



HAL
open science

Eléments pour la gestion de l'aquifère du delta de la Dranse (Haute-Savoie)

Jean Leon

► **To cite this version:**

Jean Leon. Eléments pour la gestion de l'aquifère du delta de la Dranse (Haute-Savoie). Géomorphologie. Université Pierre et Marie Curie, 1983. Français. NNT: . tel-00822181

HAL Id: tel-00822181

<https://theses.hal.science/tel-00822181>

Submitted on 14 May 2013

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

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

GEOLOGIE GRENOBLE UJF



D

050 032621 6

LEON (J.)

ACADÉMIE DE PARIS

UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Mémoires des Sciences de la Terre

83 - 4 1

ELEMENTS POUR LA GESTION DE L'AQUIFERE

DU DELTA DE LA DRANSE (Haute-Savoie)

J. LEON

13

α

13 MAI 1986



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

83 - 4 1

ELEMENTS POUR LA GESTION DE L'AQUIFERE

DU DELTA DE LA DRANSE (Haute-Savoie)

J. LEON

13 MAI 1986

Soutenu le 18 Novembre 1983 devant le Jury composé de :

R. LETOLLE	Président
M. ALBINET	Examineur
B. BLAVOUX	Examineur
M. DRAY	Examineur
P. HUBERT	Rapporteur

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

83-41

UNIVERSITÉ DE BRUXELLES
INSTITUT DE LA LANGUE
DOCUMENTATION
RUE MARIUS D'ARNOUX
P. 38031 COURMAYEUR CEDEX
TEL. 021 27 42 43

à Bernique,

Le vent se lève

Il faut tenter de vivre...

RESUME

Une modélisation de l'aquifère du delta de la Dranse (Haute-Savoie) nous a permis de dégager les conditions d'une organisation rationnelle des prélèvements. Cet aspect hydraulique de la ressource est complété par une estimation des potentialités d'exploitation thermique de l'aquifère.

Pour fournir au gestionnaire une information complète et aisément manipulable, un modèle numérique, de petite taille, a été élaboré. Son principe découle du concept de fonction d'influence.

AVANT-PROPOS

L'étude qui fait l'objet de ce mémoire a été effectuée au Centre de Recherche Géodynamique de Thonon-les-Bains, rattaché à l'Université Pierre et Marie Curie, et au Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris.

Je tiens à remercier ici, tous les membres des équipes de ces deux laboratoires qui, par leur aide, leurs conseils, leurs remarques techniques ou scientifiques ont très largement contribué à l'avancement de mes travaux, à la rédaction et à la mise en forme finale de ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie également les organismes communaux ou régionaux qui ont collaboré à cette étude qui, sans eux, n'aurait pu être menée à bien.

J'associe à ces remerciements, Messieurs les membres du Jury pour leur participation tant au déroulement de ces recherches qu'à la phase ultime de la soutenance.

SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : ASPECT SOCIAL ET NATUREL DE L'AQUIFERE DU DELTA DE LA DRANSE	5
1. ASPECT SOCIAL ET ECONOMIQUE	6
2. MORPHOLOGIE	9
3. GEOLOGIE	10
3.1. Les versants	10
3.2. Le delta de la Dranse	12
3.3. Limites entre les deux formations	13
4. HYDROLOGIE	13
4.1. Carte piézométrique	15
4.2. Limites et fonctionnement	17
- Limite Dranse-aquifère	17
- Limite aquifère-atmosphère	18
- Limite aquifère-lac	18
- Limite aquifère-versants	18
5. CONCLUSION	19
CHAPITRE II : ELEMENTS POUR UNE GESTION DE L'AQUIFