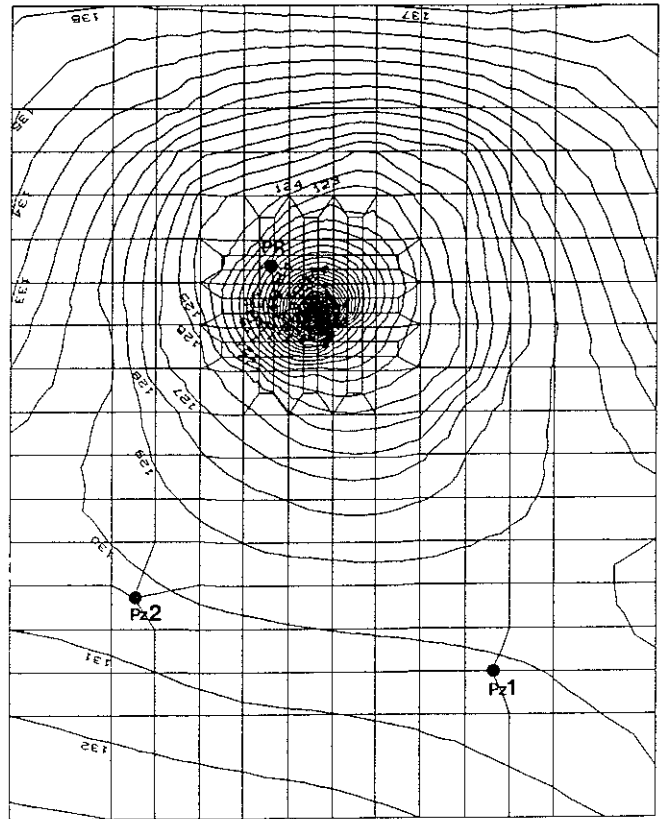
Le même phénomène pourrait expliquer le taux de restitution faible du lithium (58 %), malgré la rapidité du passage en direction du puits de pompage.

L'adsorption sur les argiles à la base du conglomérat à silex est peu à craindre étant donné le niveau de l'injection, dans la partie inférieure de la craie fissurée, c'est-à-dire 8 mètres sous le niveau argileux qui se trouve à la base du conglomérat à silex.

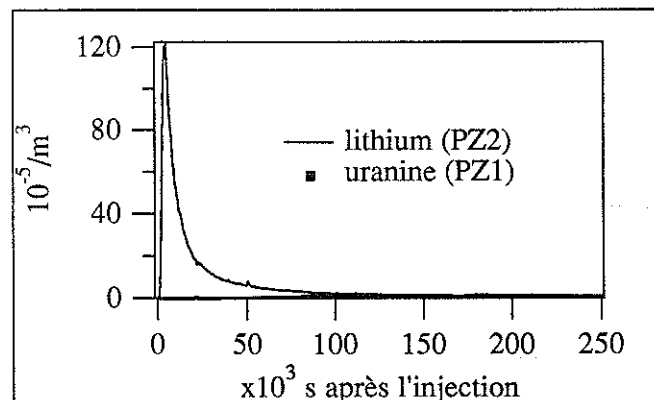
La différence entre la restitution de l'uranine et celle du lithium apparaît clairement sur le graphique en concentrations normées (fig. 2.54), les deux courbes pouvant à peine être représentées à la même échelle.

Le taux de restitution du naphthionate (R = 53 %) confirme son caractère moins conservatif que l'iodure (R = 93 %). On notera toutefois qu'une imprécision sur ces valeurs pourrait provenir de la rapidité du passage ( $t_m = 720$  secondes), laquelle peut, du fait de l'espacement entre échantillons, engendrer une sous-estimation de la valeur de concentration au pic.





**Fig. 2.53** : Piézométrie de la nappe du Crétacé en cours de pompage au PE ( $Q = 122 \text{ m}^3/\text{h}$ ) montrant la crête de partage des eaux à proximité du PZ1. Résultat de la modélisation par éléments finis d'après BIVER (thèse à paraître).



**Fig. 2.54** : Comparaison des courbes de restitution, normées par rapport à la masse injectée, du lithium (PZ2) et de l'uranine (PZ1) à Crisnée. La restitution de l'uranine est beaucoup plus étalée en raison de la position du piézomètre d'injection à proximité d'une crête de partage des eaux.

### 2.5.3.3. TRAÇAGES SUR LE SITE DE GRAND HALLET

#### 2.5.3.3.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site de Grand Hallet (fig. 3) se trouve en Hesbaye, à environ 1,5 km au SW de celui de Bertrée, soit 1,5 km au NW de Hannut. Comme Bertrée, il appartient au bassin de la Petite Gette.

Anciennement utilisé pour le captage par galerie de l'aquifère des sables du Landénien, il a été abandonné à cause de la trop forte teneur en nitrate. Récemment il fut choisi pour l'implantation d'un captage par puits dans la nappe sous-jacente des craies du Crétacé.

Un piézomètre (PZ, profondeur = 44 m) et un puits d'exploitation (PE, profondeur = 45 m, diamètre = 260 mm) ont été creusés à 19,6 m de distance l'un de l'autre et des pompages d'essai ont été réalisés à différents débits au puits d'exploitation.

Le site se trouve en rive gauche d'une vallée orientée NW-SE, dont l'écoulement provient de vidange de la nappe phréatique en amont et des sources du Crétacé en aval.

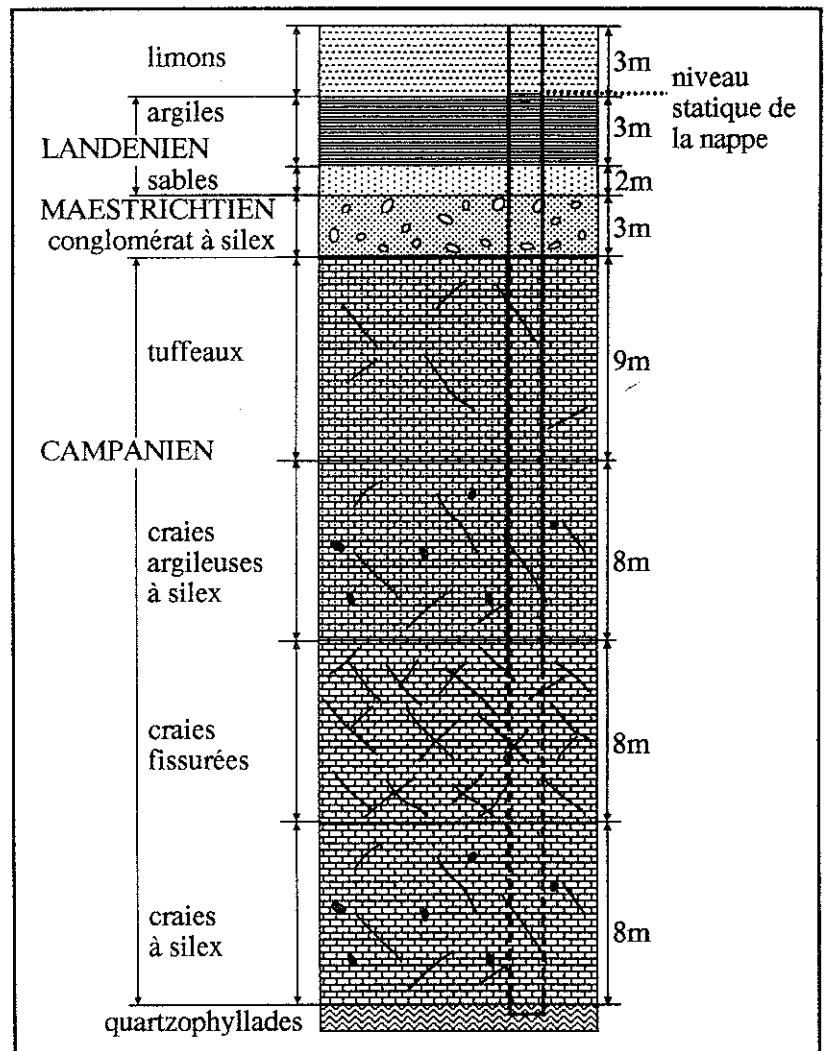
La succession lithologique (fig. 2.55) a été établie sur base des forages et des diagraphies au PE (VALENTINI, 1992). Elle se présente comme suit :

de 0 à 3m :	limons et argiles de couverture (Pléistocène)
de 3 à 6m :	argiles (Landénien)
de 6 à 8m :	sables glauconifères (Landénien)
de 8 à 11m :	conglomérat à silex (Maestrichtien)
de 11 à 20m :	craies et tuffeaux (Campanien)
de 20 à 28m :	craies argileuses à silex (Campanien)
de 28 à 36m :	craies fortement fissurées (Campanien)
de 36 à 44m :	craies compactes (Campanien)
à partir de 44 m :	quartzophyllades (socle paléozoïque)

Les deux formations aquifères sont :

- le Landénien (sables) contenant la nappe phréatique (aquifère à porosité d'interstice)
- le Campanien (craies fissurées), contenant une nappe captive dont le niveau statique s'établit à environ 3 m sous la surface du sol. Les craies argileuses campaniennes, les tuffeaux campaniens, et le conglomérat à silex maestrichtien, jouent ensemble le rôle de toit de l'aquifère. Le mur est constitué par les quartzophyllades du socle paléozoïque. Les diagraphies (caliper, micromoulinet, sonic) ont montré que la craie la plus fissurée se trouve entre 28 et 36 mètres, plus de 50 % de l'eau du forage étant produite à ce niveau.

Le gradient naturel de la nappe des craies atteint environ 0,4 %. Il est dirigé du piézomètre vers le puits d'exploitation.



**Fig. 2.55** : Coupe lithologique simplifiée montrant l'aquifère du Crétacé (Campanien) sur le site de Grand Hallet.

L'interprétation en régime transitoire des tests de pompage à 47 m<sup>3</sup>/h, 70 m<sup>3</sup>/h, 97 m<sup>3</sup>/h, 125 m<sup>3</sup>/h et 150 m<sup>3</sup>/h, donne des valeurs de transmissivité comprises entre 3,8 et 5,1.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s. Ces transmissivités sont plus élevées qu'à Bertrée (1.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s) mais inférieures à celles de Crisnée (1.10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s).

Sur les courbes de rabattement, on a remarqué, comme à Crisnée, l'influence d'une limite de flux. Cette alimentation pourrait provenir de la nappe phréatique (au travers du conglomérat à silex et des tuffeaux) mais elle est plus vraisemblablement due à la présence d'un axe de drainage parallèle à la vallée principale. Les pompages à gros débit ont d'ailleurs provoqué le tarissement d'une source importante en aval.

### 2.5.3.3.2. Mise en oeuvre des traçages

Deux tests de traçage (9 et 13 juillet 1992) ont été réalisés, aux débits de 47 et 97 m<sup>3</sup>/h, avec les mêmes traceurs que ceux utilisés à Bertrée ou à Crisnée (Li<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et uranine).

Les rabattements stabilisés au puits d'exploitation et au piézomètre valent respectivement 2,07 et 1,61 m pour le palier à 47 m<sup>3</sup>/h, 3,33 et 2,46 m pour celui à 97 m<sup>3</sup>/h. Les caractéristiques des injections sont résumées dans le tab. 2.28).

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Piézomètre d'injection	Distance (m)	Traceur	Quantité (g)	Type d'injection
47	PZ	19,6	LiCl	3000	(1)
97	PZ	19,6	uranine	20	(2)
	PZ	19,6	KNO <sub>3</sub>	5105	(2)

**Tab. 2.28** : Caractéristiques des injections dans le piézomètre du Crétacé sur le site de Grand Hallet.

Dans le premier mode d'injection (mode 1), on a injecté en 6 minutes le traceur dilué dans 200 litres d'eau, via un tuyau dont l'extrémité se trouvait à 30 m de profondeur (craie fissurée). Ensuite, durant 6 minutes, 220 litres d'eau claire ont été déversés dans le tuyau pour le vider du traceur.

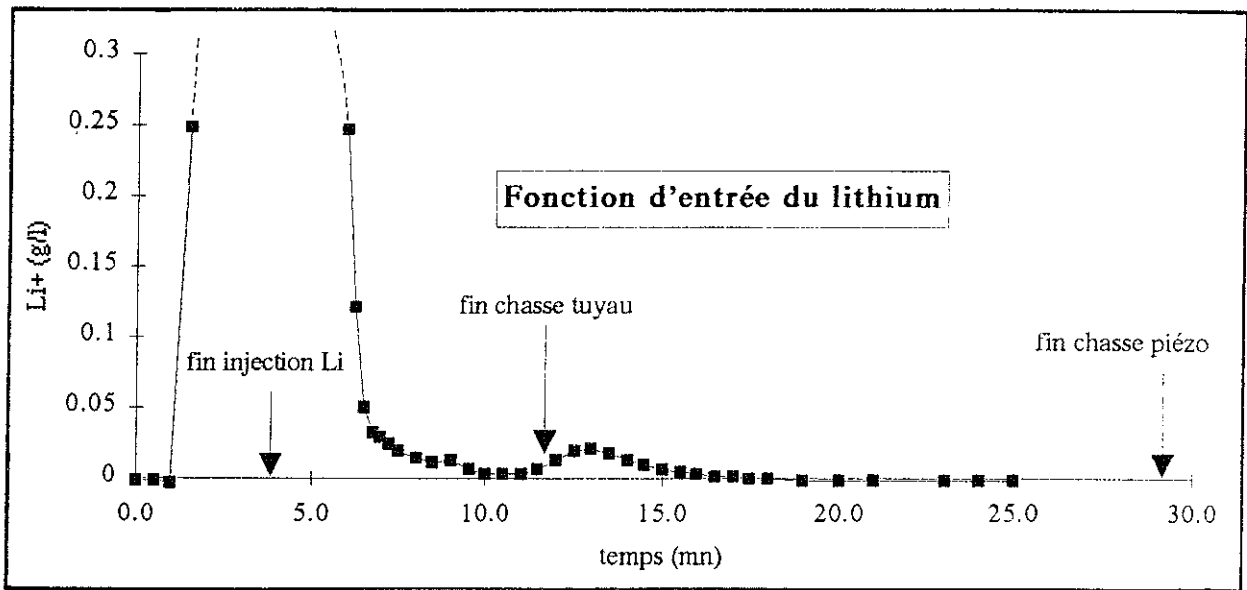
Enfin, durant 5 minutes, 220 litres ont été à leur tour déversés dans le piézomètre à l'extérieur du tuyau ayant servi à l'injection du traceur, afin d'empêcher la migration de ce dernier dans la zone d'eau morte au-dessus des 28 m (tube aveugle).

Dans le second mode (mode 2), le traceur, dilué dans 50 litres, a été déversé en 3 minutes dans le tuyau d'injection et ensuite chassé pendant 4 minutes avec 100 litres d'eau claire.

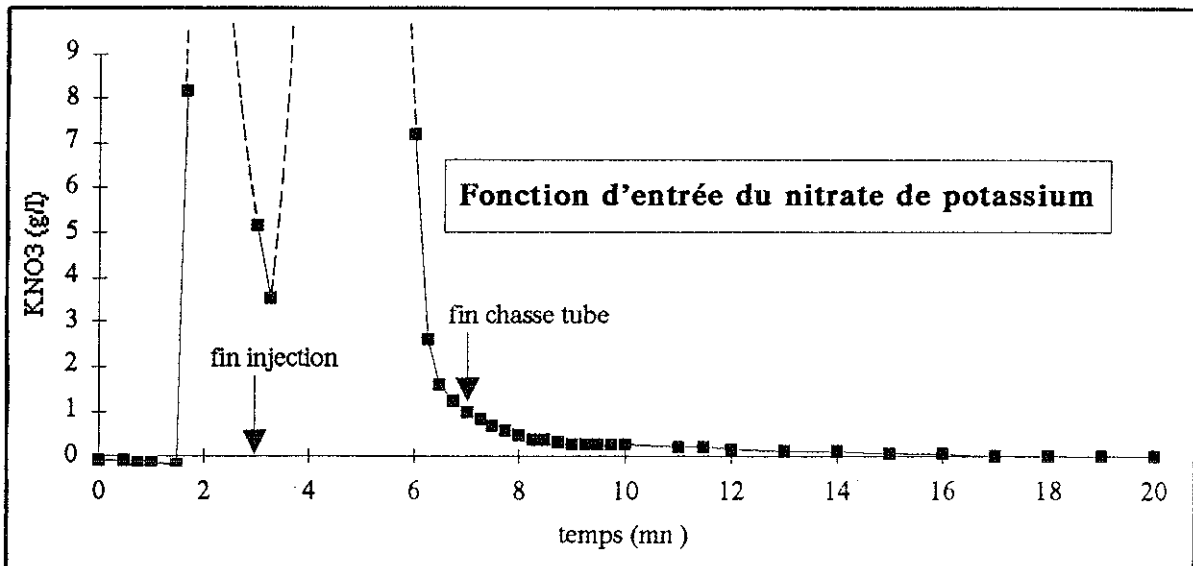
Dans chaque cas, la fonction d'entrée a été suivie par des mesures de conductivité à l'aide d'une sonde placée à 33 m de profondeur. Les courbes d'étalonnage de la conductivité en fonction des teneurs en LiCl et en KNO<sub>3</sub> (VALENTINI, 1992) ont ainsi permis d'obtenir les fonctions d'entrée, exprimées en concentration de traceur (fig. 2.56 et 2.57).

Dans les deux cas, le traceur quitte le piézomètre en une dizaine de minutes (du moins au niveau du point de mesure). Malgré la rapidité, cela est tout de même long, comparé au temps de passage du traceur (t<sub>max</sub> = 58 minutes à 47 m<sup>3</sup>/h et t<sub>max</sub> = 31 minutes à 97 m<sup>3</sup>/h). Les injections ne peuvent donc plus être considérées en toute rigueur comme des impulsions de Dirac.

La chasse dans le piézomètre (mode 1) a eu pour effet de refouler vers le bas le lithium ayant diffusé vers le haut de la colonne au niveau du tube aveugle. Ce refoulement se marque par une légère augmentation de la concentration 12 minutes après le début de l'injection.



**Fig. 2.56 :** Fonction d'entrée du lithium établie à partir des mesures de conductivité dans le piézomètre PZ à Grand Hallet.



**Fig. 2.57 :** Fonction d'entrée du nitrate de potassium établie à partir des mesures de conductivité dans le piézomètre PZ à Grand Hallet.

### 2.5.3.3. Résultats des traçages

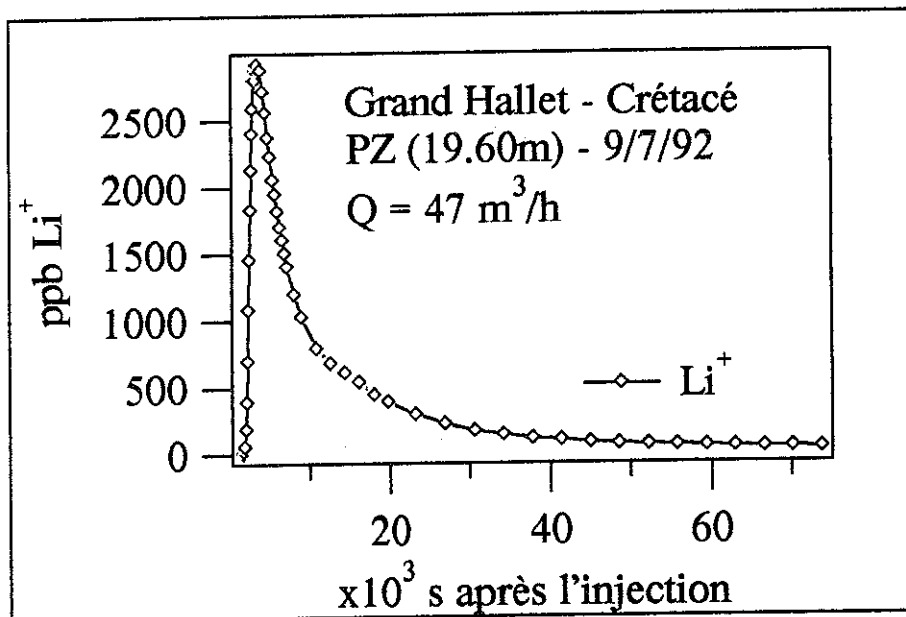
Les traceurs sont parvenus très rapidement au puits de pompage. Cela ne peut s'expliquer que par l'existence de fissures très perméables joignant le puits au piézomètre, parallèlement à la vallée principale.

Les courbes de restitution sont présentées aux fig. 2.58 et 2.59. Leurs caractéristiques sont rassemblées dans le tab. 2.29.

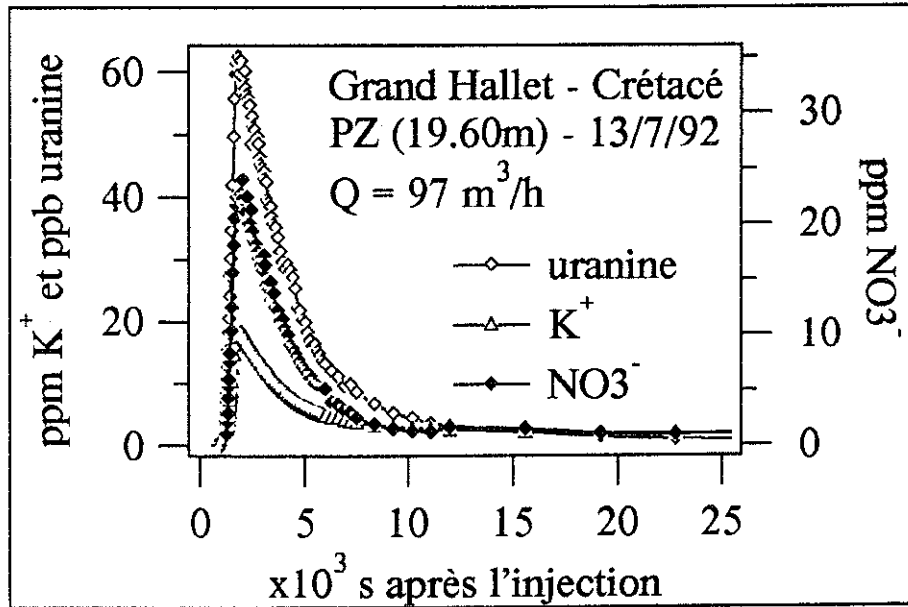
Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
PZ / PR	19.60	Li+	500	13	42.00	20.28	4.80	9.77	67.000
PZ / PR	19.60	uranine	20	26.8	65.33	37.94	6.62	18.84	34.000
PZ / PR	19.60	K+	1971	26.8	67.85	37.94	6.19	17.18	80.000
PZ / PR	19.60	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3133	26.8	56.90	34.59	1.97	12.30	81.000

**Tab. 2.29** : Caractéristiques des courbes de restitution des traçages dans le piézomètre du Crétacé sur le site de Grand Hallet.

D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.



**Fig. 2.58** : Courbe de restitution au PE du lithium injecté au PZ à Grand Hallet (Q = 47 m<sup>3</sup>/h).



**Fig. 2.59** : Courbes de restitution au PE de l'uranine, du potassium et du nitrate injectés au PZ à Grand Hallet (Q = 97 m<sup>3</sup>/h).

Les vitesses maximales varient entre 42 m/h (lithium pour Q = 47 m<sup>3</sup>/h) et 67,85 m/h (potassium pour Q = 97 m<sup>3</sup>/h).

Les vitesses modales sont comprises entre 20,28 et 37,94 m/h. Ces dernières sont du même ordre de grandeur que la vitesse du lithium à Crisnée (V<sub>m</sub> = 34,81 m/h), pour une distance deux fois plus faible à Grand Hallet.

Les vitesses maximales et les vitesses modales sont un peu moins que doublées lorsque le débit est doublé.

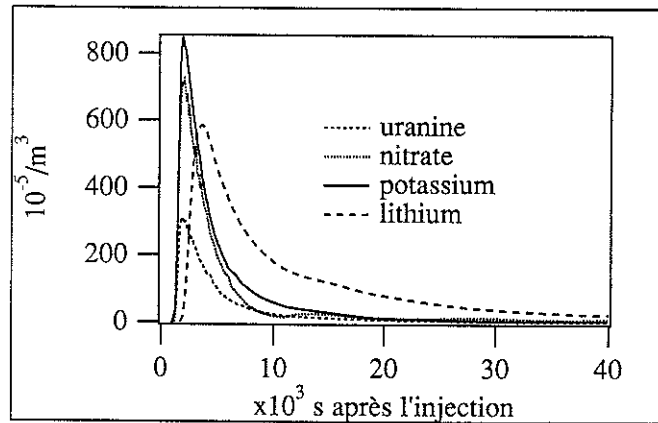
Le taux de restitution assez faible du lithium (67 %) peut être attribué, d'une part à l'adsorption, d'autre part au piégeage d'une partie du traceur dans le piézomètre d'injection.

Les taux de restitution sont plus élevés dans le cas du potassium (80 %) et du nitrate (81 %). Cela pourrait être dû aux raisons suivantes :

- moins de phénomènes d'adsorption,
- moins de piégeage dans le piézomètre, grâce d'une part au plus grand débit, et d'autre part au mode d'injection plus efficace.

Le taux de restitution de l'uranine est relativement faible (34 %), malgré la rapidité du passage. C'est pourtant le taux de restitution le plus élevé que l'on ait observé jusqu'à présent dans la craie de Hesbaye. Les pertes pourraient provenir de l'adsorption (sur les argiles au toit et au mur de l'aquifère), du piégeage dans le piézomètre, ou encore d'une diffusion du traceur en dehors du cône d'appel du pompage (moins probable vu le gradient naturel en direction du puits et vu l'importance du débit).

Le graphique de la fig. 2.60 (concentrations normées) illustre bien les réponses des différents traceurs : la réponse plus étalée du lithium due au débit de pompage plus faible, les réponses semblables du potassium et du nitrate et la réponse très amortie de l'uranine, pour les raisons que nous venons d'évoquer.



**Fig. 2.60** : Courbes de restitution, normées par rapport à la masse injectée, des traceurs injectés à Grand Hallet à différents débits (lithium à  $Q = 47 \text{ m}^3/\text{h}$ , uranine, potassium et nitrate à  $Q = 97 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

## 2.5.3.4. TRAÇAGE SUR LE SITE DE JANDRAIN

### 2.5.3.4.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

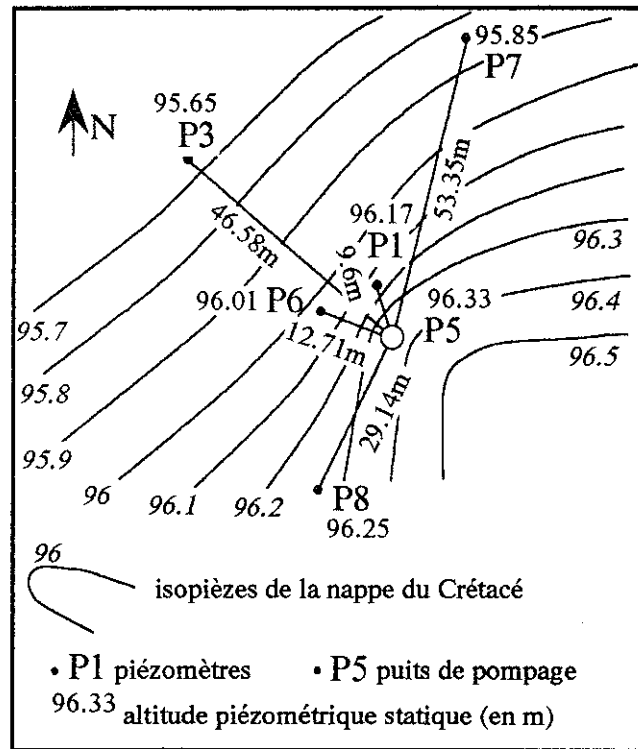
Le site se trouve également en Hesbaye (fig. 3), à un peu plus de 3 km à l'Ouest de Hannut, au centre du village de Jandrain. Il appartient, au même titre que Bertrée et Grand Hallet, au bassin de la Petite Gette, affluent de l'Escaut. Il est situé en rive droite, à quelques dizaines de mètres d'un ruisseau prenant sa source au Sud de Jandrain.

Une fuite à partir de la station service TOTAL située au centre du village a provoqué il y a peu l'infiltration dans le sous-sol de quelques milliers de litres d'essence sans plomb. Afin d'étudier la propagation de la pollution et le danger qu'elle représente pour les sources captées (captages S.W.D.E.) quelques 800 mètres en aval à Orp-Jauche, 6 forages ont été réalisés dans la craie, l'un d'eux (P5) étant destiné à extraire le polluant.

La localisation des forages est montrée à la fig. 2.61, de même que la piézométrie (altitudes par rapport au niveau de la mer).

L'érosion de surface a presque entièrement décapé la couverture des terrains meubles tertiaires et quaternaires. Le Crétacé (craies à silex du Campanien) constitue par conséquent le seul aquifère et la nappe est libre.





**Fig. 2.61** : Situation du puits P5 et des piézomètres dans la nappe du Crétacé (Campanien) à Jandrain. Carte piézométrique de la nappe avant pompage.

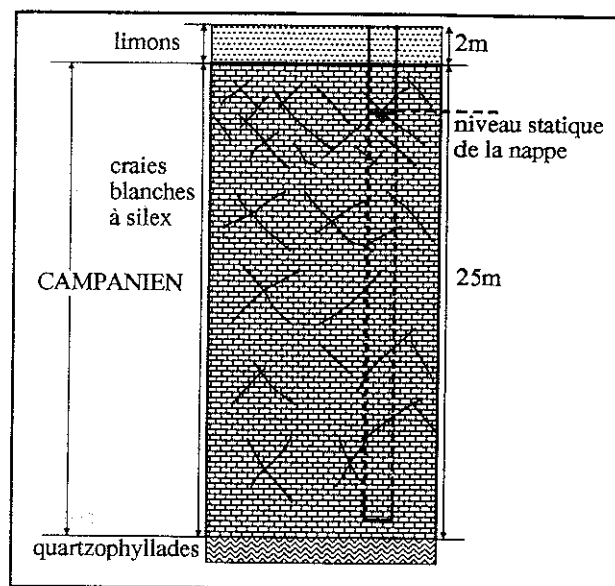
Le ruisseau à l'Ouest forme une limite à potentiel imposé.

La longueur insuffisante des forages n'a pas permis d'atteindre la base de l'aquifère. Sur base des forages à Orp-Jauche, on a cependant pu estimer la profondeur du socle paléozoïque formant le mur de la nappe à un peu plus de 25 mètres. La succession lithologique (fig. 2.62) est alors la suivante :

- de 0 à 2m : limons (Pléistocène)
- de 2 à 25m : craie blanche à silex (Campanien)
- à partir d'environ 25m : quartzophyllades (socle)

La nappe s'écoule vers le NW en direction du ruisseau, avec un gradient moyen d'environ 1 ‰ (fig. 2.61).

Les transmissivités, déduites des pompages d'essai, sont comprises entre  $2$  et  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Elles sont un peu plus élevées qu'à Bertrée ( $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ) mais plus faibles qu'à Grand Hallet ( $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ) et Crisnée ( $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Elles ont été calculées en utilisant la correction de Hantush pour tenir compte de la pénétration incomplète des forages (VALENTINI, 1992). Contrairement aux autres sites étudiés dans la craie, à Jandrain aucune nappe superficielle n'alimente la nappe du Crétacé.



**Fig. 2.62** : Coupe lithologique simplifiée montrant l'aquifère du Crétacé (Campanien) sur le site de Jandrain.

#### 2.5.3.4.2. Mise en oeuvre du traçage

Malgré la transmissivité relativement faible de la plupart des forages, les communications ont été testées par un traçage (28 juillet 1992) en écoulement radial convergent avec pompage au P5.

Trois piézomètres furent choisis pour les injections : deux d'entre eux (P1 et P6) pour leur proximité par rapport au P5 (respectivement 9,6 et 12,71 m), le troisième (P8) parce qu'il était le seul piézomètre situé en amont du P5 par rapport au sens d'écoulement naturel de la nappe.

Le débit de pompage a été de 12,7 m<sup>3</sup>/h.

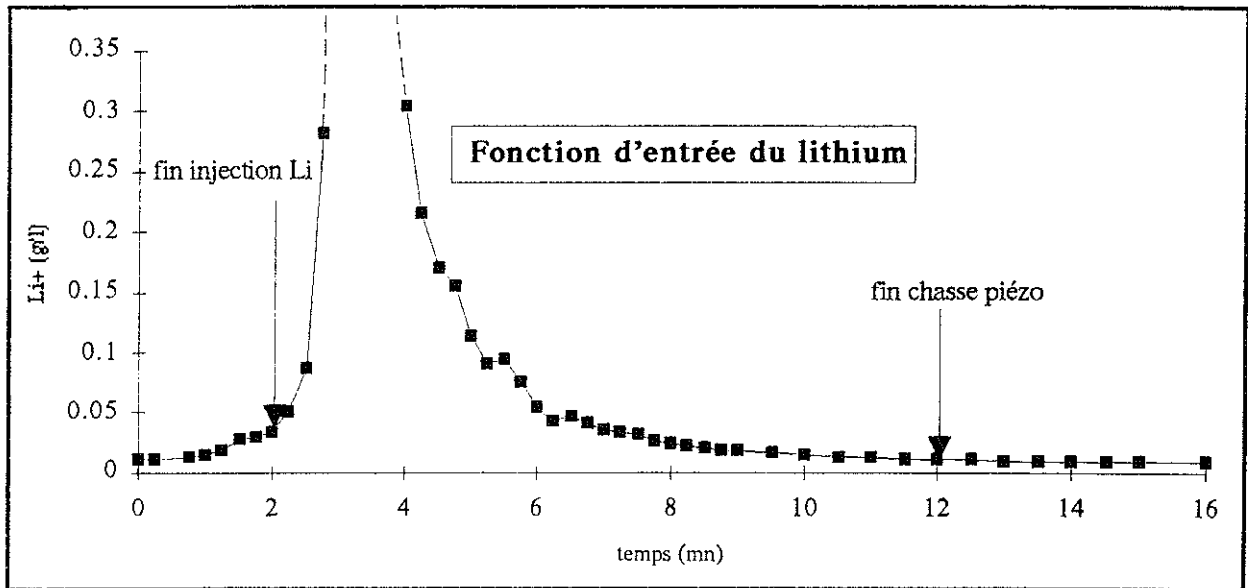
Les caractéristiques des injections sont reprises dans le tab. 2.30.

Débit (m <sup>3</sup> /h)	Piézomètre d'injection	Distance (m)	Traceur	Quantité (g)	Type d'injection
12,7	P8	29,14	NaCl	25000	(1)
	P6	12,71	uranine	115	(1)
	P1	9,60	LiCl	2000	(1)

**Tab. 2.30** : Caractéristiques des injections dans les piézomètres du Crétacé sur le site de Jandrain.

Le seul mode d'injection (mode 1) a consisté à verser le traceur en solution (200 l pour le NaCl, 20 l pour le LiCl et 5 l pour l'uranine) dans le piézomètre et à le chasser durant quelques minutes avec un volume d'eau claire (220 litres).

La fonction d'entrée du LiCl a été suivie comme dans le cas de Grand Hallet (fig. 2.63).



**Fig. 2.63** : Fonction d'entrée du lithium établie à partir des mesures de conductivité dans le piézomètre P1 à Jandrain.

L'injection a à nouveau été terminée en moins de dix minutes. Le maintien de la sonde à une profondeur déterminée n'a malheureusement pas permis de s'assurer de l'évacuation complète du traceur hors du piézomètre sur toute la hauteur de la colonne d'eau.

Les prélèvements à la sortie du pompage ont duré seulement 24 heures.

### 2.5.3.4.3. Résultats du traçage

Des trois traceurs injectés, seul le lithium en provenance du P1 a été retrouvé au puits de pompage. Les deux autres traceurs (P6 et P8) ont été injectés, soit trop loin, soit dans des zones trop peu perméables, soit en dehors du cône d'appel du pompage.

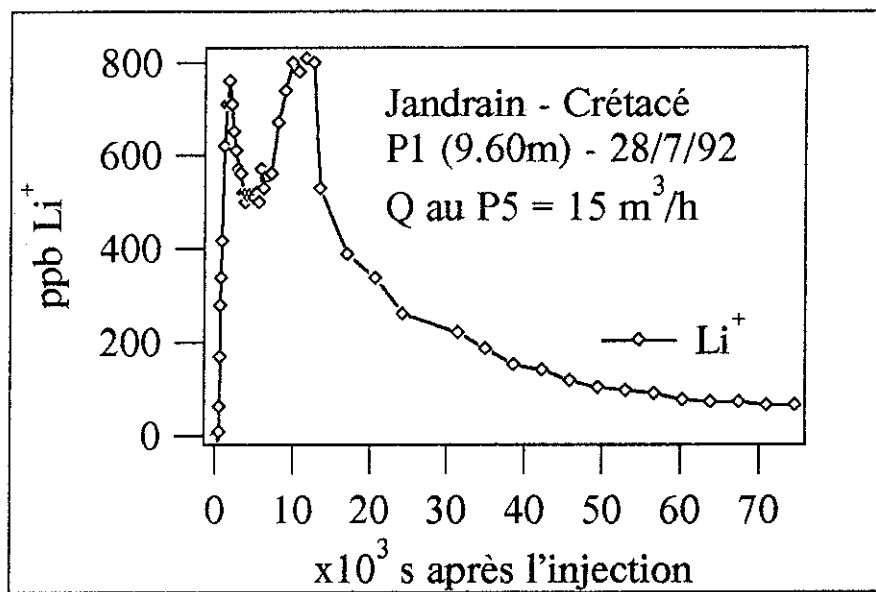
La courbe de restitution du lithium est présentée à la fig. 2.64. Ses caractéristiques sont rassemblées dans le tab. 2.31.

La courbe est bimodale : un premier pic correspond à un court-circuit via des fissures plus perméables et un second à la migration du traceur dans le réseau de microfissures.

La vitesse maximale est élevée (72 m/h) en accord avec l'existence de fissures relativement larges.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
P1 / P5	9.60	Li+	333	4.17	72.00	19.86 (2.97)	1.57	4.03	23.000

**Tab. 2.31** : Caractéristiques de la courbe de restitution du lithium injecté dans le piézomètre P1 à Jandrain. D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %. Le chiffre entre parenthèses correspond au second pic.



**Fig. 2.64** : Courbe de restitution au P5 du lithium injecté au P1 à Jandrain ( $Q = 15 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

La vitesse modale correspondant au premier pic (19,86 m/h) est du même ordre de grandeur que celle observée à Bertrée (lithium au Pz12), pour une distance et un débit de pompage à peu près identiques.

La vitesse modale correspondant au second pic est nettement plus faible (2,97 m/h) et, à ce titre, elle s'apparente plus à celle de l'uranine injectée au Pz2 à Bertrée. Dans les deux cas, le transport a lieu dans le sens opposé au gradient naturel de la nappe. Le taux de restitution très faible (23 %) pourrait d'ailleurs indiquer qu'une partie du traceur a échappé au cône d'appel du pompage.

## 2.5.4. TRAÇAGES DANS LES SABLES DU LANDENIEN

### 2.5.4.1. TRAÇAGES SUR LE SITE DE BERTREE

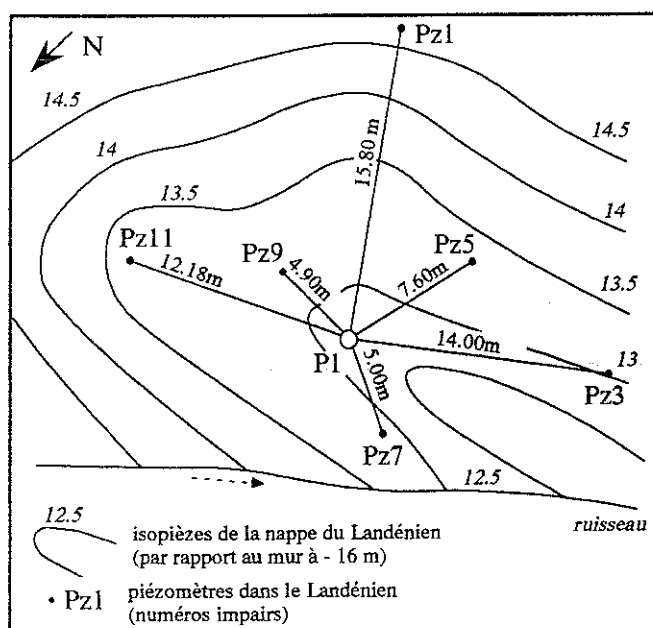
#### 2.5.4.1.1. Situation géographique et contexte hydrogéologique

Le site et le contexte hydrogéologique sont décrits au § 2.5.3.1.1. (fig. 2.42).

Nous nous intéresserons plus particulièrement ici à l'aquifère des sables et "tuffeaux" du Landénien situés entre 3 et 16 m de profondeur. Il s'agit d'un aquifère fortement hétérogène, à porosité de fissure et d'interstice, plus ou moins riche en argile. Le mur est formé par les marnes heersiennes (L1a).

Les situations des piézomètres (Pz1 à Pz11) et du puits de pompage (P1) sont reprises à la fig. 2.65 de même que la piézométrie de la nappe en écoulement naturel. Les hauteurs piézométriques sont données par rapport au sommet des marnes, à 16 m sous la surface du sol. La nappe s'écoule vers l'Ouest en direction du ruisseau formant une limite à potentiel imposé. Un drainage principal a lieu suivant l'axe Pz11-Pz9-P1.

Les tests de pompage interprétés en régime transitoire indiquent que les transmissivités sont comprises entre  $3,3 \cdot 10^{-3}$  et  $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . La valeur la plus élevée est observée au P1. Ces valeurs sont un peu plus élevées que celles rencontrées dans l'aquifère crayeux sous-jacent ( $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ).



**Fig. 2.65 :** Situation du puits P1 et des piézomètres dans la nappe du Landénien à Bertree. Carte piézométrique de la nappe avant pompage.

### 2.5.4.1.2. Mise en oeuvre des traçages

Deux expériences de traçage (26 février et 23 avril 1991) ont été réalisées avec le même débit ( $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Dans la première, deux directions (Pz1 et Pz9) ont été testées en utilisant des traceurs salins (NaCl, LiCl, KI, KNO<sub>3</sub>) et fluorescents (uranine, rhodamine B). Dans la seconde, trois directions ont été testées (Pz1, Pz7 et Pz9) avec les mêmes traceurs, à l'exception de la rhodamine B (au rendement médiocre). Le NaCl a été injecté dans le Pz7, en aval du P1 dans le sens d'écoulement naturel de la nappe.

Les caractéristiques des injections sont rassemblées dans le tab. 2.32.

Débit ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Piézomètre d'injection	Distance (m)	Traceur	Quantité (g)	Mode d'injection
1er test :  10	Pz1	15,80	uranine	4	(1)
	Pz1	15,80	LiCl	2000	(1)
	Pz1	15,80	NaCl	10636	(1)
	Pz9	4,90	KI	207	(2)
	Pz9	4,90	rhodamine B	1	(2)
	Pz9	4,90	KNO <sub>3</sub>	5130	(2)
2ème test :  10	Pz1	15,80	uranine	100	(3)
	Pz1	15,80	LiCl	2000	(3)
	Pz9	4,90	KI	2000	(2)
	Pz9	4,90	KNO <sub>3</sub>	5000	(2)
	Pz7	5,00	NaCl	10735	(2)

**Tab. 2.32** : Caractéristiques des injections dans les piézomètres du Landénien sur le site de Bertrée.

Toutes les injections ont eu lieu à 12 m de profondeur.

Le mode d'injection (1) correspondait à une injection plus ou moins continue pendant 6 heures avec un débit de 8 l/h à l'aide d'un vase de MARIOTTE. Cette injection a été suivie d'une chasse avec un débit de  $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$ , 1 m au-dessus et 1 m en dessous du niveau d'injection.

Le mode (2) était une injection instantanée avec chasse au-dessus et en dessous, comme dans le cas précédent, mais avec un débit de  $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$  pour le premier test et de  $2,2 \text{ m}^3/\text{h}$  pour le second.

Le mode (3) était une injection continue à l'aide d'une pompe doseuse pendant 16 heures avec, comme précédemment, une chasse au-dessus et en dessous ( $Q = 0,25 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

Les prélèvements avaient lieu à la sortie du puits P1, manuellement et à l'aide d'échantillonneurs automatiques.

### 2.5.4.1.3. Résultats des traçages

Les courbes de restitution des traceurs au cours du premier test sont présentées aux fig. 2.66 et 2.67, celles du second test aux fig. 2.68, 2.69 et 2.70. Leurs caractéristiques sont consignées dans le tab. 2.33.

Relation	D	Traceur	M	Q	Vmax	Vm	Vapp	Vmoy	R
Pz1 / P1 1er test	15.80	uranine	4	2.78	27.09	1.39	0.57	0.94	4.000
Pz1 / P1 1er test	15.80	Na+	4217	2.78	2.02	1.53	0.66	0.90	12.000
Pz1 / P1 1er test	15.80	Li+	191	2.78	70.20	1.28	0.58	0.92	17.000
Pz9 / P1 1er test	4.90	NO3-	3149	2.78	19.60	1.50	0.31	1.38	42.000
Pz1 / P1 2ème test	15.80	uranine	100	2.78	31.60	0.57	0.25	0.41	13.000
Pz1 / P1 2ème test	15.80	Li+	333	2.78	15.80	0.74	0.32	0.58	30.000
Pz9 / P1 2ème test	4.90	I-	1530	2.78	30.95	1.96	0.16	0.84	60.000
Pz9 / P1 2ème test	4.90	NO3-	3072	2.78	19.60	2.15	0.88	1.57	30.000
Pz7 / P1 2ème test	5.00	Na+	4256	2.78	1.43	0.42	0.14	1.73	9.000

**Tab. 2.33** : Caractéristiques des courbes de restitution des traçages dans les piézomètres du Landénien sur le site de Bertrée.

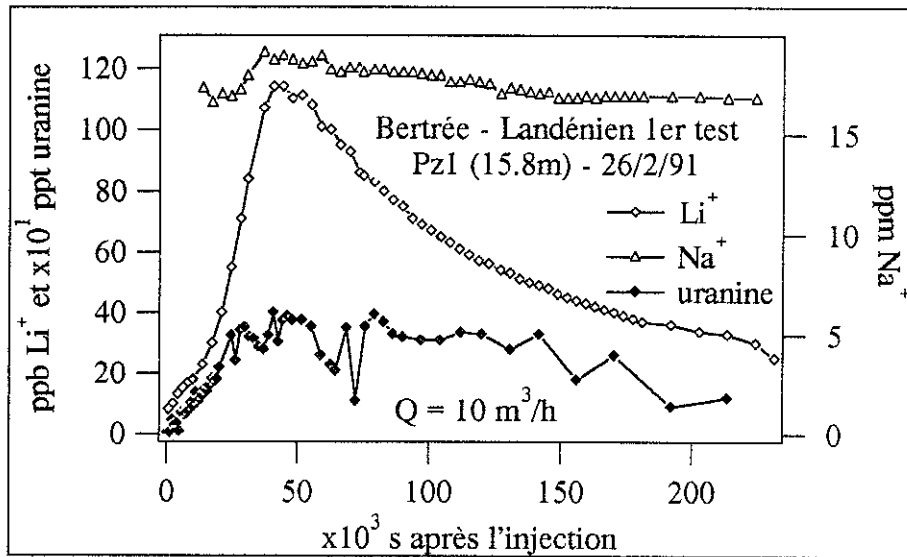
D = distance en m M = masse injectée en g Q = débit au point de sortie en l/s Vmax = vitesse maximale en m/h Vm = vitesse modale en m/h Vapp = vitesse apparente de transit en m/h Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %.

L'iodure et la rhodamine B injectés au Pz9 au cours du premier test n'ont pas été retrouvés. Les quantités utilisées ont été trop faibles eu égard à la méthode de détection (fluorimètre à filtre pour la rhodamine B et potentiométrie pour l'iodure).

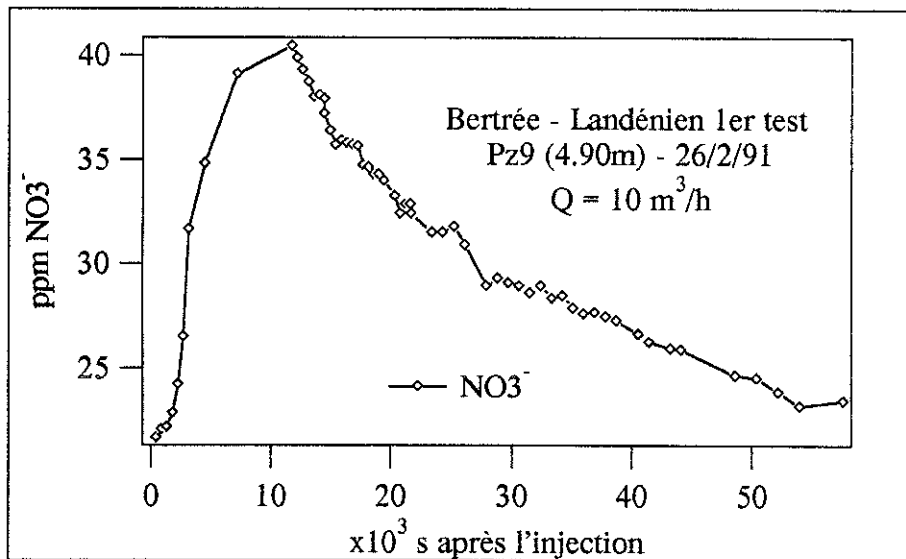
Les quantités d'uranine et de sodium ont également été un peu faibles pour de telles conditions de traçage.

Les vitesses maximales sont conditionnées par les limites de détection des traceurs et les modes d'injection. La vitesse la plus élevée est celle du lithium au cours du premier test (70,22 m/h, alors qu'elle n'est plus que de 15,8 m/h dans le second test). Cette arrivée précoce est due à une fuite du système d'injection avant le début de l'injection proprement dite (épaulement sur la courbe de restitution).

Les vitesses modales sont plus significatives. Elles sont presque toujours inférieures à 2 m/h. Elles sont maximales dans le cas de l'iodure et du nitrate injectés au Pz9 au cours du second test, et minimales dans le cas du sodium injecté au Pz7, également au cours du second test.



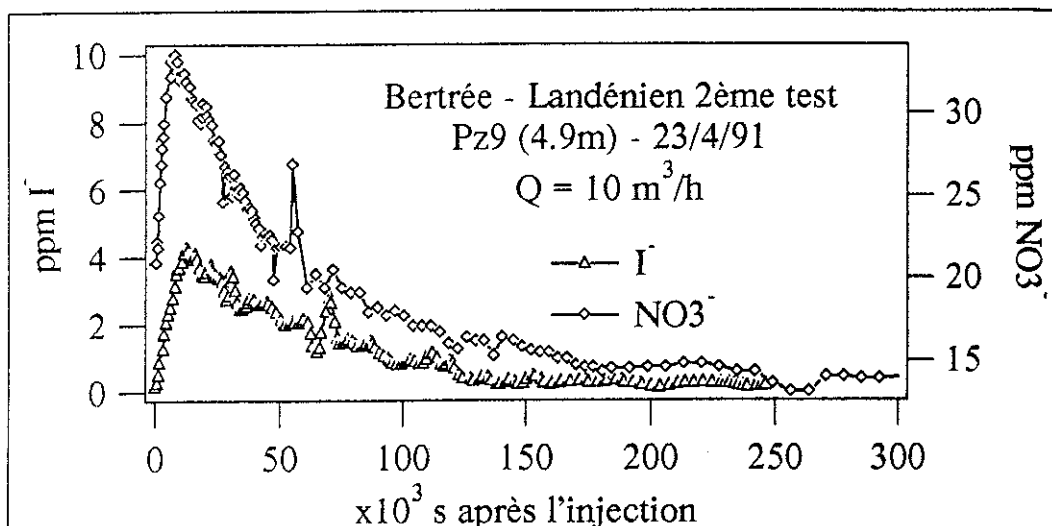
**Fig. 2.66** : Courbes de restitution au P1 de l'uranine, du lithium et du sodium injectés au Pz1 lors du premier test dans la nappe du Landénien à Bertrée.



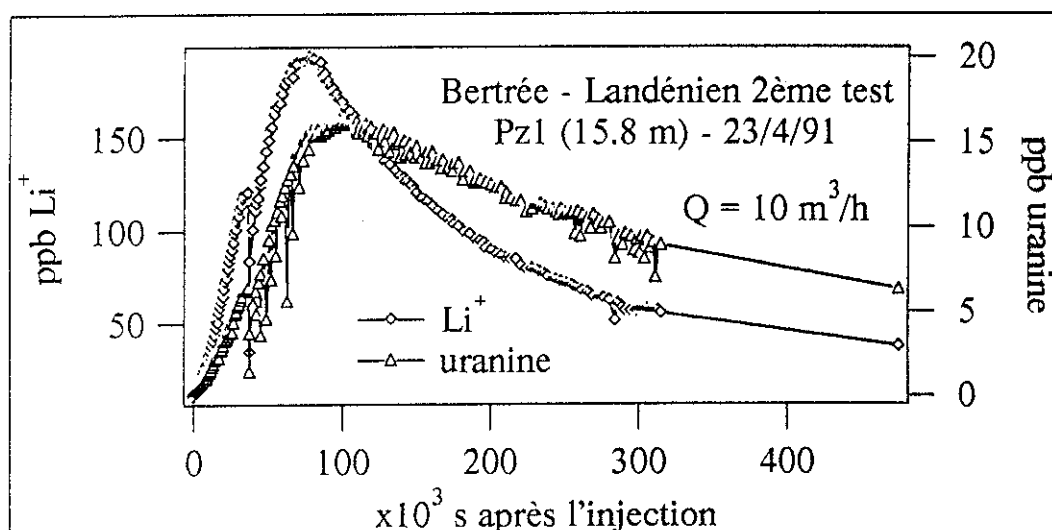
**Fig. 2.67** : Courbe de restitution au P1 du nitrate injecté au Pz9 lors du premier test dans la nappe du Landénien à Bertrée.

Malgré les transmissivités plus élevées du Landénien, les vitesses modales sont largement inférieures (excepté pour l'uranine injectée au Pz2) à celles observées dans le Crétacé (entre 15 et 30 m/h). Cette différence provient de l'existence de fissures plus larges dans l'aquifère crayeux et du rôle plus important de la porosité de matrice dans l'aquifère du Landénien. L'épaisseur de l'aquifère pourrait également avoir une influence.

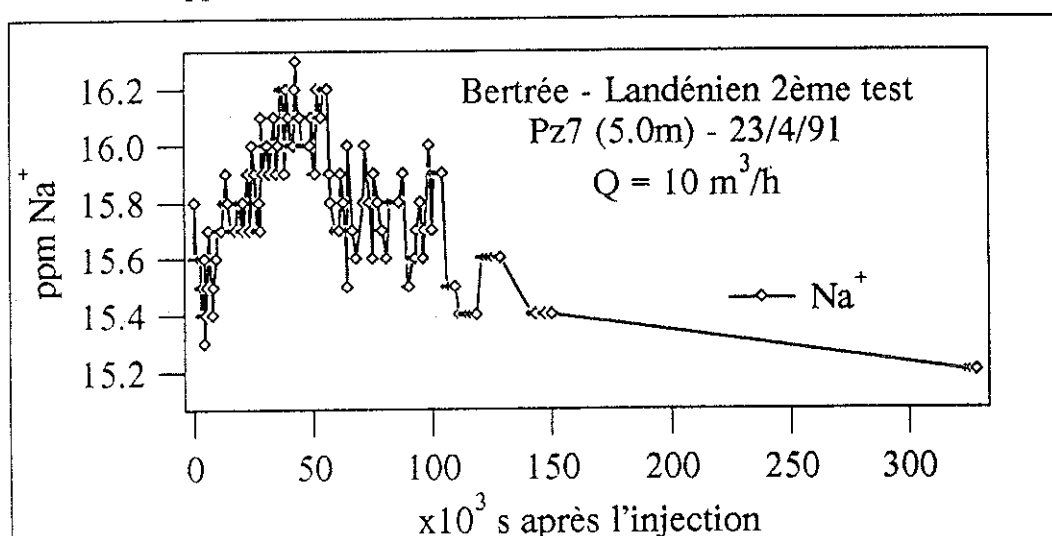




**Fig. 2.68** : Courbes de restitution au P1 de l'iodure et du nitrate injectés au Pz9 lors du second test dans la nappe du Landénien à Bertrée.



**Fig. 2.69** : Courbes de restitution au P1 de l'uranine et du lithium injectés au Pz1 lors du second test dans la nappe du Landénien à Bertrée.



**Fig. 2.70** : Courbe de restitution au P1 du sodium injecté au Pz7 lors du second test dans la nappe du Landénien à Bertrée.

L'importance de la porosité de matrice du Landénien est confirmée par les taux de restitution très faibles (en général inférieurs à 50 %), dus au piégeage des traceurs dans la matrice, soit par adsorption à la surface des argiles, soit par diffusion vers l'eau immobile.

Le taux de restitution du sodium injecté au Pz7 est très faible (9 %). Une partie du traceur pourrait avoir échappé au pompage suite à l'entraînement par l'écoulement naturel de la nappe.

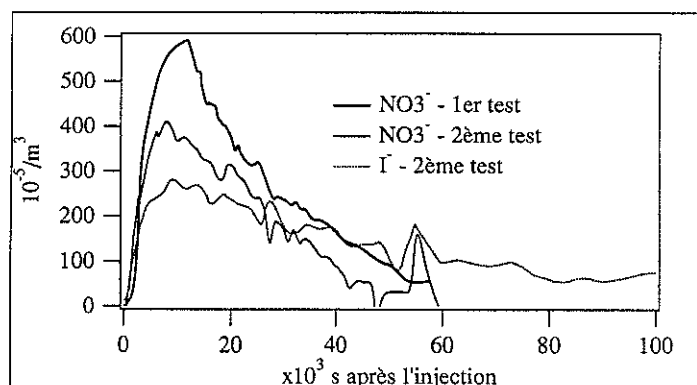
Comparée aux autres traceurs, l'uranine semble être la plus affectée par les pertes ( $R = 4$  et 13 %). Elle est d'une part plus sorptive et d'autre part plus diffusive en raison de sa taille moléculaire. Ces phénomènes sont responsables du retard (par rapport au lithium injecté au même endroit) observé sur le graphique de la fig. 2.69.

A l'exception d'un taux de restitution plus faible pour le nitrate (30 % contre 60 % pour l'iode), l'iode et le nitrate ont des comportements très proches (fig. 2.68). Le nitrate subit sans doute des réactions chimiques ou biologiques dans la nappe. L'iode peut pratiquement être considéré comme un traceur idéal.

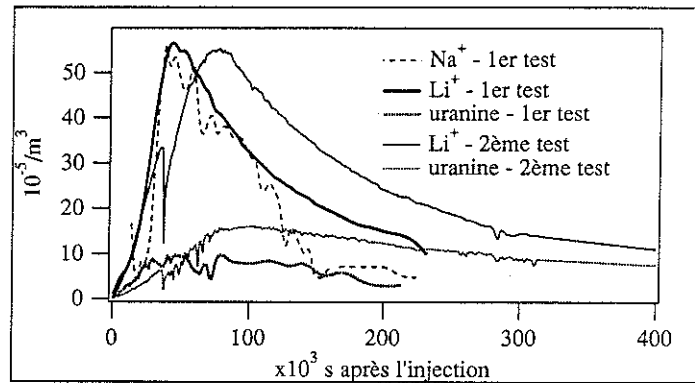
Il est intéressant de comparer, au moyen des courbes de restitution normées (fig. 2.71 et 2.72), les injections réalisées à partir d'un même piézomètre (piézomètres Pz9 et Pz1).

Dans le premier cas (fig. 2.71), on voit que le nitrate décroît plus rapidement que l'iode. Cela peut être dû à la dégradation du traceur suite aux réactions chimiques ou biologiques.

Dans le second cas (fig. 2.72), on voit nettement la différence de comportement entre le lithium et l'uranine. Le sodium a un comportement fort semblable à celui du lithium, excepté la queue moins allongée en raison de l'adsorption plus faible. Les fluctuations du bruit de fond du sodium introduisent toutefois une grande imprécision sur les concentrations faibles de la queue.



**Fig. 2.71** : Courbes de restitution, normées par rapport à la masse injectée, des traceurs injectés au Pz9 à Bertrée (premier et second test).



**Fig. 2.72 :** Courbes de restitution, normées par rapport à la masse injectée, des traceurs injectés au Pz1 à Bertrée (premier et second test).

Les différences observées entre les deux tests pour le lithium et l'uranine proviennent de modes d'injection différents. L'injection est en effet plus longue d'une dizaine d'heures dans le second test.

### 2.5.5. DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR

Les courbes de distribution des temps de séjour (DTS) sont les courbes de flux normées par rapport à la masse de traceur restituée (voir § 2.3.2.1.).

Mis à part le fait que leur forme dépend du débit et de la distance de traçage, ces DTS sont très pratiques pour comparer les différentes restitutions car la surface sous les courbes est toujours unitaire.

Les courbes de distribution des temps de séjour ont été calculées dans tous les cas où les débits aux sorties du système étaient connus. Ces courbes, correspondant aux traçages dans les calcaires du Carbonifère, dans les craies du Crétacé et dans les tuffeaux du Landénien, sont représentées sur trois figures séparées (fig. 2.73, 2.74 et 2.75). Les deux premières de celles-ci ont chacune été scindées en deux graphiques comportant des échelles différentes pour faciliter la représentation de toutes les courbes. Les courbes 1 des fig. 2.73 et 2.74 sont reprises sur chacun des deux graphiques afin de mieux visualiser le changement d'échelle.

Les courbes de distribution des temps de séjour pour les traçages dans les calcaires du Dévonien ont été volontairement exclues de la présente description car on dispose de trop peu de données tant qu'à présent.

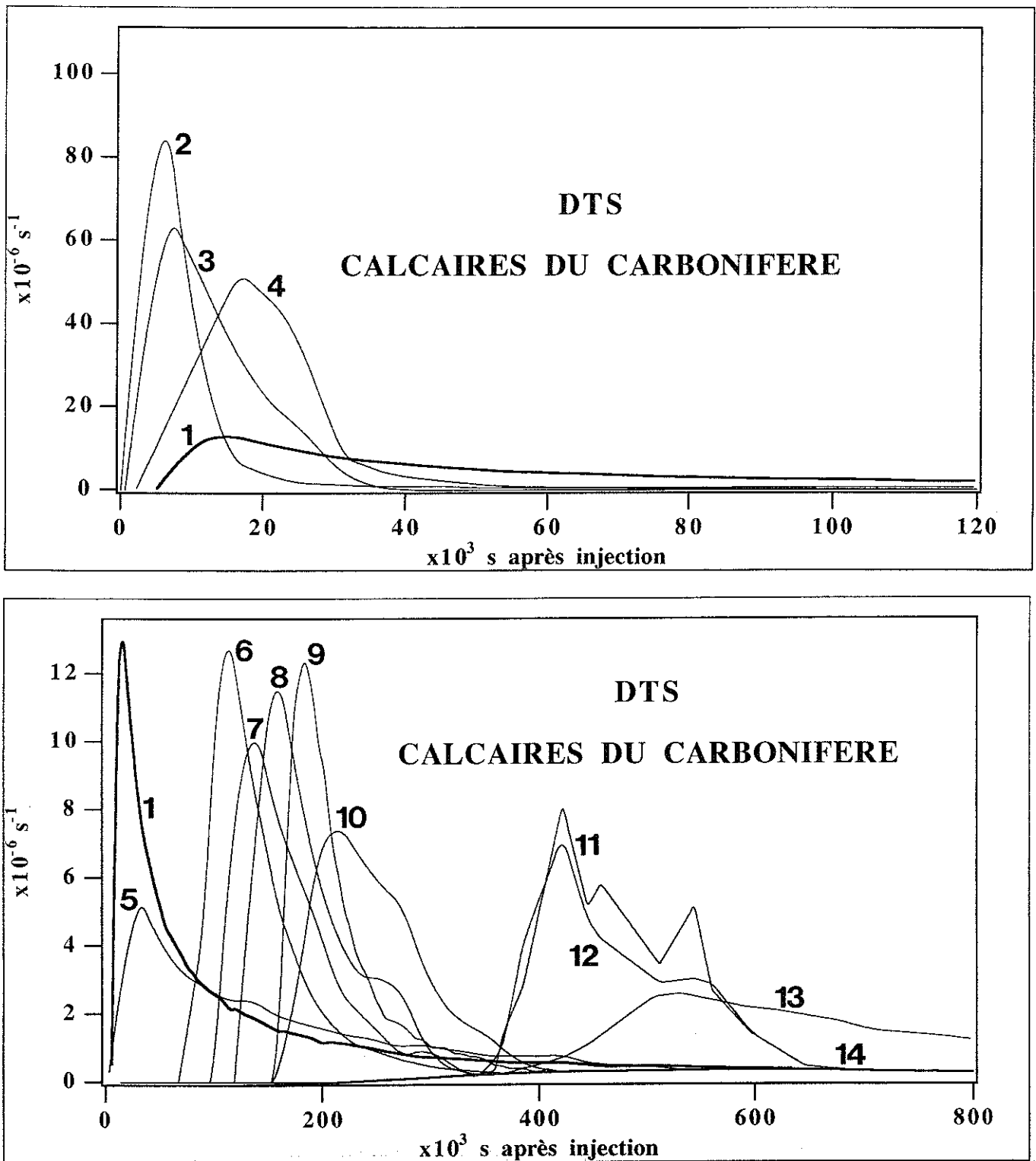


Fig. 2.73 : Courbes de distribution des temps de séjour pour les traçages dans les calcaires du Carbonifère. 1 = lithium-Spontin-7/1/91 2 = microsphères-Spontin-7/1/91 3 = uranine-Spontin-7/1/91 4 = bactériophages-Spontin-6/3/90 5 = lithium-Mt-sur-Marchienne-16/12/91 6 = uranine-Crossée-10/12/88 7 = rhodamineB-Anthisnes-29/3/89 8 = naphthionate-Crossée-29/3/89 9 = lithium-Marsée-27/12/91 10 = uranine-Vien-29/3/89 11 = microsphères-Crossée-15/8/90 12 = uranine-Crossée-15/8/90 13 = naphthionate-Spontin-15/1/92 14 = uranine-Mt-sur-Marchienne-16/12/91.

1) En ce qui concerne les calcaires du Carbonifère (fig. 2.73), la comparaison des DTS amène les remarques suivantes :

- la forme des courbes est très variable, depuis des courbes très pointues (courbe 2 : microsphères à Spontin) jusqu'à des courbes très étalées (courbe 14 : uranine à Mont-sur-Marchienne). Les plus pointues - celles pour lesquelles le traceur réapparaît le plus rapidement - correspondent à des traçages à courte distance dans un milieu très karstifié (courbes 2, 3 et 4 : traçages dans le ravin des Agauches sur le site de Spontin). Les plus étalées peuvent, quant à elles, correspondre à des trajets sur de courtes distances dans des fissures peu ou pas karstifiées (courbe 14 : uranine à Mont-sur-Marchienne) ou à des trajets beaucoup plus longs, en période de basses eaux, dans des conduits karstifiés (courbes 11 et 12 : uranine et microsphères à Crossée). Elles peuvent aussi être la conséquence d'une perméabilité plus faible à proximité du point d'injection (courbe 13 : injection dans le forage F1 à Spontin);

- pour un même point d'injection et une même sortie (courbes 6, 8, 11 et 12 : injections à Crossée), plus les eaux sont basses, plus le temps de passage est long et plus la courbe est étalée : les traçages 11 et 12 ont en effet eu lieu en période d'étiage alors que les traçages 6 et 8 se sont déroulés en période de hautes eaux. Le dédoublement apparaissant sur la courbe 8, dû, semble-t-il (§ 1.7.9.3.), à l'existence de deux trajets distincts, est encore mieux visible sur les courbes 11 et 12 correspondant au traçage en période d'étiage;

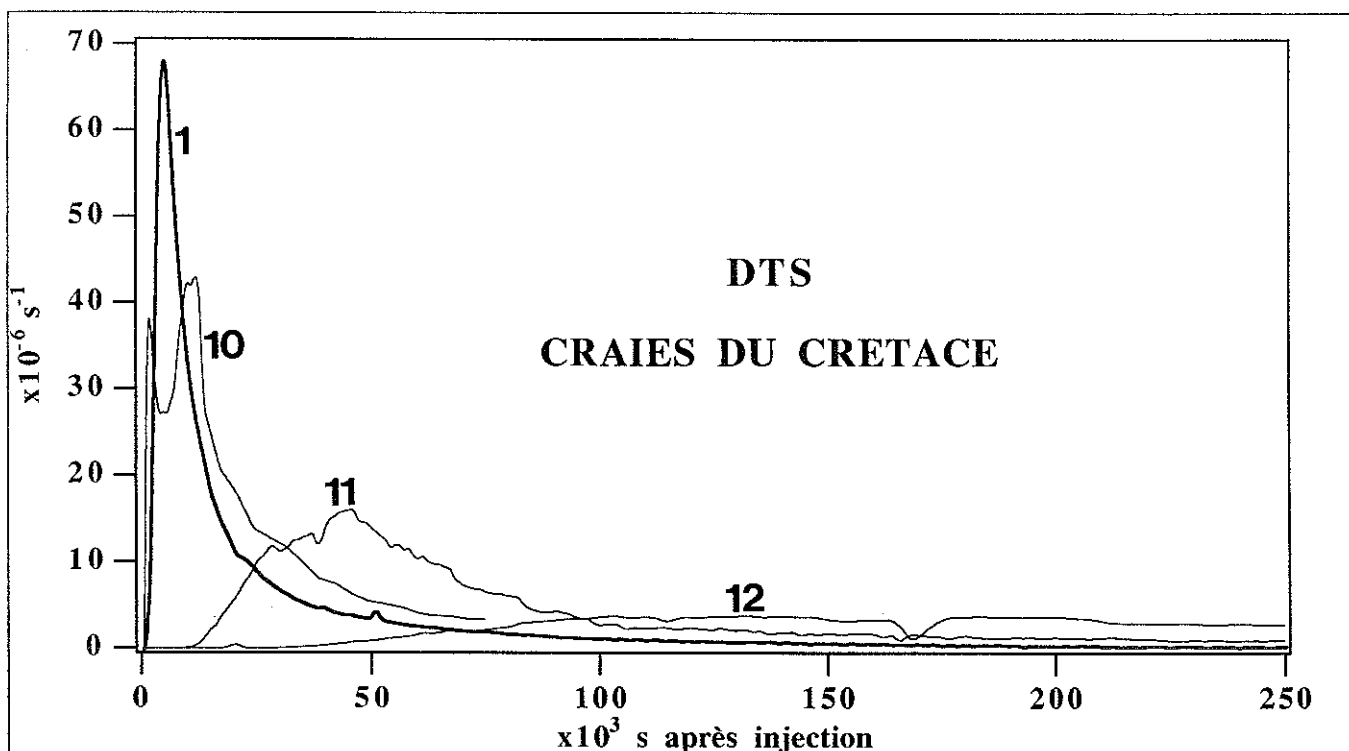
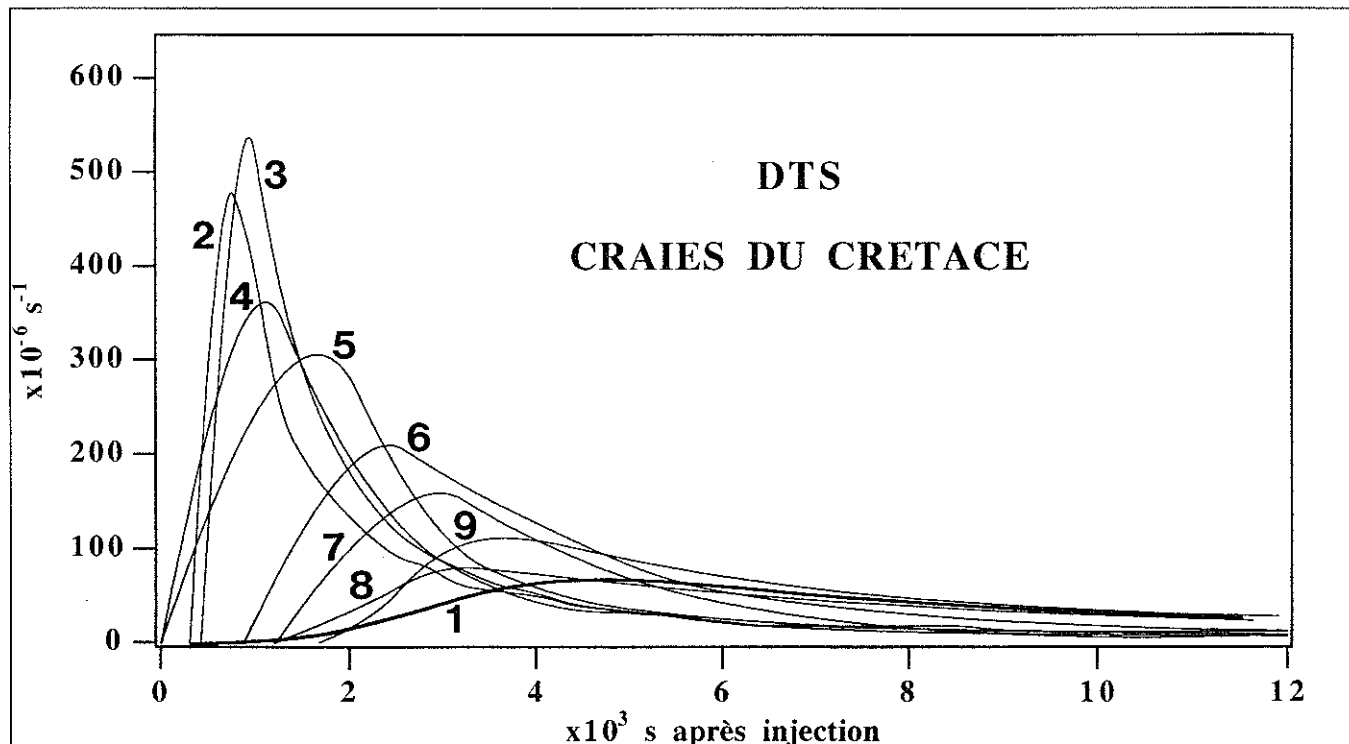
- la courbe du lithium injecté à la perte du Bois de Marsée (courbe 9) ne paraît pas très différente des courbes obtenues au cours des traçages aux pertes de Crossée, Vien et Anthisnes (courbes 6, 7, 8 et 10) alors que nous verrons au chapitre suivant que leurs paramètres hydrodispersifs sont fort différents;

- la courbe 5 (traçage en écoulement radial convergent avec le lithium à Mont-sur-Marchienne, distance = 50 m, gradient apparent = 5 %) est relativement étalée malgré le temps de passage court. Cet étalement serait dû à la dispersion dans le réseau des fines fissures entre le piézomètre d'injection et les conduits plus perméables en communication avec le puits de pompage;

- comparée aux autres injections dans le même ravin (courbes 2 et 3 : microsphères et uranine dans le ravin des Agauches à Spontin), la courbe 1 (lithium) présente une plus longue queue et un retard dus à une traversée plus longue du bed-rock altéré;

- les courbes 1 et 4 correspondent à deux injections exactement au même endroit (pt 1 du ravin des Agauches à Spontin). Leur différence de forme pourrait provenir d'une différence de comportement des deux traceurs utilisés (lithium et bactériophages) mais il est plus vraisemblable qu'elle soit due à des conditions hydrodynamiques différentes au moment des deux traçages (la quantité d'eau susceptible d'entraîner le traceur au travers de la zone non saturée étant déterminante dans ce cas);

- les courbes 5 et 14 correspondent toutes deux à des injections en écoulement radial convergent sur le même site (Mont-sur-Marchienne). Leurs formes très différentes témoignent de la forte hétérogénéité de ce site.



**Fig. 2.74 :** Courbes de distribution des temps de séjour pour les traçages dans les craies du Crétacé. 1 = lithium-Crisnée 2 = iodure-Crisnée 3 = iodure-Bertrée 4 = potassium-Bertrée 5 = nitrate-Bertrée 6 = uranine-Grand Hallet 7 = nitrate-Grand Hallet 8 = lithium-Bertrée 9 = lithium-Grand Hallet 10 = lithium-Jandrain 11 = uranine-Bertrée 12 = uranine-Crisnée.

2) Les DTS des traçages dans les craies du Crétacé sont reprises sur la fig. 2.74. On remarquera les points suivants :

- la diversité des courbes est tout aussi grande que dans le cas des calcaires mais le passage des courbes très pointues (courbes 2 et 3 : iodure à Crisnée et à Bertrée) aux courbes plus étalées (courbe 12 : uranine à Crisnée) est beaucoup plus régulier. Cette observation tend à montrer que, dans l'ensemble, le milieu crayeux est plus homogène et que l'hypothèse de milieu poreux équivalent est mieux justifiée dans son cas;

- deux piézomètres appartenant à un même site peuvent toutefois présenter des différences de comportement assez importantes (courbes 1 et 12 du lithium et de l'uranine à Crisnée ou courbes 3 et 11 de l'iodure et de l'uranine à Bertrée). Les hétérogénéités du milieu responsables de ces différences sont sans doute très locales et la position des piézomètres par rapport à ces hétérogénéités semble déterminante. Une distance relative à un élément de volume représentatif peut donc difficilement être atteinte dans les craies avec ce type de traçage (de forage à forage);

- les courbes des traçages avec l'uranine à Bertrée (courbe 11) et à Crisnée (courbe 12) sont particulièrement étalées en raison de l'importance de l'écoulement régional de la nappe dans une direction différente de celle du puits de pompage (voir § 2.5.3.1.3. et 2.5.3.2.3.);

- la forme très pointue des courbes 2, 3 et 4 provient du fait que ces traçages ont lieu à très courte distance (9,7 m dans le cas de la courbe 2 et 6,7 m dans le cas des courbes 3 et 4), c'est-à-dire dans la zone de rabattement maximum dû au pompage;

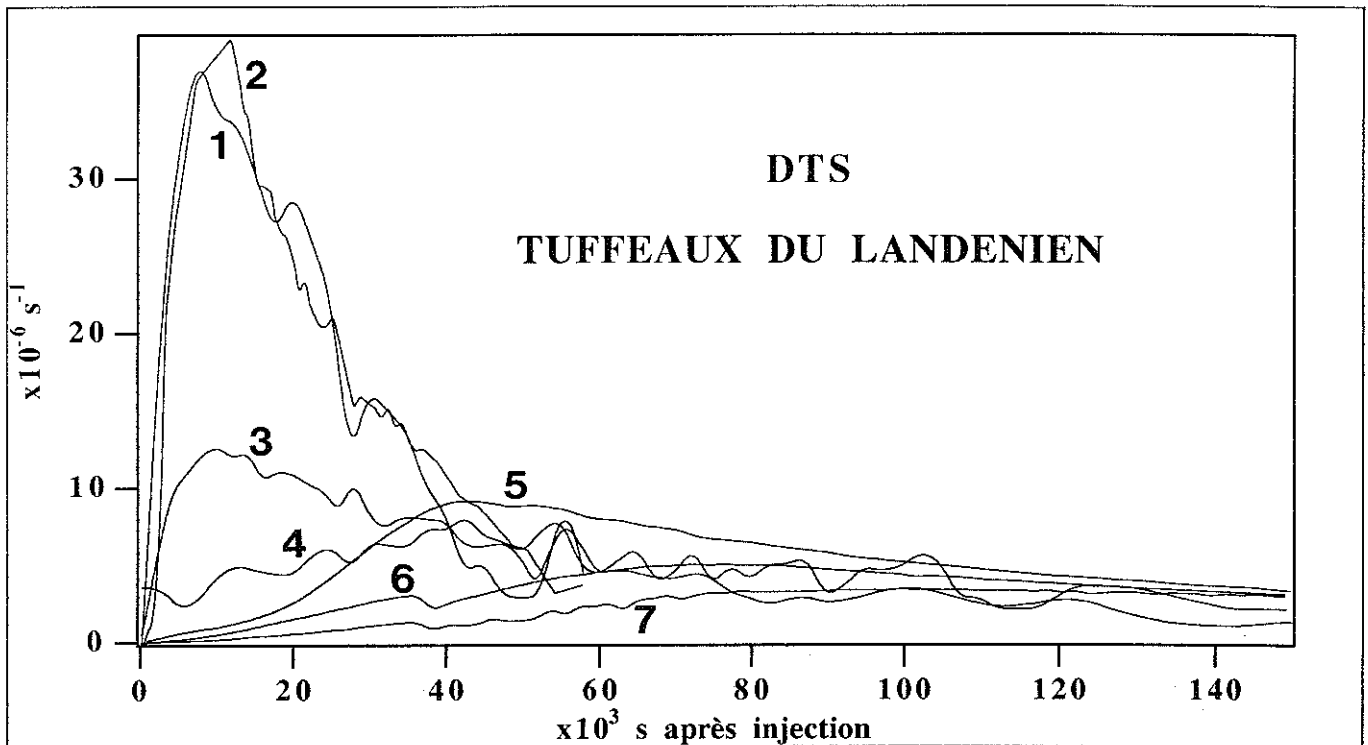
- la courbe du lithium à Jandrain (courbe 10) est bimodale. Elle correspond à la coexistence de deux types de fissures<sup>1</sup>, les unes - il s'agit d'ailleurs vraisemblablement d'une fissure unique - très ouvertes, responsables du premier pic, les autres d'ouverture réduite, plus régulièrement espacées, permettant d'expliquer le second pic et la queue de la courbe;

- en résumé, le temps moyen de séjour du traceur et l'étalement de la courbe, dans le cas des traçages en écoulement radial convergent dans les craies, sont fonction des facteurs suivants :

- la distance du point d'injection;
- le débit de pompage et par conséquent la vitesse effective;
- l'ouverture, la fréquence et la continuité des fissures entre le point d'injection et le puits de pompage, et plus particulièrement à proximité immédiate du point d'injection;
- la direction du gradient régional (dont l'influence dépend du rabattement créé par le pompage, de la distance par rapport au puits de pompage et de l'obtention ou non d'un régime permanent d'écoulement);

---

<sup>1</sup>Il s'agit donc d'un milieu à triple porosité, si l'on considère en plus la porosité de matrice.



**Fig. 2.75** : Courbes de distribution des temps de séjour pour les traçages dans les tuffeaux du Landénien à Bertrée. 1 = nitrate-2ème test 2 = nitrate-1er test 3 = iodure-2ème test 4 = sodium-2ème test 5 = lithium-1er test 6 = lithium-2ème test 7 = uranine-2ème test.

3) Dans le Landénien, seul le site de Bertrée a jusqu'à présent fait l'objet de tests. Les DTS sont reprises sur la fig. 2.75. Elles présentent les particularités suivantes :

- l'étalement des courbes dépend principalement de la distance de traçage : les courbes 1, 2 et 3 correspondent aux injections dans le piézomètre le plus proche du puits de pompage (Pz9 à 4,9 m), les courbes 5, 6 et 7 correspondent aux injections dans le piézomètre le plus éloigné (Pz1 à 15,8 m);

- on note également une nette influence de la durée d'injection sur la forme des courbes : la courbe 5 (1er test), moins étalée, correspond au même traceur (lithium), injecté dans le même piézomètre (Pz1), mais avec une injection environ 3 fois plus longue que dans le cas de la courbe 6 (2ème test);

- la différence entre les courbes 1 et 2 d'une part (nitrate) et la courbe 3 d'autre part (iodure injecté dans le même piézomètre), pourrait provenir de l'existence d'un bruit de fond variable dans le cas du nitrate.



## 2.6. COMPARAISON DES MILIEUX A L'AIDE DES PARAMETRES HYDRODISPERSIFS

### 2.6.1. Les paramètres hydrodispersifs représentatifs de la structure du milieu fissuré ou poreux

Pour pouvoir comparer les différents sites et les différents milieux, il est nécessaire de faire appel aux paramètres les plus intrinsèques possibles, c'est-à-dire reflétant au mieux la structure des vides dans l'aquifère (tab. 2.34).

Aquifère	Porosité d'interstice	Porosité de fissure	Influence de la nature du traceur sur les vitesses	Influence de la nature du traceur sur les dispersivités	Influence du débit sur les dispersivités	Type de modèle le mieux adapté à priori
Landénien (sables et tuffeaux)	importante	faible	importante	faible	en principe nulle	- convection-dispersion en milieu poreux avec adsorption et diffusion vers l'eau immobile
Crétacé (craies)	importante mais influence faible sur l'écoulement et le transport	importante	faible	faible	en principe nulle	- convection-dispersion en milieu poreux avec seulement la diffusion vers l'eau immobile
Carbonifère (calcaires)	très faible	très importante	très faible	très faible	peut devenir importante (loi de Darcy non vérifiée)	- convection-dispersion dans les fissures avec seulement la diffusion vers l'eau immobile

**Tab. 2.34** : Caractérisation de la structure des milieux testés. Comparaison de l'influence de différents facteurs, d'une part sur les vitesses (vitesses maximales, vitesses modales et vitesses apparentes de transit), d'autre part sur les dispersivités calculées à partir des modèles.

On a vu aux chapitre précédent (2.5.) que les caractéristiques des courbes de restitution (vitesse maximale, vitesse modale, vitesse apparente de transit, taux de restitution) ne dépendent pas seulement de la structure du milieu (poreux, fissuré ou karstique) mais aussi de la distance de traçage, du débit de pompage (en écoulement radial convergent), ou de la vitesse d'écoulement de la nappe (en écoulement naturel).

Quant à la nature du traceur, nous avons constaté que son influence sur la restitution varie suivant le milieu considéré : elle est d'autant plus forte que le volume d'aquifère impliqué dans le traçage est important et que la taille des vides s'apparente à celle des traceurs.

Cette influence est par conséquent maximale dans le cas de l'aquifère du Landénien (porosité d'interstice proportionnellement plus importante), moyenne dans le cas des craies (milieu fissuré non karstique avec porosité d'interstice jouant un rôle négligeable), et faible dans le cas des calcaires (circulations rapides le long des conduits karstiques).

Les paramètres hydrodispersifs (dispersivité et porosité efficace), calculés sur base des modèles de transport, présentent en principe l'avantage, par rapport aux courbes de restitution, de ne plus dépendre des vitesses effectives (à condition que la loi de DARCY reste applicable, c'est-à-dire principalement dans les milieux poreux et fissurés).

Dans le cas des circulations très rapides dans les calcaires karstifiés, nous avons vu (§ 1.7.9.3.) que l'application des modèles pouvait conduire à la surestimation de la dispersivité longitudinale.

La dispersivité dépend aussi de la nature du traceur mais cette dépendance diminue lorsque les interactions entre le traceur et l'aquifère (adsorption, échanges avec l'eau immobile) diminuent. Plus le temps de séjour du traceur est court et plus les écoulements sont localisés (aquifères karstiques), moins les échanges avec la roche et avec le restant de l'aquifère sont possibles.

Lors de plusieurs tests réalisées à des échelles allant jusqu'à quelques centaines de mètres, sur des sites expérimentaux, en milieu hétérogène (poreux et fissuré), divers auteurs (PTAK et TEUTSCH, 1992, REICHERT et HÖTZL, 1992, HOFMANN et al, 1992, POREL, 1988) ont étudié l'augmentation de la dispersivité longitudinale avec la distance de traçage (effet d'échelle). Certains d'entre eux ont ainsi pu constater une stabilisation de la dispersivité à grande distance.

Dans ce qui suit, nous ferons l'hypothèse simplificatrice de traceurs conservatifs. Autrement dit, nous considérerons l'adsorption et le stockage irréversibles comme négligeables. Dans ce cas, l'allure des courbes de restitution ne dépend plus que de la convection-dispersion et d'éventuels échanges réversibles avec l'eau immobile. Cette hypothèse est particulièrement justifiée dans le cas des craies et des calcaires car ces milieux sont relativement inertes vis-à-vis des traceurs et les écoulements ont lieu dans des fissures avec peu de possibilités d'échanges avec la matrice.

Les dispersivités et les porosités efficaces ont été calculées sur base de deux types de modèle analytique. Ces modèles et les paramètres dont ils dépendent ont été décrits en détail au § 2.3.2.2.

1) Le premier type de modèle fait intervenir uniquement la convection-dispersion. Il utilise les solutions analytiques (SAUTY, 1988) des équations de transport pour une injection de Dirac dans un écoulement monodimensionnel uniforme (1D), bidimensionnel uniforme (2D) ou radial convergent (radial).

La solution en écoulement radial convergent est une solution approchée car, dans ce cas, il n'existe pas de solution analytique exacte au problème du transport.

Le logiciel utilisé est celui développé par SAUTY et KINZELBACH (1988).

Aucun phénomène de retard dû à l'adsorption ou à la diffusion vers l'eau immobile n'est pris en compte dans ce modèle.

A priori, il paraît plus justifié d'utiliser le modèle en écoulement uniforme (1D ou 2D) pour les traçages en l'absence de pompage et le modèle en écoulement radial convergent (radial) pour les tests avec pompage. Il semble cependant que le modèle en écoulement monodimensionnel uniforme donne aussi d'excellents résultats dans le cas d'un dispositif en écoulement radial convergent (MALOSZEWSKI et ZUBER, 1990). Cela peut s'expliquer par la convergence des lignes de courant ayant pour effet de réduire la dispersion latérale.

Avec ce type de modèle, la calibration des paramètres est souvent effectuée uniquement sur la partie montante et sur le pic de la courbe. Dans beaucoup de cas en effet (principalement en milieu karstique), les phénomènes de retard provoqués par les échanges avec l'eau immobile et l'adsorption n'entraînent qu'un léger décalage du pic, que ce soit dans le temps ou en concentration. Lorsque ces effets (eau immobile et adsorption) ne sont plus négligeables, l'application des modèles précédents conduit à des valeurs de paramètres hydrodispersifs fausses.

2) Le second type de modèle (RAVEN et al., 1988) permet le calcul plus précis des dispersivités, en tenant compte des échanges par diffusion avec l'eau immobile.

Le principe physique du modèle (modèle ADTS) repose sur la circulation dans un drain au contact d'un volume d'eau immobile vers lequel le traceur peut diffuser.

Ce modèle permet d'évaluer, outre le coefficient d'échange de l'eau mobile vers l'eau immobile, le volume d'aquifère contaminé par le traceur.

Il est en principe mieux adapté au karst que la plupart des modèles faisant intervenir la diffusion vers la matrice poreuse, car le milieu karstique est peu tortueux comparé au milieu poreux. En pratique cependant, la complexité du milieu (position des drains, continuité des fissures) fait en sorte que les paramètres obtenus ne représentent plus vraiment une réalité physique.

Ce dernier modèle ne prend toujours pas en compte les phénomènes d'adsorption.

MALOSZEWSKI et ZUBER (1990) ont, rappelons-le, développé un modèle, appelé "modèle de dispersion en fissure simple" (SFDM pour "Single-Fissure Dispersion Model"), tenant compte, en plus de la diffusion dans la matrice poreuse, de l'adsorption réversible et irréversible sur le substrat rocheux. Ce type de modèle nécessite l'ajustement d'un nombre encore plus important de paramètres, aux dépens de la commodité d'utilisation. Il est déconseillé de l'utiliser dans le cas où l'on ne connaît pas exactement la nature des phénomènes affectant le transport du traceur car on ne dispose dans ce cas d'aucun moyen de contrôle de la validité des résultats obtenus.

De manière générale, la connaissance hydrogéologique du milieu et l'allure des courbes de restitution orienteront le choix d'un modèle plutôt qu'un autre, la qualité de l'ajustement des paramètres permettant à posteriori de confirmer la validité de ce choix. Dans certains cas, nous sommes limités à un seul type de modèle alors que, dans la plupart des cas, plusieurs modèles ont été comparés.

## 2.6.2. Résultats des modélisations

Les résultats des ajustements réalisés avec les différents modèles sont présentés dans les tableaux ci-après (tab. 2.35 à 2.42), accompagnés de quelques courbes modélisées appelant des commentaires (fig. 2.76 à 2.82).

Pour l'explication des paramètres, on se reportera au § 2.3.2.2.

- M est la masse injectée;
- x et Z sont les distances de traçage dans le cas du modèle convection-dispersion et du modèle ADTS;
- $V_0$  est la vitesse de DARCY;
- h est la hauteur de l'aquifère dans le cas du modèle convection-dispersion et S la surface dans le cas du modèle ADTS respectivement;
- u est la vitesse effective;
- neff est la porosité efficace dans le cas du modèle convection-dispersion et  $\phi$  la fraction d'eau immobile dans le cas du modèle ADTS;
- $\alpha_L$  est la dispersivité longitudinale;
- K est le coefficient de transfert de masse de l'eau mobile vers l'eau immobile (modèle ADTS);
- R est le taux de restitution.

### *Traçages dans les bassins du Néblon et d'Anthisnes*

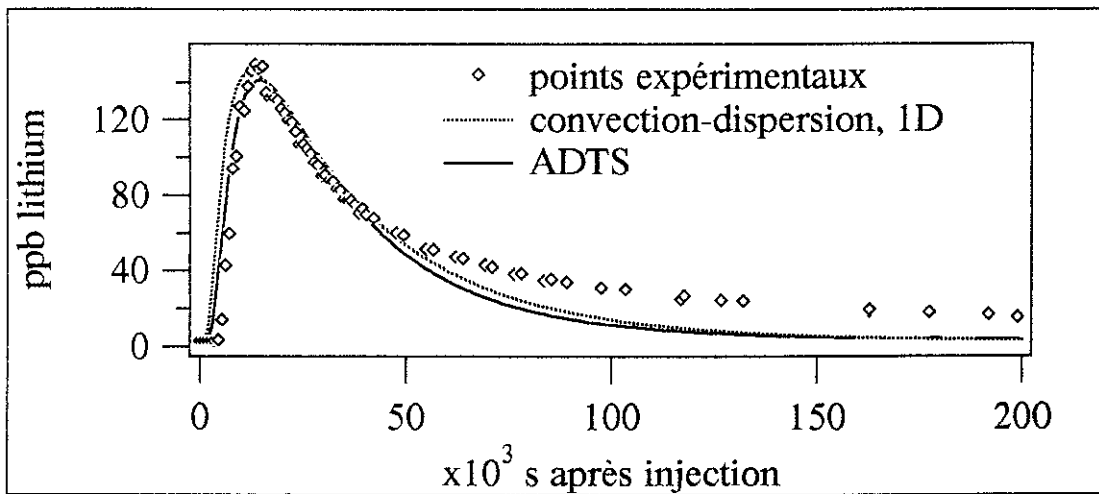
Les résultats ont été décrits au § 1.7.9.3.

### *Traçages à Spontin*

Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	$V_0$ (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou $\phi$ (%)	$\alpha_L$ (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
lithium 7/1/91	ID	0,5	200	$9,5 \cdot 10^{-4}$	10	$1 \cdot 10^{-2}$	9,5	100	-	12
	ADTS	0,048	200	-	0,6	$6,3 \cdot 10^{-3}$	5	100	$4 \cdot 10^{-7}$	100

**Tab. 2.35** : Résultats des modélisations du traçage avec le lithium entre le point 1 (ravin des Agauches) et la source Duchesse à Spontin.

Sur la fig. 2.76, on voit qu'aucun des deux modèles ne permet d'expliquer la longue queue de la courbe de restitution du lithium. Nous avons en effet vu au § 2.5.1.2.3. que le lithium présentait un retard important, contrairement aux bactériophages injectés à la même perte ou à l'uranine et aux microsphères injectées un peu plus en aval. Ce retard s'explique par le lessivage d'une partie du lithium adsorbé dans la zone d'infiltration au moment du passage de la vague de traceur.



**Fig. 2.76** : Modélisations du traçage avec le lithium entre le point 1 (ravin des Agauches) et la source Duchesse à Spontin.

*Traçage à Fairoule*

Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	V <sub>0</sub> (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou φ (%)	α <sub>L</sub> -α <sub>T</sub> (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
naphtionate 4/2/91	2D	3	95	2.10 <sup>-5</sup>	25	1,2.10 <sup>-4</sup>	17	10 - 2	-	2,7

**Tab. 2.36** : Résultats de la modélisation du traçage avec le naphtionate entre le piézomètre Pz4 et la galerie GI à Fairoule.

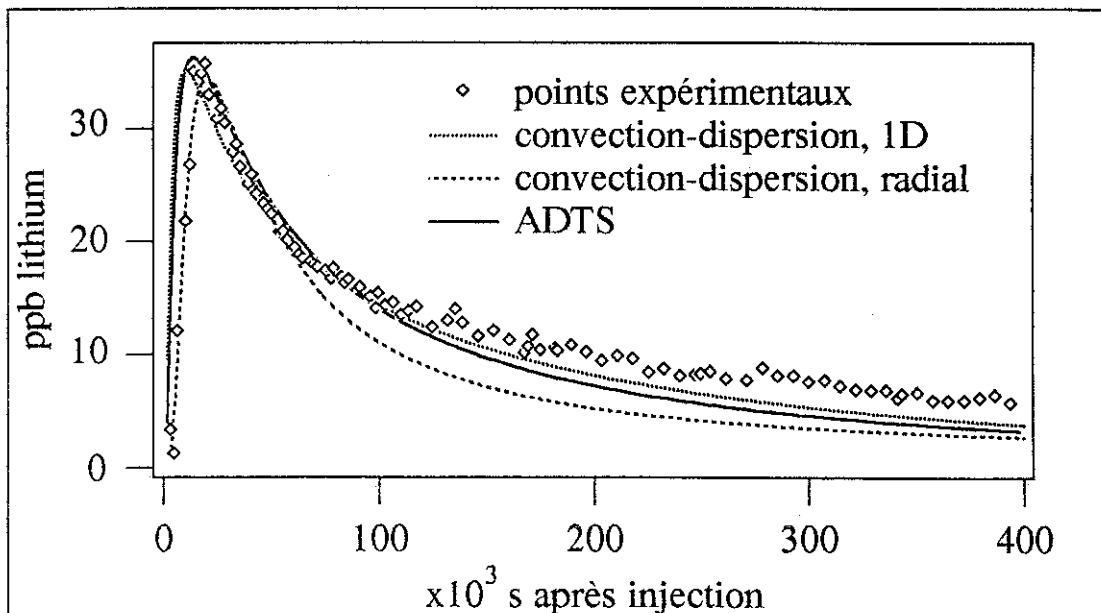
Rappelons que ce traçage a eu lieu en écoulement naturel depuis le piézomètre Pz4 en direction de la galerie GI. On a vu précédemment que la courbe de restitution comportait deux pics (§ 2.5.1.3.3.). L'interprétation ne concerne ici que le pic principal. Le modèle utilisé est à deux dimensions. Il a permis de déterminer une valeur de dispersivité transversale α<sub>T</sub> de 2 m.

## Traçages à Mont-sur-Marchienne

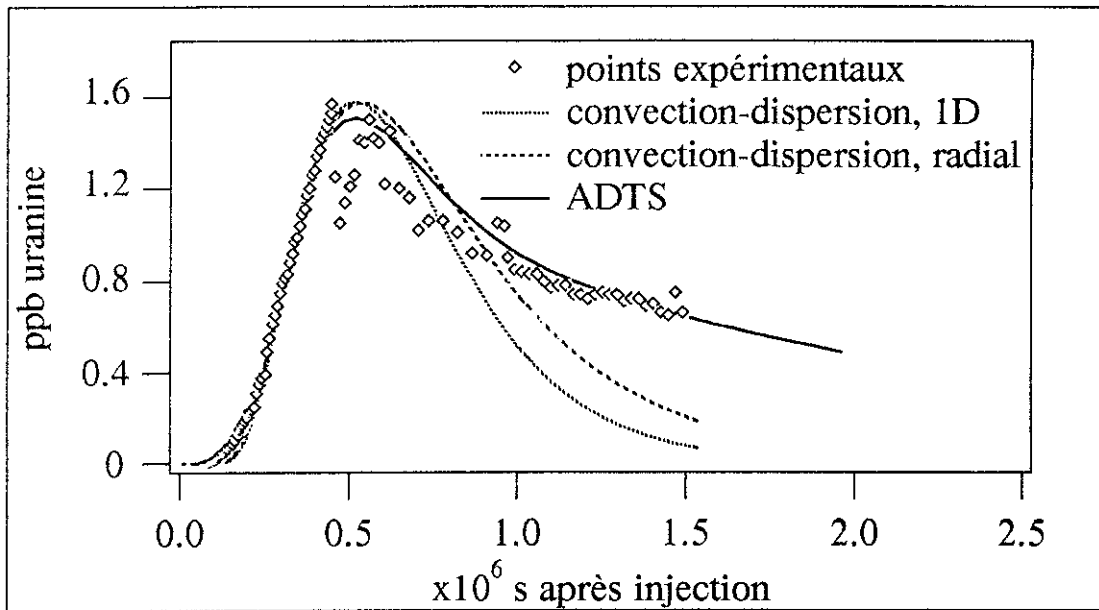
Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	$V_0$ (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou $\phi$ (%)	$\alpha_L$ (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
lithium 16/12/91	1D	0,357	50	$1.10^{-3}$	52	$1,2.10^{-3}$	82	92	-	66
	radial	0,357	50	$3,6.10^{-6}$	30	$6,3.10^{-5}$	5,8	170	-	35
	ADTS	0,310	50	-	9	$7,8.10^{-4}$	14	90	$1.10^{-10}$	100
uranine 16/12/91	1D	0,08	120	$2.10^{-4}$	65	$2,1.10^{-4}$	95	12	-	16
	radial	0,25	120	$7,4.10^{-6}$	6,2	$7,9.10^{-5}$	9,4	16	-	16
	ADTS	0,05	120	-	5,5	$1,8.10^{-4}$	45	15	$8.10^{-7}$	100

**Tab. 2.37** : Résultats des modélisations des traçages avec le lithium et l'uranine dans les piézomètres PZ2 et PZ3 à Mont-sur-Marchienne.

Les traçages ont eu lieu en écoulement radial convergent, à partir des trois piézomètres vers le puits de captage. Nous avons déjà constaté la différence de comportement assez nette entre l'uranine injectée au PZ3 et le lithium injecté au PZ2 (§ 2.5.1.4.3.).



**Fig. 2.77** : Modélisations du traçage avec le lithium entre le piézomètre PZ2 et le puits de captage à Mont-sur-Marchienne.



**Fig. 2.78** : Modélisations du traçage avec l'uranine entre le piézomètre PZ3 et le puits de captage à Mont-sur-Marchienne.

Cette différence se traduit par des valeurs de dispersivité très différentes (90 à 170 m pour le lithium et 12 à 16 m pour l'uranine). La dispersivité du lithium correspond mieux à une circulation karstique que celle de l'uranine.

Le modèle radial ne permet pas d'ajuster correctement la courbe du lithium (fig. 2.77). De plus, il donne une valeur de dispersivité aberrante (170 m). Les modèles 1D et ADTS (modèles à une dimension) conviennent mieux dans ce cas. Cela confirme que l'écoulement a lieu principalement dans un drain karstique.

Dans le cas de l'uranine (fig. 2.78), les trois méthodes donnent des valeurs de dispersivité comparables. Par contre, le modèle ADTS est le seul qui permette d'ajuster correctement la courbe. Cela témoigne d'une diffusion importante vers l'eau immobile (vides karstiques sans circulation d'eau par exemple). Le taux de restitution faible de l'uranine indique qu'une partie du traceur ayant diffusé est sans doute restée piégée dans l'eau immobile, à moins qu'elle n'ait été restituée très progressivement au-delà de la période de prélèvement.

## Traçages dans le Crétacé à Bertrée

Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	$V_0$ (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou $\phi$ (%)	$\alpha_L$ (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
Iodure <sup>1</sup> 4/2/92	radial	1,654	6,69	$3,2 \cdot 10^{-5}$	4	$2,3 \cdot 10^{-3}$	1,4	3	-	92
Potassium 4/2/92	radial	4,369	6,69	$3,4 \cdot 10^{-5}$	4	$1,6 \cdot 10^{-3}$	2,1	3	-	94
Nitrate 4/2/92	radial	6,138	6,69	$3,3 \cdot 10^{-5}$	4	$2,2 \cdot 10^{-3}$	1,5	3	-	77
Sodium 4/2/92	radial	9,914	14,4	$1,2 \cdot 10^{-5}$	5	$6 \cdot 10^{-4}$	2	5	-	79
Uranine 4/2/92	radial	0,05	13,7	$6 \cdot 10^{-6}$	10	$1 \cdot 10^{-4}$	6	2	-	27
Lithium	1D	0,333	14,4	$4 \cdot 10^{-4}$	13	$3,6 \cdot 10^{-3}$	11	7	-	45
	radial	0,333	14,4	$1,3 \cdot 10^{-5}$	4,5	$6,4 \cdot 10^{-4}$	2,1	9	-	50
	ADTS	0,224	14,4	-	1,3	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0,7	9	$3 \cdot 10^{-7}$	100

**Tab. 2.38** : Résultats des modélisations des traçages dans l'aquifère du Crétacé sur le site de Bertrée.

Les dispersivités sont comprises entre 2 et 9 m.

Elles dépendent principalement de la direction du traçage par rapport au gradient naturel de la nappe. Par exemple, l'uranine montre une dispersivité plus faible (2 m) alors<sup>2</sup> qu'elle est injectée à une distance plus grande (13,7 m) que l'iodure, le potassium et le nitrate (distance = 6,69 m, dispersivité = 3 m). On a vu précédemment (§ 2.5.3.1.3.) que l'injection d'uranine était telle que le traceur se déplaçait dans le sens opposé au gradient naturel de la nappe (3 % vers le Sud). Ce déplacement "à contresens" permettrait d'expliquer les vitesses d'écoulement plus faibles (vitesse de DARCY et vitesse effective pour l'uranine environ un ordre de grandeur en-dessous de celles observées pour l'iodure, le potassium et le nitrate). La vitesse effective étant plus faible, la dispersion cinématique et la dispersivité sont également plus faibles.

La position des Pz10 et Pz12, plus près d'un axe principal de fissuration, pourrait également expliquer les valeurs de dispersivité aussi élevées (de 3 à 9 m) pour les traceurs injectés dans ces piézomètres (iodure, potassium, nitrate au Pz10, sodium et lithium au Pz12).

<sup>1</sup> Modélisations de l'iodure, du potassium, du nitrate, du sodium et de l'uranine d'après GARCET (1992).

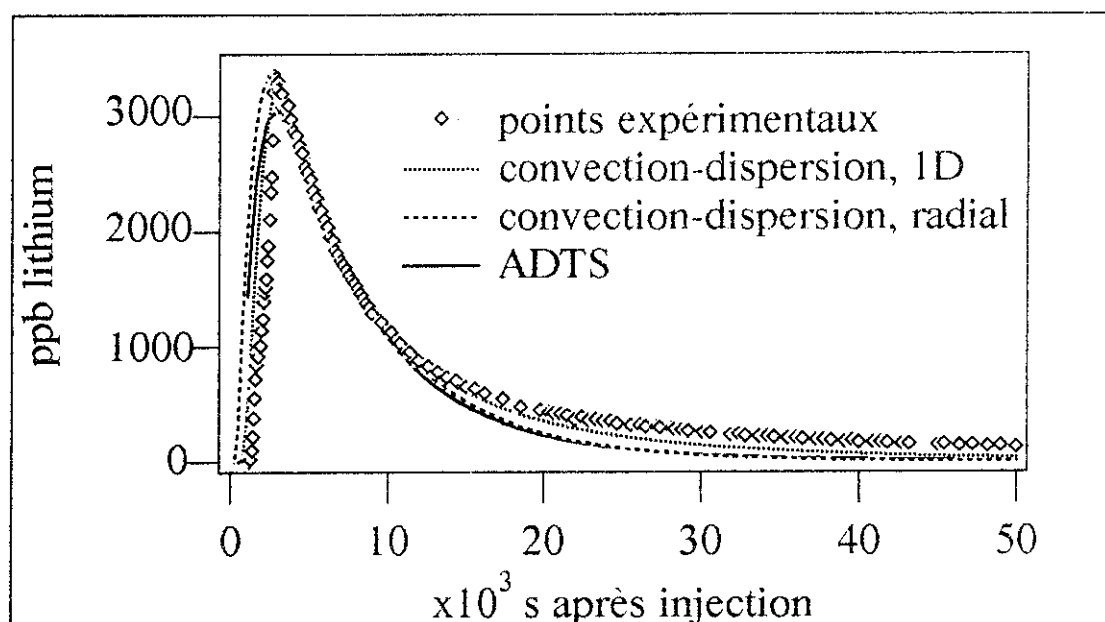
<sup>2</sup>En principe la dispersivité augmente avec la distance.



Par conséquent, les dispersivités des différents traceurs ne peuvent être comparées que dans le cas de points d'injection semblables. La dispersivité du sodium (5 m) est ainsi nettement inférieure à celle du lithium (9 m).

Sur la fig. 2.79 (lithium), on voit que les trois modèles permettent des ajustements à peu près aussi précis l'un que l'autre. Ils ne peuvent cependant pas expliquer totalement la queue. Celle-ci est sans doute due à l'adsorption-désorption, dont les modèles ne tiennent pas compte. L'ajustement avec le modèle 1D est un peu meilleur.

Il pourrait signifier un écoulement dans des fissures assez larges. Un tel axe de drainage entre le Pz12 et le puits de pompage a été mis en évidence par l'examen de la piézométrie (§ 2.5.3.1.1.).



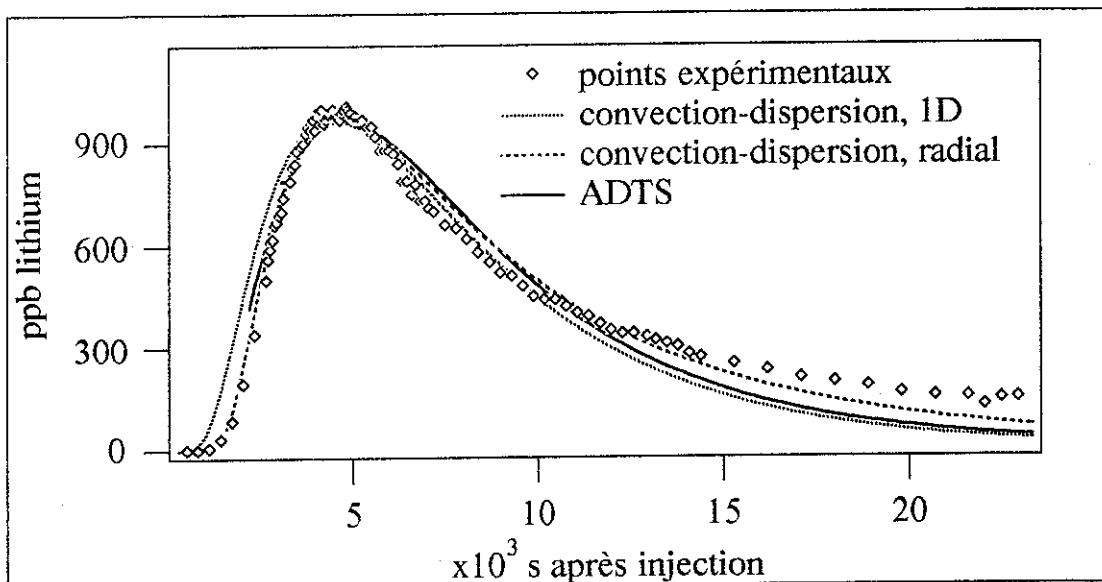
**Fig. 2.79** : Modélisations du traçage avec le lithium entre le piézomètre Pz12 et le puits P2 à Bertrée.

### Traçages à Crisnée

Il est intéressant de remarquer le parallélisme entre les restitutions du lithium et de l'uranine, d'une part dans les calcaires à Mont-sur-Marchienne (fig. 2.77 et 2.78) et d'autre part dans les craies à Crisnée (fig. 2.80 et 2.81).

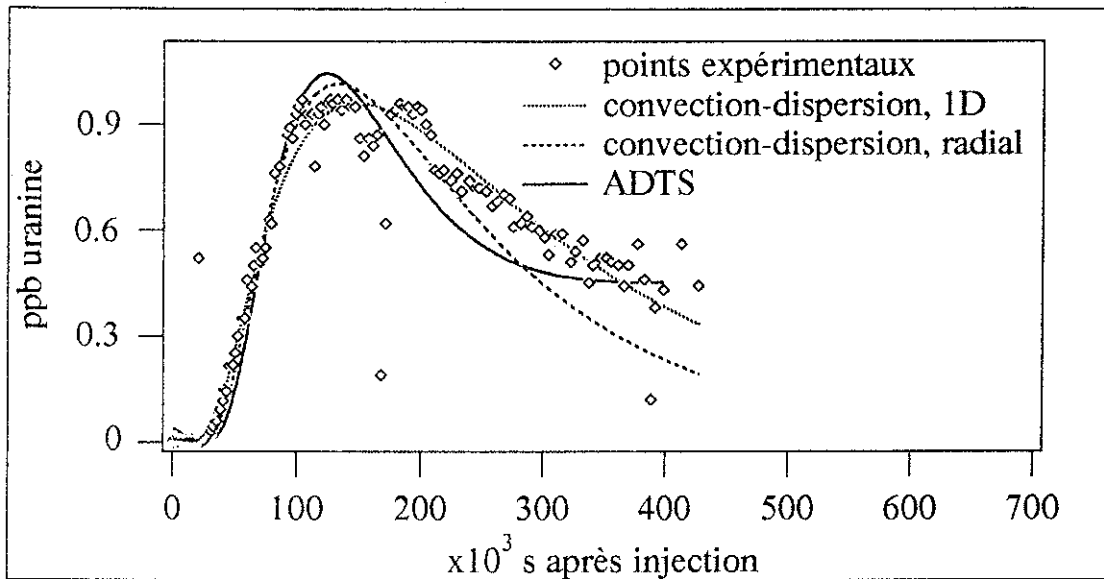
Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	$V_0$ (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou $\phi$ (%)	$\alpha_L$ (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
Iodure <sup>1</sup> 29/1/92	radial	0,616	9,7	$5,6 \cdot 10^{-5}$	10	$2,8 \cdot 10^{-3}$	2	4	-	92
Naphtionate 29/1/92	radial	0,075	9,7	$1,6 \cdot 10^{-4}$	3,5	$6,6 \cdot 10^{-3}$	2,4	4	-	53
Lithium 29/1/92	1D	0,825	47	$1,7 \cdot 10^{-4}$	28	$8,5 \cdot 10^{-3}$	2	10	-	4,8
	radial	0,825	47	$2 \cdot 10^{-5}$	5,55	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,82	14	-	38
	ADTS	0,47	47	-	1,9	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,5	17	$1 \cdot 10^{-7}$	100
Uranine 29/1/92	1D	0,05	54,4	$1,4 \cdot 10^{-6}$	22	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,5	15	-	0,02
	radial	0,05	54,4	$8,2 \cdot 10^{-6}$	12	$1,1 \cdot 10^{-4}$	7,5	12	-	17,5
	ADTS	0,037	54,4	-	33	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,5	15	$1 \cdot 10^{-6}$	100

**Tab. 2.39** : Résultats des modélisations des traçages dans l'aquifère du Crétacé sur le site de Crisnée.



**Fig. 2.80** : Modélisations du traçage avec le lithium entre le piézomètre PZ2 et le puits PE à Crisnée.

<sup>1</sup> Modélisations de l'iode et du naphtionate d'après GARCET (1992).



**Fig. 2.81** : Modélisations du traçage avec l'uranine entre le piézomètre PZ1 et le puits PE à Crisnée.

Dans les deux cas, la restitution de l'uranine est plus étalée que celle du lithium mais pas pour les mêmes raisons :

- à Mont-sur-Marchienne, on a vu ci-dessus que la différence de comportement se traduisait par une dispersivité nettement plus élevée pour le lithium (90 m) que pour l'uranine (15 m). Nous avons expliqué cela par des circulations plus rapides dans des conduits karstiques dans le cas du lithium et des circulations plus lentes, dans un milieu fissuré plus homogène, dans le cas de l'uranine;

- à Crisnée, les dispersivités sont semblables pour le lithium et l'uranine (entre 10 et 17 m selon le modèle). Il faut donc invoquer ici une autre raison que la structure du milieu pour expliquer les différences de comportement entre les deux traceurs. Le taux de restitution faible de l'uranine (17 %) a été expliqué précédemment (§ 2.5.3.2.3.) par l'existence d'un col de partage des eaux entre le puits de pompage et un axe de circulation drainant la nappe perpendiculairement à la vallée sèche située à l'Ouest. Ce col, dont le gradient est plus faible, a pour effet d'étaler la restitution de l'uranine. Ceci est confirmé par la vitesse effective de l'uranine, au moins un ordre de grandeur en dessous de celle du lithium.

Cela n'exclut pas que le milieu soit fortement fissuré entre le piézomètre d'injection (PZ1) et le puits de pompage. Le modèle 1D permet en effet un meilleur ajustement de la partie descendante de la courbe de restitution.

*Traçages à Grand Hallet*

Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	$V_0$ (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou $\phi$ (%)	$\alpha_L$ (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
Lithium <sup>1</sup> 9/7/92	radial	0,5	19,6	$2,5 \cdot 10^{-5}$	4,5	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,3	4	-	43
Uranine 13/7/92	radial	0,02	19,6	$4,9 \cdot 10^{-5}$	4,5	$2,9 \cdot 10^{-3}$	1,7	4,7	-	34
Potassium 13/7/92	radial	1,971	19,6	$5,7 \cdot 10^{-5}$	4	$3,0 \cdot 10^{-3}$	1,9	6	-	80
Nitrate 13/7/92	radial	3,133	19,6	$8,0 \cdot 10^{-5}$	2,8	$3,2 \cdot 10^{-3}$	2,5	5,5	-	81

**Tab. 2.40** : Résultats des modélisations des traçages dans l'aquifère du Crétacé sur le site de Grand Hallet.

Les dispersivités varient ici entre 4 et 6 m, pour une distance unique de traçage de 19,6 m. Elles sont du même ordre de grandeur que celles rencontrées à Bertrée (entre 2 et 9 m) avec des distances de traçage un peu plus faibles (entre 6,69 et 14,4 m) et inférieures à celles rencontrées à Crisnée (entre 10 et 17 m) avec des distances de traçage supérieures (47 et 54,4 m). Bien qu'il s'agissent de sites distincts, cette observation est relativement en accord avec une augmentation de la dispersivité en fonction de la distance de traçage.

*Traçage à Jandrain*

Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	$V_0$ (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou $\phi$ (%)	$\alpha_L$ (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
Lithium <sup>2</sup> 28/7/92	radial	0,333	9,6	$1,2 \cdot 10^{-5}$	5	$3,7 \cdot 10^{-4}$	3,15	3,3	-	20

**Tab. 2.41** : Résultats de la modélisation du traçage dans l'aquifère du Crétacé sur le site de Jandrain.

Malgré une vitesse effective plus faible ( $3,7 \cdot 10^{-4}$  m/s à Jandrain contre  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s à Bertrée), la dispersivité obtenue à Jandrain (3,3 m) est un peu plus élevée que celle rencontrée à Bertrée (3 m) avec une distance un peu plus faible (6,69 m contre 9,6 m).

<sup>1</sup>Modélisations du lithium, de l'uranine, du potassium et du nitrate d'après VALENTINI (1992)

<sup>2</sup>Modélisation d'après VALENTINI (1992) sur le second pic de la courbe de restitution.

*Traçages dans le Landénien à Bertrée*

Les valeurs de dispersivité sont comprises entre 1,9 et 7 m. Elles sont du même ordre de grandeur que celles des craies sous-jacentes, alors que les vitesses effectives sont généralement un ordre de grandeur plus bas.

Traçage	Modèle	M (kg)	x ou Z (m)	V <sub>0</sub> (m/s)	h ou S (m et m <sup>2</sup> )	u (m/s)	neff ou φ (%)	α <sub>L</sub> (m)	K (s <sup>-1</sup> )	R (%)
Nitrates 26/2/91	radial	3,149	4,9	6.10 <sup>-6</sup>	14	1.10 <sup>-4</sup>	6	1,9	-	42
	Laga <sup>1</sup>	3,149	4,9	6,9.10 <sup>-6</sup>	13	6,9.10 <sup>-4</sup>	1 n <sub>im</sub> = 1,5	2,5	4,5.10 <sup>-7</sup>	42
Lithium 26/2/91	radial	0,191	15,8	2.10 <sup>-6</sup>	14	8.10 <sup>-5</sup>	2,5	4,75	-	17
	ADTS	0,14	15,8	4,7.10 <sup>-5</sup>	3,8	1,7.10 <sup>-4</sup>	28	7	3.10 <sup>-7</sup>	100
	Laga	0,191	15,8	2,2.10 <sup>-6</sup>	13	3,6.10 <sup>-5</sup>	6 n <sub>im</sub> = 12	6	3,6.10 <sup>-8</sup>	17
Iodure 23/4/91	radial	1,53	4,9	6,3.10 <sup>-6</sup>	14	2,1.10 <sup>-5</sup>	30	6,7	-	60
Nitrates 23/4/91	radial	3,072	4,9	6,5.10 <sup>-6</sup>	14	1.10 <sup>-4</sup>	6,5	2,5	-	30

**Tab. 2.42** : Résultats des modélisations des traçages dans l'aquifère du Landénien sur le site de Bertrée.

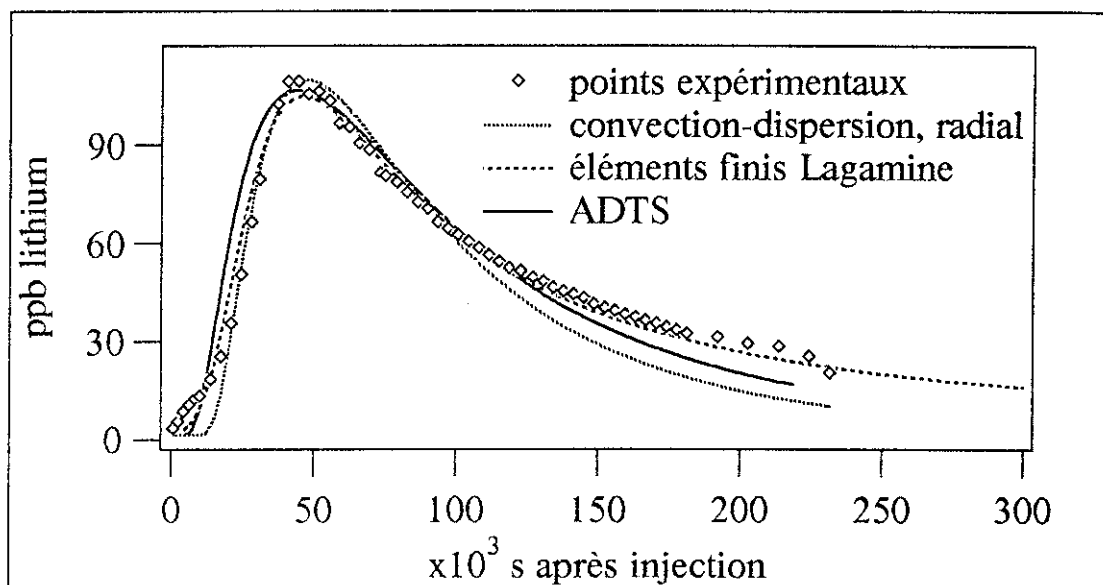
Les dispersivités du nitrate (entre 1,9 et 2,5 m) sont inférieures à celles du lithium (entre 4,75 et 7 mètres). Cela est en accord cette fois avec l'augmentation de la dispersivité en fonction de la distance d'injection (effet d'échelle).

Les valeurs de porosité efficace (de même que les dispersivités mais dans une moindre mesure) varient très fort suivant l'interprétation utilisée.

On notera que pour les injections à 4,9 m de distance (iodure et nitrate), il est probable que la condition de validité de la solution approchée en écoulement convergent ne soit pas vérifiée. En effet, la distance doit être supérieure à trois fois la dispersivité.

<sup>1</sup>Modélisations du nitrate et du lithium par éléments finis réalisées par BIVER avec le code Lagamine (in BIVER et MEUS, 1992). n<sub>im</sub> est la porosité d'eau immobile.

Sur la fig. 2.82, on voit que le modèle à éléments finis (BIVER in BIVER et MEUS, 1992) permet un meilleur ajustement de la queue de la courbe du lithium. En effet, le modèle convection-dispersion radial ne prend pas en compte les effets d'eau immobile et le modèle ADTS ne tient pas compte de la présence d'une matrice poreuse. Ces deux modèles sont par conséquent moins bien adaptés à l'aquifère à porosité d'interstice prédominante du Landénien.



**Fig. 2.82** : Modélisations du traçage avec le lithium entre le piézomètre Pz1 et le puits P1 à Bertrée. Modèle à éléments finis (code LAGAMINE) utilisé par BIVER (in BIVER et MEUS, 1992, et BIVER, thèse à paraître).

### 2.6.3. Analyse comparative des paramètres hydrodispersifs

Il nous a paru intéressant de chercher à distinguer, au sein des valeurs des paramètres hydrodispersifs, les tendances liées à la structure des tendances liées à d'autres facteurs (écoulement naturel ou convergent, injection à partir d'une perte ou d'un forage, type de traceur, type de modèle, distance, effet d'échelle, etc.).

Le tab. 2.43 rassemble, par type d'aquifère, les paramètres calculés dans chaque cas avec le modèle le plus approprié (voir § 2.6.2.).

Pour des raisons évidentes (voir § 2.4.1.), on a séparé, parmi les traçages en milieu calcaire, les traçages à partir des pertes (écoulement karstique) des traçages à partir des forages (écoulement fissural). Les tests dans le Crétacé et dans le Landénien sont tous interprétés en écoulement radial convergent.

Aquifère	Site	Traceur	Distance (m)	Dispersivité (m)	Porosité efficace (%)	Vitesse effective (m/s)	Modèle	
Calcaires du Carbonifère (pertes)	Marsée	uranine	3055	15	60	$1,6 \cdot 10^{-2}$	ADTS	
	Crossée	uranine	7200	21	50	$1,7 \cdot 10^{-2}$	1D, 2 drains	
		naphionate	7200	50	40	$4,5 \cdot 10^{-2}$	1D, 2 drains	
		uranine	7200	100	42	$6,3 \cdot 10^{-2}$	1D, 2 drains	
	Spontin	lithium	200	100	9,5	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1D	
Calcaires du Carbonifère (forages)	Fairoule	naphionate	95	10	17	$1,2 \cdot 10^{-4}$	2D	
	Mt-sur-Marchienne	uranine	120	16	9,4	$7,9 \cdot 10^{-5}$	radial	
		lithium	50	92	82	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1D	
Craies du Crétacé	Bertrée	uranine	13,7	2	6	$1,0 \cdot 10^{-4}$	radial	
		iodure	6,69	3	1,4	$2,3 \cdot 10^{-3}$	radial	
		potassium	6,69	3	2,1	$1,6 \cdot 10^{-3}$	radial	
		nitrate	6,69	3	1,5	$2,2 \cdot 10^{-3}$	radial	
		sodium	14,4	5	2	$6,0 \cdot 10^{-4}$	radial	
		lithium	14,4	9	2,1	$6,4 \cdot 10^{-4}$	radial	
	Crisnée	iodure	9,7	4	2	$2,8 \cdot 10^{-3}$	radial	
		naphionate	9,7	4	2,4	$6,6 \cdot 10^{-3}$	radial	
		uranine	54,4	12	7,5	$1,1 \cdot 10^{-4}$	radial	
		lithium	47	14	0,82	$2,5 \cdot 10^{-3}$	radial	
	Grand Hallet	lithium	19,6	4	1,3	$1,9 \cdot 10^{-3}$	radial	
		uranine	19,6	4,7	1,7	$2,9 \cdot 10^{-3}$	radial	
		nitrate	19,6	5,5	2,5	$3,2 \cdot 10^{-3}$	radial	
		potassium	19,6	6	1,9	$3,0 \cdot 10^{-3}$	radial	
		Jandrain	lithium	9,6	3,3	3,2	$3,7 \cdot 10^{-4}$	radial
	Tuffeaux du Landénien	Bertrée	nitrate	4,9	1,9	6	$1,0 \cdot 10^{-4}$	radial
nitrate			4,9	2,5	6,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	radial	
lithium			15,8	4,8	2,5	$8,0 \cdot 10^{-5}$	radial	

**Tab. 2.43** : Synthèse des paramètres hydrodispersifs calculés pour les traçages dans les calcaires du Carbonifère, dans les craies du Crétacé et dans les tuffeaux du Landénien. Les porosités efficaces ne représentent la porosité réelle de l'ensemble de l'aquifère que dans le cas où l'interprétation est effectuée avec le modèle radial.

Les dispersivités varient entre 1,9 et 100 m. Les domaines de variation pour chaque type d'aquifère sont les suivants :

- calcaires du Carbonifère (pertes) : de 15 à 100 m
- calcaires du Carbonifère (forages) : de 10 à 92 m
- craies du Crétacé : de 2 à 14 m
- tuffeaux du Landénien : de 1,9 à 4,8 m

Plus la porosité de fissure est importante, plus les dispersivités sont élevées. Celles-ci ne dépassent jamais 5 m dans le cas des tuffeaux et 15 mètres dans le cas des craies. Par contre, en ce qui concerne les calcaires karstifiés, elles peuvent atteindre 100 m.

Dans le Landénien, les valeurs de dispersivités sont relativement homogènes. Elles ne concernent toutefois qu'un seul site. Il est peu probable qu'à cette échelle (moins de 15 m), un élément de volume représentatif de l'aquifère soit déjà atteint.

En ce qui concerne les craies, les dispersivités varient assez bien en fonction de la position du point d'injection par rapport aux axes principaux de fissuration. Elles peuvent être aussi élevées que dans le cas des calcaires (14 m pour le lithium et 12 m pour l'uranine à Crisnée), indiquant l'existence de fissures vraisemblablement karstifiées. Elles peuvent également être aussi faibles que dans le Landénien (< 5 m), indiquant un milieu fissuré plus homogène.

En ce qui concerne les calcaires, un élément de volume représentatif de l'aquifère ne peut jamais être atteint car les traçages n'impliquent jamais qu'une seule partie du système à la fois : soit les conduits très perméables (cas des traçages à partir des pertes), soit les blocs peu perméables (cas des traçages à partir des forages). L'hétérogénéité de l'aquifère ne peut être étudiée de manière globale. Les traçages à partir des forages sont à une échelle trop petite en comparaison des hétérogénéités alors que les traçages à partir des pertes ne concernent pas assez les blocs entre les chenaux.

Les valeurs de dispersivité dans le karst varient par conséquent beaucoup plus largement qu'ailleurs. Les valeurs les plus faibles correspondent à un écoulement en milieu fissuré, sans conduit karstique majeur (10 m pour le naphthionate à Fairoule et 16 m pour l'uranine à Mont-sur-Marchienne) ou à l'existence d'une nappe de fissure en aval d'un système karstifié (15 m pour le lithium au Bois de Marsée).

Les valeurs les plus élevées correspondent à des circulations dans les chenaux karstiques. Il convient de rappeler que dans ce cas les valeurs calculées s'écartent souvent des valeurs réelles pour les deux raisons principales suivantes, liées à la validité des modèles utilisés :

- dans le cas des traçages à partir des pertes, il y a un passage au travers de la zone non saturée. Les lois d'écoulement et de transport en milieu saturé ne sont plus applicables;
- les vitesses effectives dans les conduits karstiques sont souvent telles que la loi de DARCY n'est plus vérifiée, même en zone saturée.



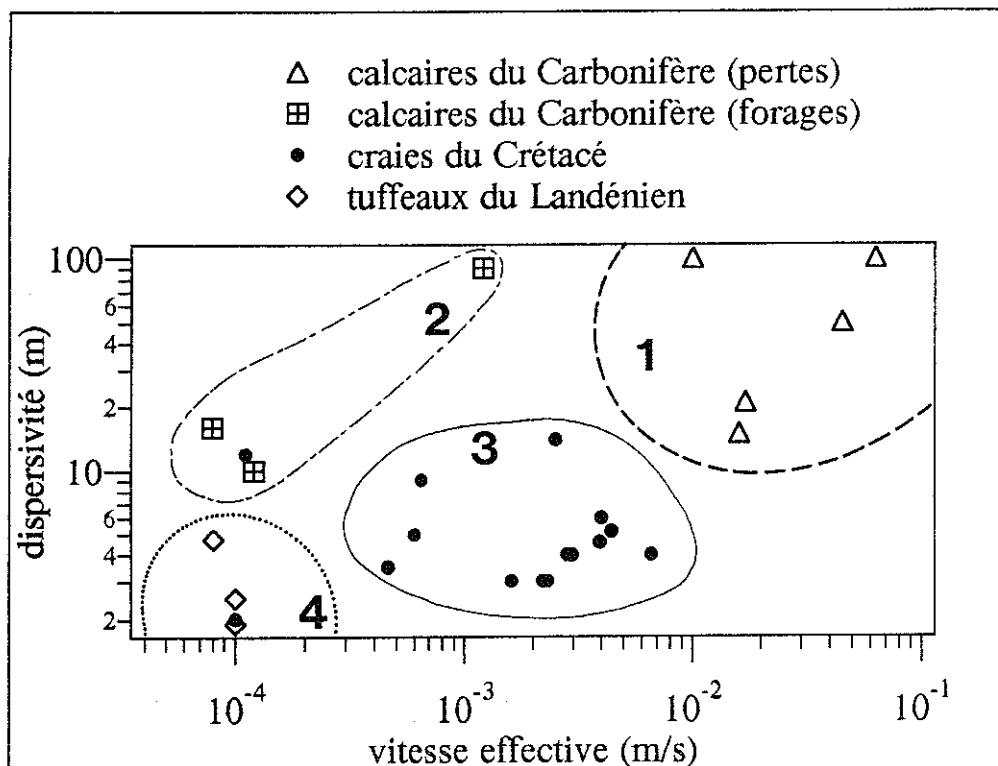
Tenant compte des remarques précédentes, si une limite devait être placée entre le milieu fissuré et le milieu karstique, celle-ci se situerait sans doute aux alentours de 10 à 15 m de dispersivité. Cette limite n'est bien sûr valable que pour les aquifères et les conditions expérimentales étudiées. Elle ne peut être utilisée en toute généralité.

Il est intéressant de comparer les différents aquifères en reportant les valeurs de dispersivité en fonction des vitesses effectives (fig. 2.83). La dispersivité et la vitesse effective sont en effet toutes deux liées à l'ouverture, à la fréquence et à la continuité des fissures.

Ce type de représentation fait nettement apparaître quatre groupes distincts :

groupe 1 : calcaires du Carbonifère avec traçages à partir des pertes. Les dispersivités et les vitesses effectives sont très élevées à cause des circulations en chenaux;

groupe 2 : calcaires du Carbonifère avec traçages à partir des forages. Les vitesses effectives sont faibles malgré les dispersivités relativement élevées. Les vitesses sont limitées par la transmissivité faible autour des forages. L'hétérogénéité de la fissuration entraîne cependant une plus grande dispersivité que dans le cas des craies;



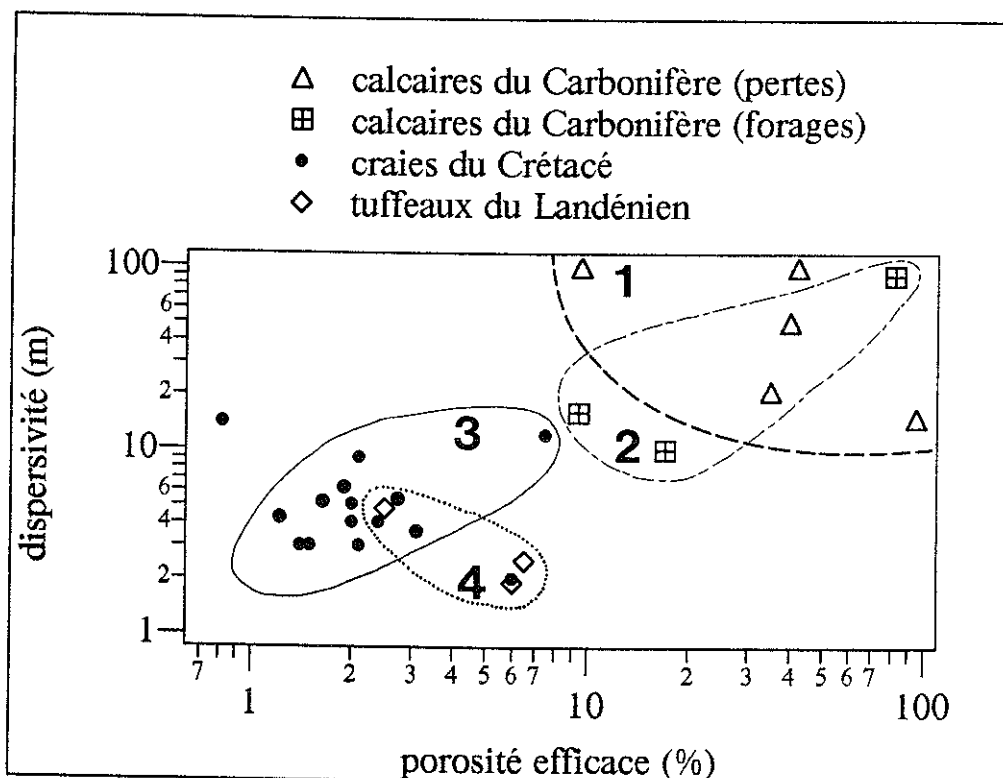
**Fig. 2.83** : Dispersivité en fonction de la vitesse effective pour tous les traçages modélisés dans les calcaires du Carbonifère (pertes et forages), dans les craies du Crétacé et dans les tuffeaux du Landénien.

groupe 3 : craies du Crétacé. Les dispersivités sont plus faibles que dans le cas des calcaires mais les vitesses effectives restent importantes. Le milieu fissuré est plus homogène mais des variations dans la fréquence et l'ouverture des fissures peuvent conduire à des dispersivités aussi élevées que dans les calcaires. Deux points se situent en dehors du domaine : l'uranine injectée au PZ1 à Crisnée, pour laquelle on a vu que la vitesse était faible en raison de la proximité d'un col de partage, et l'uranine injectée au Pz2 à Bertrée, pour laquelle on a vu que le gradient naturel en sens opposé au traçage était responsable de la vitesse plus faible;

groupe 4 : tuffeaux du Landénien. Les dispersivités et les vitesses effectives sont les plus faibles. La dispersion est due à la fois à la tortuosité de la matrice poreuse et à l'existence de fissures.

Sur la fig. 2.84, on a reporté les dispersivités en fonction des porosités efficaces.

La comparaison entre les milieux fissuré et karstique est un peu plus compliquée que dans le cas précédent car la signification physique de la "porosité" est différente suivant le modèle utilisé pour l'interprétation (modèle 1D, modèle radial ou modèle ADTS). Néanmoins, on constate une assez bonne concordance entre la dispersivité et la porosité. Ces dernières croissent en effet toutes les deux lorsque l'ouverture des fissures augmente. L'aquifère du Landénien se distingue plus difficilement de celui du Crétacé. La porosité de fissure du second est en effet compensée par la porosité d'interstice du premier.



**Fig. 2.84** : Dispersivité en fonction de la porosité efficace pour tous les traçages modélisés dans les calcaires du Carbonifère (pertes et forages), dans les craies du Crétacé et dans les tuffeaux du Landénien.

A titre de comparaison, pour clore ce chapitre, nous avons relevé dans la littérature quelques valeurs de paramètres hydrodispersifs calculées à partir de tests de traçage dans différents types d'aquifères poreux, fissurés et karstiques.

POREL (1988) trouve, pour l'aquifère crayeux du site de Béthune dans le Nord de la France, des valeurs de dispersivité pour l'uranine et l'iodure, en écoulement radial convergent, comprises entre 0,1 et moins de 5 m.

Ces valeurs correspondraient à un milieu fissuré plus homogène que la plupart des sites étudiés dans la craie en Belgique (Crisnée, Grand Hallet). Les porosités efficaces sont du même ordre de grandeur dans les deux cas, ne dépassant jamais 6 %.

D'autres tests réalisés sur le même site, toujours en écoulement radial convergent avec l'uranine, l'iodure et le deutérium ont été interprétés par MALOSZEWSKI et ZUBER (1990) à l'aide du modèle SFDM (Single Fissure Dispersion Model). Ces auteurs obtiennent des valeurs de dispersivité d'à peine 0,2 m.

LAURENT (1982) signale, pour la craie du Crétacé de la Haine, des valeurs de dispersivité, en écoulement radial convergent, comprises entre 5 et 12,5 m. Ces valeurs sont toutefois calculées de manière peu rigoureuse.

HANICH (1991) a trouvé une dispersivité de 9,7 m pour l'uranine, lors d'un traçage en écoulement radial convergent à une distance de 40 m dans l'aquifère crayeux de Sangatte (Artois, France). Le même auteur signale, dans la craie du Boulonnais à Escalles, des vitesses maximales pouvant atteindre 50 m/h pour une distance de 1100 m en écoulement naturel. Cette vitesse témoigne de l'existence de conduits karstiques continus sur une distance relativement longue.

Peu de tests en écoulement uniforme sur des distances suffisamment longues ont, semble-t-il, été réalisés jusqu'à présent dans la craie. Ce type de test, mis à part le fait qu'il fournirait une image plus représentative d'un scénario de pollution, permettrait d'obtenir des valeurs de dispersivité transversale (VALENTINI, 1992).

Sur le site de Marsillargues (aquifère hétérogène de graviers et de sables), HANICH (1991) trouve des dispersivités très variables, comprises entre 0,02 et 80 m. L'hétérogénéité sur ce site est telle que, à notre avis, la notion de dispersivité n'a plus beaucoup de sens.

PTAK et TEUTSCH (1992) trouvent sur le site de Horkheimer Insel (aquifère de sables et de graviers) des dispersivités comprises entre 3,8 et 11 m. Les tests ont eu lieu à des distances comprises entre 10 et 200 m, en écoulement naturel, et l'interprétation est basée sur un modèle 1D. Des tests réalisés en écoulement radial convergent sur le même site fournissent des valeurs de dispersivité "apparente" comprises entre 0,5 et 12 m.

REICHERT et HÖTZL (1992) ont étudié un autre site dans la nappe alluviale du Neckar (sables et graviers), à des distances de 6 à 80 m, en écoulement radial convergent. Ils obtiennent des dispersivités apparentes comprises entre 0,35 et 10,4 m. Ces dispersivités dépendent du type de traceur utilisé.

Signalons enfin, en ce qui concerne les aquifères poreux, les études réalisées par SAUTY (1988) sur le site de Bonnaud en France (aquifère alluvial), par DE CARVALHO DILL et al (1992) sur le site de Merdingen (Allemagne) et par LEIBUNDGUT et al (1992) sur le site de Wilerwald (Suisse).

En ce qui concerne les aquifères karstiques, on trouve beaucoup moins d'exemples.

BEAUDOING et al. calculent, pour le réseau karstique de l'Ouyse, sans trop se soucier de la validité du modèle utilisé, des dispersivités supérieures à 100 m, atteignant même presque 400 m.

HANICH (1991) a effectué des tests dans les calcaires du Dévonien (Givétien) sur le site de pompage de Moranrieux dans l'Avesnois. Il obtient une dispersivité de 3,2 m pour un traçage entre perte et forage à une distance de 17 m, et une valeur encore plus faible (1,7 m) pour un traçage entre deux forages distants d'environ 150 m. Ces valeurs de dispersivité sont excessivement faibles pour des calcaires. Cela mériterait des essais complémentaires, notamment avec différents débits.

Dans BEHRENS et al (1992), on trouve les résultats d'une série de modélisations d'essais de traçages à grandes distances, avec différentes substances, sur le karst de Lurbach (Alpes autrichiennes). Les courbes de restitution sont interprétées à l'aide d'un modèle convection-dispersion monodimensionnel à plusieurs trajets. Les dispersivités calculées sont comprises entre 6,3 et 40 m. Aucune influence du débit n'est signalée par ces auteurs.

# **CONCLUSION GENERALE**



W. H. R.

## CONCLUSION GENERALE

Cette recherche sur les aquifères karstiques des calcaires carbonifères du Sud de la Belgique est à la fois monographique et thématique.

La première partie du travail a porté sur l'étude des bassins du Néblon et d'Anthisnes, situés dans le Condroz, à l'extrémité Est du synclinorium de Dinant. Deux types d'approche nous ont permis de comparer ces systèmes karstiques : d'une part une approche structurale basée sur les mesures géophysiques, d'autre part une approche fonctionnelle (ou systémique) faisant appel à l'étude des réponses naturelles (hydrodynamique<sup>1</sup>, hydrogéochimie) et provoquées (traçages). Des différences nettes de comportement entre les deux bassins ont été mises en évidence par la plupart des méthodes utilisées dans l'approche systémique. Elles montrent que la connaissance de la structure à partir des méthodes directes reste encore insuffisante pour rendre compte du fonctionnement complet des systèmes hydrogéologiques. Ces différences de comportement sont attribuées à des états de karstification différents. Parce qu'il est plus karstifié, le bassin d'Anthisnes semble posséder de moins grandes réserves et une plus grande vulnérabilité que le bassin du Néblon. Nous reprenons ci-dessous les conclusions essentielles de cette recherche.

La seconde partie du travail a été entièrement consacrée aux méthodes de traçage. Les expériences réalisées dans les bassins d'Anthisnes et du Néblon ont été replacées dans un cadre plus général en envisageant de façon plus détaillée les mécanismes de transport des traceurs dans les milieux fissurés et karstiques. De nombreux tests ont été effectués, d'une part en écoulement naturel (traçages de perte à source ou de forage à source), d'autre part en écoulement radial convergent (traçages de forage à forage). Ces traçages ont permis d'étudier les effets de la "double perméabilité" en caractérisant les échanges entre les drains karstiques et les blocs microfissurés peu perméables situés autour. Trois catégories d'aquifère ont été comparées : les calcaires dévoniens et carbonifères (aquifères fissurés et karstifiés), les craies du Crétacé (aquifère principalement fissuré) et les tuffeaux du Landénien (aquifère principalement à porosité d'interstice). En ce qui concerne les calcaires dévoniens et carbonifères, les sites étudiés sont situés dans les bassins de Dinant, de Namur et de la Vesdre. En ce qui concerne les craies et les tuffeaux, les sites appartiennent à la Hesbaye. Les tests ont permis de mettre au point des méthodes de traçage mieux adaptées aux buts poursuivis. Deux manières d'interpréter les résultats ont été envisagées : l'une purement descriptive à partir des courbes de restitution (distribution des temps de séjour, taux de restitution, vitesses), l'autre plus quantitative à partir de la modélisation des essais et de la détermination des caractéristiques hydrodispersives de l'aquifère.

---

<sup>1</sup>La comparaison au point de vue hydrodynamique a été étendue à un troisième bassin géographiquement proche des deux précédents : le système du "vallon des chantoirs" à Remouchamps (calcaires dévoniens).

## Nappe karstique des bassins du Néblon et d'Anthisnes

Du point de vue géomorphologique, on note un développement plus important de l'exokarst dans le bassin d'Anthisnes que dans celui du Néblon. Dans le bassin du Néblon, le réseau hydrographique de surface est plus développé. Ces différences sont liées à l'évolution différente des deux bassins ainsi qu'à leur structure géologique propre.

Le bassin d'Anthisnes est un synclinal étroit où les eaux en provenance des terrains famenniens situés au Nord se perdent au contact des calcaires, favorisant l'organisation d'un important réseau de drainage souterrain karstique. Dans le bassin du Néblon, l'alimentation des calcaires est plus diffuse car les terrains famenniens ne sont présents qu'au Sud (synclinal de Chardeneux) et sont directement drainés par le Néblon.

On distingue trois familles d'accidents tectoniques : les failles longitudinales (E-W), les failles transversales (N-S) et les failles obliques. Le synclinal d'Anthisnes subit une flexure à hauteur de Ouhar (E d'Anthisnes). Mis à part le fait que ces failles conditionnent l'emplacement des pertes, leur rôle hydrogéologique en profondeur semble restreint.

Du point de vue hydrogéologique, l'ensemble calcaire peut être divisé en deux aquifères séparés par les schistes du Pont d'Arcole (Tn2a) : l'aquifère principal allant du Tn2b au V2b et l'aquifère secondaire comprenant le Tn1b. Le rôle important joué par l'aquifère des grès fissurés du Famennien (Fa2b et Fa2c) a également retenu notre attention. Une importante couverture de limons joue le rôle de "réservoir tampon" dans la zone d'infiltration.

Les méthodes géophysiques électriques et électromagnétiques (VLF, MELOS) ont permis de détecter sous les limons les nombreux accidents tectoniques (failles et fractures) que les levés en surface n'avaient pu mettre en évidence. La carte structurale ainsi établie, avec l'aide complémentaire des photographies aériennes, a permis de compléter la carte géologique de la région.

La géophysique, le levé de fissuration et l'examen des photographies aériennes ne mettent pas en évidence les mêmes familles de fractures.

Les diagrapies montrent que la karstification est plus importante dans la zone d'infiltration, au-dessus du niveau de la nappe (conduits karstiques non fonctionnels).

Les différences entre le bassin du Néblon et celui d'Anthisnes se marquent mieux dans le comportement hydrodynamique des exutoires souterrains. Dans le bassin du Néblon, les sources captées à Néblon-le-Moulin sont presque exclusivement alimentées par l'écoulement de base des réserves. A la résurgence de Comblain, une composante directe se superpose à cet écoulement de base.

Alors que le rapport  $Q_{max}/Q_{min}$  atteint 5 dans le cas de la résurgence de Comblain, il ne dépasse pas 1,2 dans le cas des galeries de captages du Néblon. Ces valeurs sont en outre nettement plus basses que celles rencontrées à l'exutoire du système de Remouchamps ( $Q_{max}/Q_{min} = 158$ ).



Les débits souterrains spécifiques sont très faibles ( $8,4 \text{ l/s/km}^2$  dans le Néblon et  $10,4 \text{ l/s/km}^2$  à Anthisnes) car les lames d'eau annuelles précipitées et écoulées sont faibles également ( $P < 805 \text{ mm}$  et  $Q < 360 \text{ mm}$ ). Ces débits spécifiques sont fortement liés au facteur climatique (et par conséquent à la végétation).

Les bilans hydrologiques des bassins pris dans leur ensemble ferment généralement bien, qu'ils soient calculés simplement par la formule de TURC ou de façon plus précise par la méthode de THORNTHWAITE. Ils montrent que les limites des bassins hydrogéologiques correspondent assez bien aux lignes de crête topographiques. Les écarts s'expliquent souvent par l'imprécision des paramètres mesurés ou par le fait que l'on a négligé un paramètre.

L'étude des hydrogrammes a permis de calculer les réserves d'une part et de caractériser la forme des courbes de décrue d'autre part. Cette étude a été mise à profit dans la détermination des paramètres  $k$  (réserves) et  $i$  (infiltration) utilisés dans la classification de MANGIN.

Les volumes dynamiques (réserves écoulables) sont très importants (plus de 100 mm en ce qui concerne le système d'Anthisnes et plus de 1000 mm en ce qui concerne celui du Néblon). Les réserves du bassin du Néblon ont été largement surestimées du fait de la réalimentation de la nappe (infiltration efficace) durant la période de tarissement considérée. Les coefficients de tarissements ont également été calculés sur base des variations des niveaux d'eau dans les piézomètres. Les valeurs ainsi obtenues présentent le même inconvénient que dans le cas précédent (surestimation des réserves due à l'absence de prise en compte de l'infiltration efficace). Elles permettent toutefois d'étudier les variations interannuelles de la recharge.

D'après les valeurs de  $k$  et  $i$ , les systèmes carbonifères étudiés se placent dans le domaine des systèmes complexes à grandes réserves, voire même, dans le cas du Néblon, en dehors du domaine des aquifères karstiques.

L'analyse des courbes de débits classés a montré l'existence de seuils de mise en charge des conduits karstiques dans les systèmes d'Anthisnes et de Remouchamps.

L'analyse corrélatrice a permis de préciser "l'effet mémoire" des systèmes en relation avec les réserves et les modalités de l'infiltration. Cet effet mémoire est très important dans le cas du système du Néblon (galeries de captages et piézomètres). Les temps de régulations calculés à partir des spectres dans le cas des bassins du Néblon, d'Anthisnes et de Remouchamps valent respectivement 47, 53 et 21 jours. Les analyses croisées des pluies et des débits indiquent des temps de réactions de l'ordre de 100 j dans le Néblon, 2 j à Anthisnes et 1,5 j à Remouchamps. Les corrélogrammes croisés des pluies avec les niveaux d'eau dans les piézomètres montrent deux réponses : l'une après environ 20 j, correspondant à la traversée de la couverture de limons suivie d'une circulation dans les chenaux karstiques, l'autre après plus de 60 j correspondant à l'infiltration diffuse au travers de la couverture meuble puis au travers des calcaires fissurés peu perméables.

L'étude hydrogéochimique a montré une nette distinction entre les eaux calcaires et les eaux issues des grès fameniens ou namuriens, moins minéralisées.

Les mesures des variations de conductivité à la résurgence de Comblain ont permis d'effectuer la décomposition de l'hydrogramme de la source. Les débits d'infiltration obtenus sont faibles en comparaison de l'écoulement des réserves.

La plupart des eaux en provenance du Famennien sont saturées vis-à-vis de la calcite avant leur entrée dans les calcaires.

La dissolution spécifique des systèmes étudiés est très faible ( $< 40 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$ ). Elle est sans doute liée au fait que l'écoulement spécifique est faible.

Dans le bassin du Néblon, le seul drain karstique mis en évidence par les traçages est celui reliant la perte du Bois de Marsée à la galerie Communale (Néblon-le-Moulin).

Dans le bassin d'Anthisnes, les trois points de perte principaux (Crossée, Vien, Anthisnes) communiquent avec la résurgence du Moulin à Comblain.

Les vitesses de passage sont comprises entre 73 et 277 m/h. Elles sont plus faibles à partir des pertes de Vien et d'Anthisnes qu'à partir de la perte de Crossée, vraisemblablement en raison de l'éloignement par rapport à l'axe principal de drainage. Dans la partie aval du système, cet axe est en effet situé sur le flanc Sud du synclinal.

Grâce à un pompage, les traceurs injectés à la perte de Crossée (microsphères et uranine) ont été retrouvés, à l'état de traces, dans l'eau du forage P14. Ils témoignent de la difficulté des échanges entre les conduits karstiques et les blocs moins perméables.

Les injections à partir des forages n'ont donné aucun résultat à l'exception de l'injection au P14 pour laquelle des traces d'uranine ont été retrouvées à la résurgence de Comblain. Ces tests confirment la faible perméabilité des blocs comportant les réserves de l'aquifère. La reprise par pompage de l'uranine injectée au P2 a montré qu'aucun conduit karstique fonctionnel ne se trouvait sans doute à moins d'une trentaine de mètres du forage.

Dans le cas des traçages mettant en jeu les forages, les microsphères montrent en général des taux de restitution inférieurs à ceux des traceurs salins ou fluorescents. Les microsphères sont en effet piégées plus facilement en raison de leur taille.

Deux modèles de transport en écoulement monodimensionnel uniforme (avec et sans effet d'eau immobile) ont permis de calculer les dispersivités longitudinales. Celles-ci sont comprises entre 15 et 100 m.

A Crossée, les dispersivités calculées augmentent avec le débit (de 20 à 100 m). Les valeurs les plus élevées doivent être considérées avec précaution car il se peut que la loi de Darcy ne soit plus respectée.

Un modèle à deux trajets convient parfaitement pour expliquer l'existence de deux pics sur les courbes de restitution des traceurs injectés à la perte de Crossée.

Dans le cas du traçage à la perte du Bois de Marsée, les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide du modèle prenant en compte les effets d'eau immobile. Ils montrent l'existence d'une zone noyée importante en aval du système.

## Transport dans les milieux fissurés et karstiques

### Types de traçage et de traceur

Cinq configurations de système-traçage ont été définies pour tenir compte de la grande diversité des situations rencontrées dans les trois types d'aquifères étudiés (calcaires, craies et tuffeaux).

La première configuration est le cas classique du traçage perte-résurgence. Elle n'a été utilisée que dans les calcaires (Dévonien et Carbonifère) vu l'absence de pertes dans les autres aquifères.

La deuxième configuration est celle du traçage forage-résurgence. Elle a été testée à Anthisnes (P14), à Spontin (F1) et à Fairoule (Pz4 et Pz6).

La troisième configuration correspond au traçage perte-forage. Elle a été testée avec succès dans le bassin d'Anthisnes (traçage entre la perte de Crossée et le forage P14).

La quatrième configuration est celle du traçage entre deux forages. C'est la configuration la plus employée pour les traçages à petite et moyenne distance dans les aquifères fissurés et à porosité d'interstice. Nous l'avons testée dans les calcaires du Carbonifère (Mont-sur-Marchienne), dans les craies du Crétacé (Bertrée, Grand Hallet, Crisnée, Jandrain) et dans les tuffeaux du Landénien (Bertrée). Seule la méthode de l'écoulement radial convergent a été employée. Elle est à priori plus intéressante que l'écoulement naturel uniforme car les courbes de restitution sont plus régulières et le bilan de traceur peut être calculé. Elle ne permet cependant pas de déterminer les dispersivités transversales et met en jeu des vitesses d'écoulement très éloignées des situations naturelles.

La quatrième configuration est celle de l'injection en puits unique. Elle a été testée à l'occasion du traçage au P2 dans le bassin du Néblon.

Le choix du traceur est avant tout dicté par le type d'aquifère à tester. Dans le karst, sa nature a peu d'importance tant qu'il s'agit de trajets le long des drains avec peu d'échanges avec l'eau immobile (convection prédominante). Les effets d'eau immobile prennent de l'importance dans le cas des craies. L'adsorption est souvent négligeable dans des milieux inertes comme les calcaires et les craies. Elle devient plus importante dans le cas des tuffeaux dont la teneur en argile est plus élevée et où les vitesses effectives sont plus faibles.

Les traceurs suivants ont été utilisés :

- Na<sup>+</sup> (NaCl), K<sup>+</sup> (KI, KNO<sub>3</sub>), Li<sup>+</sup> (LiCl), Cl<sup>-</sup> (NaCl, LiCl), I<sup>-</sup> (KI), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (KNO<sub>3</sub>),
- uranine, rhodamine B, naphthionate,
- microsphères fluorescentes YG 1µm,
- bactériophages (souche de *Serratia Marcescens*).

La comparaison des taux de restitution de ces différents traceurs dans différents contextes a permis d'inventorier les principaux avantages et désavantages. Ainsi par exemple, d'après les résultats des tests en écoulement radial convergent, le sodium et le potassium seraient plus conservatifs que le lithium. Ils conviennent cependant moins bien pour des tests à grande distance (karst) vu leur présence dans les eaux naturelles. L'iodure et le nitrate montrent les taux de restitution les plus élevés dans le cas des traçages en écoulement radial convergent.

La fonction d'entrée au cours des injections dans les piézomètres a aussi retenu notre attention. Le mode d'injection (profondeur d'injection, débit et durée de chasse) influence en effet la pénétration du traceur dans l'aquifère et cette influence est d'autant plus forte que la transmissivité est faible.

#### Relations mises en évidence et informations apportées par les courbes de restitution

Dans le karst, les traçages en écoulement naturel ont servi, dans un premier temps, à déterminer les communications entre les points d'injection (perte ou forage) et les émergences.

Le tableau suivant reprend les principales relations mises en évidence sur les différents sites karstiques étudiés :

Site	Point d'injection	Point de sortie	Vmax	Vm	Dispersivité
Néblon	perte du Bois de Marsée	galerie Communale	73	60	15
Néblon	perte du Bois de Marsée	grande galerie	-	28	-
Anthisnes	perte de Crossée	résurgence de Comblain	76 - 277	61 - 225	15 - 100
Anthisnes	perte de Vien	résurgence de Comblain	125	89	-
Anthisnes	perte d'Anthisnes	résurgence de Comblain	105	82	-
Spontin	Agauches - pt 1	sources Duchesse et Presbytère	100 - 327	20 - 53	100
Spontin	Agauches - pt 2	sources Duchesse et Presbytère	128 - 247	53 - 71	-
Spontin	Agauches - pt 3	sources Duchesse et Presbytère	81 - 196	53 - 94	-
Spontin	Agauches - pt 4	sources Duchesse et Presbytère	7 - 9	7	-
Spontin	forage F1	résurgence Breujette	9	6	-
Fairoule	forage Pz6	forage Pz3	3,8	-	-
Fairoule	forage Pz6	galerie GIII	32	-	-
Fairoule	forage Pz4	forage Pz7	1,2	0,7	-
Fairoule	forage Pz4	galerie GI	1,6	0,4	10
Walhorn	chanoir de Walhorn	source n°3 (Gueule)	25	20	-
La Reid	chanoir de La Reid	résurgence d'Hestroumont	20	13	-
La Reid	chanoir de La Reid	résurgence de Spixhe	28	20	-
La Reid	égouts	résurgence d'Hestroumont	15	10	-
Xhoris	abîme de Xhoris	résurgence sous-fluviale	37	30	-
Remouchamps	chanoir de Sècheval	Rubicon	-	17	-

Trois types de courbe (courbes de restitution, courbes de restitution normées et courbes de distribution des temps de séjour) ont permis de dégager, pour chaque traçage, l'influence de divers facteurs tels que : la nature du milieu (milieu fissuré homogène ou présence de conduits karstiques), la nature du traceur (conservatif ou non), le débit et la vitesse d'écoulement, l'épaisseur de la zone non saturée, la position du point d'injection par rapport aux axes principaux de drainage, l'allure de la surface piézométrique (col de partage des eaux), la présence de niveaux argileux.

Les vitesses maximales, dans le cas des traçages en écoulement naturel en milieu karstique, sont comprises entre 1,2 et 327 m/h. Elles sont les plus élevées dans le cas des bactériophages injectés au point 1 dans le ravin des Agauches à Spontin (système perte-source) et les plus faibles dans le cas du passage du naphthionate entre les forages Pz4 et Pz7 à Fairoule (système forage-forage). Les vitesses modales sont comprises entre 0,4 et 225 m/h. Elles sont les plus élevées dans le cas de l'uranine injectée à la perte de Crossée (système perte-source) et les plus faibles dans le cas du passage du naphthionate entre le forage Pz4 et la galerie GI (système forage-source).

Les vitesses maximales, dans le cas des traçages en écoulement radial convergent, sont comprises entre 5 et 26 m/h en ce qui concerne les calcaires<sup>1</sup>, entre 5 et 141 m/h en ce qui concerne les craies et entre 1,43 et 70,2 m/h pour ce qui est des tuffeaux. Les vitesses modales sont, dans ce cas, comprises entre 1 et 9,2 m/h pour les calcaires, entre 1 et 48 m/h pour les craies et entre 0,42 et 2,15 m/h pour les tuffeaux.

#### Paramètres hydrodispersifs

Les dispersivités et les porosités efficaces ont été calculées sur base de deux types de modèles :

- le modèle convection-dispersion simple en écoulement monodimensionnel uniforme, bidimensionnel uniforme ou radial convergent (code CATTI),
- le modèle convection-dispersion dans un drain avec diffusion vers l'eau immobile (modèle ADTS).

Plus la porosité de fissure est importante, plus les dispersivités sont élevées. L'application de ces modèles aux différents milieux a permis de définir les domaines de variation des dispersivités comme suit :

- calcaires du Carbonifère (pertes) :	de 15 à 100 m
- calcaires du Carbonifère (forages) :	de 10 à 92 m
- craies du Crétacé :	de 2 à 14 m
- tuffeaux du Landénien :	de 1,9 à 4,8 m

Ces valeurs de dispersivité ont été comparées à celles rencontrées dans la littérature pour différents milieux karstiques, fissurés ou poreux hétérogènes.

En ce qui concerne les traçages en écoulement radial convergent dans les craies, les dispersivités varient assez bien en fonction de la position du point d'injection par rapport aux axes fissurés principaux (EVR non atteint).

<sup>1</sup>Un seul site a été testé de cette manière, celui de Mont-sur-Marchienne.

Le report des valeurs de dispersivité en fonction des vitesses effectives a permis de mieux différencier les quatre groupes précédents :

- calcaires du Carbonifère avec traçages à partir de pertes. Les dispersivités et les vitesses effectives sont très élevées à cause des circulations en chenaux;

- calcaires du Carbonifère avec traçages à partir de forages. Les vitesses effectives sont faibles malgré les dispersivités relativement élevées. Les vitesses sont limitées par la transmissivité faible autour des forages;

- craies du Crétacé. Les dispersivités sont plus faibles que dans le cas des calcaires mais les vitesses effectives restent importantes.

- tuffeaux du Landénien. Les dispersivités et les vitesses effectives sont plus faibles que dans le cas des calcaires et des craies.

---

**BIBLIOGRAPHIE**

- AGIE J. (1967): Etude hydrogéologique de la nappe karstique de Modave - Thèse.
- ALTHAUS H., BRICELJ M., ENGEL W., JONG K.D., KOSI G. (1986): Tracing with phages - Karst hydrogeology of the Central and Eastern Peloponnesus. Steirische beiträge zur hydrogeologie, Band 37-38. Jahrgang 85-86, pp 259-269.
- ARAGNO M., MÜLLER I. (1982): Premières expériences de traçages des eaux souterraines dans le karst du jura neuchâtelois (Suisse) à l'aide de bactériophages - Bull. Centre d'Hydrogéologie, n°4, 1982, pp 59-81.
- ATKINSON T.C. (1985): Present and future directions in karst hydrogeology - Ann. de la Soc. Géol. de Belgique, Comptes Rendus du Colloque International de Karstologie Appliquée, Liège, 1984, T 108, pp 293-296.
- ATKINSON T.C., PRICE M. (1992): Tracing the movement of highway drainage in the Chalk aquifer, southern England - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 305-311.
- BAHDADA B. (1993): Etude du transport des polluants dans la craie de Hesbaye (Belgique). Approche géophysique et approche par traçage - Mémoire, Université de Liège, 102p, inédit.
- BAKALOWICZ M. (1977): Etude du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés par une méthode hydrogéochimique nouvelle - C.R. Acad Sc Paris, t.284, série D, pp 2463-2466.
- BAKALOWICZ M. (1979): Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification - Thèse. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 269p.
- BAKALOWICZ M. (1979): L'anhydride carbonique dans la karstogenèse - Actes du Symposium International sur l'érosion karstique, U.I.S., Aix en Provence - Marseille - Nîmes, pp 41-48.
- BAKALOWICZ M. (1980): Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O - carbonate - Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates, Coll Soc Géol Fr, Assoc Géol Sud-Ouest, Soc Fr Minéral Cristall, Bordeaux, pp 11-23.
- BAKALOWICZ M. (1986): De l'hydrogéochimie en karstologie - Karst Euskadi 86, vol 2, pp 105-129.
- BAKALOWICZ M. (1986): La karstification, processus, modèles et exemples - 9ème Congrès International de Spéléologie, volume III, Barcelone, pp 59-63.
- BARKER R.D. (1981): The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. - Geophysical Prospecting, n°29, pp 128-143.
- BEAR J., VERRUIJT A. (1987): Modeling groundwater flow and pollution - Theory and applications of transport in porous media, Reidel, 414p.

- BEAUDOING G., ASTRUC J.G., BARADAT J.M., BOUZIGES M., CHARENTUS T., COUSTOU J.C., GETTO D., MOUYON P., RICARD J., SAUTY J.P., TARISSE A., VICENTE A. (1989): Traçages et protection des captages dans le karst: détermination des paramètres de transfert et prévision de la propagation des pollutions dans le réseau karstique de l'Ouyse, Causse de Gramat (Lot, France) - *Hydrogéologie*, 4, 1989, pp 279-292.
- BEHRENS H. (1986): Water tracer chemistry - a factor determining performance and analytics of tracers - Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing. Athens 1986, Ed. Morfis & Paraskevopoulou, pp 121-134.
- BEHRENS H., BENISCHKE R., BRICELJ M., HARUM T., KÄSS W., KOSI G., LEDITSKY H.P., LEIBUNDGUT Ch., MALOSZEWSKI P., MAURIN V., RAJNER V., RANK D., REICHERT B., STADLER H., STICHLER W., TRIMBORN P., ZOJER H., ZUPAN M. (1992): Investigations with natural and artificial tracers in the karst aquifer of the Lurbach system (Peggau-Tanneben-Semriach, Austria) - *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie*. 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Transport Phenomena in Different Aquifers, ATH ed., 43, Jahrgang 1992, pp 9-158.
- BEHRENS H., LEIBUNDGUT Ch., THEODORATOS P., VITORIOU-GEORGOULI A. (1986): Tracing with fluorescent tracers - Karst hydrogeology of the Central and Eastern Peloponnesus. *Steirische beiträge zur hydrogeologie*, Band 37-38. Jahrgang 85-86, pp 235-247.
- BENDERITTER Y., CHATELAIN S., CHERY J.L., LELONG F., LEPILLER M., LIVROZET E., PETITFILS B., ZUNINO C. (1980): Structure et fonctionnement des aquifères karstiques et transit des pollutions - Actes du 1er Colloque National sur la Protection des Eaux Souterraines Karstiques, Besançon 1980, pp 83-120.
- BENDERITTER Y., ROBIN G. (1982): Image électrique de terrains calcaires obtenue par méthode géophysique de type électromagnétique - *Ann. Sc. Université de Besançon*, 3ème Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Géologie, Mémoire n°1, pp 211-218.
- BENDERITTER Y., ROBIN G. (1987): Approche singulière des discontinuités de perméabilité en milieu carbonaté - *Hydrogéologie*, n°3, 1987, pp 161-168.
- BENISCHKE R., SCHMERLAIB H. (1986): Pyranin: a fluorescent dye for tracer hydrology. Review of physico-chemical properties, the toxicity and applicability - Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing. Athens 1986, Ed. Morfis & Paraskevopoulou, pp 135-148.
- BIRON J.P. (1982): Utilisation des réserves karstiques pour la distribution d'eau - in "La protection des eaux karstiques. S.N.D.E. - C.N.P.S.S.", pp 49-55.
- BIRON J.P. (1985): Indices karstiques rencontrés en forage de production d'eau - *Ann. de la Soc. Géol. de Belgique*, Comptes Rendus du Colloque International de Karstologie Appliquée, Liège, 1984, T 108, pp 105-111.
- BIVER P. (1993): Etude numérique et phénoménologique de la propagation de polluants miscibles dans un milieu à double porosité. Application au transport des nitrates dans l'aquifère crayeux du Crétacé de Hesbaye (thèse à paraître).
- BIVER P., MEUS Ph. (1992): The use of tracer tests to identify and quantify the transport processes in an heterogeneous aquifer - *Tracer Hydrology*, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzel & Werner Ed., pp 415-421.
- BÖGLI A. (1980): *Karst hydrology and physical speleology* - Springer Verlag, 284 p.



- BRICELJ M., HÖTZL H., KÄSS W., MAURIN V., PROBST G., REICHERT B., REISS F., ZUPAN M. (1986): Tracing with spores - Karst hydrogeology of the Central and Eastern Peloponnesus. *Steirische beiträge zur hydrogeologie*, Band 37-38. Jahrgang 85-86, pp 252-256.
- BURGER A., RECORDON E., BOVET D., COTTON L., SAUGY B. (1985): *Thermique des nappes souterraines* - Presses Polytechniques Romandes, 241p.
- C.C.E. (1982): *Ressources en eaux souterraines de la Communauté européenne. Bilan des ressources en eau souterraine de la Belgique (coordination F.Derycke)* - Verlag Th Schäfer, Hannover, 260p.
- CHARRIERE R. (1974): *Perfectionnements à la mesure des traceurs fluorescents. Applications à l'hydrogéologie* - Thèse. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 197p.
- COLLIGNON B. (1988): *Spéléologie, approches scientifiques* - Edisud, 236p.
- COUTURAUD A., PUIG J.M. (1992): *Traçages en bordure du système karstique de Vaucluse* - *Karstologia*, n°20, 2ème sem. 1992, pp 23-36.
- DASSARGUES A. (1992): *Paramétrisation et simulation des réservoirs souterrains. Discrétisation du domaine, préparation statistique des données, couplages et non linéarités des paramètres* - Thèse, Université de Liège, 313p.
- DAVIS J.C. (1973): *Statistics and data analysis in Geology* - Wiley I. Edition., 550p.
- DAVIS S.N., THOMPSON G.M., BENTLEY H.W., STILES G. (1980): *Ground-water tracers: a short review* - *Ground Water*, vol.18, n°1, pp 14-23.
- DECHANT M., HACKER P. (1986): *Neue Entwicklungen in der Methode des Sporennachweises* - *Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing*. Athens 1986, Ed. Morfis & Paraskevopoulou, pp 149-155.
- DELMER A. (1979): *Hydrodynamique de la nappe aquifère du calcaire carbonifère en Hainaut* - *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, T.102, 1979, pp 259-264.
- DELMER A. (1982): *Les karsts profonds connus en Belgique - La protection des eaux karstiques*. S.N.D.E. - C.N.P.S.S., pp 56-57.
- DELMER A., LECLERCQ V., RORIVE A. (1990): *Mise en évidence d'un milieu à " double porosité " par un essai de pompage (à paraître)*.
- DELPY A. (1985): *Prospection et localisation de cavités. Deux types d'application de méthodes géophysiques*. - *Spelunca*, n°17 janv-mars, 1985, pp 39-42.
- DE CARVALHO DILL A., GERLINGER K., HAHN T., HÖTZL H., KÄSS W., LEIBUNDGUT Ch., MALOSZEWSKI P., MÜLLER I., OETZEL S., RANK D., TEUTSCH G., WERNER A. (1992): *Porous aquifer - Test Site Merdingen (Germany)* - *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie. 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Transport Phenomena in Different Aquifers*, ATH ed., 43, Jahrgang 1992, pp 251-279.
- DERYCKE F. (1982): *Evolution hydrogéologique du karst carbonifère du Tournaisis - La protection des eaux karstiques*. S.N.D.E. - C.N.P.S.S., pp 58.
- DETOURNAY E. (1977): *Prospection électromagnétique en VLF. Le GEONICS EM16* - *Ann. des Mines de Belgique*, 12ème livraison, déc.1977, pp 1119-1138.

DE MARSILY G. (1986): Quantitative hydrogeology. Groundwater, Hydrology for Engineers - Academic Press, 440p.

DE SAMBUCY M., LONGERE M., FOSSEY M. (1973): Essai d'une nouvelle méthode géophysique. Procédé MELOS - Bull. liaison Labo. Ponts et Chaussées, 66, juil-août 1973, inf 1284, pp 31-35.

DIMITROULAS Ch., DOUNAS A., LEONTIADIS I., MORFIS A., PARASKEVOPOULOU P., ZOURIDAKIS N. (1986): Tracing with chromide-51 - Karst hydrogeology of the Central and Eastern Peloponnesus. Steirische beiträge zur hydrogeologie, Band 37-38. Jahrgang 85-86, pp 271-276.

DI CLEMENTE C., LAURENT S. (1986) : Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin du Néblon - Mémoire, Université de Liège, 285p, inédit.

DODGE E.D. (1983): Hydrogéologie des aquifères karstiques du Causse Comtal (Aveyron, France) - Thèse, Université Libre de Bruxelles, 589p.

DREW D.P. (1992): Water resource management and water tracing in a lowland karst aquifer - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 221-225.

DROGUE C. (1972): Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques - J. Hydrology, n°15, pp 49-68.

EIKENBERG J., FRICK U., FIERZ T., BÜHLER C. (1992): On-line detection of stable helium isotopes in migration experiments - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 77-84.

EK C. (1969): Facteurs, processus et morphologies karstiques dans les calcaires paléozoïques de la Belgique - Thèse de doctorat. Université de Liège.

EK C., ROQUES H. (1972): Dissolution expérimentale de calcaires dans une solution de gaz carbonique. Note préliminaire - Transactions of the Cave Research Group of Great Britain, n°14, pp 67-82.

EK C. (1984): Les formations karstifiables - Le karst Belge. Karstphänomene in Nordrhein-Westfalen. Kölner geographische arbeiten, Heft 45, Geographisches Institut der Universität zu Köln im Selbstverlag, pp 13-20.

FISCHER G., LE QUANG B.V., MÜLLER I. (1983): VLF ground surveys, a powerfull tool for the study of two dimensional structures - Geophysical prospecting, n°31, pp 977-991.

FLEYFEL M., BAKALOWICZ M. (1980): Etude géochimique et isotopique du carbone minéral dans un aquifère karstique - Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates., Coll Soc Géol Fr, Assoc Géol Sud-Ouest, Soc Fr Minéral Cristall, Bordeaux, pp 231-245.

FOURNEAUX J.C., COUTURIER B., SOMMERIA L. (1989): Analyse d'une opération de traçage dans la région du Pic Saint-Loup (Hérault, France) - Karstologia, 13, pp 50-53.

FOURNEAUX J.C., GRANGE R. (1980): Application des méthodes de jaugeages chimiques aux écoulements karstiques: le karst de Suran - Actes du 1er Colloque National sur la Protection des Eaux Souterraines Karstiques, Besançon 1980, pp 171-188.

FOURNEAUX J.C., SOMMERIA L. (1986): Utilisation de la méthode des traçages pour l'étude des aquifères fissurés en milieu calcaire - Karstologia, n°7, pp 21-24.

- FRASER D.C. (1969): Contouring of VLF-EM data - *Geophysics*, vol.34, n°6, pp 958-967.
- FRICK U., BAERTSCHI P., HOEHN E. (1988): Etudes de migration - *Cédra informe*, n°1-2, juin 1988, 10e année, pp 23-34.
- FROST L.H., SCHEIER N.W., KOZAK E.T., DAVISON C.C. (1992): Solute transport properties of a major fracture zone in granite - *Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing*, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 313-320.
- GARCET N. (1992): Détermination des propriétés de transport de la craie fissurée de Hesbaye (expérimentation in situ et interprétation analytique) - Travail de fin d'études, Université de Liège, 130p, inédit.
- GIBERT J. (1986): Ecologie d'un système karstique jurassien. Hydrogéologie, dérive animale, transits de matières, dynamique de la population de *Niphargus* (Crustacé Amphipode) - Thèse, Université de Lyon, 327p.
- GUYOT J.L. (1985): Le karst superficiel: étude des écoulements hypodermiques sur un site expérimental, Corconne (Gard) - *Karstologia*, 6,1985, pp 15-20.
- HANICH L. (1991): Les traçages d'essai en aquifère hétérogène: méthodes, intérêt et limites - Thèse, Université des Sciences et Techniques de Lille - Flandre - Artois, 155p.
- HARUM T., FANK J. (1992): Hydrograph separation by means of natural tracers - *Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing*, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 143-146.
- HIMMELSBACH T., HÖTZL H., KÄSS W., LEIBUNDGUT Ch., MALOSZEWSKI P., MEYER T., MOSER H., RAJNER V., RANK D., STICHLER W., TRIMBORN P., VEULLIET E. (1992): Fractured rock - Test Site Lindau / Southern Black Forest (Germany) - *Steirische Beiträge zur Hydrogeologie. 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Transport Phenomena in Different Aquifers*, ATH ed., 43, Jahrgang 1992, pp 159-228.
- HISSEL J. (1982): Micro-informatique et équilibres chimiques dans les eaux - Ed. CEBEDOC, 141p.
- HOEHN E., EIKENBERG J. (1992): Injection-extraction migration experiments in a single fracture with uranine and the reactive radionuclides  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$  and  $^{85}\text{Sr}$  - *Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing*, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 321-327.
- HOFMANN B., GRUSS A., TEUTSCH G. (1992): Multiple distance radially convergent tracer experiments for the analysis of mass-transport in heterogeneous formations - *Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing*, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 189-192.
- JAMIER D. (1976): Interprétation des essais de traçage des eaux karstiques - *Ann. Sc. Université de Besançon, 2ème Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Géologie, fasc.25, 3ème série*, pp 229-240.
- JEANNIN P.Y. (1992): Géométrie des réseaux de drainage karstique : approche structurale, statistique et fractale - *Ann. Sc. Université de Besançon, 5ème Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Géologie, mémoire hors série n°11, 1992*, pp 1-8.
- JENNINGS J.N. (1987): *Karst geomorphology* - Blackwell, 293p.

KAROUS M., HJELT S.E. (1983): Linear filtering of VLF dip-angle measurements - Geophysical Prospecting, vol. 31, pp 782-794.

KÄSS W. (1986): Markierung von Porengrundwasser - Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing. Athens 1986, Ed. Morfis & Paraskevopoulou, pp 191-202.

KÄSS W. (1990): Entwicklung der karsthydrologischen Forschung in Deutschland -unter besonderer Berücksichtigung der Markierungstechnik - Karst und Höhle, 1989/90, pp 131-149.

KÄSS W. (1992): Hydrogeologische Markierungstechniken bei der Altlastensanierung - Die geowissenschaften, 10 Jahrg. 1992, n°7, pp 199-205.

KÄSS W. (1992): Hydrologische Markierungstechnik - Lehrbuch der Hydrogeologie 9, Berlin-Stuttgart (Gebr.Borntraeger Verlag).

KÄSS W., HÖTZL H. (1988): Fluorescent spores for karstwater tracing. Fluorescent microspheres as a further drifting tracer - Poster presentation, IAH 21st Congress, Guilin-China, 1988, pp 1-6.

KÄSS W., MORFIS A., PARASKEVOPOULOU P., STYLIANOU A. (1986): Tracing with salts - Karst hydrogeology of the Central and Eastern Peloponnesus. Steirische Beiträge zur hydrogeologie, Band 37-38. Jahrgang 85-86, pp 248-251.

KÄSS W., REICHERT B. (1986): Tracing of karst water with fluorescent spores - Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing. Athens 1986, Ed. Morfis & Paraskevopoulou, pp 157-165.

KEPPLER A., DROST W. (1992): Migration experiments at the Grimsel Test Site. Comparison of concentration histories by using method of moments - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 353-356.

KIRALY L. (1973): Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel - Bull. de la Soc. neuchâteloise des Sc. Naturelles, supplément au t.96, 15p.

KIRALY L. (1978): La notion d'unité hydrogéologique: essai de définition - Thèse, Université de Neuchâtel, 216 p.

KOLL J., MÜLLER I. (1989): Elektromagnetische Very low frequency - Resistivity (VLF-R) Prospektion zur Erkundung von Grundwasserleitern im paläozoischen Mittelgebirge am Beispiel des Oberharzes - Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, Band 40, pp 103-122.

KRUSEMAN G.P., DE RIDDER N.A. (1974): Interprétation et discussion des pompages d'essai - Internat. Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, Bull 11f, 213p.

LAIDLAW I.M.S., SMART P.L. (1982): An evaluation of some orange fluorescent dyes - Beitrage zur Geologie der Schweiz, Hydrologie, Bd 28 I, pp 113-117.

LALLEMAND A., PALOC H. (1964): Possibilités offertes par la méthode de détection au charbon actif pour les expériences de coloration à la fluorescéine - Spelunca Mémoires, 4,1964, pp 27-40.

LALLEMAND-BARRES A., ROUX J.C. (1988): Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine - Manuels et Méthodes, 19, Editions du BRGM, 218p.

LAURENT E. (1979): Détermination des coefficients intrinsèques de dispersion d'un aquifère - La technique de l'eau et de l'assainissement, 388, pp 29-35.

LAURENT E. (1979): Evolution qualitative de la nappe du calcaire carbonifère du Tournaisis suite à l'infiltration d'eau de l'Escaut à Pont-à-Chin (Kain). Deuxième partie: interprétation hydrogéologique de l'infiltration - La technique de l'eau et de l'assainissement, n°390-391, juin-juil 1979, pp 21-30.

LAURENT E. (1979): Evolution qualitative de la nappe du calcaire carbonifère du Tournaisis suite à l'infiltration d'eau de l'Escaut à Pont-à-Chin (Kain). Première partie: les observations et les types de pollution. - La technique de l'eau et de l'assainissement, n°389, mai 1979, pp 9-16.

LAURENT E. (1982): Détermination du coefficient intrinsèque de dispersion radiale du Crétacé de la Haine à Havré. Fiabilité du modèle radial de dispersion basé sur ce coefficient. - La technique de l'eau et de l'assainissement, n°432, déc.82, pp 9-16.

LAURENT E. (1985): La karstologie appliquée à la protection des ressources en eau - Ann. de la Soc. Géol. de Belgique. Comptes rendus du Colloque International de Karstologie Appliquée. Liège 1984, T 108, pp 9-12.

LAURENT E., GHYSEL P. (1981): Zones de protection du captage du Triffoy. Commune de Huy - La technique de l'eau et de l'assainissement, n°409, jan 1981, pp 21-35.

LAURENT R., GIBERT J. (1981): Les traçages - Spelunca, n°3, juillet-septembre 1981, pp 21.

LEAP D., MAI P. (1986): Variation of dispersivity with groundwater velocity in fissured aquifers determined by two-well recirculating tracer tests - Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing. Athens 1986, Ed. Morfis & Paraskevopoulou, pp 203-213.

LEIBUNDGUT Ch. (1986): Characteristics of flow path conditions by evaluating artificial tracer techniques - Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing. Athens 1986, Ed. Morfis & Paraskevopoulou, pp 311-319.

LEIBUNDGUT Ch., DE CARVALHO DILL A., MALOSZEWSKI P., MÜLLER I., SCHNEIDER J. (1992): Investigation of solute transport in the porous aquifer of the test site Wilerwald (Switzerland) - Steirische Beiträge zur Hydrogeologie. 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Transport Phenomena in Different Aquifers, ATH ed., 43, Jahrgang 1992, pp 229-250.

LEIBUNDGUT Ch., WERNLI H.R. (1986): Naphtionate - another fluorescent dye - Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing. Athens 1986, Ed. Morfis & Paraskevopoulou, pp 167-177.

LEMORDANT Y. (1976): Etude de circulations karstiques par l'utilisation des traceurs. Un exemple de diffluence karstique: le Plateau de Mont Revard (Savoie) - Ann. Sc. Université de Besançon, 2ème Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Géologie, fasc.25, 3ème série, 1976, pp 241-250.

LEPILLER M. (1976): Résultats et interprétation de cinq opérations de traçages effectuées sur les systèmes karstiques du Semnoz et de la Montagne de Bange - Bois de Prépoulain (Massif subalpin des Bauges, Savoie et Haute-Savoie, France) - Ann. Sc. Université de Besançon, 2ème Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Géologie, fasc.25, 3ème série, 1976, pp 251-262.

LEPILLER M., MONDAIN P.H. (1986): Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. Mise en oeuvre et interprétation. - Hydrogéologie, n°1, 1986, pp 33-52.

- LIEVENS R. (1977): Mise en oeuvre du procédé de sondage électromagnétique par onde de surface MELOS - Travail de fin d'études, Université de Liège, 147p, inédit.
- LOUIS C. (1968): Etude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leurs influences sur la stabilité des massifs rocheux. - Thèse, Université de Karlsruhe, 131p.
- LOUIS C. (1974): Introduction à l'hydraulique des roches - Bulletin du B.R.G.M. (2ème série), section III, n°4, pp 283-356.
- LOX A. (1985): Etude hydrologique du synclinal de Durnal - Mémoire, Université de Liège, 125p, inédit.
- MALOSZEWSKI P. (1992): Mathematical modelling of tracer transport in different aquifers: results from ATH test fields - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 25-30.
- MALOSZEWSKI P., ZUBER A. (1985): On the theory of tracer experiments in fissured rocks with a porous matrix - Journal of Hydrology, 79 (1985), pp 333-358.
- MALOSZEWSKI P., ZUBER A. (1990): Mathematical modeling of tracer behavior in short-term experiments in fissured rocks - Water Resources Research, vol.26, n°7, pp 1517-1528.
- MANGIN A. (1975): Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques - Université de Dijon. Laboratoire du C.N.R.S. Moulis. Thèse publiée dans les Ann. de Spéléologie: 1974, n°29 (3), pp 283-332; 1974, n°29 (4), pp 495-601; 1975, n°30 (1), pp 21-124.
- MANGIN A. (1976): Les systèmes karstiques et leur méthodologie d'investigation - Ann. Sci. Univ. Besançon. 2ème Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire, Géologie, fasc.25, 3ème série, pp 263-273.
- MANGIN A. (1982): L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques - Reunion monografica sobre el karst, Larra, pp 141-157.
- MANGIN A. (1984): Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales - Journal of Hydrology, n°67, pp 25-43.
- MANGIN A. (1988): Réflexion sur les mécanismes de l'infiltration dans les karsts à partir de l'exemple de Niaux - Bull. Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, n°8, pp 3-25.
- MANGIN A., BAKALOWICZ M. (1989): Orientation de la recherche scientifique sur le milieu karstique. Influences et aspects perceptibles en matière de protection. - Spelunca, n°35, juil-sept, pp 71-79.
- MATHEY B. (1971): La méthode au charbon actif dans les essais de coloration à la fluorescéine - Actes du 4ème Congrès Suisse de Spéléologie, Neuchâtel, 1970, pp 53-61.
- MATHEY B. (1976): Hydrogéologie des bassins de la Serrière et du Seyon (Neuchâtel, Suisse) - Thèse, Université de Neuchâtel, 323p.
- MAURIN Y. (1988): A propos d'un cas de diffuence et de capture hydrologique souterraine: le Can de l'Hospitalet en Lozère - Hydrogéologie, 4, 1988, pp 255-261.
- MEUS Ph., KÄSS W. (1992): Tracer tests in small karst systems of the Carboniferous limestones in Belgium - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 271-275.

- MIJATOVIC B.F. (1992): Water tracing techniques and transport models in karst aquifers - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 277-281.
- MISEREZ J.J. (1973): Géochimie des eaux du karst jurassien - Thèse. Université de Neuchâtel, 313p.
- MISEREZ J.J. (1975): Variations chimiques de sources karstiques et bilan de l'altération. Exemple de l'Areuse et de la Noiraigue, Jura neuchâtelois - Ann. de Spéléologie, Tome 30, fasc. 2, pp 241-254.
- MOENCH A.F. (1989): Convergent radial dispersion: a Laplace transform solution for aquifer tracer testing - Water Resources Research, vol.25, n°3, pp 439-447.
- MOESCHLER P. (1982): Traçage des eaux souterraines dans le karst neuchâtelois à l'aide d'éléments aquatiques d'origine épigée - Bull. du Centre d'Hydrogéologie, 4, pp 41-57.
- MOLINARI J. (1976): Perspectives offertes par l'utilisation rationnelle des traceurs naturels et artificiels en hydrologie karstique. Commentaires de nombreux exemples récents de multitraçages. - Ann. Sc. Université de Besançon, 2ème Colloque Hydrologie en Pays Calcaire, fasc.25, 3ème série, 1976, pp 275-306.
- MONJOIE A. (1984): Les réserves aquifères dans les régions karstiques - Le karst Belge. Karstphänomene in Nordrhein-Westfalen, Kölner geographische arbeiten, Heft 45, Geographisches Institut der Universität zu Köln im Selbstverlag, pp 143-149.
- MORFIS A., ZOJER H. (1986): Karst Hydrogeology of the Central and Eastern Peloponnesus (Greece). 5th International Symposium on Underground Water Tracing, Athens 1986 - Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, Jahrgang 85/86, Ed. A.Morfis and H.Zojer, Springer Verlag, Wien-New York, 301p.
- MÜLLER I. (1976): L'importance d'un dispositif in situ et en continu pour l'observation des paramètres physiques et chimiques dans les sources karstiques - Ann. Sc. Université de Besançon. 2ème Colloque Hydrologie en Pays Calcaire, Géologie, fasc.25, 3ème série, 1976, pp 317-320.
- MÜLLER I. (1977): Jaugeage chimique des cours d'eau à l'aide d'électrode ionique spécifique - Wasser, Energie, Luft - Eau, Energie, Air, n°1/2, 1977, pp 4-6.
- MÜLLER I. (1982): Multitraçage des eaux souterraines karstiques dans le bassin de la source de l'Areuse (Jura Neuchâtelois, Suisse) - Bull. Centre d'Hydrogéologie, 4, pp 7-37.
- MÜLLER I. (1982): Résultats préliminaires des sondages géophysiques pluridirectionnels (résistivité, polarisation induite, microsismique) dans la région de la Baume (Jura neuchâtelois, Suisse) - Bull Soc neuchâteloise des Sc nat, 105, pp 191-204.
- MÜLLER I. (1988): Anisotropic properties of rocks detected with electro-magnetic VLF (very low frequency) measurements - International Symposium on Field measurements in Geomechanics, Zurich, Sept. 5-8, 1988, pp 273-282.
- MÜLLER I., BURGER A., SCHOTTERER U., SIEGENTHALER U. (1983): Résultats des méthodes d'investigations indirectes dans l'exploration des aquifères calcaires - Gaz - Eaux - Eaux usées, 63ème année, 1983, n°9, pp 501-515.

MÜLLER I., GIBERT J., LAURENT R. (1984): Application des méthodes géophysiques, électromagnétique VLF et micro-sismique à l'étude du karst de Dorvan Cleysieu (Jura méridional, France) - Bull. Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, n°5, pp 145-159.

MÜLLER I., SCHOTTERER U., SIEGENTHALER U. (1982): Etude des caractéristiques structurales et hydrodynamiques des aquifères karstiques par leurs réponses naturelles et provoquées - *Eclogae Geol.*, vol.75/1, pp 65-75.

NAHOLD M., HÖTZL H. (1992): The use of water tracers in order to improve remediation techniques - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 119-123.

NICOUD G., LAMI M. (1982): Etude de la propagation de pollutions provoquées dans un milieu karstique. Cas du système de La Feclaz-Doria (Alpes de Haute-Savoie, France) - Ann. Sc. Uni. Besançon, 3ème Colloque d'Hydro. en Pays Calcaire, Géologie, Mémoire n°1, pp 123-131.

NYS L., LINSMAN M. (1932): Hydrologie du massif d'Xhoris - Ann. Soc. Géol. de Belgique, n°55, pp 69-71.

OFPE (1977): Instructions pratiques pour la détermination des secteurs de protection des eaux, des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines - Révision partielle en 1982, 90p.

PALOC H., BACK W. (1992): Hydrogeology of selected karst regions - Paloc & Back ed., Heise, 494p.

PARRIAUX A., DUBOIS J.D., MANDIA Y. (1990): Persistance des traceurs fluorescents dans les nappes d'eaux souterraines - *Hydrogéologie*, n°3, 1990, pp 183-194.

PARRIAUX A., LISZKAY M., MÜLLER I., DELLA VALLE G. (1988): Guide pratique pour l'usage des traceurs artificiels en hydrogéologie - Société Géologique Suisse, Groupe des Hydrogéologues, 49p.

PLOTE H. (1985): Sondage de reconnaissance hydrogéologique: méthode au marteau fond-de-trou, exécution et surveillance - B.R.G.M. Manuels et Méthodes n°12, 150p.

POREL G. (1988): Transfert de soluté en aquifère crayeux. Causes de modifications des résultats de traçages. - Thèse. Université des Sciences et Techniques de Lille-Flandre-Artois, 327p.

PTAK T., TEUTSCH G. (1992): Macrodispersivity in highly heterogeneous porous aquifers - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 149-155.

PULIDO-BOSCH A., PADILLA-BENITEZ A. (1988): Deux exemples de modélisation d'aquifères espagnols - *Hydrogéologie*, n°4, 1988, pp 281-290.

RAVEN K.G., NOVAKOWSKI K.S., LAPCEVIC P.A. (1988): Interpretation of field tracer tests of a single fracture using a transient solute storage model - *Water Resources Research*, vol.24, n°12, pp 2019-2032.

REICHERT B., HÖTZL H. (1992): Transport processes by bank filtration in heterogeneous porous media - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 157-163.

REPSOLD H. (1989): Well logging in groundwater development - Int. Contributions to Hydrogeology, éd. Castany, Groba, Romijn, 136p.



- RIEG A., LEIBUNDGUT Ch. (1992): Gauging of high variable discharge using tracer dilution method - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 287-289.
- ROCHAT J., ALARY J., FOURNEAUX J.C. (1981): Comportement des traceurs fluorescents xanthéniques. Influence des principaux composants du sol sur la rétention du traceur - Spelunca, n°3, juillet-septembre 1981, pp 22-25.
- ROCHAT J., ALARY J., MOLINARI J., CHARRIERE R. (1975): Séparations physico-chimiques de colorants xanthéniques utilisés comme traceurs en hydrologie - Journal of Hydrology, 26, 1975, pp 277-293.
- RODET J. (1985): Le développement du karst dans la craie de Normandie et ses conséquences sur la protection des eaux souterraines (Normandie, France) - Ann. de la Soc. Géol. de Belgique, Comptes Rendus du Colloque International de Karstologie Appliquée, Liège, 1984, T 108, pp 33-41.
- RODET J. (1991): La craie, roche carbonatée poreuse et son karst - Karstologia, n°18, pp 13-18.
- ROLAND C., MARION J.M. (1987): Phénomènes karstiques et cônes de limon formés aux résurgences de La Reid - Bull. Soc. Géogr. de Liège, n°22-23, pp 149-159.
- ROQUES H. (1990): Fondements théoriques du traitement chimique des eaux - Ed. Lavoisier, 2 vol.
- ROSSI P. (1992): Use of new bacteriophages as groundwater tracers: decay rate and adsorption - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 65-70.
- ROSSIER Y., KIRALY L., TRIPET J.P., ZWAHLEN F. (1992): Interprétation quantitative des essais de traçage dans les aquifères karstiques. Utilisation pour la protection des eaux - 5ème Colloque Hydrologie en Pays Calcaire; Ann. Sc. Uni. Besançon, Géologie, Mémoire hors série n°11, pp 65-76.
- SABATINI D.A., AUSTIN T.A.I. (1991): Characteristics of rhodamine WT and fluorescein as adsorbing ground-water tracers - Ground Water, vol.29, n°3, pp 341-349.
- SANCHEZ-VILLA X., CARRERA J., COLOMINAS I. (1992): Directional effects on convergent flow tracer tests - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 407-414.
- SAUTER M. (1992): Nonpoint-source transport in a karst hydrological system - 5ème Colloque Hydrologie en Pays Calcaire; Ann. Sc. Uni. Besançon, Géologie, Mémoire hors série n°11, pp 169-177.
- SAUTY J.P. (1977): Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage - Thèse. Université Scientifique et Médicale et Institut National Polytechnique de Grenoble, 157p.
- SAUTY J.P., KINZELBACH W. (1988): On the identification of the parameters of groundwater mass transport - Groundwater Flow and Quality Modelling, E.Custodio et al. (eds), pp 33-56.
- SMART P.L., LAIDLAW I.M.S. (1977): An evaluation of some orange fluorescent dyes for water tracing - Water Resources Research, vol.13, n°1, pp 15-33.

SOMMERIA L. (1986): Comportement des traceurs fluorescents et phénomènes de dispersion. Application à l'étude d'aquifères fissurés. - Thèse. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 178p.

STEVANOVIC Z.P., DRAGISIC V.S. (1992): The direction of circulation of karst groundwaters in the Carpatho-Balkanides, Serbia - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 291-294.

TENHAEFF G., KÄSS W. (1987): Karsthydrologische Untersuchungen im Bereich der Bauschlotter Platte (Nordbaden) - Jh.geol. Landesamt Baden-Württemberg, 29, pp 209-254.

THIERRIN J. (1988): Essai de coloration aux confins des bassins des sources de l'Areuse, du Pont de la Roche, de la Noiraigue et de l'Arvoux (Jura Neuchâtelois) - Cavernes (Neuchâtel), n°1, 1988, pp 5-8.

THIERRIN J. (1990): Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg - Thèse. Université de Neuchâtel, 306p.

THIERY D., VANDENBEUSCH M., VAUBOURG P. (1983): Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère - Documents du BRGM, n°57, 53p.

TOTH J. (1962): A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada - Journal of Geophysical Research, vol 67, n°11, pp 4375-4387.

TOUSSAINT G. (1974): Contribution à l'étude hydrogéologique et sédimentologique des calcaires viséens moyens de la région d'Eupen-Moresnet - Mémoire, Université de Liège, 82p, inédit.

UYTTENDAELE M., NAA P. (1983): La prospection VLF et le traitement des données - Ann. des Mines de Belgique, 3-4/1983, pp 135-140.

VALENTINI O. (1992): Essais de pompage et de traçage dans la craie fissurée (région de Hannut, Belgique) - travail de diplôme de cycle postgrade inter-universitaire en hydrologie et hydrogéologie, Universités de Liège et Neuchâtel, 71p, inédit.

VAN DEN BROECK E., MARTEL E.A., RAHIR E. (1910): Les cavernes et les rivières souterraines de la Belgique - Bruxelles, 2 tomes, 1586p.

VEULLIET E.J., HÖTZL H. (1992): Simulation of pollutant migration by in-situ step input tracer tests in a jointed aquifer - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 369-373.

VILLERMAUX J., VAN SWAAIJ W.P.M. (1969): Modèle représentatif de la distribution des temps de séjour dans un réacteur semi-infini à dispersion axiale avec zones stagnantes. Application à l'écoulement ruisselant dans des colonnes d'anneaux Raschig - Chem. Eng. Sc., vol 24, pp 1097-1111.

WITWEN R., WASER H., MATHEY B. (1971): Essai de fixation de la sulforhodamine B et de la sulforhodamine G extra sur charbon actif - Actes du 4ème Congrès Suisse de Spéléologie, Neuchâtel, sept. 1970, pp 78-83.

WRIGHT J. L. (1988): VLF interpretation manual - EDA instruments inc., 85p.

XHAARD P. (1992): Abîme-grotte de Comblain-au-Pont - Regards, n°10, pp 8-12.

ZAHN M.T., BEHRENS (1992): Quantitative investigations on the transport of fluorescein in fluvio-glacial gravels - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 135-138.

ZUPAN M. (1992): The pollution transport in karst waters - Tracer Hydrology, Proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe, Hötzl & Werner Ed., pp 299-301.

## RAPPORTS INEDITS

CILE (1985): Etude du Crétacé de Hesbaye.

CILE, LGIH, INIEX (1986): Etude hydrogéologique du bassin versant du Néblon.

CILE, LGIH, INIEX (1989): Etude de l'influence des sources de pollution sur l'exploitabilité du potentiel aquifère du synclinal de Comblain-au-Pont.

INIEX (1987): Etude de l'implantation d'un captage d'eaux alimentaires sur la Commune d'Anthisnes.

INIEX (1987): Etude du périmètre de protection de la zone de Spontin.

LGIH - ANTH/891 (1989): Etude hydrogéologique de la carrière d'Anthisnes. Levé de fracturation.

LGIH - CEB/801 (1980): Réinjection dans le sol des effluents d'une station d'épuration, région de Hannut - phase 1.

LGIH - CEB/811 (1981): Réinjection dans le sol des effluents d'une station d'épuration, région de Hannut - phase 2.

LGIH - DW/911 (1991): Approfondissement de la carrière de calcaire Dumont-Wautier à St-Georges sur Meuse. Etude hydrogéologique. Phase préliminaire.

LGIH - DW/912 (1991): Approfondissement de la carrière de calcaire Dumont-Wautier à St-Georges sur Meuse. Etude hydrogéologique. Essais de pompage D1 réalisés dans la dolomie.

LGIH - DW/916 (1991): Approfondissement de la carrière de calcaire Dumont-Wautier à St-Georges sur Meuse. Etude hydrogéologique. Essais de pompage dans le puits C1 réalisé dans les calcaires.

LGIH - SOLV/88 (1988): Etude hydrogéologique de la nappe aquifère des calcaires au Sud de Couillet.

LGIH - SPA/812 (1981): Spontin. Etude hydrogéologique des sources Duchesse et Presbytère.

LGIH - SPA/814 (1981): Spontin. Potentialités aquifères de la région de Spontin.

LGIH - SPO/871 (1987): Spontin. Reconnaissance des sources Duchesse et Presbytère comme "eau minérale".

LGIH - SPO/911 (1991): Traçages à Spontin pour la délimitation des zones d'alimentation des sources Duchesse et Presbytère.

LGIH - SPO/912 (1991): Zones d'alimentation des sources Duchesse et Presbytère. Etude de la fracturation.

LGIH - SPO/921 (1992): Multitraçage à Spontin pour la détermination des zones d'alimentation des sources captées par la S.A. SPONTIN.

LGIH - SWDE/911 (1991): Fairoule (Walcourt). Traçages pour la détermination des zones d'alimentation de galeries captantes.

LGIH - SWDE/922 (1992): Traçages pour la détermination des zones d'alimentation du captage de la carrière Dupuis à Mont-sur-Marchienne.

LGIH - UNG/901 (1990): Etude hydrogéologique de la carrière d'Anthisnes. Forage 1.

SWDE (1990): Walcourt. Forage de six piézomètres. Etude du site de la galerie GI.

<b>ANNEXE A</b>
-----------------

## PRINCIPES DES METHODES GEOPHYSIQUES

### A.1. METHODE GEOELECTRIQUE-RESISTIVITE

#### A.1.1. Principe de la mesure

La méthode tire parti de la mesure de résistivité électrique des roches. Elle est surtout sensible à la présence d'eau et d'argile qui peuvent remplir les fractures karstifiées ou à la présence des vides s'il s'agit de fractures ouvertes dans la zone non saturée. Les différentes méthodes utilisées dans le cadre de cette étude sont toutes basées sur un dispositif quadripolaire : deux électrodes A et B servent à l'injection dans le sol d'un courant alternatif à basse fréquence d'intensité I, et deux autres électrodes, appelées électrodes de potentiel M et N, servent à mesurer la différence de potentiel résultant  $\delta V$  entre deux autres points du terrain.

La relation générale :

$$\rho_a = K \frac{\delta V}{I}$$

où K est un facteur géométrique variant suivant la disposition des électrodes,

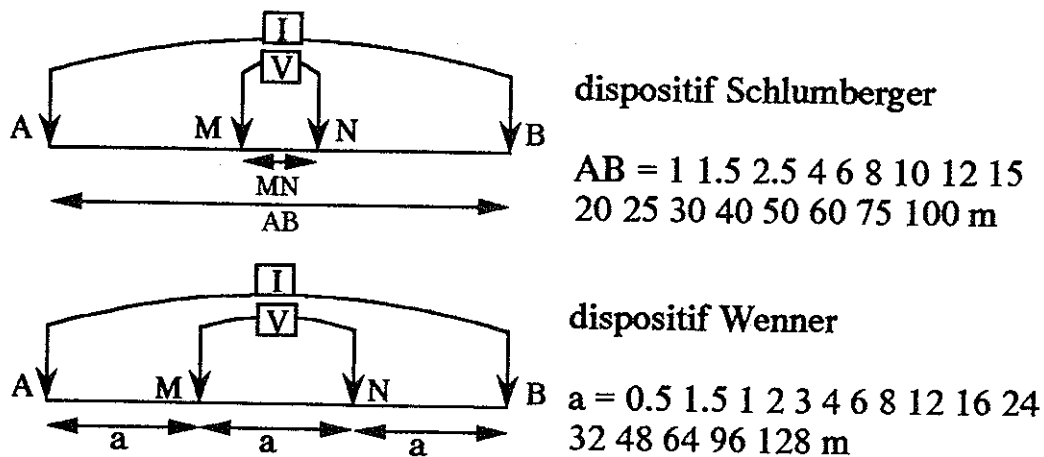
donne la valeur de résistivité apparente du terrain entre M et N. C'est la résistivité qu'aurait un terrain homogène avec un dispositif identique d'électrodes. En réalité, le terrain est le plus souvent hétérogène et constitué d'une succession de couches de résistivités différentes, contribuant à la valeur de résistivité apparente. Toute variation de la profondeur, de l'épaisseur, ou de la résistivité des couches, se traduira par une variation de la résistivité apparente.

Les appareils suivants ont servi à mesurer la résistance du terrain : ABEM A.C. TERRAMETER et ABEM TERRAMETER SAS 300, éventuellement renforcé par le BOOSTER ABEM SAS 2000.

#### A.1.2. Sondage électrique

Le sondage électrique consiste à établir une courbe des résistivités apparentes du terrain en fonction de la profondeur. Il s'agit d'une exploration verticale du sous-sol. Le dispositif est composé des quatre électrodes alignées. La profondeur d'investigation croît en augmentant l'espacement des électrodes d'injection de courant A et B.

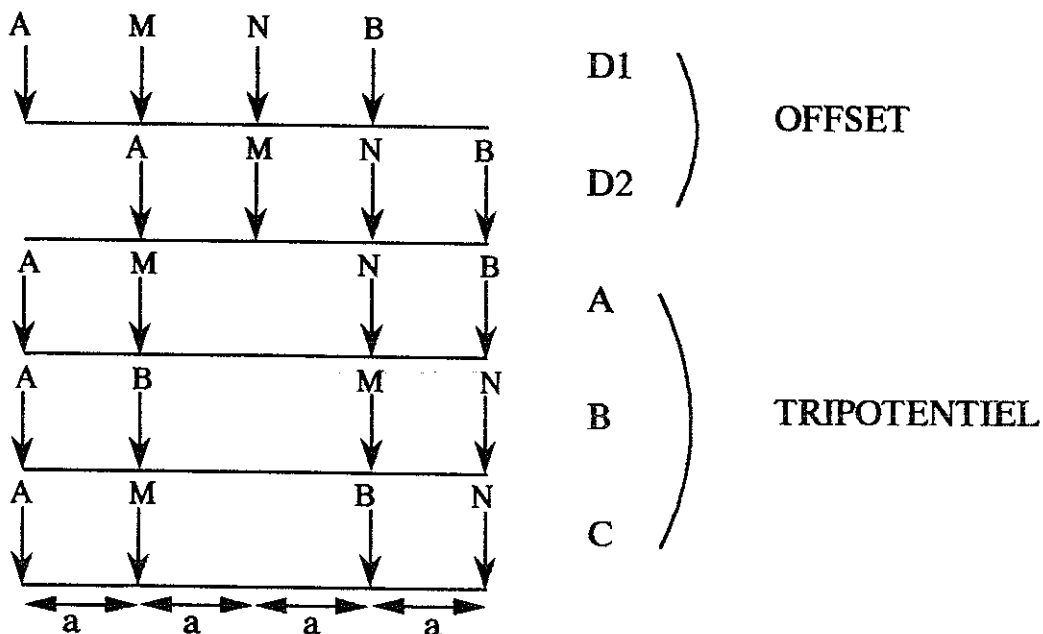
Deux configurations d'électrodes avec des écartements standards ont été employées (fig. A.1): le dispositif Wenner où la distance a est la même entre chaque électrode et le dispositif Schlumberger où MN prend successivement les valeurs de 0.5, 2 et 5 mètres, et reste constant pour plusieurs écartements AB successifs.



**Fig. A.1** : Configurations d'électrodes employées dans la prospection géoélectrique.

L'interprétation des courbes de sondage est faite à l'aide de l'ordinateur par calages successifs de la courbe expérimentale au moyen d'une courbe calculée sur base d'un modèle à plusieurs couches d'épaisseur et de résistivité données.

Dans le cadre de cette étude, les sondages Wenner ont été réalisés à l'aide d'un câble de Barker (BARKER, 1981). Celui-ci permet, grâce au choix judicieux des écartements, le branchement simultané, via un câble à plusieurs brins, de dix électrodes de part et d'autre du centre du dispositif, plusieurs électrodes jouant tour à tour le rôle d'électrode de potentiel ou de courant selon la position d'un commutateur central. Pour un écartement donné, cinq résistances (fig. A.2) sont mesurées grâce à un second réglage du commutateur central.



**Fig. A.2** : Schéma des cinq configurations d'électrodes de la méthode de BARKER (1981).

Les deux premières positions (offset) servent à la mesure d'une résistivité apparente (moyenne entre les deux mesures) moins entachée des erreurs dues aux anomalies conductrices proches de la surface que le dispositif Wenner simple.

Les autres résistances mesurées (tripotentiel) servent au calcul des résistivités apparentes correspondant à des écartements intermédiaires non mesurés (écartements 3a).

La courbe de sondage peut dès lors être tracée à l'aide de 16 points dont 9 sont mesurés ( $a = 0,5 \text{ m}, 1 \text{ m}, 2 \text{ m}, 4 \text{ m}, 8 \text{ m}, 16 \text{ m}, 32 \text{ m}, 64 \text{ m}$  et  $128 \text{ m}$ ) et 7 sont calculés ( $a = 1,5 \text{ m}, 3 \text{ m}, 6 \text{ m}, 12 \text{ m}, 24 \text{ m}, 48 \text{ m}$  et  $96 \text{ m}$ ). La méthode ne demande qu'un seul opérateur, ce qui est son principal avantage. Vu le plus petit nombre de points réels de mesure, le sondage Wenner avec le câble de Barker est moins précis qu'un sondage Schlumberger de longueur équivalente.

La méthode donne de bons résultats quant à la succession relative des terrains mais la précision sur la profondeur des couches et sur leur résistivité peut être très aléatoire. Elle est entachée d'incertitudes dues au "principe d'équivalence" suivant lequel plusieurs configurations géologiques peuvent donner lieu à la même valeur de résistivité apparente et au "principe de suppression" selon lequel certaines couches intermédiaires très conductrices peuvent passer inaperçues.

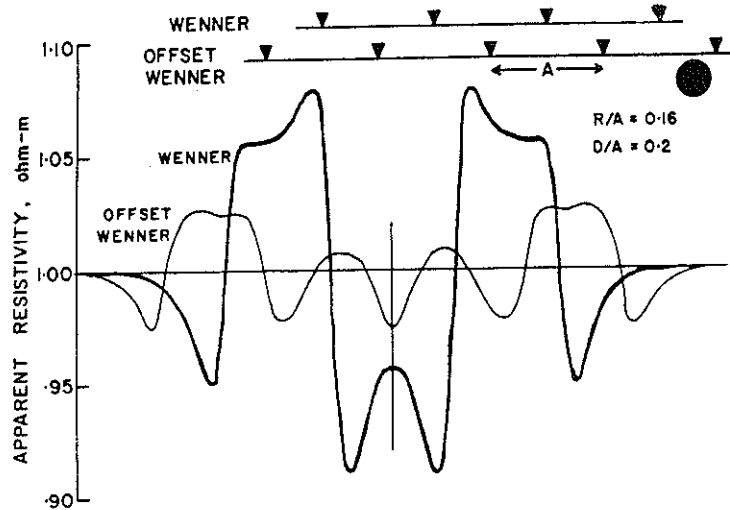
### A.1.3. Trainé électrique

Les deux dispositifs, Wenner et Schlumberger, ont aussi été utilisés pour les trainés électriques, le premier pour des profils longitudinaux et transversaux, le second pour des profils transversaux uniquement.

Avec la méthode Schlumberger, le dispositif linéaire, dont l'écartement des électrodes est fixe, se trouve perpendiculaire à l'axe du profil et il est déplacé parallèlement à lui-même. Les profils sont réalisés avec deux écartements différents, un petit (10 ou 15 m) et un grand (60 ou 100 m), afin de rejeter, lors de l'interprétation, des anomalies trop proches de la surface, ne correspondant pas au type d'accident recherché en profondeur. Le pas de mesure a beaucoup d'importance car il doit être adapté à la largeur des anomalies provoquées par les discontinuités du sous-sol. Dans notre cas, il a toujours été inférieur à 30 mètres. Dans le cas du passage d'une formation à une autre, de résistivité différente, les quatre électrodes franchissent en même temps la limite, ce qui se marque par une variation très nette sur le profil de résistivité apparente.

Avec la méthode Wenner utilisée, le dispositif linéaire est parallèle à l'axe du profil. En pratique, on utilise un câble à trois conducteurs qu'un seul opérateur, en bout de ligne, peut déplacer aisément. Un seul écartement est utilisé (48 m) mais avec, à chaque station, trois mesures correspondant au schéma tripotentiel (ABMN, AMNB et AMBN). Les facteurs géométriques correspondant à ces trois mesures valent respectivement  $6\pi a$ ,  $2\pi a$  et  $3\pi a$ . Comme pour les trainés Schlumberger, la méthode permet une investigation à différentes profondeurs puisque la profondeur d'investigation augmente de ABMN à AMBN.

La méthode est particulièrement indiquée pour repérer les fractures transversales ou obliques en se déplaçant parallèlement aux bancs. La traversée de toute anomalie conductrice se marque très nettement sur les profils par des variations semblables à celles représentées sur la fig. A.3 (d'après BARKER, 1981).



**Fig. A.3** : Profils Wenner et Wenner Offset au-dessus d'une sphère conductrice (d'après BARKER, 1981).

Sur les graphiques, on reporte les trois résistivités apparentes obtenues. Les résistivités correspondant à AMNB et AMBN évoluent dans le même sens. La résistivité ABMN évolue dans le sens inverse. Dans le cas d'un conducteur incliné sur la verticale, l'anomalie devient dissymétrique. Lorsque plusieurs fractures importantes se succèdent à moins de  $3a$  de distance, l'interprétation est rendue plus difficile par la superposition des anomalies sur le profil. Le pas d'avancement et l'écartement des électrodes doivent donc en principe être adaptés à l'épaisseur de la couverture, à l'importance et à la fréquence des fractures. Le passage d'un terrain à un autre de résistivité différente se traduit par une variation plus étalée que dans le cas de la progression avec le dispositif Schlumberger. La méthode Wenner employée est donc moins intéressante pour la recherche des limites géologiques.

MÜLLER (in MÜLLER et al, 1983) utilise les variations de résistivité résiduelle pour mettre en évidence des zones fracturées. La résistivité résiduelle  $\Delta$ , exprimée en %, est obtenue par :

$$\Delta = (R_a - R_b - R_c)/R_a$$

où  $R_a$ ,  $R_b$  et  $R_c$  sont les résistances mesurées dans les positions AMNB, ABMN et AMBN respectivement.

En terrain homogène, la résistivité résiduelle est théoriquement nulle. Elle croît en fonction des hétérogénéités locales.



Dans la région étudiée, les valeurs de résistivité résiduelle sont très faibles et varient très peu, même dans les zones fracturées. Cela peut s'expliquer par la profondeur d'investigation relativement élevée ( $a = 48$  m), qui tend à "homogénéiser" beaucoup plus le terrain. Les anomalies proches de la surface sont en quelque sorte "filtrées" au profit des anomalies plus profondes, plus intéressantes du point de vue hydrogéologique.

#### A.1.4. Rectangle de résistivité

Le but de cette méthode est d'obtenir une carte des résistivités apparentes du terrain où sont tracées les lignes d'isoresistivités interprétables en terme de structure géologique.

Les électrodes de courant A et B sont fixes, distantes de plusieurs centaines de mètres (fig. A.4). L'écartement des électrodes MN est constant (5 ou 10 m). Les mesures de potentiel sont effectuées à intervalles réguliers, le segment MN restant parallèle à lui-même, en couvrant la surface d'un rectangle centré sur le milieu de AB, et dont les côtés n'excèdent pas  $AB/2$ .

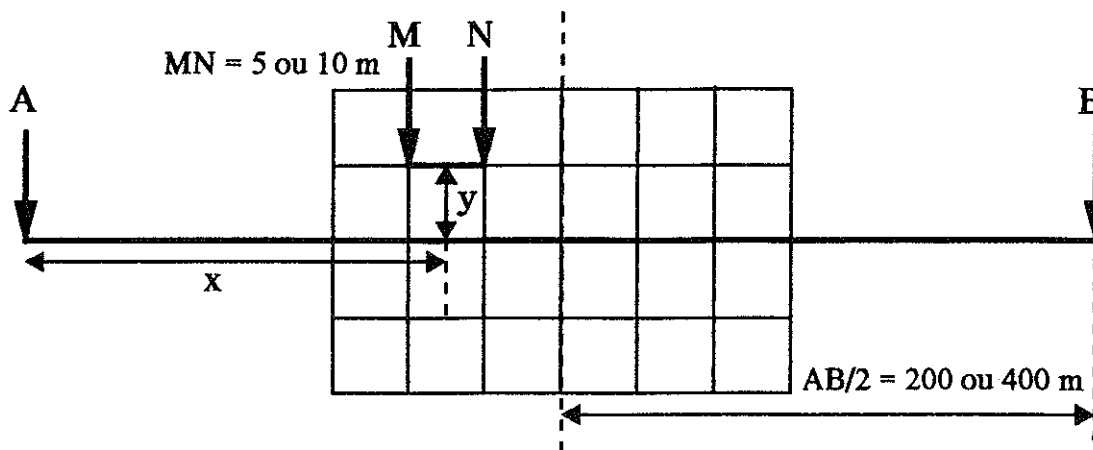


Fig. A.4 : Schéma du dispositif de mesure dans la méthode du rectangle de résistivité.

Le coefficient géométrique pour le calcul des résistivités apparentes est :

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{\sqrt{\left(x - \frac{MN}{2}\right)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(AB - x + \frac{MN}{2}\right)^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{\left(x + \frac{MN}{2}\right)^2 + y^2}} + \frac{1}{\sqrt{\left(AB - x - \frac{MN}{2}\right)^2 + y^2}} \right) \cdot l$$

La profondeur d'investigation est supérieure à celle des trainés vu l'écartement plus important des électrodes A et B.

### A.1.5. Sondage pluridirectionnel

En milieu fortement anisotrope, comme les calcaires karstifiés, il est intéressant de déterminer les directions d'anisotropie de certains paramètres physiques du milieu rocheux et de les interpréter en termes d'anisotropie de fissuration et de perméabilité. A cette fin, on utilise par exemple les variations directionnelles, pour une station donnée, de la vitesse sismique, de la polarisation induite, de la résistivité apparente mesurée par la méthode VLF-résistivité ou par la méthode électrique-résistivité. La mesure en plusieurs points de cette anisotropie est mise à profit dans la détermination des directions principales de fissuration et la délimitation de compartiments hydrogéologiques présentant des orientations et des taux de fissuration différents (MÜLLER, 1982).

Dans cette étude, un dispositif électrique Schlumberger a servi à mesurer de  $30^\circ$  en  $30^\circ$  les résistivités apparentes, avec  $AB/2$  et  $MN/2$  constants. Ces résistivités apparentes sont reportées le long de segments orientés, de longueur proportionnelle à la valeur de résistivité exprimée en  $\Omega.m$ . Le graphique prend généralement la forme d'une ellipse. Le grand axe, c'est-à-dire la plus grande résistivité, correspond, en milieu calcaire dont les fissures sont ouvertes au-dessus de la zone saturée, à la direction principale de la karstification et lorsque les fissures sont remplies d'argile ou d'eau, à la direction perpendiculaire. Les résultats ne sont plus interprétables en cas d'accrochage latéral d'autres formations.

## A.2. METHODE ELECTROMAGNETIQUE

### A.2.1. Principe de la mesure

Les méthodes électromagnétiques tirent aussi parti des différences de résistivité électrique des roches.

Ce sont des méthodes dites "d'induction". Un champ électromagnétique primaire, engendré par un émetteur, subit dans le sol une atténuation et un déphasage qui sont fonction des propriétés électriques de la roche. La présence d'une masse plus conductrice, dans laquelle se créent des courants secondaires, induit des anomalies du champ résultant en surface. Les méthodes électromagnétiques sont basées sur la mesure des composantes magnétiques et électriques de ce champ résultant.

Plusieurs méthodes différentes existent selon que l'émetteur est fixe (VLF, MELOS) ou mobile (bipôles) ainsi que selon la gamme de fréquence utilisée. La plupart de ces méthodes n'utilisent que des composantes magnétiques du champ électromagnétique.

Seuls le VLF-résistivité (VLF-R : MÜLLER et al., 1983) et le MELOS (DE SAMBUCY et al., 1973) utilisent aussi la composante électrique, ce qui permet de calculer la résistivité apparente du terrain d'après la formule suivante :

$$\rho_a = \frac{1}{\mu_0 \omega} \left( \frac{E_y}{H_x} \right)^2$$

où

$\mu_0$  = la perméabilité magnétique du vide

$\omega$  = la pulsation associée à la fréquence utilisée

$E_y$  = la composante horizontale du champ électrique dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation

$H_x$  = la composante horizontale du champ magnétique dans la direction de propagation

### A.2.2. Bipôles ou boucles

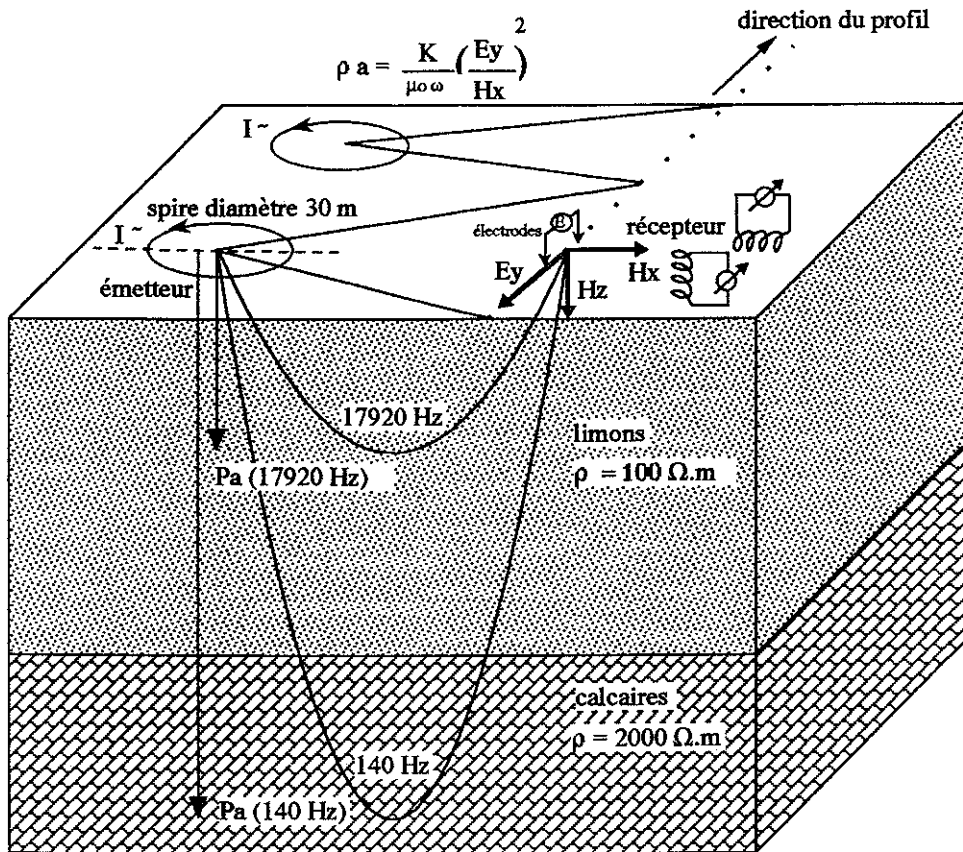
Plusieurs essais ont été réalisés avec deux boucles de type SHARPE SE 300. Chaque boucle sert alternativement de récepteur ou d'émetteur d'un champ magnétique de 400 ou de 1600 Hz. Plusieurs techniques sont utilisées en déplaçant les boucles, tenues verticalement ou horizontalement, le long de deux lignes parallèles (distances entre 50 et 100 m). L'angle d'inclinaison (tilt angle) de la bobine réceptrice, pour l'extinction maximale du signal sonore, est fonction des anomalies du champ magnétique.

En terrain calcaire viséen, où nous avons testé la méthode, nous n'avons pu obtenir aucun résultat. Les interférences sont trop nombreuses et l'appareil trop peu sensible pour détecter les fractures sous une couverture conductrice aussi importante (plus de 10 m de limons).

### A.2.3. MELOS (magnéto-électrique par ondes de surface)

Cette méthode a donné de meilleurs résultats que la précédente (NIHANT in CILE, LGIH, INIEX, 1986). Elle a été appliquée dans le bassin du Néblon, dans les calcaires à l'Est et à l'Ouest du synclinal namurien de Bende, en utilisant l'appareil MINI-MELOS (BRGM).

Le champ magnétique pulsant est généré par une boucle de 30 mètres de diamètre disposée à la surface du sol (fig. A.5). Au point de réception, distant d'environ 200 m, on mesure les composantes  $H_x$  (champ magnétique horizontal) et  $H_z$  (champ magnétique vertical) grâce à deux solénoïdes perpendiculaires ainsi que la composante  $E_y$  (champ électrique) grâce à deux électrodes plantées dans le sol. La technique adoptée est celle des trainés multifréquentiels parallèles à la direction des bancs (fig. A.5). A chaque station du profil, on effectue un sondage de fréquence en faisant varier celle-ci entre 35 et 17920 Hz.



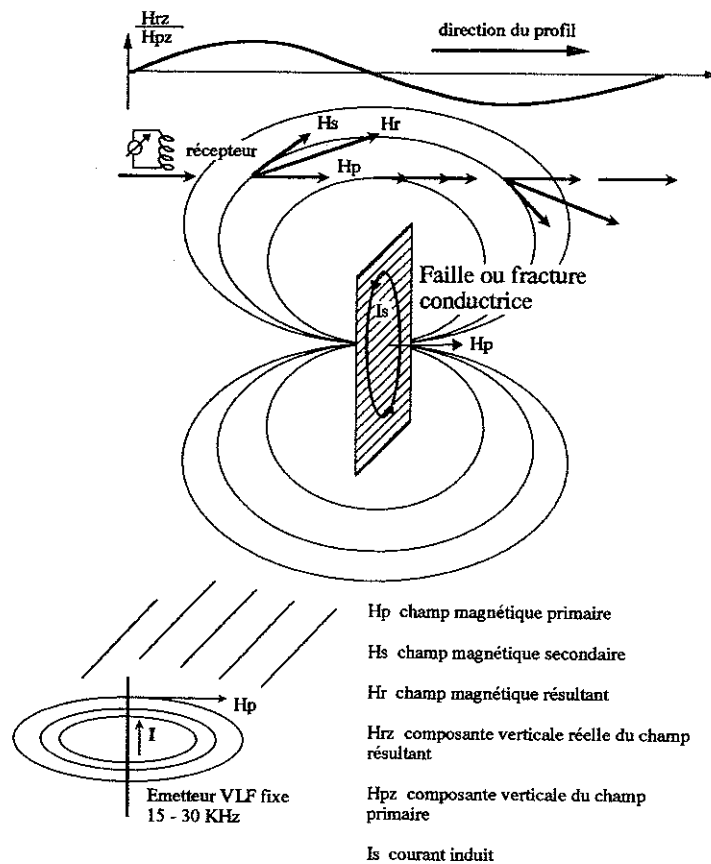
**Fig. A.5** : Principe de la méthode électromagnétique MELOS (trainés multifréquentiels).

La profondeur d'investigation ( $P_a$ ) dépend non seulement de la fréquence mais aussi de la résistivité apparente du terrain. Cette profondeur peut être nettement plus élevée que dans le cas du VLF qui travaille d'ordinaire à des fréquences supérieures à 15 KHz. Les corrélations entre profils et entre coupes établies à partir des sondages mettent en évidence la structure géologique profonde et les zones plus fracturées dans les calcaires.

#### A.2.4. VLF (Very Low Frequencies)

Le champ électromagnétique primaire est celui d'émetteurs fixes lointains (fig. A.6). Ces stations puissantes (300 à 1000 kW) sont réparties un peu partout dans le monde et émettent des ondes radio à très basse fréquence.

Après quelques essais infructueux avec le GEONICS EM16, le récepteur que nous avons finalement utilisé est un ABEM-WADI, commercialisé par ATLAS COPCO, travaillant entre 15 et 30 kHz. Cet appareil permet la mesure et l'enregistrement des composantes verticales en phase (ou composante réelle) et hors phase (ou composante imaginaire) du champ magnétique résultant.



**Fig. A.6 :** Principe de la méthode électromagnétique VLF. Variation du champ magnétique résultant au-dessus d'une anomalie conductrice.

Une fois la direction du profil choisie, soit de préférence perpendiculairement à la direction des anomalies recherchées, l'appareil sélectionne automatiquement la station optimale dans la direction perpendiculaire au profil.

Une option de l'appareil permet la transformation des composantes mesurées en composantes filtrées, grâce à un filtre mathématique appelé "filtre de Hjelt" (KAROUS et HJELT, 1983), dérivé de celui, mieux connu, de Fraser. Ce filtrage a pour but de rendre plus simple l'interprétation des courbes, en faisant mieux ressortir les anomalies sous forme de pics positifs, et en supprimant les effets topographiques. Il est fonction de l'intervalle choisi pour les mesures. Les essais effectués dans le synclinal d'Anthisnes ont montré que 10 mètres d'intervalle est un bon compromis pour la recherche des zones fissurées dans les calcaires sous couverture de limons quaternaires.

L'interprétation reste qualitative. Elle est principalement basée sur la recherche des pics positifs sur les profils de la composante verticale réelle filtrée, et sur les corrélations entre profils.

La méthode est fort sensible à la présence de corps conducteurs (en surface ou à faible profondeur), tels que les clôtures, les lignes électriques ou les conduites.

L'option "interprétation" du WADI, donnant directement la profondeur et l'inclinaison de l'anomalie, nous a paru peu fiable dans le cas d'un milieu hétérogène comme les calcaires karstifiés.

MÜLLER (1983) a mis au point un VLF-résistivité travaillant entre 12 et 240 kHz. Outre le fait que cet appareil permet une interprétation en terme de résistivité apparente, il permet, comme c'est le cas du MELOS, d'effectuer des sondages de fréquence grâce à une plus large gamme de profondeurs d'investigation (entre 10 et 45 m pour une résistivité apparente de 100  $\Omega$ .m).

La méthode est également utilisée pour déterminer l'anisotropie de la fissuration, en mesurant la résistivité dans plusieurs directions.

### A.3. METHODE MICROGRAVIMETRIQUE

Par l'étude des variations du champ de la pesanteur, la microgravimétrie est destinée à mettre en évidence les vides karstiques, les zones déconsolidées et les poches de dissolution dans les calcaires. Sa mise en oeuvre demande beaucoup de soins. C'est une méthode très ponctuelle, souvent utilisée pour les études de détail.

Les valeurs de g (accélération de la pesanteur), mesurées relativement à une base, sont transformées en "BOUGUER brute" en appliquant les corrections "de BOUGUER", "à l'air libre"<sup>1</sup> et "de dérive"<sup>2</sup>. En soustrayant de la "BOUGUER brute" l'anomalie "régionale", on obtient l'anomalie "résiduelle" que l'on peut interpréter en terme des variations locales de densité des terrains.

Dans notre cas, les mesures microgravimétriques ont été effectuées suivant un profil transversal.

### A.4. METHODE SISMIQUE

La méthode tire parti des différences de vitesse de propagation des ondes sismiques dans divers types de roches et des phénomènes de réfraction qui en découlent. En milieu calcaire sous couverture meuble, la sismique réfraction est utile pour déterminer la profondeur du bed-rock, sa compacité, la limite entre le bed-rock sain et le bed-rock altéré et les zones plus fissurées.

---

<sup>1</sup>Les corrections "de BOUGUER" et "à l'air libre" sont appelées "corrections d'altitude".

<sup>2</sup>Dérive luni-solaire et dérive instrumentale.

## A.5. DIAGRAPHIES

Les diagraphies différées (par opposition aux diagraphies instantanées<sup>1</sup>, enregistrées en cours de forage) consistent en une série de mesures géophysiques (ou géochimiques), réalisées dans les forages. Les profils verticaux obtenus permettent l'étude du réservoir rocheux à l'échelle de volumes relativement restreints. Les méthodes les plus fréquemment employées en hydrogéologie sont : les diagraphies électriques (résistivité, potentiel spontané), les diagraphies sismiques (Sonic, sismique entre forages), les diagraphies de "formation"<sup>2</sup> ( $\gamma$ -ray,  $\gamma$ - $\gamma^3$ , Neutron), le moulinet de forage (Flowmeter), le diamètreur (Caliper) et accessoirement l'inclinométrie, la pendagimétrie, la salinométrie, la thermométrie et l'inspection caméra.

Cinq des dix-huit forages des bassins d'Anthisnes et du Néblon ont fait l'objet de diagraphies Sonic,  $\gamma$ -ray,  $\gamma$ - $\gamma$  et Neutron. Parallèlement, des profils des paramètres physico-chimiques de l'eau (température, conductivité, oxygène dissous et pH) ont été réalisés. Les mesures de diagraphie effectuées conviennent particulièrement pour caractériser les discontinuités de perméabilité dues à la fissuration et à la karstification des bancs calcaires. Moyennant un étalonnage précis des sondes, il est possible d'évaluer les paramètres hydrogéologiques suivants (REPSOLD, 1989) :

- la porosité totale, à partir des diagraphies Neutron et, moyennant certaines hypothèses, à partir des diagraphies Sonic et  $\gamma$ - $\gamma$ ;
- la teneur en argiles, à partir de la radioactivité naturelle de celles-ci, mesurée par la diagraphie  $\gamma$ -ray;
- la perméabilité, soit à partir de la porosité (mesurée comme indiqué précédemment) et la résistivité obtenue par la méthode électrique, soit à partir des mesures de  $\gamma$ -ray.

La diagraphie Neutron est considérée comme la méthode la plus précise de détermination de la porosité en milieu saturé.

Les diagraphies Sonic et  $\gamma$ - $\gamma$  sont quant à elles très bien adaptées à la recherche des zones fracturées dans les roches cohérentes comme les calcaires.

### A.5.1. Principe du Sonic

La diagraphie Sonic permet de mesurer la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans les terrains. Cette vitesse est fonction de la nature lithologique et de la compacité (porosité de fissure) de la roche.

La sonde utilisée possède un émetteur et deux récepteurs situés à deux distances différentes.

---

<sup>1</sup>Pression sur l'outil et vitesse d'avancement.

<sup>2</sup>Ou diagraphies nucléaires.

<sup>3</sup>Ou diagraphie de "densité".

Le signal reçu est compensé pour tenir compte des effets de paroi.

Cette diagraphie ne peut se faire que sous eau, pour éviter un échauffement de la sonde. La présence de tubages métalliques, conducteurs préférentiels des ondes soniques, rend la méthode peu efficace lorsque le trou est tubé.

Sur les profils, toute diminution de la vitesse sismique due à la présence d'une zone fracturée se marque par une augmentation du retard  $t$  mesuré par l'appareil.

### A.5.2. Principe du $\gamma$ -ray

Cette diagraphie mesure la radioactivité naturelle (rayonnements gamma) due à la présence d'éléments radioactifs :  $K^{40}$ ,  $U^{238}$  et  $Th^{232}$ , Ra.

La radioactivité des sables, des grès, des calcaires et des dolomies est plutôt faible.

Les argiles, contenant nettement plus d'ions  $K^+$ , ont une radioactivité plus élevée.

La mesure s'effectue à l'aide d'un compteur à scintillation composé d'un cristal transparent qui émet un photon de lumière quand il est traversé par un rayon gamma. Ce photon est détecté par un photomultiplicateur et est traduit en impulsions de courant. Celles-ci sont comptées pendant une durée appelée constante de temps. Comme les désintégrations radioactives sont aléatoires, il est nécessaire d'avoir une constante de temps suffisamment longue et de régler en conséquence la vitesse de déplacement du capteur dans le forage, afin de repérer les couches peu épaisses.

Le  $\gamma$ -ray convient pour repérer des conduits fossiles et des fissures colmatées par les argiles, ainsi que des joints de stratification plus argileux entre les bancs calcaires.

### A.5.3. Principe du $\gamma$ - $\gamma$

Cette diagraphie permet de mesurer la masse spécifique des terrains en place, par conséquent leur déconsolidation.

La mesure est basée sur le phénomène de diffusion du rayonnement gamma suivant la densité de la matière. Elle consiste à bombarder le matériau par un rayonnement gamma émis par une source radioactive de Césium 137. Les rayonnements gamma subissent un certain nombre de phénomènes d'absorption par interaction avec les électrons du milieu. Le principal de ces effets est l'effet Compton. Un détecteur à scintillation, placé à une certaine distance de la source, recueille le rayonnement non absorbé. Celui-ci est inversement proportionnel à la densité de la formation, ou plus strictement parlant à la densité d'électrons, suivant une loi de type exponentiel.

La présence d'irrégularités sur les parois du sondage perturbe le comptage. Pour remédier à cet inconvénient, la sonde comprend deux détecteurs : l'un placé à une faible distance de la source (24 cm) et très sensible aux phénomènes proches du trou (HRD : High Resolution Density), l'autre



plus éloigné de la source (48 cm) et plus influencé par le massif lui-même (LSD : Long Spacing Density).

#### **A.5.4. Principe du Neutron**

La diagraphie Neutron permet de mesurer les variations relatives de teneur volumique en eau des terrains.

Des neutrons rapides, émis par une source constituée d'un mélange Américium-Béryllium, sont ralentis par collision avec les noyaux environnants. Les neutrons lents ainsi produits sont comptés au moyen d'un détecteur. L'intensité dépend avant tout de la présence des noyaux d'hydrogène, de masse volumique identique à celle des neutrons. Elle est donc principalement liée au taux d'humidité, mais elle dépend aussi de la densité des terrains (présence d'autres éléments absorbants) et de la présence d'autres matériaux riches en hydrogène (par exemple les charbons ou le PVC du tubage).

L'intensité Neutron augmente dès que la sonde pénètre dans la zone noyée.

#### **A.5.5. Principe des profils des paramètres physico-chimiques**

La méthode consiste à mesurer la conductivité (corrigée à 20°C), la température, le pH et la teneur en oxygène dissous de l'eau de la nappe à différentes profondeurs dans les piézomètres.

La sonde, munie des électrodes et des circuits d'amplification, est reliée à l'appareil de mesure situé en surface (COMBIBOX WTW) via un câble. Les mesures sont effectuées tous les deux mètres en remontant lentement la sonde.

Sur les profils, on distingue les arrivées d'eau et les zones "d'eau morte", notamment face aux parties aveugles du tubage. La conductivité et la teneur en oxygène dissous sont les plus sensibles aux circulations d'eau, la première diminuant et la seconde augmentant en face des arrivées d'eau. Etant donné la lenteur des circulations et les phénomènes de mélange à l'intérieur du piézomètre, seule la profondeur sous laquelle les calcaires deviennent moins aquifères est en général visible. Elle se marque par une augmentation de la conductivité et une chute de la teneur en oxygène dissous.



## ANNEXE C

## Compositions chimiques moyennes des points d'eau dans les bassins du Néblon et d'Anthisnes

N°	Point d'eau	Ca mg/l	Mg mg/l	Ca /Mg	Na mg/l	K mg/l	K25 µScm-1	pH	T° °C	TH °F	HCO3 mg/l	CO2 mg/l	SiO2 mg/l	NO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	DCO mg/l
1	Méan sce	59,0	15,8	3,7	48,6	16,6	680	7,4	10,3	21,2	162	4,7	7,1	21,7	108,7	37,2	19,1
2	Abîme sce	61,2	11,9	5,4	7,2	1,5	392	7,7	9,4	20,2	168	2,3	9,4	20,9	20,8	30,2	6,9
3	Charneu sce	94,4	5,3	17,7	8,1	0,8	519	7,6	10,0	25,7	161	2,6	8,7	35,8	52,4	39,4	2,6
4	Bonsin sce	70,0	6,1	12,1	5,1	0,7	383	7,8	9,5	20,0	155	1,8	7,4	32,1	14,9	32,1	21,3
5	Guévelettes sce	38,2	9,3	4,3	8,3	2,5	308	7,2	9,8	13,4	56	2,6	9,5	59,9	19,5	33,8	11,8
6	Croix marion sce	78,4	7,3	10,7	7,2	2,1	438	7,9	10,8	22,6	196	1,6	7,7	27,3	16,8	34,2	16,6
7	Borlon sce1	55,5	6,4	8,7	7,3	7,0	385	7,2	11,1	16,5	65	3,5	7,3	56,6	20,4	35,6	34,7
8	Borlon sce3	37,9	9,0	5,4	8,9	1,0	310	6,5	8,1	13,1	43	5,5	8,4	52,9	28,0	33,4	2,4
9	Champ Mahay	42,4	6,7	6,3	5,1	0,8	325	7,5	10,1	13,3	95	2,3	6,8	32,6	12,0	28,0	4,0
10	Sévrin sce w	15,3	5,0	3,0	6,4	0,8	157	6,2	7,4	5,9	7	3,2	11,4	22,5	12,1	32,3	4,7
11	Sévrin sce e	48,6	3,9	12,8	5,2	0,8	274	7,8	9,6	13,7	112	1,3	10,4	14,2	10,8	27,8	7,6
12	Oneu sce1	71,2	6,1	11,7	9,7	1,6	433	7,6	17,6	20,2	153	2,5	5,8	23,3	36,9	33,6	18,0
13	Oneu sce2	70,9	5,2	13,6	8,4	0,9	413	7,9	12,6	19,9	132	1,5	6,0	28,2	32,7	37,7	10,0
14	Houjon sce	93,6	5,7	16,3	5,8	0,7	701	7,9	9,0	25,7	214	2,0	8,0	23,1	27,4	26,0	5,9
15	Jenneret	64,1	6,9	9,8	5,5	2,6	363	7,8	9,8	18,8	161	2,1	12,0	21,2	14,6	26,0	20,6
16	Warzée sce E	37,2	7,9	4,7	5,5	3,9	317	7,7	5,2	12,5	129	10,8	0,0	2,9	11,7	12,1	9,0
17	Lizin sce w	41,7	13,5	3,1	7,8	1,1	396	7,1	8,6	16,0	127	23,4	5,0	25,5	18,6	23,6	12,0
18	Lizin sce e	44,9	13,6	3,3	6,8	1,4	414	7,1	8,6	16,8	135	53,3	4,6	33,3	17,2	18,2	10,0
19	Crossée sce w	20,7	8,4	2,5	6,9	0,8	243	7,4	8,1	8,6	56	7,6	3,3	15,5	15,7	20,3	19,0
20	Crossée sce e	49,8	12,8	3,9	7,0	2,1	435	7,6	8,7	17,7	171	9,7	3,5	10,6	17,0	25,7	18,1
21	Vien sce w	70,4	12,7	5,5	8,7	3,2	540	6,9	9,1	22,8	198	33,8	4,9	22,9	18,7	32,3	5,1
22	Anthisnes sce	61,2	19,5	3,1	10,4	1,6	553	7,2	8,9	23,3	186	23,3	3,6	33,1	23,2	33,4	11,2
23	Ouhar sce e	47,7	14,2	3,3	7,8	1,1	427	7,6	9,2	17,8	146	5,6	3,6	14,3	17,6	32,0	9,8
24	Ouhar sce w	42,5	11,7	3,6	10,7	5,6	365	6,7	8,9	15,4	115	26,2	4,5	26,6	22,5	32,4	8,4
25	Bende	55,1	15,4	3,7	26,5	20,4	565	7,5	10,1	20,1	124	3,5	4,9	27,2	76,2	39,7	0,1
26	Marsée sce2	21,6	6,6	3,3	5,3	0,9	183	7,1	9,5	8,1	39	2,2	8,1	13,2	10,3	31,1	13,8
27	Marsée sce 3	43,5	9,2	4,6	5,7	0,9	290	7,3	10,2	14,7	106	4,4	12,2	5,3	9,3	48,7	7,7
28	Ocquier sce1	99,8	4,5	22,4	6,2	0,6	498	7,6	9,6	26,7	248	5,4	7,0	16,4	20,4	32,5	21,8
29	Ocquier sce2	75,3	3,9	19,3	6,7	0,7	409	7,0	8,0	20,4	165	11,0	6,5	18,5	21,1	32,7	
30	Méan	81,6	11,3	7,3	23,7	11,2	662	7,4	9,5	25,4	182	8,0	8,9	22,8	87,6	32,0	37,5
31	Abîme	79,8	10,9	7,4	15,2	4,9	509	7,8	9,3	24,4	216	4,2	11,1	22,0	35,8	33,7	16,1
32	Charneu	56,1	8,1	7,0	6,7	1,6	362	7,7	9,2	17,3	113	1,8	8,0	34,8	26,5	31,2	13,2
33	Bonsin	57,4	8,6	7,4	5,8	2,5	366	7,6	10,5	17,9	132	4,0	6,2	42,2	18,3	36,4	22,9
34	Guévelettes	55,0	7,8	7,2	7,0	1,4	358	7,7	10,0	16,9	118	2,3	8,8	38,7	16,8	32,7	15,3
35	Croix Marion	132,0	10,5	11,4	28,8	31,3	842	6,7	12,3	37,3	182	88,9	17,2	19,2	32,5	294,3	88,5
36	Borlon	56,2	7,3	7,7	10,0	8,6	388	8,0	12,1	17,0	137	1,8	5,2	21,4	27,0	33,2	20,8
37	Sevrin	67,5	6,7	9,8	6,3	1,4	387	7,6	9,4	19,6	160	5,5	9,8	28,6	16,0	30,2	8,7
38	Lizin carrière	45,8	13,8	3,3	7,2	1,4	418	8,0	8,5	17,1	149	5,8	4,8	25,4	17,0	22,8	15,0
39	Lizin perte	45,4	14,5	3,1	8,0	4,0	446	7,8	8,2	14,8	160	5,6	4,8	23,0	17,7	20,0	20,0
40	Crossée perte N	51,1	12,9	4,0	7,6	2,7	447	8,0	9,3	18,0	171	2,6	4,3	14,0	18,5	22,2	16,9
41	Crossée perte S	33,9	12,6	2,7	7,8	1,0	373	7,8	7,9	13,6	102	4,7	3,0	25,9	18,3	20,0	7,6
42	Vien étang	57,2	13,5	4,3	9,2	1,7	477	7,8	8,9	19,8	176	3,5	3,6	18,7	21,3	29,0	4,5
43	Vien rau	41,6	10,0	4,1	8,4	1,4	384	7,5	8,0	14,5	119	7,3	2,5	19,5	20,9	18,9	25,0
44	Ouhar étang	40,4	11,4	3,5	8,4	1,8	368	8,0	10,1	14,7	128	10,9	2,6	11,2	19,4	20,7	18,1
45	Chardeneu	79,4	9,2	8,6	10,9	2,4	509	7,8	12,1	23,6	193	2,2	9,8	25,7	36,5	33,0	10,4
46	Ombre	82,2	10,6	7,7	9,9	3,4	493	7,8	9,3	24,9	207	2,6	7,6	31,3	29,7	32,8	17,4
47	Ama bis	87,1	9,8	8,9	8,0	2,3	499	7,9	11,6	25,7	231	2,1	8,3	25,0	24,6	31,7	8,5
48	Néblon j Jenneret	110,3	13,6	8,1	6,5	2,0	573	8,5	12,0	33,1	304	0,6	8,9	20,5	23,4	33,1	7,2
49	Néblon ruines	98,2	11,9	8,8	7,9	2,7	551	8,1	10,1	29,4	278	1,9	6,7	26,1	24,6	32,5	14,6
50	Néblon cile	105,4	14,3	7,4	7,7	2,2	590	7,8	10,1	32,2	301	3,9	7,3	28,0	25,0	33,0	10,1
51	Vervo	119,6	17,4	6,9	6,5	2,1	653	7,8	9,3	37,0	351	6,2	7,3	21,3	25,7	32,4	7,7

N°	Point d'eau	Ca mg/l	Mg mg/l	Ca /Mg	Na mg/l	K mg/l	K25 µScm-1	pH	T° °C	TH °F	HCO3 mg/l	CO2 mg/l	SiO2 mg/l	NO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	DCO mg/l
52	Ocquier village	114,8	16,8	6,8	7,3	1,7	622	7,9	13,0	35,6	340	2,9	7,8	21,2	24,1	35,0	24,3
53	Ama	114,4	16,4	7,0	7,8	2,3	639	8,1	11,1	35,3	340	3,1	6,9	23,3	24,8	33,4	7,9
54	Nesson pont	138,8	14,3	9,6	15,6	8,2	746	7,6	9,2	38,4	400	16,5	8,8	21,2	33,6	37,8	46,5
55	Ouffet	129,8	22,1	5,7	139,1	93,4	1901	7,0	14,2	41,5	874	338,0	27,8	13,3	107,7	193,9	534,4
56	Vervo sce	118,3	19,0	6,2	6,2	0,5	666	7,4	9,6	37,3	348	10,9	7,9	38,3	23,9	35,2	2,1
57	Gde galerie	117,0	17,9	6,5	6,8	2,0	658	7,6	10,3	36,5	345	9,9	9,2	28,7	25,0	31,8	5,6
58	Tinkou	112,5	13,4	8,5	7,4	1,7	603	7,5	10,2	33,5	323	12,2	8,0	22,4	24,4	31,1	9,2
59	Communale	121,4	15,8	7,7	6,3	1,6	557	7,5	10,8	36,8	360	11,1	7,6	21,7	21,5	33,2	4,0
60	La Roke	102,8	7,8	13,5	6,0	1,6	620	7,3	9,1	26,3	286	26,0	2,4	13,2	21,4	14,4	6,4
61	Comblain Moulin	99,0	18,9	5,2	8,0	1,6	710	7,1	10,0	33,4	305	32,0	2,0	22,1	22,3	17,4	4,1
62	Comblain Rocher	112,6	18,1	6,2	6,4	1,4	838	7,3	10,0	35,5	342	24,6	1,6	22,9	17,5	21,4	3,5
63	Ouffet carrière w	42,1	5,2	8,2	10,2	4,6	369	8,4	10,4	12,6	126	4,1	1,1	13,1	13,2	17,9	8,2
64	Anthisnes carr w	56,4	7,5	7,5	26,1	8,5	662	8,9	8,8	17,1	86	2,1	1,8	13,4	26,0	85,0	9,2
65	Minaqua	13,5	19,6	0,7	14,1	2,6	483	8,5	11,3	11,4	123	1,3	0,7	2,1	35,0	14,4	36,0
66	P08 Crossée	93,1	19,3	4,9	7,4	1,9	444	7,3	10,7	31,2	316	22,9	2,9	19,6	20,6	23,8	5,7
67	P04 Warzée	88,5	14,6	6,1	7,1	1,3	646	7,2	10,1	28,1	266	23,1	2,0	34,6	22,0	24,2	25,7
68	P0 Ouffet	94,3	16,7	5,7	7,8	1,2	675	7,3	10,5	30,4	318	15,6	3,5	13,3	17,6	33,2	52,3
69	P10	154,5	15,1	10,2	33,8	5,0	724	7,7	9,9	45,0	282	9,9	15,5	56,7	127,3	63,9	8,5
70	P11	210,0	13,8	15,3	20,3	0,6	809	7,1	12,3	58,1	374	14,4	6,9	39,2	63,2	38,1	13,1
71	P12	203,0	22,1	9,2	10,6	0,8	778	7,1	10,5	59,7	443	58,4	8,1	33,7	33,8	24,6	6,4
72	P14	185,0	38,5	4,8	3,8	0,5	745	7,1	10,2	62,0	493	61,9	9,1	63,2	22,2	1,9	7,2

Compositions chimiques moyennes par type de point d'eau

Type	Ca mg/l	Mg mg/l	Ca /Mg	Na mg/l	K mg/l	K25 µScm-1	pH	T° °C	TH °F	HCO3 mg/l	CO2 mg/l	SiO2 mg/l	NO3 mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	DCO mg/l
Sces Fa	58,5	9,7	7,7	9,4	2,5	459	7,3	9,7	18,6	149	10,9	6,1	23,3	25,5	29,1	11,8
Sces Na	72,9	5,9	15,4	6,2	0,7	487	7,4	9,3	20,6	173	6,9	8,6	13,4	16,9	38,0	14,8
Raux Fa	52,9	10,6	5,5	8,3	2,6	430	7,8	9,3	17,3	145	4,6	5,7	25,0	21,0	27,0	15,7
Car Anthisnes	56,4	7,5	7,5	26,1	8,5	664	8,7	8,8	17,1	86	2,1	1,8	13,4	26,0	85,0	9,2
Néblon	105,4	14,3	7,4	7,7	2,2	675	8,0	10,1	32,2	301	3,9	7,3	28,0	25,0	33,0	10,1
Rau Ocquier	116,3	16,9	6,9	7,2	2,0	730	8,0	11,1	36,0	344	4,1	7,4	21,9	24,9	33,6	13,3
Sces calcaires	111,9	15,8	7,7	6,7	1,5	721	7,3	10,0	34,2	330	18,1	5,5	24,2	22,3	26,4	5,0
Forages	155,9	20,1	8,5	13,9	1,5	732	7,8	10,6	47,2	363	30,5	7,5	40,1	47,7	31,0	18,9
Egout	129,8	22,1	5,7	139,1	93,4	2074	7,6	14,2	41,5	874	338,0	27,8	13,3	107,7	193,9	534,4

## ANNEXE D

## RESULTATS BRUTS DES TRAÇAGES

Tableau de correspondance des symboles utilisés dans la liste des résultats de traçage

Symbole	Site	Traceur	Date	Point d'injection	Point de sortie
mar1ur	Néblon	uranine	24/12/91 9:20	perte du Bois de Marsée	galerie Communale
mar2li	Néblon	lithium	27/12/91 9:35	perte du Bois de Marsée	galerie Communale
mar1glur	Néblon	uranine	24/12/91 9:20	perte du Bois de Marsée	grande galerie
cro1ur	Anthisnes	uranine	10/12/88 14:30	perte de Crossée	résurgence de Comblain
anthr	Anthisnes	rhodamine	29/3/89 19:30	perte d'Anthisnes	résurgence de Comblain
antur	Anthisnes	uranine	29/3/89 19:30	perte de Vien	résurgence de Comblain
antna	Anthisnes	naphthionate	29/3/89 19:30	perte de Crossée	résurgence de Comblain
cro2mi	Anthisnes	microsphères	15/8/90 10:15	perte de Crossée	résurgence de Comblain
cro2ur	Anthisnes	uranine	15/8/90 10:15	perte de Crossée	résurgence de Comblain
cro2mip14	Anthisnes	microsphères	15/8/90 10:15	perte de Crossée	forage P14
cro2urp14	Anthisnes	uranine	15/8/90 10:15	perte de Crossée	forage P14
larur	Anthisnes	uranine	27/11/91 14:30	forage P14	résurgence de Comblain
spo1dur	Spontin	uranine	7/1/91 9:35	ravin des Agauches pt3	source Duchesse
spo1dli	Spontin	lithium	7/1/91 9:45	ravin des Agauches pt1	source Duchesse
spo1dmi	Spontin	microsphères	7/1/91 9:45	ravin des Agauches pt2	source Duchesse
spo1pur	Spontin	uranine	7/1/91 9:35	ravin des Agauches pt3	source Presbytère
spo1pli	Spontin	lithium	7/1/91 9:45	ravin des Agauches pt1	source Presbytère
spo1pmi	Spontin	microsphères	7/1/91 9:45	ravin des Agauches pt2	source Presbytère
spo2dmi	Spontin	microsphères	16/1/92 11:00	ravin des Agauches pt4	source Duchesse
spo2pmi	Spontin	microsphères	16/1/92 11:00	ravin des Agauches pt4	source Presbytère
spo2bna	Spontin	naphthionate	15/1/92 12:10	forage F1	résurgence Breujette
spodbac	Spontin	bactériophages	6/3/90 8:25	ravin des Agauches pt1	source Duchesse
spopbac	Spontin	bactériophages	6/3/90 8:25	ravin des Agauches pt1	source Presbytère
fag1na	Fairoule	naphthionate	4/2/91 10:50	forage Pz4	galerie G1
fapz7na	Fairoule	naphthionate	4/2/91 10:50	forage Pz4	forage Pz7
fapz3ur	Fairoule	uranine	4/2/91 10:08	forage Pz6	forage Pz3
fapz3mi	Fairoule	microsphères	4/2/91 10:15	forage Pz6	forage Pz3
fag3mi	Fairoule	microsphères	4/2/91 10:15	forage Pz6	galerie GIII
fag3ur	Fairoule	uranine	4/2/91 10:08	forage Pz6	galerie GIII
msmli	Mt-sur-Marchienne	lithium	16/12/91 12:30	PZ2	puits de captage
msmur	Mt-sur-Marchienne	uranine	16/12/91 12:00	PZ3	puits de captage
msmmi	Mt-sur-Marchienne	microsphères	16/12/91 12:50	PZ1	puits de captage

Symbole	Site	Traceur	Date	Point d'injection	Point de sortie
waur	Walhorn	uranine	9/4/92 19:30	chantoir de Walhorn	sce n°3 (Gueule)
re1hur	La Reid	uranine	12/1/90 21:15	chantoir de La Reid	résurgence d'Hestroumont
re1sur	La Reid	uranine	12/1/90 21:15	chantoir de La Reid	résurgence de Spixhe
re2hrh	La Reid	rhodamine B	14/1/90 14:45	égouts de la Reid	résurgence d'Hestroumont
xhour	Xhoris	uranine	12/5/90 20:30	abîme de Xhoris	résurgence dans l'Ourthe
rem1ur	Remouchamps	uranine	24/5/91 19:20	chantoir de Sècheval	Rubicon
be3ur	Bertrée / Crétacé	uranine	4/2/92 11:00	Pz2	puits P2
be3li	Bertrée / Crétacé	lithium	4/2/92 9:30	Pz12	puits P2
be3i	Bertrée / Crétacé	iodure	4/2/92 10:00	Pz10	puits P2
be3na	Bertrée / Crétacé	sodium	4/2/92 9:30	Pz12	puits P2
be3no3	Bertrée / Crétacé	nitrate	4/2/92 10:00	Pz10	puits P2
be3k	Bertrée / Crétacé	potassium	4/2/92 10:00	Pz10	puits P2
cr2i	Crisnée	iodure	29/1/92 9:45	PR	PE
cr2ur	Crisnée	uranine	29/1/92 9:13	PZ1	PE
cr2li	Crisnée	lithium	29/1/92 9:00	PZ2	PE
cr2nap	Crisnée	naphtionate	29/1/92 9:45	PR	PE
gh1ur	Grand Hallet	uranine	13/7/92 16:40	PZ	PE
gh1k	Grand Hallet	potassium	13/7/92 16:40	PZ	PE
gh1no3	Grand Hallet	nitrate	13/7/92 16:40	PZ	PE
gh1li	Grand Hallet	lithium	9/7/92 14:30	PZ	PE
ja1li	Jandrain	lithium	28/7/92 13:16	P1	P5
be1na	Bertrée / Landénien	sodium	26/2/91 20:10	Pz1	P1
be1ur	Bertrée / Landénien	uranine	26/2/91 20:10	Pz1	P1
be1li	Bertrée / Landénien	lithium	26/2/92 20:10	Pz1	P1
be1no3	Bertrée / Landénien	nitrate	26/2/91 16:30	Pz9	P1
be2li	Bertrée / Landénien	lithium	23/4/91 21:35	Pz1	P1
be2na	Bertrée / Landénien	sodium	23/4/91 16:15	Pz7	P1
be2ur	Bertrée / Landénien	uranine	23/4/91 21:35	Pz1	P1
be2no3	Bertrée / Landénien	nitrate	23/4/91 16:45	Pz9	P1
be2i	Bertrée / Landénien	iodure	23/4/91 16:45	Pz9	P1

Pages suivantes : tableaux des résultats bruts des traçages

Pour les symboles utilisés, voir le tableau précédent. Les temps t sont exprimés en secondes. Les concentrations sont exprimées en ppb en ce qui concerne l'uranine, le naphtionate, la rhodamine B et le lithium, en ppm en ce qui concerne le sodium, le potassium, le nitrate, l'iodure, en nombre de particules par 100 ml en ce qui concerne les microsphères et en nombre de PFU par ml (plaques formant unités) en ce qui concerne les bactériophages.

t	mar	lur	358800	1.050	517200	0.410	t	mar	2li	140100	1.4	422700	1.9	t	mar	lg	lur	t	cro	lur
179400	7.120	360600	1.020	524400	0.420	2400	1.6	141900	1.4	429900	2.0	178200	0.074	66900	0.07					
184200	6.510	362400	0.990	531600	0.430	6000	1.6	143700	1.3	436200	1.8	257400	0.179	93600	41.90					
187500	5.090	364200	0.970	538800	0.400	9600	1.6	145500	1.3	450600	1.8	306600	0.255	99000	90.90					
191100	5.180	366000	0.960	546000	0.400	13200	1.6	147300	1.3	508200	1.8	348600	0.273	104400	90.90					
194700	4.940	367800	0.980	553200	0.390	16800	1.6	149100	1.3	580200	1.6	390600	0.325	109800	109.90					
198300	4.500	369600	0.970	560400	0.370	20400	1.6	150900	1.5	601200	1.4	431700	0.314	115200	110.90					
201900	4.290	371400	0.920	567600	0.380	24000	1.7	152700	1.6	652200	1.5	516000	0.324	120600	99.90					
205500	4.110	373200	0.930	574800	0.370	27600	1.6	154500	1.8	724200	1.4	695400	0.301	126000	90.90					
209100	3.980	375000	0.880	582000	0.360	31200	1.6	156300	2.2	781800	1.4	861000	0.286	131400	80.90					
212700	3.690	376800	0.920	589200	0.350	34800	1.6	158100	2.8	810600	1.3	1070100	0.251	136800	71.90					
216300	3.520	378600	0.910	596400	0.340	38400	1.6	159900	3.8					142200	64.90					
219900	3.270	380400	0.870	603600	0.330	42000	1.6	161700	4.8					147600	58.90					
223500	3.290	382200	0.890	610800	0.320	45600	1.5	163500	6.1					153000	52.90					
227100	3.100	384000	0.900	618000	0.310	48600	1.4	165300	7.7					158400	43.90					
230700	3.110	385800	0.880	625200	0.300	50400	1.4	167100	9.1					163800	39.90					
234300	2.870	387600	0.860	632400	0.290	52200	1.4	168900	10.3					169200	35.90					
237900	2.800	389400	0.820	639600	0.290	54000	1.4	170700	11.9					174600	30.90					
241500	2.670	391200	0.740	646800	0.280	55800	1.3	172500	13.9					177000	30.90					
245100	2.550	393000	0.850	654000	0.280	57600	1.4	176100	14.1					180000	27.90					
248700	2.410	394800	0.840	661200	0.290	59400	1.4	179700	15.3					180300	26.90					
252300	2.320	396600	0.820	668400	0.270	61200	1.3	183300	15.7					185400	23.90					
255900	2.210	398400	0.800	675600	0.270	63000	1.3	186900	15.3					190800	21.90					
258000	2.160	400200	0.780	682800	0.260	64800	1.3	190500	14.7					196200	17.90					
262500	2.180	402000	0.760	690000	0.250	66600	1.3	194100	13.9					201600	15.90					
266100	2.130	403800	0.770	696300	0.240	68400	1.4	197700	12.6					207000	14.90					
269700	2.030	405600	0.780	710700	0.240	70200	1.3	201300	12.5					212400	12.90					
273300	2.070	407400	0.770	768300	0.210	72000	1.3	204900	10.8					217800	11.90					
276900	1.940	409200	0.750	840300	0.179	73800	1.3	208500	10.1					223200	10.90					
280500	1.890	411000	0.710	861300	0.155	75600	1.3	212100	8.9					228600	9.50					
284100	1.810	412800	0.700	912300	0.144	77400	1.3	215700	8.5					234000	9.10					
287700	1.750	414600	0.730	984300	0.121	79200	1.4	219300	7.5					238500	8.60					
291300	1.710	416400	0.730	1041900	0.116	81000	1.4	222900	7.1					263400	6.30					
294900	1.590	418200	0.720	1070700	0.122	82800	1.4	226500	6.8					264900	6.10					
298500	1.550	420000	0.710			84600	1.4	230100	6.1					275700	5.20					
302100	1.610	421800	0.700			86400	1.3	233700	5.7					286500	4.50					
305700	1.550	423600	0.670			88200	1.3	237300	5.5					297300	3.80					
308700	1.410	425400	0.660			89700	1.4	240900	5.2					318900	2.90					
310500	1.400	427200	0.690			91500	1.3	244500	4.9					325800	2.90					
312300	1.410	429000	0.680			93300	1.2	248100	4.5					340500	2.50					
314100	1.470	430800	0.660			95100	1.3	251700	4.3					349800	2.40					
315900	1.360	432600	0.620			96900	1.3	255300	4.0					362100	2.10					
317700	1.320	436200	0.640			98700	1.2	257100	3.8					383700	1.80					
319500	1.280	439800	0.630			100500	1.3	264300	3.7					411300	1.50					
321300	1.270	443400	0.620			102300	1.3	271500	3.6					423840	1.40					
323100	1.340	447000	0.640			104100	1.3	278700	3.4					436200	1.20					
324900	1.300	450600	0.580			105900	1.3	285900	3.1					474240	1.00					
326700	1.290	454200	0.580			107700	1.3	293100	3.1					498600	0.68					
328500	1.260	457800	0.600			109500	1.2	300300	2.8					522600	0.61					
330300	1.280	461400	0.560			111300	1.3	307500	2.8					524640	0.70					
332100	1.240	465000	0.570			113100	1.3	314700	2.8					575040	0.40					
333900	1.150	468600	0.550			114900	1.3	321900	2.6					583800	0.45					
335700	1.170	472200	0.550			116700	1.4	329100	2.6					625440	0.34					
337500	1.210	475800	0.530			118500	1.5	336300	2.5					671100	0.35					
339300	1.120	479400	0.530			120300	1.4	343500	2.5					675840	0.35					
341100	1.090	483000	0.530			122100	1.4	350700	2.4					726240	0.35					
342900	1.010	486600	0.510			123900	1.4	357900	2.2					756600	0.32					
344700	1.050	490200	0.520			125700	1.4	365100	2.2					776640	0.32					
346500	1.040	493800	0.500			127500	1.4	372300	2.1					827040	0.26					
348300	1.050	497400	0.500			129300	1.2	379500	2.1					848400	0.25					
349800	1.090	501000	0.480			131100	1.3	386700	2.1					877440	0.22					
351600	1.090	504600	0.460			132900	1.3	393900	2.0					927840	0.17					
353400	1.090	508200	0.470			134700	1.3	401100	2.0					1015800	0.28					
355200	1.020	511800	0.470			136500	1.3	408300	2.1					1276200	0.05					
357000	1.070	515400	0.470			138300	1.4	415500	2.0					1536300	0.02					

t	anrh	928800	0.0	t	antur	928800	0.10	t	anra	928800	0.1	t	cro2mi	t	cro2ur
1800	0.0	950400	0.0	1800	0.10	950400	0.10	1800	0.1	950400	0.1	84900	0	84900	0.00
9000	0.0	972000	0.0	9000	0.10	972000	0.10	9000	0.1	972000	0.1	99900	0	99900	0.00
16200	0.0	993600	0.0	16200	0.10	993600	0.10	16200	0.1	993600	0.1	123300	0	123300	0.00
23400	0.0	1260000	0.0	23400	0.10	1260000	0.10	23400	0.1	1260000	0.1	152100	0	152100	0.00
30600	0.0	1863000	0.1	30600	0.10	1863000	0.10	30600	0.1	1863000	0.1	173100	0	173100	0.00
37800	0.0	2467800	0.0	37800	0.10	2467800	0.10	37800	0.1	2467800	0.1	188100	0	188100	0.00
45000	0.0			45000	0.10			45000	0.1			189000	0	189000	0.00
52200	0.0			52200	0.10			52200	0.1			252000	0	252000	0.00
59400	0.0			59400	0.10			59400	0.1			276300	0	276300	0.00
66600	0.0			66600	0.10			66600	0.1			298500	0	298500	0.00
73800	0.0			73800	0.10			73800	0.1			339300	8	339300	0.67
81000	0.0			81000	0.10			81000	0.1			359100	16	359100	3.90
88200	0.0			88200	0.10			88200	0.1			366300	68	366300	5.60
95400	0.0			95400	0.10			95400	0.1			385800	144	385800	22.00
102600	0.4			102600	0.10			102600	0.1			422100	405	422100	38.00
109800	4.9			109800	0.10			109800	0.1			445500	254	445500	25.00
117000	12.4			117000	0.10			117000	0.1			457800	286	457800	22.00
124200	15.5			124200	0.10			124200	4.2			512100	166	512100	15.10
131400	20.5			131400	0.10			131400	71.0			545100	250	545100	15.70
136800	17.5			136800	0.10			136800	180.0			560700	128	560700	14.80
144000	15.5			144000	0.12			144000	300.0			597600	66	597600	7.50
158400	12.4			158400	0.80			158400	340.0			645600	0	645600	2.70
172800	9.9			172800	10.20			172800	255.0			727740	0	727740	1.50
187200	10.2			187200	32.00			187200	190.0			803700	0	803700	1.00
201600	5.8			201600	44.00			201600	140.0						
216000	4.3			216000	44.00			216000	110.0						
230400	3.6			230400	40.00			230400	84.0						
244800	2.6			244800	34.00			244800	79.0						
259200	2.2			259200	33.00			259200	84.0						
273600	1.3			273600	30.00			273600	71.0						
288000	2.0			288000	22.00			288000	38.0						
302400	0.9			302400	15.00			302400	19.0						
316800	1.3			316800	12.00			316800	11.5						
331200	0.5			331200	10.00			331200	9.5						
345600	0.5			345600	9.00			345600	7.4						
360000	0.0			360000	7.10			360000	4.5						
374400	0.0			374400	4.30			374400	0.7						
388800	0.0			388800	3.10			388800	0.1						
403200	0.0			403200	2.30			403200	0.1						
417600	0.0			417600	2.10			417600	0.1						
432000	0.0			432000	1.90			432000	0.1						
446400	0.0			446400	1.60			446400	0.1						
460800	0.0			460800	1.40			460800	0.1						
475200	0.0			475200	1.20			475200	0.1						
496800	0.0			496800	1.00			496800	0.1						
518400	0.2			518400	0.75			518400	0.1						
540000	0.2			540000	0.65			540000	0.1						
561600	0.2			561600	0.54			561600	0.1						
583200	0.0			583200	0.50			583200	0.1						
604800	0.0			604800	0.45			604800	0.1						
626400	0.0			626400	0.41			626400	0.1						
648000	0.0			648000	0.37			648000	0.1						
669600	0.0			669600	0.32			669600	0.1						
691200	0.0			691200	0.32			691200	0.1						
712800	0.0			712800	0.29			712800	0.1						
734400	0.0			734400	0.24			734400	0.1						
756000	0.0			756000	0.22			756000	0.1						
777600	0.0			777600	0.22			777600	0.1						
799200	0.0			799200	0.21			799200	0.1						
820800	0.0			820800	0.19			820800	0.1						
842400	0.0			842400	0.16			842400	0.1						
864000	0.0			864000	0.15			864000	0.1						
885600	0.0			885600	0.15			885600	0.1						
907200	0.0			907200	0.14			907200	0.1						



t	cro2mip14	t	cro2urp14	t	larur	t	spoldur	127500	0.000	t	spoldli	126900	24.6	t	spoldmi
4200	0	4200	0	1395900	0.000	600	0.000	132900	0.000	0	3.1	132300	24.1	0	0
8220	0	8220	0	1461600	0.002	1500	0.000	163380	0.000	900	3.1	162780	18.6	900	0
27900	0	27900	0	1571400	0.006	2400	0.000	163500	0.000	1800	3.1	162900	19.5	1800	0
35100	0	35100	0	1827300	0.013	3300	0.001	177900	0.000	2700	3.1	177300	18.2	2700	17
42900	0	42900	0	2142000	0.010	4200	0.019	192300	0.000	3600	3.0	191700	17.0	3600	7030
49500	0	49500	0	2343900	0.005	5100	0.028	199500	0.000	4500	3.5	198900	15.5	4500	31320
56700	0	56700	0	2511000	0.004	6000	0.030	206700	0.000	5400	14.0	206100	16.0	5400	30960
63900	0	63900	0	2671200	0.005	6900	0.030	221100	0.000	6300	42.9	220500	15.3	6300	32760
71100	0	71100	0	3014100	0.003	7800	0.030	235500	0.000	7200	59.6	234900	14.4	7200	31440
78300	0	78300	0	3359700	0.003	8700	0.027	249900	0.000	8100	93.9	249300	13.6	8100	24240
85620	0	85620	0			9600	0.026	250500	0.000	9000	100.5	249900	13.3	9000	14640
92760	0	92760	0			10500	0.022	285900	0.000	9900	126.9	285300	11.1	9900	11660
100140	0	100140	0			11400	0.022	337500	0.000	10800	124.5	336900	10.1	10800	9760
107100	0	107100	0			12300	0.020	372300	0.000	11700	137.5	371700	9.1	11700	8690
114300	0	114300	0			13200	0.018	424500	0.000	12600	145.8	423900	9.0	12600	5540
121500	0	121500	0			14100	0.016	460500	0.000	13500	149.3	459900	7.8	13500	2940
128700	0	128700	0			15000	0.015	518100	0.000	14400	147.0	517500	8.0	14400	2400
135900	0	135900	0			15900	0.014	548700	0.000	15300	148.1	548100	7.5	15300	2022
143100	0	143100	0			16800	0.013	599100	0.000	16200	134.0	598500	7.1	16200	1700
150300	0	150300	0			17700	0.011	632700	0.000	17100	131.6	632100	7.0	17100	1406
157500	0	157500	0			18600	0.011			18000	131.6			18000	1098
164700	0	164700	0			19500	0.010			18900	130.4			18900	908
171900	3	171900	7			20400	0.009			19800	125.7			19800	1180
179100	4	179100	1			21300	0.008			20700	123.4			20700	634
186300	1	186300	2			22200	0.008			21600	119.8			21600	617
193500	5	193500	4			23100	0.007			22500	118.6			22500	600
200700	18	200700	19			24000	0.007			23400	113.6			23400	583
208500	2	208500	4			24900	0.006			24300	106.8			24300	548
248400	3	248400	1			25800	0.006			25200	106.8			25200	394
279900	0	279900	5			26700	0.005			26100	104.6			26100	411
						27600	0.004			27000	102.0			27000	222
						28500	0.004			27900	97.3			27900	420
						29400	0.003			28800	95.7			28800	454
						30300	0.002			29700	90.2			29700	394
						31200	0.002			30600	90.6			30600	420
						32100	0.001			31500	88.1			31500	412
						33000	0.001			32400	87.0			32400	437
						33900	0.001			33300	83.2			33300	308
						34800	0.001			34200	82.6			34200	325
						35700	0.000			35100	78.0			35100	245
						36600	0.000			36000	77.3			36000	420
						37500	0.000			36900	77.3			36900	188
						38400	0.000			37800	75.0			37800	146
						39300	0.000			38700	70.4			38700	240
						40200	0.000			39600	72.6			39600	234
						41100	0.000			40500	69.8			40500	257
						42900	0.000			42300	67.8			42300	240
						48300	0.000			47700	60.0			47700	317
						50100	0.000			49500	58.7			49500	146
						55500	0.000			54900	51.6			54900	163
						57300	0.000			56700	51.3			56700	163
						62700	0.000			62100	47.4			62100	112
						64500	0.000			63900	46.5			63900	112
						69900	0.000			69300	43.4			69300	68
						71700	0.000			71100	42.1			71100	60
						77100	0.000			76500	38.2			76500	37
						78900	0.000			78300	38.6			78300	40
						84300	0.000			83700	34.7			83700	26
						86100	0.000			85500	35.5				
						89700	0.000			89100	33.9				
						98100	0.000			97500	31.1				
						104100	0.000			103500	30.5				
						117600	0.000			117000	24.9				
						118500	0.000			117900	27.0				

t	spo1pur	t	spo1pli	t	spo1pmi	t	spo2dmi	t	spo2bna	t	spodbac
1500	0.000	900	3.9	900	0	18000	0	13800	0.0	2202	65
3300	0.000	2700	3.9	2700	0	79200	0	75000	0.0	9397	4000
5100	0.000	4500	3.9	4500	206	165600	0	100200	0.0	16593	8000
6900	0.001	6300	4.1	6300	1820	190800	0	161400	0.0	23936	6200
8700	0.003	8100	5.4	8100	3780	252000	6	247800	0.0	31279	1200
10500	0.004	9900	9.8	9900	2270	277200	4	273000	0.0	38328	520
12300	0.003	11700	10.6	11700	1430	338400	5	334200	0.0	45671	320
14100	0.003	13500	11.7	13500	1150	363600	2	359400	0.2	53307	130
15900	0.003	15300	12.2	15300	775	424800	3	420600	0.8	60650	92
17700	0.003	17100	17.6	17100	790	450000	3	445800	1.3	67699	74
19500	0.003	18900	14.8	18900	396	511200	1	507000	3.0	75335	50
21300	0.003	20700	15.1	20700	206	536400	1	532200	3.1	81944	32
23100	0.003	22500	15.1	22500	240	597600	0	593400	2.6	89287	33
24900	0.002	24300	12.6	24300	86	622800	0	618600	2.5	100301	27
26700	0.003	26100	17.3	26100	224	684000	0	679800	2.1	107350	20
28500	0.002	27900	14.0	27900	163	770400	1	705000	1.8	114840	26
30300	0.002	29700	12.8	29700	86	795600	0	766200	1.6	121742	18
32100	0.002	31500	12.0	31500	122	856800	1	852600	1.2	128497	9
33900	0.001	33300	12.0	33300	64	882000	0	877800	1.1	135840	11
35700	0.002	35100	12.9	35100	77	943200	0	939000	1.1	143183	8
37500	0.001	36900	11.0	36900	63	968400	0	964200	0.9	150232	13
39300	0.001	38700	11.1	38700	127	1029600	0	1025400	0.6	157868	12
41100	0.002	40500	22.7	40500	110	1054800	1	1050600	0.5	165652	9
42900	0.003	42300	20.9	42300	103	1116000	0	1111800	0.5	173141	9
48300	0.001	47700	9.8	47700	104	1141200	0	1137000	0.5	215289	2
55500	0.001	54900	10.1	54900	43	1202400	0	1198200	0.4	257168	0
62700	0.002	62100	8.9	97500	53	1288800	0	1223400	0.3	285035	2
69900	0.002	69300	8.5	198900	17	1375200	1	1284600	0.2	344666	0
77100	0.001	76500	8.9	285300	13	1461600	0	1371000	0.0	372834	0
84300	0.004	83700	6.9	371700	14			1457400	0.0		
98100	0.005	97500	7.5	460500	13			1543800	0.0		
117540	0.003	116940	7.8	550500	6						
127500	0.002	126900	6.2	632700	5					t	spopbac
163560	0.001	162960	5.5							2202	9
199500	0.000	198900	5.3			t	spo2pmi			9397	9
250080	0.000	249480	5.0			18000	0			16593	22000
285900	0.000	285300	5.1			79200	0			23936	18000
337200	0.000	336600	5.0			165600	0			31279	30000
372300	0.000	371700	4.8			190800	1			38328	1200
425100	0.000	424500	4.6			252000	2			45671	570
461100	0.000	460500	4.4			277200	0			53307	230
518700	0.000	518100	4.3			338400	0			60650	190
551100	0.000	550500	4.4			363600	0			67699	130
599700	0.000	599100	4.4			424800	0			75335	100
633300	0.000	632700	4.2			450000	2			81944	57
						511200	0			89287	70
						536400	0			100301	42
						597600	1			107350	44
						622800	0			114840	32
						684000	0			121742	23
						770400	0			128497	31
						795600	0			135840	12
						856800	0			143183	13
						882000	0			150232	18
						943200	0			157868	8
						968400	0			165652	12
						1029600	0			173141	25
						1054800	0			215289	3
						1116000	0			257168	0
						1141200	0			285035	3
						1202400	0			344666	3
						1288800	0			372834	0
						1375200	2				
						1461600	0				

t	fag1na	t	fag3mi	t	msmli	225600	13.3	1121100	6.7	t	msmur	432300	1.470
4200	0.00	-65700	0	3300	8.3	232800	13.6	1142700	6.9	77700	0.005	439500	1.500
47400	0.00	87300	1	5100	6.2	240000	13.0	1164300	7.2	79500	0.006	446700	1.530
90600	0.00	172800	0	6900	17.0	247200	13.1	1185900	6.8	80400	0.008	446700	1.570
133800	0.00	257400	0	10500	26.7	249900	13.2	1207500	6.6	81300	0.007	457500	1.250
177000	0.00	345900	0	12300	31.7	254400	13.4	1229100	6.7	84900	0.007	471900	1.050
220200	1.05	439200	0	14100	40.0	261600	12.7	1250700	6.8	86700	0.008	486300	1.140
258900	0.85	607500	1	17700	39.8	271500	12.6	1272300	6.8	88500	0.010	500700	1.210
355200	1.87	781800	1	19500	40.7	278700	13.7	1293900	6.6	93900	0.012	515100	1.260
438900	1.53	965700	1	21300	37.9	285900	13.0	1315500	6.9	98400	0.015	529500	1.410
528000	3.48	1210200	1	24900	35.8	293100	13.0	1337100	6.6	101100	0.014	543900	1.400
614400	2.89	1469100	0	26700	36.7	300300	12.5	1358700	6.7	102000	0.015	558300	1.500
700800	3.47	2083500	3	28500	35.4	307500	12.6	1380300	6.8	105600	0.020	572700	1.420
787200	3.83	2682000	1	32100	32.8	314700	12.1	1401900	6.6	109200	0.021	587100	1.400
873600	3.31	3293100	0	33900	33.5	321900	11.8	1423500	6.8	112800	0.025	605100	1.220
960000	2.07	3800700	1	35700	31.5	329100	11.7	1445100	7.0	116400	0.028	619500	1.450
1017600	2.84			39300	30.0	336300	11.7	1468200	6.4	120000	0.038	648300	1.200
1209600	2.88	t	fag3ur	41100	30.8	341700	11.0	1488300	6.8	127200	0.048	677100	1.160
1472400	0.34	-65700	0.000	42900	29.1	343500	11.4	1531500	6.9	134400	0.053	705900	1.020
2081400	1.34	87300	0.004	46500	28.3	350700	11.5	1574700	6.9	138000	0.055	734700	1.060
2679900	2.82	172800	0.004	48300	27.8	357900	10.8	1617900	6.7	141600	0.062	777900	1.060
3290100	1.89	257400	0.004	50100	27.3	365100	10.8	1661100	8.1	148800	0.078	821100	1.010
3795900	1.48	345900	0.004	53700	25.7	372300	10.8	1704300	7.3	156000	0.085	864300	0.920
		439200	0.005	55500	25.8	379500	11.1	1747500	6.8	163200	0.100	907500	0.910
t	fapz7na	607500	0.002	57300	25.0	386700	11.3	1805700	6.7	170400	0.120	940800	1.050
97500	0.00	781800	0.003	60900	24.3	393900	10.6	1833900	6.8	171900	0.125	962100	1.040
260700	5.27	965700	0.003	62700	23.7	401100	11.0	1914300	7.4	174000	0.120	972300	0.900
442200	125.00	1210200	0.002	64500	23.4	408300	11.6	1920300	6.7	177600	0.150	993900	0.850
785400	54.00	1469100	0.004	68100	23.1	415500	10.7	1973400	7.6	184800	0.160	1015500	0.840
952800	59.00	2083500	0.004	69900	22.8	422700	11.1	2006700	6.8	185700	0.170	1037100	0.830
1214700	4.93	2682000	0.005	71700	22.6	429900	11.1	2083200	7.1	192000	0.185	1058700	0.830
1470900	46.00	3293100	0.004	75300	22.3	437100	10.3	2093100	7.6	199200	0.200	1080300	0.800
2082300	63.00	3800700	0.003	77100	21.9	444300	10.4	2148900	7.4	206400	0.230	1101900	0.770
2684400	64.00			78000	21.6	444300	9.8	2179500	6.5	213600	0.235	1123500	0.780
3299100	34.00			78900	22.5	455100	9.6	2265900	7.6	220800	0.245	1145100	0.780
				82500	21.7	469500	9.4	2352300	7.2	228000	0.305	1166700	0.740
t	fapz3ur			84300	21.2	483900	9.4	2422500	7.0	235200	0.345	1188300	0.740
89700	10.800			86100	21.5	498300	9.6	2438700	7.4	242400	0.375	1209900	0.720
177000	7.140			91500	20.8	512700	9.0	2490900	6.6	249600	0.400	1231500	0.740
273000	3.870			96000	20.0	527100	8.7	2666400	6.6	252300	0.390	1253100	0.750
361500	3.200			98700	19.0	541500	8.4	2667300	6.9	256800	0.490	1274700	0.740
453000	2.450			99600	20.3	555900	8.4	2753700	6.9	264000	0.550	1296300	0.740
619800	0.102			103200	19.2	570300	8.1	3031800	6.5	273900	0.610	1317900	0.710
789600	0.525			106800	19.5	584700	7.8	3206400	6.6	281100	0.650	1339500	0.720
958800	0.155			110400	18.4	595500	7.8	3272100	6.7	288300	0.690	1361100	0.720
1216200	0.080			114000	18.7	602700	8.1	3356700	6.6	295500	0.745	1382700	0.690
1482600	0.780			117600	19.1	617100	7.6	3583500	6.9	302700	0.790	1404300	0.700
2094600	0.490			124800	17.3	645900	7.3	3669900	6.4	309900	0.810	1425900	0.660
2679600	0.825			132000	17.9	674700	7.5	3756300	6.4	317100	0.830	1447500	0.650
3290700	1.132			135600	18.9	679200	7.4	3929100	6.3	324300	0.880	1470600	0.750
				139200	17.7	703500	7.7			331500	0.920	1490700	0.660
t	fapz3mi			146400	16.5	732300	7.1			338700	0.970		
89700	510			153600	17.0	775500	7.2			344100	1.000		
177000	185			160800	16.2	818700	6.9			345900	0.990		
273000	60			168000	15.0	861900	7.5			353100	1.040		
361500	25			169500	15.6	905100	7.1			360300	1.090		
453000	23			171600	16.6	938400	7.2			367500	1.110		
619800	2			175200	15.3	959700	7.0			374700	1.170		
789600	1			182400	15.5	969900	7.3			381900	1.200		
958800	3			183300	15.2	991500	7.3			389100	1.260		
1216200	5			189600	15.7	1013100	7.3			396300	1.280		
1482600	1			196800	15.1	1034700	7.3			403500	1.340		
2094600	4			204000	14.3	1056300	6.8			410700	1.370		
2679600	2			211200	14.8	1077900	7.2			417900	1.420		
3290700	2			218400	14.5	1099500	6.9			425100	1.440		

t	msmmi	357000	1	t	waur	t	re1hur	t	re2hrh	t	xhour	t	remlur	416820	0.231
47400	4	400200	1	59400	0.170	42300	0.010	6300	0.0	81000	1.27	141000	19.084	424020	0.212
49200	1	414600	1	95400	0.222	54900	0.010	68100	0.0	169200	1.35	145620	13.784	431220	0.212
52800	17	443400	1	145800	2.901	62100	0.010	98100	0.0	257400	1.13	146700	14.184	438420	0.180
54600	21	454200	1	181800	5.836	80100	0.010	154800	0.0	338400	14.00	150300	11.584	445620	0.187
56400	18	468600	1	232200	5.618	90900	0.010	184500	0.0	351900	150.00	153900	9.084	452820	0.161
60000	9	483000	2	268200	5.291	136800	0.010	198000	0.0	386400	97.00	157500	7.184	460020	0.148
61800	8	497400	1	318600	4.310	155700	0.010	237600	0.0	421800	215.00	161100	5.884	467220	0.142
63600	12	526200	2	354600	4.092	217500	0.010	270900	0.0	475200	110.00	164700	4.984	474420	0.161
67200	9	540600	2	405000	3.983	247500	0.010	327600	0.0	514800	36.50	168300	4.334	481620	0.135
69000	15	555000	1	441000	3.547	304200	1.780	358200	0.0	585000	42.00	171900	3.884	488820	0.122
70800	13	569400	5	491400	3.438	333900	8.400	414900	3.3	676800	10.00	175500	3.484	496020	0.122
74400	10	583800	2	577800	3.300	347400	9.600	442800	1.2	765000	11.70	179100	3.184	506100	0.212
76200	10	594600	1	685800	2.458	387000	14.500	505800	2.6	861000	6.60	182700	2.784	513000	0.110
77100	22	601800	3	786600	1.617	420300	18.500	528300	2.5	907200	9.70	186300	2.879	520200	0.078
78000	9	616200	1	873000	1.093	477000	23.500	593100	9.5	1033200	6.20	189900	2.675	527400	0.065
81600	5	645000	1	955800	0.976	507600	19.500	613800	0.8	1207800	4.00	193500	2.629	534600	0.052
83400	11	673800	1	1020600	1.119	564300	16.000	779700	1.3	1278000	3.00	197100	2.448	541800	0.078
85200	7	678300	1	1204200	1.484	592200	15.500	1044900	0.3	1289700	4.00	200700	2.402	549000	0.046
90600	6	702600	1	1380600	1.572	655200	8.200					204300	2.425	556200	0.046
95100	4	731400	1	1560600	1.236	677700	7.700					207900	2.198	563400	0.033
97800	3	774600	1	1809000	0.924	742500	4.800					211500	2.107	570600	0.046
98700	4	817800	3	2050200	0.742	763200	2.600					215100	1.993	577800	0.052
102300	4	861000	1	2579400	0.820	929100	0.550					218700	1.879	585000	0.058
105900	7	937500	1	3256200	0.547	1194300	0.025					222300	1.675	592200	0.046
109500	3	1033800	1	4217400	0.443							225900	1.516	600000	0.058
113100	2	1120200	2									229500	1.448	614400	0.033
116700	2	1206600	1									239100	1.243	628800	0.020
123900	5	1314600	2									243180	1.175	643200	0.007
131100	4	1401000	1									246780	1.129	657600	0.026
134700	6	1487400	1									250380	1.039	672000	0.026
138300	12											253980	0.993	686400	0.046
145500	8											257580	0.970	700800	0.020
152700	12											261180	0.902	715200	0.033
159900	9											264780	0.948	729600	0.007
167100	6											268380	0.948	744000	0.026
168600	6											271980	0.857	760200	0.001
170700	7											275580	0.948		
174300	4											279180	0.902		
181500	7											282780	0.993		
182400	4											286380	0.993		
188700	3											289980	1.311		
195900	3											293580	1.334		
203100	5											297180	1.402		
210300	8											300780	1.402		
217500	4											304380	0.948		
224700	3											307980	0.902		
231900	3											311580	0.948		
239100	8											315180	0.970		
246300	2											318780	0.667		
249000	2											322380	0.584		
253500	3											325980	0.475		
260700	4											330420	0.481		
270600	2											333000	0.443		
277800	2											337620	0.443		
285000	1											344820	0.417		
292200	1											352020	0.379		
299400	2											359220	0.353		
306600	1											366420	0.302		
313800	4											373620	0.276		
321000	3											380820	0.296		
328200	1											388020	0.283		
335400	3											395220	0.270		
340800	1											402420	0.251		
342600	1											409620	0.251		

t	be3ur	49020	35.900	117900	5.650	232440	2.360	t	be3li	7920	1550	45420	152	105300	46	223440	21
7200	0.020	49980	34.500	118800	5.950	234000	2.550	1200	2	8100	1510	46380	138	107100	45	225000	20
7800	0.025	50820	33.400	119700	6.110	236040	2.550	1260	7	8280	1460	47220	144	108900	44	227040	19
8400	0.025	51780	32.300	121500	5.590	237600	2.280	1320	21	8460	1430	48180	131	109800	45	228600	20
9000	0.055	52620	31.300	122400	5.790	239640	2.250	1380	94	8640	1380	49020	138	110700	43	230640	19
9600	0.110	53580	30.800	123300	5.560	241200	2.450	1440	218	8820	1340	49980	125	112500	43	232200	20
10200	0.220	54000	27.600	125100	5.280	243240	2.400	1500	378	9000	1290	50820	133	114300	41	234240	19
10800	0.420	54420	31.100	126000	6.070	244800	2.250	1560	550	9600	1210	51780	120	116100	40	235800	19
12000	1.160	55380	29.000	126900	5.740	246840	2.470	1620	720	10200	1130	52200	123	117000	42	237840	19
13200	2.550	56220	29.700	129600	5.090	250440	2.360	1680	840	10800	1030	52620	126	117900	40	239400	19
14400	4.380	57180	27.300	131520	5.780	252000	2.280	1740	910	11400	950	53580	115	119700	39	241440	19
15000	5.610	58020	29.100	133200	4.770	254040	2.370	1800	1000	12000	880	54420	119	121500	38	243000	19
15300	6.210	58980	26.300	135120	5.180	255600	2.350	1860	1000	12600	830	55380	110	123300	38	245040	18
15750	6.860	60780	24.900	136800	4.000			1920	1010	13200	780	56220	114	124200	39	246600	18
16200	6.650	61200	27.200	138720	4.530			1980	1140	13800	730	57180	105	125100	38	248640	18
16620	8.030	61620	25.500	140400	4.530			2040	1240	14400	700	58020	109	126900	37	250200	18
17100	9.190	62580	24.400	142320	4.870			2100	1390	15000	650	58980	101	127800	38	252240	18
17520	9.210	63420	24.200	144000	3.800			2160	1470	15600	630	59400	102	128700	36	255840	18
18000	10.600	64380	23.800	145920	4.530			2220	1520	16200	590	59820	105	130500	35	257400	18
18420	10.800	65220	24.100	147600	3.890			2280	1590	17400	540	60780	97	131400	36	259440	17
18900	12.400	66180	22.900	149520	4.560			2340	1750	18600	470	61620	101	132300	35	261000	17
19320	12.700	67020	23.100	151200	4.210			2400	1870	19800	442	62580	93	135000	35		
20220	14.100	67980	20.700	153120	4.230			2460	2100	20400	426	63420	98	136920	35		
20760	15.900	68400	16.900	156720	4.370			2520	2340	20700	419	64380	89	138600	34		
21120	16.000	68820	19.400	159900	4.340			2580	2470	21150	408	65220	94	140520	34		
21780	18.000	69780	18.200	160320	4.200			2640	2790	21600	397	66180	86	142200	33		
22020	18.100	70620	17.700	162000	3.100			2700	3200	22020	360	66600	87	144120	33		
22710	19.800	71580	17.400	163920	4.160			2760	3340	22500	380	67020	90	145800	32		
22920	19.400	72420	16.900	165600	2.070			2820	3330	22920	358	67980	82	147720	32		
23400	21.300	73380	16.900	167520	4.010			2880	3330	23400	359	68820	87	149400	31		
23820	21.700	74220	16.900	169200	4.040			2940	3270	23820	345	69780	80	151320	31		
24720	22.800	75180	15.800	171120	3.650			3000	3290	24300	346	70620	83	153000	30		
25200	25.400	75600	12.900	172800	3.580			3060	3230	24720	329	71580	77	154920	30		
26520	26.300	76020	15.900	174720	3.350			3120	3200	25620	315	72420	81	156600	29		
27000	27.800	76980	15.500	176400	2.890			3180	3190	26160	314	73380	75	158520	29		
27420	27.000	77820	15.700	178320	3.460			3240	3080	26520	301	73800	75	160200	29		
28320	30.100	78780	15.200	180000	3.730			3300	3070	27180	299	74220	78	162120	28		
28800	29.500	79620	15.200	181920	3.370			3360	3060	27420	289	75180	73	165300	27		
29220	28.200	80580	14.500	183600	3.110			3420	3050	28110	282	76020	75	165720	28		
30120	27.400	81420	15.000	185520	3.190			3480	3030	28320	276	76980	71	167400	27		
30600	26.800	82380	14.400	187200	3.050			3540	3040	28800	273	77820	72	169320	27		
31020	28.400	82800	12.900	189120	3.020			3600	3090	29220	266	78780	68	171000	26		
31920	29.000	84150	11.500	190800	3.380			3780	2970	30120	253	79620	70	172920	26		
32400	29.700	85500	10.800	192720	3.150			3960	2870	30600	252	80580	66	174600	25		
32820	30.600	87300	10.400	194400	3.270			4140	2830	31920	232	81000	67	176520	25		
33720	31.800	89100	10.300	196320	3.010			4320	2740	32400	233	81420	68	178200	25		
34200	30.500	90000	10.800	198000	3.080			4500	2680	32820	224	82380	65	180120	25		
34620	31.000	90900	10.500	199920	3.210			4680	2560	33720	214	83220	66	181800	24		
35520	32.800	92700	9.990	201600	3.050			4860	2510	34200	216	84180	64	183720	25		
36000	31.800	94500	8.880	203520	3.110			5040	2450	34620	207	85020	65	185400	24		
36420	32.100	96300	8.480	205200	3.120			5220	2350	35520	200	85980	62	187320	24		
37320	33.600	97200	8.890	207120	2.810			5400	2290	36000	202	86820	62	189000	24		
37800	28.800	98100	7.560	208800	3.010			5580	2210	36420	192	87780	60	190920	24		
39600	31.400	99900	6.470	210720	3.150			5760	2180	37320	186	88200	61	192600	23		
40020	35.400	101700	7.060	212400	3.250			5940	2100	37800	190	89550	59	196200	23		
40980	37.000	103500	6.770	214320	3.040			6120	2040	38220	180	90900	56	199800	23		
41820	37.300	104400	6.610	216900	2.910			6300	1950	39120	175	92700	54	203400	22		
42780	38.800	105300	5.270	218040	2.890			6480	1920	39600	178	94500	53	207000	22		
43620	38.800	107100	6.030	219600	2.930			6660	1840	40020	170	95400	54	210600	21		
44580	39.500	108900	5.800	221640	2.750			6840	1800	40920	164	96300	51	212520	21		
45420	39.500	110700	5.840	223200	2.620			7020	1750	41400	167	98100	50	214200	21		
46380	39.700	111600	5.870	225240	2.400			7200	1710	41820	158	99900	49	216120	21		
46800	33.300	112500	5.940	226800	2.370			7380	1670	42720	155	101700	48	217800	21		
47220	37.400	114300	5.970	228840	2.470			7560	1620	43200	156	102600	49	219720	20		
48180	35.700	116100	5.670	230400	2.540			7740	1580	45000	149	103500	47	222300	21		



t	be3i	13800	2.0	57600	0.2	t	be3na	7740	63.0	45000	13.9	103500	9.7	t	be3no3	12600	7.5
420	0.2	14400	1.9	58020	0.2	1140	7.9	7920	62.0	45420	14.4	105300	9.7	0	1.0	13200	7.5
480	0.4	15600	1.8	58980	0.1	1200	8.0	8100	61.0	46380	13.4	107100	9.7	300	1.0	14400	6.8
540	14.2	16800	1.7	59820	0.1	1260	8.0	8280	58.0	47220	14.0	108900	9.7	360	1.0	15600	5.9
600	36.5	18000	1.4	60780	0.1	1320	8.5	8460	57.0	48180	12.9	109800	9.9	420	1.4	16800	5.8
660	69.6	18600	1.4	61620	0.1	1380	11.2	8640	56.0	49020	13.7	110700	9.6	480	1.8	18000	4.4
720	146.0	18900	1.4	62580	0.1	1440	15.5	8820	54.0	49980	12.7	112500	9.6	540	43.0	18600	4.9
780	184.0	19350	1.3	63420	0.1	1500	20.6	9000	52.0	50820	13.5	114300	9.6	600	101.0	18900	4.6
840	173.0	19800	1.3	64380	0.1	1560	26.3	9600	50.0	51780	12.4	116100	9.6	660	175.0	19800	5.3
900	152.0	20220	0.6	64800	0.2	1620	31.6	10200	48.0	52200	12.9	117000	9.7	720	328.0	20220	3.6
960	140.0	20700	1.2	65220	0.1	1680	36.0	10800	46.0	52620	13.4	117900	9.6	780	337.0	20700	5.4
1020	134.0	21120	1.1	66180	0.1	1740	37.4	11400	43.0	53580	12.2	119700	9.5	840	462.0	21120	3.0
1080	125.0	21600	1.0	67020	0.1	1800	40.6	12000	41.0	54420	13.1	121500	9.5	900	487.0	21600	3.9
1140	117.0	22020	1.0	67980	0.1	1860	41.0	12600	39.0	55380	12.0	123300	9.5	960	473.0	22020	2.9
1200	110.0	22500	0.9	68820	0.1	1920	44.0	13200	36.7	56220	12.8	124200	9.7	1020	477.0	22500	3.4
1260	104.0	22920	0.9	69780	0.1	1980	47.0	13800	35.0	57180	11.8	126900	9.4	1080	504.0	22920	2.6
1320	98.4	23820	0.8	70620	0.1	2040	50.0	14400	33.9	58020	12.4	127800	10.0	1140	469.0	23820	2.7
1380	92.7	24360	0.8	72000	0.1	2100	55.0	15000	32.1	58980	11.7	128700	9.4	1200	453.0	24360	2.5
1440	86.0	24720	0.7	72420	0.1	2160	59.0	15600	31.3	59400	12.1	130500	9.4	1260	423.0	24720	2.1
1500	83.8	25380	0.7	79200	0.1	2220	58.0	16200	29.9	59820	12.3	131400	9.6	1320	410.0	25380	2.5
1560	76.2	25620	0.7			2280	61.0	17400	27.4	60780	11.5	132300	9.4	1380	375.0	25620	2.5
1620	70.0	26310	0.7			2340	68.0	18600	25.8	61620	12.1	135000	9.6	1440	340.0	26310	2.4
1680	67.1	26520	0.6			2400	72.0	19800	24.5	62580	11.3	136920	9.4	1500	316.0	26520	2.0
1740	64.3	27000	0.6			2460	80.0	20400	23.7	63420	12.0	138600	9.6	1560	296.0	27420	1.9
1800	60.9	27420	0.6			2520	89.0	20700	23.7	64380	11.5	140520	9.3	1620	254.0	28320	1.7
1980	50.2	28320	0.6			2580	94.0	21150	23.1	65220	11.9	142200	9.5	1680	260.0	28800	2.3
2160	42.5	28800	0.6			2640	106.0	21600	22.9	66180	11.2	144120	9.3	1800	257.0	29220	1.6
2340	37.5	30120	0.5			2700	119.0	22020	21.1	66600	11.4	145800	9.5	1980	198.0	30120	1.7
2520	30.1	30600	0.5			2760	125.0	22500	22.1	67020	11.8	147720	9.3	2160	160.0	31020	1.6
2700	27.7	31020	0.5			2820	125.0	22920	20.9	67980	11.2	149400	9.4	2340	141.0	31920	1.9
2880	25.3	31920	0.5			2880	123.0	23400	21.5	68820	11.6	151320	9.3	2520	118.0	32400	2.1
3060	23.1	32400	0.5			2940	122.0	23820	20.4	69780	11.0	153000	9.4	2700	105.0	32820	1.8
3240	21.4	32820	0.4			3000	122.0	24300	21.0	70620	11.5	154920	9.2	2880	88.4	33720	1.6
3420	17.6	33720	0.4			3060	121.0	24720	19.8	71580	10.9	156600	9.4	3060	80.3	35520	1.5
3600	16.8	34200	0.4			3120	120.0	25620	19.2	72420	11.4	158520	9.1	3240	71.8	36000	2.0
3780	16.1	34620	0.4			3180	117.0	26160	20.4	73380	10.9	160200	9.4	3420	57.8	37320	1.2
3960	15.0	35520	0.4			3240	116.0	26520	18.6	73800	11.0	162120	9.1	3600	57.7	39120	1.3
4140	13.8	36000	0.4			3300	116.0	27180	19.2	74220	11.3	165300	9.4	3780	53.1	39600	1.8
4320	11.4	36420	0.3			3360	117.0	27420	18.0	75180	10.8	165720	9.1	3960	49.4	40920	1.2
4500	10.8	37320	0.3			3420	115.0	28110	18.9	76020	11.1	167400	9.3	4140	44.2	43200	1.5
4680	9.9	37800	0.3			3480	116.0	28320	17.8	76980	10.6	169320	9.0	4320	36.5	43620	1.1
4860	9.7	38220	0.3			3540	117.0	28800	18.6	77820	11.0	171000	9.3	4500	37.1	50820	1.1
5040	9.1	39120	0.3			3600	118.0	29220	17.2	78780	10.6	172920	9.1	4680	34.3	57600	1.2
5220	8.6	39600	0.3			3780	113.0	30120	17.0	79620	10.9	174600	9.3	4860	31.5	59820	1.1
5400	8.3	40020	0.3			3960	108.0	30600	17.6	80580	10.5	176520	9.1	5040	27.3	68820	1.1
5580	7.6	40920	0.2			4140	107.0	31920	16.6	81000	10.7	178200	9.3	5220	25.5	72000	1.1
5760	7.1	41400	0.3			4320	104.0	32400	16.9	81420	10.9	180120	9.0	5400	27.0	77820	1.1
5940	6.3	43200	0.3			4500	104.0	32820	16.3	82380	10.5	181800	9.3	5580	26.0	85020	1.0
6120	6.4	43620	0.3			4680	98.0	33720	16.2	83220	10.7	183720	8.9	5760	21.0	86400	1.1
6300	4.4	44580	0.2			4860	97.0	34200	16.0	84180	10.5	185400	9.3	5940	19.9	122400	1.0
6480	6.0	45420	0.3			5040	94.0	34620	15.7	85020	10.6	187320	9.0	6120	21.4	158400	1.0
6660	5.4	46380	0.2			5220	91.0	35520	15.5	85980	10.5	189000	9.3	6300	20.6	208800	1.0
6840	5.1	47220	0.2			5400	87.0	36000	15.8	86820	10.5	190920	9.1	6480	19.6		
7020	4.6	48180	0.2			5580	85.0	36420	15.4	87780	10.3	192600	9.3	6660	16.2		
7200	4.7	49020	0.2			5760	83.0	37320	15.3	88200	10.4	196200	9.3	6840	16.1		
7800	4.2	49980	0.2			5940	80.0	37800	15.4	89550	10.4	199800	9.3	7020	16.9		
8400	3.9	50400	0.2			6120	78.0	38220	15.1	90900	10.2	203400	9.3	7200	15.4		
9000	3.6	50820	0.2			6300	76.0	39120	15.1	92700	10.0	207000	9.3	7800	14.4		
9600	3.2	51780	0.2			6480	74.0	39600	14.8	94500	10.0	210600	9.9	8400	12.5		
10200	3.1	52620	0.2			6660	71.0	40020	14.7	95400	10.2			9000	12.1		
10800	2.8	53580	0.2			6840	69.0	40920	14.3	96300	9.9			9600	10.7		
11400	2.6	54420	0.2			7020	68.0	41400	14.5	98100	9.8			10200	10.3		
12000	2.4	55380	0.1			7200	67.0	41820	14.3	99900	9.8			10800	9.2		
12600	2.3	56220	0.2			7380	65.0	42720	14.1	101700	9.7			11400	9.3		
13200	2.1	57180	0.1			7560	64.0	43200	14.2	102600	10.0			12000	8.2		

t	be3k	21600	3.4	67980	1.7	149520	1.3	t	cr2i	7200	0.3	t	cr2ur	38370	0.083	233220	0.710
0	1.4	22020	3.4	68820	1.6	151200	1.4	300	0.0	7500	0.3	1020	0.002	39270	0.093	239100	0.740
120	1.4	22500	3.3	69780	1.5	153120	1.3	360	0.4	7800	0.3	1620	0.005	41070	0.117	244020	0.720
240	1.4	22920	3.2	70620	1.6	154800	1.4	420	1.9	8100	0.3	1980	0.025	42420	0.148	247620	0.720
360	1.4	23820	3.1	71580	1.5	156720	1.3	480	4.3	8400	0.3	2100	0.014	44100	0.144	253500	0.710
480	2.7	24360	2.9	72000	1.6	158400	1.5	540	6.6	8700	0.3	2220	0.013	46020	0.216	258420	0.670
600	77.0	24720	3.0	72420	1.5	160320	1.3	600	8.4	9000	0.2	2340	0.008	49500	0.217	262020	0.680
660	260.0	25380	2.8	73380	1.5	163500	1.5	660	9.2	9300	0.2	2460	0.019	51300	0.251	267900	0.700
720	293.0	25620	2.8	74220	1.5	163920	1.3	720	9.5	9600	0.2	2580	0.019	53220	0.300	272820	0.690
780	310.0	26310	2.8	75180	1.5	165600	1.4	780	9.1	9900	0.2	2700	0.014	56700	0.350	276420	0.610
840	331.0	26520	2.8	76020	1.5	167520	1.3	840	8.7	10260	0.2	2820	0.012	58500	0.350	282300	0.620
900	339.0	27000	2.8	76980	1.5	169200	1.6	900	7.9	10500	0.2	2940	0.008	60420	0.460	287220	0.640
960	351.0	27420	2.6	77820	1.5	171120	1.3	960	7.1	10800	0.2	3060	0.013	63900	0.440	290820	0.610
1020	356.0	28320	2.6	78780	1.5	172800	1.4	1020	6.3	11100	0.2	3180	0.018	65700	0.500	296700	0.600
1080	358.0	28800	2.5	79200	1.5	174720	1.3	1080	5.7	11400	0.2	3300	0.013	67620	0.550	301620	0.580
1140	337.0	30120	2.4	79620	1.5	176400	1.3	1140	4.8	11700	0.2	3420	0.014	71100	0.510	305220	0.530
1200	330.0	30600	2.4	80580	1.5	178320	1.3	1200	4.3	12600	0.2	3540	0.017	72900	0.520	311100	0.590
1260	307.0	31020	2.5	81420	1.6	180000	1.4	1260	4.1	13500	0.2	3660	0.015	74820	0.550	316020	0.590
1320	281.0	31920	2.3	82380	1.5	181920	1.3	1320	4.0	14400	0.1	3780	0.016	78300	0.630	323220	0.510
1380	266.0	32400	2.3	83220	1.5	183600	1.2	1380	3.9	15300	0.1	3900	0.011	80100	0.620	326820	0.540
1440	242.0	32820	2.3	84180	1.5	185520	1.2	1440	3.5	16200	0.1	4020	0.013	82020	0.760	332700	0.570
1500	225.0	33720	2.3	85020	1.5	187200	1.3	1500	3.3	17100	0.1	4140	0.014	85620	0.780	337620	0.450
1560	213.0	34200	2.3	85980	1.5	189120	1.3	1560	3.2	18000	0.1	4260	0.013	92220	0.870	341220	0.500
1620	195.0	34620	2.3	86400	1.5	190800	1.3	1620	2.9	18900	0.1	4380	0.009	94020	0.890	347100	0.520
1680	186.0	35520	2.2	87750	1.5	192720	1.3	1680	2.8	19800	0.1	4500	0.007	96420	0.860	352020	0.520
1740	177.0	36000	2.2	89100	1.4	194400	1.2	1740	2.7	20700	0.1	4620	0.004	99420	0.930	355620	0.510
1800	170.0	36420	2.1	90900	1.4	196320	1.2	1800	2.6	21600	0.1	4860	0.018	101220	0.950	361500	0.500
1980	137.0	37320	2.2	92700	1.4	198000	1.3	1860	2.5	22500	0.1	5100	0.015	103620	0.970	366420	0.440
2160	111.0	37800	2.1	93600	1.4	199920	1.3	1920	2.4	23400	0.1	5340	0.016	106620	0.900	370020	0.500
2340	96.0	38220	2.5	94500	1.4	201600	1.3	1980	2.2	24300	0.1	5580	0.017	108420	0.930	377220	0.560
2520	91.0	39120	2.0	96300	1.5	203520	1.2	2040	2.1	25200	0.1	5820	0.017	112020	0.930	383100	0.460
2700	73.0	39600	2.0	98100	1.5	205200	1.3	2100	2.1	26100	0.1	6060	0.011	114420	0.780	388020	0.120
2880	63.0	40020	2.0	99900	1.4	207120	1.3	2160	2.0	27000	0.1	6300	0.010	117420	0.930	391620	0.380
3060	58.0	40920	2.0	100800	1.5	208800	1.4	2220	1.9	27900	0.1	6720	0.006	119220	0.950	398820	0.430
3240	53.0	41400	2.0	101700	1.4	210720	1.2	2280	1.8	28800	0.1	7320	0.007	121620	0.900	413220	0.560
3420	46.2	43200	1.9	103500	1.4	212400	1.3	2340	1.8	29700	0.1	7920	0.011	124620	0.960	427620	0.440
3600	43.9	43620	2.1	105300	1.4	214320	1.3	2400	1.7	33300	0.1	8520	0.009	126420	0.970		
4500	21.9	44580	2.0	107100	1.3	216000	1.3	2460	1.7	36900	0.1	9120	0.006	128820	0.960		
5040	28.9	45420	1.9	108000	1.4	217920	1.3	2520	1.5	40500	0.1	9720	0.006	132420	0.970		
5400	19.5	46380	1.9	108900	1.3	220500	1.3	2580	1.6	41700	0.1	10320	0.006	136020	0.940		
6300	14.3	47220	1.9	110700	1.3	221640	1.3	2640	1.6	44100	0.1	10920	0.006	139620	0.970		
6660	14.0	48180	1.8	112500	1.4	223200	1.3	2700	1.5	47700	0.0	11520	0.007	143220	0.950		
7200	11.1	49020	1.9	114300	1.3	225240	1.2	2820	1.4			12180	0.005	146820	0.950		
7800	10.3	49980	1.8	115200	1.5	226800	1.3	2940	1.3			12720	0.006	150420	0.860		
8400	9.1	50400	1.9	116100	1.4	228840	1.4	3060	1.2			13320	0.005	154020	0.810		
9000	8.5	50820	1.9	117900	1.4	230400	1.4	3180	1.0			14520	0.005	157620	0.860		
9600	8.1	51780	1.8	119700	1.3	232440	1.3	3300	1.1			16320	0.007	161220	0.840		
10200	7.6	52620	1.8	121500	1.3	234000	1.4	3420	1.0			18120	0.006	164820	0.870		
10800	7.3	53580	1.7	122400	1.7	236040	1.3	3540	0.9			19920	0.005	168420	0.190		
11400	6.6	54420	1.8	123300	1.3	237600	1.3	3660	0.9			21270	0.520	172020	0.620		
12000	6.2	55380	1.7	125100	1.3	239640	1.2	3780	0.9			22170	0.005	175620	0.930		
12600	5.8	56220	1.8	126000	1.7	241200	1.3	3900	0.8			23070	0.003	179220	0.940		
13200	5.7	57180	1.6	126900	1.3	243240	1.3	4020	0.8			23970	0.004	182820	0.960		
13800	5.3	57600	1.7	128700	1.3	244800	1.3	4140	0.8			24870	0.005	186420	0.950		
14400	5.1	58020	1.7	129600	1.5	246840	1.3	4260	0.7			25770	0.007	190020	0.950		
15600	4.7	58980	1.7	130500	1.3	248400	1.3	4380	0.7			26670	0.008	193620	0.930		
16800	4.5	59820	1.7	133200	1.4	250440	1.2	4500	0.6			27570	0.013	197220	0.950		
18000	4.3	60780	1.7	135120	1.3	254040	1.2	4800	0.6			28470	0.015	200820	0.940		
18600	4.1	61620	1.6	136800	1.5	255600	1.3	5100	0.5			29370	0.018	204420	0.900		
18900	4.1	62580	1.7	138720	1.3	257640	1.2	5400	0.5			30270	0.022	208020	0.870		
19350	3.9	64380	1.6	140400	1.5	259200	1.2	5700	0.4			31170	0.028	211620	0.770		
19800	3.9	64800	1.6	142320	1.3			6000	0.4			32070	0.032	215220	0.760		
20220	3.7	65220	1.6	144000	1.5			6300	0.3			33870	0.044	218820	0.770		
20700	3.7	66180	1.6	145920	1.3			6600	0.3			35220	0.057	224700	0.740		
21120	3.5	67020	1.6	147600	1.5			6900	0.3			36570	0.059	229620	0.760		

t	cr2li	6720	780	36000	73	108000	18	214500	4	t	cr2nap	43980	2.8	249300	0.6
300	0	6840	730	36450	72	109200	15	216000	6	360	59.0	45780	2.5	252900	0.5
600	0	6960	730	37350	70	111000	14	218100	4	480	362.0	47700	2.7	258780	0.8
900	0	7080	710	38250	67	111600	20	219600	6	600	1020.0	51180	2.4	263700	0.4
1200	5	7200	700	39150	65	112800	14	223200	6	720	1680.0	52980	2.2	267300	0.8
1500	32	7500	660	39600	72	114600	14	225480	4	840	1680.0	54900	2.3	273180	0.8
1800	84	7800	650	40050	66	115200	16	226800	6	960	826.0	58380	2.0	278100	0.7
2100	193	8100	620	40950	62	116400	14	230400	5	1080	752.0	60180	2.0	281700	0.4
2400	340	8400	580	41850	60	118200	13	232680	4	1200	557.0	62100	1.9	287580	0.7
2700	500	8700	550	42750	59	118800	14	234000	5	1320	828.0	65580	1.7	292500	0.6
2760	560	9000	520	43200	58	120000	13	237600	5	1440	466.0	67380	1.6	296100	0.6
2820	590	9300	510	44400	55	121800	13	239880	3	1560	406.0	69300	1.6	301980	0.7
2880	620	9600	480	44880	57	122400	14	241200	5	1680	254.0	72780	1.3	306900	0.3
2940	660	9900	450	46680	54	123600	13	244800	5	1800	301.0	74580	1.5	310500	0.5
3000	670	10200	440	46800	52	125400	12	247080	3	1920	264.0	76500	1.3	316380	1.1
3060	690	10500	440	48480	51	126000	14	248400	5	2040	252.0	79980	1.3	323580	0.8
3120	700	10800	420	50280	48	127200	12	252000	5	2160	234.0	81780	1.3	328500	0.5
3180	740	11100	400	50400	70	129000	11	254280	3	2280	215.0	86700	0.9	332100	0.3
3240	790	11400	390	52080	46	129600	13	255600	4	2400	174.0	88500	0.8	337980	0.8
3300	790	11700	370	53880	44	130800	11	259200	4	2520	123.0	90900	1.1	342900	0.5
3360	790	12000	350	54000	44	133200	13	261480	3	2640	115.0	93900	0.8	346500	0.5
3420	830	12300	340	55680	42	135300	11	262800	4	2820	137.0	95700	0.7	352380	0.8
3480	840	12600	340	57480	40	136800	13	266400	4	3060	131.0	98100	1.0	360900	0.3
3540	880	12960	330	57600	39	138900	10	268680	3	3300	130.0	101100	0.7	366780	0.6
3600	890	13200	320	59280	38	140400	13	270000	4	3540	97.0	102900	0.6	371700	0.4
3660	890	13500	310	61080	37	142500	10	273600	4	3780	94.0	105300	0.9	378900	0.4
3720	900	13800	300	61200	35	144000	11	275880	2	4020	82.0	108300	0.6	382500	1.0
3780	930	14100	280	62880	36	146100	9	277200	4	4260	78.0	111900	0.5	388380	0.6
3840	950	14400	270	64680	35	147600	11	280800	4	4500	59.0	113700	0.5	393300	0.4
3900	940	15300	250	64800	33	149700	9	283080	2	5100	58.0	116100	1.0	404100	0.4
3960	970	16200	230	66480	33	151200	11	284400	4	5700	50.0	119100	0.5	418500	0.4
4020	940	17100	207	68280	32	153300	8	288000	3	6300	37.0	120900	0.4	432900	0.5
4080	980	18000	196	68400	31	154800	11	290280	2	6900	36.0	123300	0.6		
4140	1000	18900	183	70080	30	156900	8	291600	3	7500	34.0	126300	0.4		
4200	1000	19800	163	71880	30	158400	10	295200	3	8100	27.0	128100	0.3		
4260	960	20700	152	72000	29	160500	8	297480	2	8700	24.0	132600	0.4		
4320	970	21600	150	73680	29	162000	10	298800	3	9300	25.0	136200	0.4		
4380	980	22050	126	75480	28	164100	7	302400	3	9900	20.0	139800	0.3		
4440	980	22500	145	75600	28	165600	9	304680	2	10500	16.6	143400	0.3		
4500	1000	22950	146	77280	27	167700	7	306000	3	11100	19.0	147000	0.2		
4560	980	23400	131	79080	26	169200	9	309600	3	11700	18.4	150600	0.1		
4620	980	23850	138	79200	25	171300	7	311880	2	13500	13.0	154200	0.1		
4680	970	24300	127	80880	25	172800	9	313200	3	15300	12.9	157800	0.1		
4740	990	24750	131	82680	24	174900	6	316800	2	17100	12.2	161400	0.1		
4800	1000	25200	122	82800	23	176400	8	319080	2	18900	9.5	165000	0.1		
4860	1010	25650	123	84480	24	178500	6	320400	2	19800	9.4	168600	0.1		
4920	1000	26100	117	86400	22	180000	8	324000	2	20700	8.4	172200	0.1		
4980	990	26550	116	87600	22	182100	6	326280	2	21600	7.7	175800	0.6		
5040	980	27000	112	89400	20	183600	8	327600	2	22500	7.6	179400	0.6		
5100	980	27450	110	89880	21	185700	6	331200	2	23400	7.4	183000	0.6		
5160	970	27900	107	90000	21	187200	8	333480	1	24300	6.9	186600	0.7		
5220	970	28350	106	91200	19	189300	6	334800	2	25200	6.4	190200	0.5		
5280	970	28800	104	93000	19	190800	7	338400	2	26100	6.4	193800	0.5		
5340	950	29250	102	93600	20	192900	5	340680	1	27000	6.0	197400	0.5		
5400	950	29700	94	94800	18	194400	7	342000	2	27900	6.1	201000	0.5		
5520	950	30150	96	96600	18	196500	5	345600	2	28800	5.6	204600	0.6		
5640	920	30600	94	97200	19	198000	7	347880	1	29700	5.4	208200	0.5		
5760	880	31050	92	98400	17	200100	5	349200	2	31050	4.7	211800	0.1		
5880	880	31500	91	100200	17	201600	7	355080	1	32850	4.5	215400	0.1		
6000	880	31950	87	100800	19	203700	5	362280	1	33750	3.8	220500	1.0		
6120	870	32400	84	102000	16	205200	7	369480	1	35550	3.6	224100	1.1		
6240	840	32850	84	103800	16	207300	5	376680	1	36900	3.3	229980	1.0		
6360	790	33750	81	104400	18	208800	7	383880	1	38250	3.2	234900	0.8		
6480	790	34650	78	105600	15	210900	4	391080	0	40050	2.9	238500	0.4		
6600	750	35550	75	107400	15	212400	6	41700	3.0	244380	0.7				



t	gh1ur	3840	31.307	t	gh1k	4200	8.3	t	gh1no3	5280	6.1	t	gh1li	t	jali
880	0.053	3960	29.642	1040	1.8	4320	7.9	1220	0.8	5400	6.1	1680	7	420	1
920	0.021	4080	28.532	1060	1.8	4440	7.6	1240	0.9	5520	5.6	1800	22	480	2
960	0.001	4200	29.087	1080	1.9	4560	7.3	1260	1.1	5640	5.4	1920	63	540	7
1000	0.079	4320	28.188	1100	1.9	4680	7.0	1280	1.1	5760	5.2	2040	190	600	61
1040	0.021	4440	27.068	1120	2.0	4800	6.7	1300	1.9	5880	5.1	2160	390	660	169
1080	0.131	4560	25.308	1140	2.0	4920	6.5	1320	2.1	6000	5.1	2280	700	720	278
1100	0.242	4680	22.108	1160	2.1	5040	6.3	1340	2.8	6300	3.9	2400	1080	780	338
1120	0.300	4800	21.788	1180	2.1	5160	6.1	1360	2.9	6600	3.7	2520	1460	840	416
1140	0.586	4920	20.188	1200	2.2	5280	5.9	1380	4.3	6900	3.2	2640	1830	1140	620
1160	0.794	5040	19.868	1220	2.2	5400	5.7	1400	5.3	7200	3.0	2760	2130	1440	710
1180	1.191	5160	18.268	1240	2.3	5520	5.5	1420	6.0	7500	2.5	2880	2400	1740	760
1200	1.749	5280	16.988	1260	2.4	5640	5.3	1440	7.5	8400	1.9	3000	2590	2040	710
1220	2.591	5400	16.028	1280	2.8	5760	5.2	1460	8.3	9300	1.5	3120	2800	2340	650
1240	3.300	5520	16.348	1300	3.1	5880	5.0	1480	10.1	10200	1.3	3240	2800	2640	610
1260	4.037	5640	15.228	1320	3.3	6000	4.8	1500	10.4	11100	1.2	3360	2880	2940	570
1280	5.400	5760	14.588	1340	3.8	6300	4.6	1520	12.5	12000	1.6	3480	2920	3240	560
1300	6.926	5880	13.628	1360	4.2	6600	4.5	1560	15.6	15600	1.5	3600	2920	3540	520
1320	8.452	6000	13.148	1380	4.9	6900	4.2	1620	18.1	19200	1.1	3900	2880	3840	500
1340	10.748	6300	12.028	1400	5.4	7200	3.9	1680	20.5	22800	1.0	4200	2720	4140	520
1360	12.668	6600	11.068	1420	6.0	7500	3.8	1740	21.7	26400	1.2	4500	2560	4440	510
1380	15.388	6900	9.628	1440	6.6	8400	3.3	1800	22.4	30000	1.2	4800	2370	4740	520
1400	18.268	7200	9.869	1460	7.4	9300	3.0	1860	23.0	33600	1.0	5100	2230	5040	510
1420	20.508	7500	8.615	1480	8.1	10200	2.8	1920	23.1	37200	1.0	5400	2060	5340	520
1440	24.028	8400	6.708	1500	8.8	11100	2.6	1980	22.7	40800	1.2	5700	1950	5640	500
1460	27.388	9300	5.182	1520	10.4	12000	2.5	2040	24.0	44400	1.1	6000	1820	5940	570
1480	30.108	10200	4.419	1560	12.6	15600	2.2	2100	22.3	48000	1.2	6300	1700	6240	530
1500	27.977	11100	3.492	1620	14.8	19200	1.9	2160	21.5	51600	1.0	6600	1610	7140	560
1520	34.637	12000	3.165	1680	16.3	22800	1.9	2220	21.1	55200	1.2	6900	1510	8040	670
1560	41.852	15600	2.082	1740	17.6	26400	1.8	2280	22.4	69600	1.1	7200	1410	8940	740
1620	49.622	19200	1.351	1800	18.1	30000	1.8	2340	20.1	84000	1.0	8100	1200	9840	800
1680	55.727	22800	0.996	1860	18.4	84000	1.8	2400	20.0	98400	1.0	9000	1030	10740	780
1740	59.612	26400	0.716	1920	18.3	98400	1.7	2460	21.3	112800	1.0	10800	790	11640	810
1800	61.277	30000	0.528	1980	18.3	170400	1.7	2520	19.4	127200	1.0	12600	680	12540	800
1860	62.387	33600	0.456	2040	17.8			2580	18.6	141600	1.0	14400	610	13440	530
1920	59.612	37200	0.359	2100	17.8			2640	18.4	156000	1.0	16200	540	17040	389
1980	61.832	40800	0.300	2160	17.6			2700	18.2	170400	0.9	18000	446	20640	337
2040	60.167	44400	0.495	2220	17.0			2760	17.5			19800	393	24240	261
2100	59.057	48000	0.268	2280	16.8			2820	16.9			23400	297	31440	221
2160	60.167	51600	0.229	2340	16.5			2880	16.8			27000	223	35040	187
2220	57.392	55200	0.235	2400	16.0			2940	16.3			30600	174	38640	152
2280	56.282	69600	0.131	2460	15.8			3000	15.8			34200	143	42240	141
2340	55.727	84000	0.164	2520	15.5			3060	17.2			37800	116	45840	118
2400	54.617	98400	0.138	2580	15.2			3120	16.3			41400	100	49440	103
2460	48.512	112800	0.047	2640	14.8			3180	14.5			45000	86	53040	97
2520	52.952	127200	0.034	2700	14.5			3240	14.6			48600	74	56640	90
2580	51.287	141600	0.047	2760	14.1			3300	14.1			52200	65	60240	77
2640	50.732	156000	0.027	2820	13.9			3360	14.8			55800	58	63840	72
2700	49.067	170400	0.066	2880	13.5			3420	13.1			59400	52	67440	71
2760	49.622			2940	13.3			3480	13.4			63000	48	71040	65
2820	48.512			3000	13.1			3540	13.8			66600	43	74640	65
2880	46.292			3060	12.8			3600	12.5			70200	40		
2940	45.182			3120	12.4			3720	12.2			73800	37		
3000	44.627			3180	12.2			3840	11.3						
3060	44.072			3240	11.9			3960	11.4						
3120	42.962			3300	11.7			4080	10.6						
3180	42.407			3360	11.5			4200	10.0						
3240	39.632			3420	11.2			4320	9.1						
3300	39.077			3480	11.0			4440	8.7						
3360	38.522			3540	10.6			4560	8.5						
3420	36.857			3600	10.2			4680	8.1						
3480	35.747			3720	9.9			4800	7.6						
3540	35.747			3840	9.5			4920	7.1						
3600	35.192			3960	9.0			5040	6.8						
3720	33.527			4080	8.7			5160	6.5						

t	belna	t	belur	t	belli	t	belno3	t	be2li	59100	174	152700	119	300300	58
13800	17.3	300	0.500	810	8	450	21.67	0	11	59700	174	153600	118	302100	58
17400	16.6	1200	0.500	2610	10	900	22.06	900	12	61500	179	156300	117	303900	58
21000	17.0	2100	4.600	4410	13	1350	22.17	1500	13	62700	182	157200	116	305700	58
24600	16.9	3000	2.900	6210	15	1800	22.86	1800	13	63300	182	159900	115	307500	57
28200	17.2	3900	3.500	8430	17	2250	24.25	3300	14	65100	186	160800	114	309300	57
30900	17.9	4800	1.000	10230	18	2700	26.53	3600	16	66300	183	163500	112	311100	57
37200	19.1	5700	7.000	13830	23	3150	31.65	4500	17	66900	190	164400	111	312900	57
40800	18.7	6600	6.400	17430	30	4500	34.82	5400	19	68700	190	167100	110	314700	56
44400	18.9	7500	6.800	21030	40	7200	39.13	6300	21	70500	192	168000	109	475800	38
48000	18.7	8400	7.600	24630	55	11760	40.45	7200	23	70800	192	171600	107		
51600	18.5	9300	10.300	28230	71	12210	39.88	8100	25	72300	193	174300	106		
55200	18.6	10200	9.100	30930	84	12660	39.31	8700	28	73500	192	175200	104		
58800	18.9	11100	13.700	37230	107	13110	38.76	9000	28	74100	192	178800	103		
62400	18.2	12000	10.800	40830	114	13560	38.02	9900	29	75900	193	181500	101		
66000	18.1	12900	11.400	44430	114	14010	38.11	10800	33	77100	194	182400	100		
69600	18.3	13800	12.600	48030	110	14400	37.93	11700	35	77700	193	186000	99		
73200	18.3	14700	14.800	51630	111	14400	37.22	12600	38	79500	191	188700	97		
75000	18.1	15600	14.000	55230	108	14910	36.40	13500	41	80700	193	189600	96		
79200	18.2	16500	16.100	58830	101	15360	35.74	14400	44	81300	191	193200	95		
82800	18.2	17400	18.300	62430	100	15810	35.91	15300	48	83220	191	195900	94		
86400	18.1	18300	17.400	66030	95	16260	35.81	15900	52	84300	190	196800	91		
90000	18.1	19200	18.200	69630	93	16710	35.74	16200	51	85020	191	200400	90		
93600	18.1	20100	22.000	73230	86	17160	35.66	17100	56	86820	184	203100	89		
97200	18.0	24600	32.600	75030	85	17610	34.73	18000	59	87900	185	204000	88		
100800	17.9	26400	24.200	79230	83	18060	34.65	18900	62	88620	181	207600	87		
104400	17.9	28200	34.300	82830	80	18510	34.32	19800	65	90420	181	210300	86		
108000	17.6	30000	35.300	86430	77	18960	34.32	20700	69	92220	178	211200	85		
111600	17.6	31800	32.100	90030	75	19410	34.00	21600	73	94020	177	213900	85		
115200	17.7	33600	31.500	93630	71	20310	33.28	22500	75	95100	174	217500	85		
118800	17.6	35400	28.800	97230	69	20760	32.41	23100	79	95820	174	221100	82		
122700	17.5	37200	28.000	100830	67	21210	32.88	23400	80	97620	171	224700	80		
127200	17.0	39000	32.500	104430	65	21600	32.88	24300	84	99420	170	228300	80		
130800	17.3	40800	40.000	108030	63	21660	32.41	25200	87	101220	163	230100	79		
134400	17.2	42600	30.500	111630	61	23400	31.50	26100	90	102300	166	231900	79		
138000	17.1	44400	37.500	115230	59	24300	31.50	27000	94	103020	165	233700	78		
141600	17.0	46200	39.000	118830	57	25200	31.80	27900	99	104820	165	235500	77		
145200	17.1	48000	37.500	122730	56	26100	30.91	28800	101	106620	162	237300	77		
148800	16.8	51600	37.500	127230	54	27900	28.98	29700	105	108420	162	239100	76		
152400	16.8	55200	35.500	130830	53	28800	29.33	30300	107	109500	159	242700	74		
156000	16.8	58800	26.000	134430	51	29700	29.12	30600	108	110220	156	244500	74		
159600	16.9	62400	23.000	138030	50	30600	28.98	31500	112	112020	156	246300	73		
163200	16.8	64200	21.000	141630	49	31500	28.64	32400	114	113820	155	248100	73		
166800	16.9	68400	35.000	145230	48	32400	28.98	33300	118	115620	151	249900	72		
170400	16.9	72000	11.000	148830	46	33300	28.37	34200	120	116700	150	251700	72		
174000	16.9	75600	35.500	152430	45	34200	28.50	35100	121	117420	150	253500	71		
177600	16.9	79200	39.500	156030	44	35100	27.90	35400	121	119220	149	255300	71		
181200	16.9	82800	37.000	159630	43	36000	27.63	36900	121	120300	148	257100	70		
192000	16.9	86400	33.000	163230	42	36900	27.70	37500	35	121020	146	258900	69		
202800	16.9	90000	32.000	166830	41	37800	27.50	37800	84	122820	145	260700	68		
213600	16.8	97200	31.000	170430	40	38700	27.30	39900	101	124200	144	262500	68		
224400	16.8	104400	31.000	174030	39	40500	26.66	41700	111	127500	141	266100	67		
		111900	33.500	177630	38	41400	26.28	42300	115	128400	138	267900	66		
		120000	33.000	181230	37	43200	25.97	43500	118	131100	137	269700	65		
		130800	28.000	192030	36	44100	25.91	45000	125	132000	136	273300	64		
		141600	33.000	202830	34	48600	24.68	45300	128	134700	134	275100	64		
		156000	18.000	213630	33	50400	24.56	47100	135	135600	133	276900	64		
		170400	26.000	224430	30	52200	23.88	48780	143	138300	131	280500	63		
		192000	9.000	231630	25	54000	23.21	50700	149	139200	130	284100	62		
		213600	12.000			57600	23.45	51900	155	141900	129	285900	61		
								52500	156	142800	127	287700	60		
								54300	163	145500	126	289500	59		
								55500	167	146400	125	291300	57		
								56100	167	149100	123	294900	57		
								57900	169	150000	121	298500	57		

t	be2na	48900	16.0	128700	15.6	t	be2ur	59100	10.624	152700	14.240	298500	9.280	t	be2no3	48900	21.8
120	15.6	49500	16.1	142020	15.4	0	0.380	59700	11.840	153600	14.080	300300	8.480	120	20.9	50700	21.9
570	15.8	49800	15.9	143400	15.4	900	0.480	61500	12.320	156300	13.760	302100	9.440	570	20.9	52500	21.9
1020	15.6	50700	15.9	146700	15.4	1500	0.440	62700	5.600	157200	14.400	303900	8.160	900	22.2	54300	21.8
1470	15.6	51600	16.2	147600	15.4	1800	0.530	63300	12.800	159900	13.760	305700	9.440	1020	21.8	55200	26.9
1920	15.6	52500	16.1	150300	15.4	3300	0.580	65100	13.120	160800	14.400	307500	8.800	1470	23.8	57300	22.8
2370	15.6	53400	16.1	324900	15.2	3600	0.640	66300	9.600	163500	13.920	309300	9.120	1920	25.8	60900	19.4
2700	15.6	54300	16.2	326700	15.2	4500	0.730	66900	13.600	164400	13.920	311100	7.040	2370	26.9	64500	20.2
2820	15.5	54600	16.2	328500	15.2	5400	0.800	68700	14.400	167100	13.440	312900	8.960	2700	28.4	68100	19.4
3270	15.4	56100	16.2	330300	15.2	6300	0.860	70500	14.400	168000	13.920	314700	8.960	2820	27.9	71700	20.5
3720	15.5	56700	15.9	332100	15.2	7200	0.950	70800	12.320	171600	13.600	475800	6.350	3270	28.6	75300	19.4
4170	15.4	57000	15.8	333900	15.2	8100	1.020	72300	14.560	174300	13.280			3720	29.4	78900	19.1
4500	15.6	59100	15.7	495000	15.1	8700	1.060	73500	13.920	175200	13.760			4500	31.0	82500	19.1
4620	15.3	60900	15.7			9000	1.110	74100	15.200	178800	13.760			6300	33.1	86100	17.9
5070	15.4	61500	15.9			9900	1.300	75900	15.200	181500	12.800			6420	32.2	89700	18.2
5520	15.5	62700	15.8			10800	1.430	77100	14.560	182400	13.280			7620	33.5	93300	17.7
6300	15.7	64200	15.5			11700	1.550	77700	15.680	186000	13.280			8220	33.5	96900	18.0
8100	15.4	64500	16.0			12600	1.750	79500	15.680	188700	12.640			9000	33.1	100620	17.7
8220	15.5	66300	15.7			13500	1.900	80700	15.360	189600	12.800			9900	32.0	104220	17.1
9420	15.6	67980	15.6			14400	2.120	81300	15.360	193200	12.800			10800	32.4	107820	17.1
10020	15.7	71100	15.8			15300	2.320	83220	15.680	195900	12.640			11700	32.4	111420	17.1
10800	15.7	71700	16.0			15900	2.430	84300	15.360	196800	12.640			12600	31.9	115020	16.7
11700	15.7	73500	15.8			16200	2.490	85020	15.360	200400	12.480			13800	31.6	118620	16.0
12600	15.8	74700	15.6			17100	2.270	86820	15.520	203100	12.320			14700	30.9	122220	15.7
13500	15.9	75300	15.9			18000	2.650	87900	15.520	204000	12.320			15600	30.8	125820	16.4
14400	15.8	77100	15.8			18900	2.750	88620	15.840	207600	12.320			16500	30.6	129420	16.2
15600	15.7	78300	15.7			19800	2.967	90420	15.680	210300	11.680			17400	29.6	133020	16.2
16500	15.7	78900	15.7			20700	3.261	92220	16.000	211200	12.000			18300	29.4	136620	15.3
17400	15.7	80700	15.6			21600	3.261	94020	16.000	213900	11.680			18900	29.8	140220	16.4
18300	15.8	81900	15.8			22500	3.391	95100	15.840	217500	11.520			19200	30.6	144900	16.2
19200	15.8	82500	15.8			23100	3.533	95820	16.000	221100	11.520			20700	30.4	148500	15.8
20100	15.7	84300	15.8			23400	3.859	97620	16.000	224700	10.880			21000	29.9	152100	15.6
20700	15.8	85500	15.8			24300	3.717	99420	16.160	228300	11.040			21900	29.6	155700	15.5
21000	15.7	86100	15.8			25200	4.293	101220	16.000	230100	11.360			22800	29.3	159300	15.5
22500	15.9	87900	15.9			26100	3.804	102300	16.160	231900	11.360			23700	28.4	162900	15.1
22800	15.9	89700	15.5			27000	4.370	103020	16.160	233700	11.360			24600	28.2	166500	15.1
23700	15.7	90000	15.5			27900	4.837	104820	16.000	235500	11.200			25500	28.3	170100	14.7
24600	16.0	91500	15.6			28800	5.000	106620	16.000	237300	11.200			26100	27.6	173700	14.6
25500	15.9	92700	15.6			29700	5.272	108420	16.000	239100	11.040			26400	27.5	177300	14.6
26400	15.7	93300	15.7			30300	5.435	109500	15.680	242700	11.040			27300	24.6	180900	14.3
27300	15.8	95100	15.8			30600	5.435	110220	15.520	244500	10.880			28200	26.8	184500	14.5
27900	15.7	96300	15.6			31500	5.707	112020	16.000	246300	10.720			29100	26.5	191700	14.5
28200	16.1	96900	15.7			32400	5.870	113820	15.680	248100	11.040			30000	26.2	198900	14.6
29100	15.9	98700	16.0			33300	6.250	115620	16.000	249900	10.720			30900	25.0	206100	14.6
30000	16.0	99900	15.7			34200	6.359	116700	15.360	251700	10.880			31800	26.3	213300	14.8
30900	16.0	100500	15.9			35100	6.413	117420	15.840	253500	10.720			32700	25.5	220500	14.8
31800	15.9	102420	15.9			35400	6.250	119220	15.840	255300	10.880			33300	25.1	227700	14.6
33600	16.1	103500	15.9			36900	6.413	120300	15.200	257100	9.600			33600	25.4	234900	14.3
34500	15.9	104220	15.9			37500	1.467	121020	15.520	258900	10.880			34500	25.5	242100	14.3
35400	16.0	106020	15.5			37800	3.696	122820	15.520	260700	9.440			35400	25.2	249300	13.6
36300	16.2	107100	15.5			39900	5.489	124200	14.560	262500	10.720			36300	24.7	256500	13.1
37200	16.2	107820	15.5			41700	6.196	127500	15.680	266100	10.560			37200	24.2	263700	13.1
38100	15.9	109620	15.5			42300	4.891	128400	15.040	267900	9.920			38100	24.3	270900	14.0
39000	16.2	111420	15.4			43500	6.739	131100	15.520	269700	10.720			39000	24.1	278100	14.0
39900	16.1	113220	15.4			45000	3.587	132000	14.400	273300	10.400			39900	23.6	285300	13.9
40800	16.0	114300	15.4			45300	7.228	134700	15.520	275100	9.920			40500	23.6	292500	13.9
41700	16.0	115020	15.4			47100	8.152	135600	14.880	276900	10.240			40800	23.3	303300	14.0
42300	16.2	116820	15.4			48780	4.565	138300	15.040	280500	10.240			41700	23.0	324900	13.6
42600	16.3	118620	15.4			50700	9.239	139200	14.080	284100	8.160			42600	22.0	332100	13.6
43500	16.1	120420	15.6			51900	6.902	141900	15.040	285900	9.280			43500	22.5	493200	13.9
44400	16.1	121500	15.6			52500	10.109	142800	14.240	287700	9.600			44400	22.7		
45300	16.0	122220	15.6			54300	10.400	145500	14.880	289500	8.960			45300	22.5		
46200	16.0	124020	15.6			55500	8.320	146400	14.400	291300	9.600			46200	22.6		
47100	16.0	125820	15.6			56100	10.880	149100	14.080	294900	9.440			47100	22.3		
48000	16.0	127620	15.6			57900	11.520	150000	14.720	296700	8.640			47700	19.9		

t	be2i	47700	2.14	189000	0.48
120	0.18	48000	2.18	191700	0.46
570	0.28	48900	2.07	196200	0.38
900	0.53	49800	1.75	198900	0.29
1020	0.88	50700	1.38	203400	0.25
1470	1.30	51600	1.20	206100	0.25
1920	1.73	52500	1.33	210600	0.28
2370	2.08	52800	1.77	213300	0.31
2700	2.31	54300	2.40	217800	0.32
2820	2.52	54900	2.81	220500	0.33
3270	2.78	55200	2.66	225000	0.34
3720	3.14	57300	2.10	227700	0.33
4500	3.51	59100	1.63	231300	0.31
6300	3.67	59700	1.46	234900	0.30
6420	3.70	60900	1.50	238500	0.31
7620	3.87	62400	1.56	242100	0.35
8220	4.14	62700	1.57	245700	0.36
9000	4.30	64500	1.51	249300	0.35
9900	4.23	66180	1.43	252900	0.31
10800	4.03	68100	1.38	256500	0.28
11700	3.94	69300	1.37	260100	0.25
12600	4.04	69900	1.39	263700	0.22
13800	4.12	71700	1.45	267300	0.18
14700	3.98	72900	1.52	270900	0.15
15600	3.70	73500	1.47	274500	0.15
15900	3.48	75300	1.32	278100	0.19
16500	3.44	76500	1.17	283500	0.24
17400	3.58	77100	1.07	285300	0.27
18300	3.76	78900	0.99	290700	0.28
18900	3.80	80100	0.92	294300	0.29
19200	3.68	80700	0.86	297900	0.30
20700	3.56	82500	0.83	301500	0.29
21000	3.49	83700	0.85	305100	0.28
21900	3.41	84300	0.91	306900	0.27
22800	3.38	86100	0.97	308700	0.26
23700	3.31	87900	0.97	315900	0.25
24600	3.03	88200	0.91	319500	0.21
25500	2.74	89700	0.85	323100	0.17
26100	2.86	90900	0.86	326700	0.16
26400	3.31	94500	0.98	330300	0.18
27300	3.59	98100	1.14	332100	0.19
28200	3.43	101700	1.18	493200	0.20
29100	3.03	105300	1.02		
30000	2.68	109620	0.83		
30900	2.48	112500	0.76		
31800	2.46	116820	0.83		
32700	2.50	119700	0.93		
33300	2.55	124020	0.88		
33600	2.65	126900	0.70		
34500	2.76	131220	0.52		
35400	2.73	134100	0.43		
36300	2.63	137700	0.38		
37200	2.61	141600	0.35		
38100	2.66	144900	0.38		
39000	2.67	148500	0.44		
39900	2.61	152100	0.44		
40500	2.51	155700	0.35		
40800	2.37	159300	0.25		
41700	2.17	162900	0.24		
42600	2.03	166500	0.31		
43500	2.02	170100	0.35		
44400	2.07	173700	0.31		
45300	2.10	177300	0.24		
46200	2.08	180900	0.27		
47100	2.08	184500	0.38		

## ANNEXE E

## Tableaux des caractéristiques des courbes de restitution

D = distance en m M = masse injectée en g, ou quantité de microsphères par 100 ml, ou nombre de PFU de bactériophage par ml Q = débit au point de sortie en l/s C0 = concentration initiale en ppb (uranine, rhodamine B, naphthionate, lithium), ou en ppm, ou en microsphères/100 ml, ou en PFU/ml t1 = temps de première arrivée en s CI = concentration de la première arrivée Vmax = vitesse maximale en m/h tm = temps modal en s Cm = concentration modale Vm = vitesse modale en m/h t = temps moyen de séjour en s Vapp = vitesse apparente de transit en m/h th = temps harmonique en s Vmoy = vitesse moyenne de transit en m/h R = taux de restitution en %

## NEBLON / ANTHISNES

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	t1	CI	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
Marsée/galerie Communale 24/12/91	3055	uranine	1987	100,0	0,000	-	-	-	179400	7,120	61,0	-	-	-	-	3,500
Marsée/galerie Communale 27/12/91	3055	lithium	428	100,0	1,300	150900	1,500	73,0	183300	15,700	60,0	249932	44,0	181558	61,0	51,000
Crossée/résurgence Comblain 10/12/88	7200	uranine	2370	270,0	0,020	93600	41,900	277,0	115200	110,900	225,0	168945	153,0	136321	190,0	131,000
Crossée/résurgence Comblain 29/3/89	7200	naphthionate	10000	375,0	0,100	124200	4,200	209,0	158400	340,000	164,0	208822	124,0	182278	142,0	64,000
Vien/résurgence de Comblain	5000	uranine	2018	375,0	0,100	144000	0,120	125,0	201600	44,000	89,0	337500	53,3	245052	73,5	69,000
Anthisnes/résurgence de Comblain	3000	rhodamine B	1033	375,0	0,000	102600	0,400	105,0	131400	20,500	82,0	294828	37,0	172281	63,0	37,000
Crossée/résurgence Comblain 15/8/90	7200	uranine	1008	310,0	0,000	339300	0,670	76,0	422100	38,000	61,0	484326	54,0	470703	55,0	141,000
Crossée/résurgence Comblain 15/8/90	7200	microsphères	9,1x10E11	310,0	0,000	339300	8,000	76,0	422100	405,000	61,0	470171	55,0	462950	56,0	15,000
Crossée/P14 15/8/90	2390	uranine	1008	0,6	0,000	171900	0,007	50,0	200700	0,019	43,0	-	-	-	-	-
P14/résurgence Comblain 15/8/90	2390	microsphères	9,1x10E11	0,6	0,000	171900	3,000	50,0	200700	18,000	43,0	-	-	-	-	-
P14/résurgence Comblain 27/11/91	5000	uranine	509	-	0,000	1,5x10E6	0,002	12,3	1,83x10E6	0,013	9,9	-	-	-	-	-

## SPONTIN

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	t1	CI	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
Agauches pt 1/Duchesse	200	bactériophages	3,6x10E13	4,5	0,000	2202	65,000	327,0	16593	8000,000	43,0	21586	33,3	16029	44,9	1,000
Agauches pt 1/Presbytère	175	bactériophages	3,6x10E13	4,5	0,000	2202	9,000	286,0	31279	30000,000	20,0	26260	23,0	23006	27,4	6,700
Agauches pt 1/Duchesse	200	Li	500	4,5	3,000	4500	3,400	160,0	13500	127,000	53,0	146823	4,9	41141	17,5	8,000
Agauches pt 1/Presbytère	175	Li	500	4,5	3,900	6900	4,100	100,0	17100	17,600	37,0	151811	4,1	52487	12,0	1,100
Agauches pt 2/Duchesse	185	microsphères	4,6x10E11	4,5	0,000	2700	17,000	247,0	6300	32760,000	53,0	86966	6,4	48674	11,5	0,080
Agauches pt 2/Presbytère	160	microsphères	4,6x10E11	4,5	0,000	4500	206,000	128,0	8100	3780,000	71,0	82407	7,0	13953	41,3	0,350
Agauches pt 3/Duchesse	180	uranine	2	4,5	0,000	3300	0,001	196,0	6900	0,030	94,0	12394	52,3	9218	70,3	0,100
Agauches pt 3/Presbytère	155	uranine	2	4,5	0,000	6900	0,001	81,0	10500	0,004	53,0	86966	6,4	48674	11,5	0,350
Agauches pt 4/Duchesse	500	microsphères	4,6x10E11	4,5	0,000	252000	6,000	7,1	252000	6,000	7,1	471255	3,8	366470	4,9	0,010
Agauches pt 4/Presbytère	500	microsphères	4,6x10E11	4,5	0,000	190800	1,000	9,4	252000	2,000	7,1	768384	2,3	449256	4,0	0,004
Forage F1/Breuiljette	900	naphthionate	4925	11,0	0,000	359400	0,200	9,0	532200	3,100	6,1	708433	4,6	652941	5,0	0,270

## FAIROUJLE

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	t1	C1	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
Pz4 / GI	95	naphionate	3000	11,0	0,000	220200	1,050	1,6	787200	3,830	0,4	1.94x10E6	0,2	1.2x10E6	0,3	2,700
Pz4 / Pz7	88	naphionate	3000	-	0,000	260700	5,270	1,2	442200	125,000	0,7	-	-	-	-	-
Pz6 / Pz3	88	urarine	150	-	0,000	-	-	-	89700	10,800	3,5	-	-	-	-	-
Pz6 / Pz3	88	microsphères	4.6x10E11	-	0,000	-	-	-	89700	510,000	3,5	-	-	-	-	-

## MONT-SUR-MARCHIENNE

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	t1	C1	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
PZ2 / puits	50	lithium	357	34,7	6,200	6900	17,000	26,0	19500	40,700	9,2	767964	0,2	93928	1,9	66,000
PZ3 / puits	120	urarine	250	34,7	0,000	88500	0,010	4,9	446700	1,570	1,0	2.08x10E6	0,2	1.1x10E6	0,4	38,000
PZ1 / puits	65	microsphères	4.6x10E11	34,7	0,000	47400	4,000	4,9	54600	21,000	4,3	549678	0,4	209531	1,1	0,227

## WALHORN

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	t1	C1	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
chantoir de Walhorn / source n°3 dans la Gueule	1000	urarine	3000	5,0	0,170	145800	2,900	24,7	181800	5,840	19,8	1.2x10E6	2,9	535658	6,7	0,760

## LA REID

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	t1	C1	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
chantoir de La Reid/ résurgence d'Hestroumont	1700	urarine	460	10,0	0,010	304200	1,780	20,1	477000	23,500	12,8	528198	11,6	497371	12,3	13,900
chantoir de La Reid/ résurgence de Spixhe	3050	urarine	460	7,0	0,010	386100	0,810	28,4	563700	12,400	19,5	628601	17,5	600009	18,3	5,800
perte des égouts de La Reid/ résurgence de Spixhe	1700	rhodamine B	200	10,0	0,000	414900	3,300	14,8	593100	9,500	10,3	613789	10,0	579005	10,6	6,100

## XHORIS

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	t1	C1	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
abîme de Xhoris/résurgence sous-fluviale dans l'Ourthe	3500	urarine	3000	90,0	1,130	338400	14,000	37,2	421800	215,000	29,9	511588	24,6	462725	27,2	100,000

## REMOUCHAMPS

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	t1	C1	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
chantoir de Sécheval / Rubicon	600	urarine	150	149,0	0,000	126980	-	17,0	128780	33,080	16,8	181608	11,9	163550	13,2	96,000

## BERTREE / CRETACE

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	tl	Cl	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
Pz2 / P2	13,70	uranine	50	5,5	0,020	9000	0,055	5,5	46380	39,700	1,1	78516	0,6	52114	1,0	27,000
Pz12 / P2	14,40	Na+	9914	5,5	7,900	1320	8,500	39,3	2760	125,000	18,8	36309	1,4	8741	5,9	79,000
Pz12 / P2	14,40	Li+	333	5,5	0,000	2760	2,000	43,2	2760	3340,000	18,8	36532	1,4	8407	6,2	65,000
Pz10 / P2	6,69	NO3-	6138	5,5	1,000	420	1,400	57,3	1080	504,000	22,3	4369	5,5	1964	12,3	77,000
Pz10 / P2	6,69	K+	4369	5,5	1,210	480	2,700	50,2	1080	358,000	22,3	9511	2,5	1557	15,5	94,000
Pz10 / P2	6,69	I-	1654	5,5	0,000	420	0,200	57,3	780	184,000	30,9	5345	4,5	1608	15,0	92,000

## CRISNEE

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	tl	Cl	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
PR / PE	9,70	I-	616	33,9	0,000	360	0,400	97,0	720	9,500	48,5	7993	4,4	1605	21,8	93,000
PR / PE	9,70	naphthionate	75	33,9	0,000	360	59,000	97,0	720	1680,000	48,5	53012	0,7	2244	15,6	53,000
PZ1 / PE	54,40	uranine	50	33,9	0,000	27570	0,013	7,1	103620	0,970	1,9	219749	0,9	162193	1,2	17,000
PZ2 / PE	47,00	Li+	825	33,9	0,000	1200	5,000	141,0	4860	1010,000	34,8	39396	4,3	9689	17,5	58,000

## GRAND HALLET

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	tl	Cl	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
PZ / PR	19,60	Li+	500	13,0	3,000	1680	7,000	42,0	3480	2920,000	20,3	14688	4,8	7222	9,8	67,000
PZ / PR	19,60	uranine	20	26,8	0,000	1080	0,131	65,3	1860	62,387	37,9	10660	6,6	3746	18,8	34,000
PZ / PR	19,60	K+	1971	26,8	1,700	1040	1,800	67,9	1860	18,400	37,9	11401	6,2	4106	17,2	80,000
PZ / PR	19,60	NO3-	3133	26,8	0,800	1240	0,900	56,9	2040	24,000	34,6	35772	2,0	5735	12,3	81,000

## JANDRAIN

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	tl	Cl	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
P1 / P5	9,60	Li+	333	4,2	1,000	480	2,000	72,0	1740	760,000	19,9	21998	1,6	8573	4,0	23,000
									11640	810,000	3,0					

## BERTREE / LANDENNIEN

Relation	D	Traceur	M	Q	C0	tl	Cl	Vmax	tm	Cm	Vm	t	Vapp	th	Vmoy	R
Pz1 / P1 1er test	15,80	uranine	4	2,8	0,005	2100	0,046	27,1	40800	0,400	1,4	100294	0,6	60677	0,9	4,000
Pz1 / P1 1er test	15,80	Na+	4217	2,8	16,600	28200	17,200	2,0	37200	19,100	1,5	85539	0,7	63532	0,9	12,000
Pz1 / P1 1er test	15,80	Li+	191	2,8	6,000	810	8,000	70,2	44430	114,000	1,3	98643	0,6	61559	0,9	17,000
Pz9 / P1 1er test	4,90	NO3-	3149	2,8	21,670	900	22,000	19,6	11760	40,450	1,5	57600	0,3	12741	1,4	42,000
Pz1 / P1 2ème test	15,80	uranine	100	2,8	0,210	1800	0,530	31,6	99420	16,160	0,6	223135	0,3	138395	0,4	13,000
Pz1 / P1 2ème test	15,80	Li+	333	2,8	10,000	3600	16,000	15,8	77100	194,000	0,7	178657	0,2	98438	0,6	30,000
Pz9 / P1 2ème test	4,90	I-	1530	2,8	0,000	570	0,276	31,0	9000	4,290	2,0	112811	0,2	21038	0,8	60,000
Pz9 / P1 2ème test	4,90	NO3-	3072	2,8	20,900	900	22,200	19,6	8220	33,500	2,2	20158	0,9	11228	1,6	30,000
Pz7 / P1 2ème test	5,00	Na+	4256	2,8	15,100	12600	15,800	1,4	42600	16,300	0,4	126459	0,1	10373	1,7	9,000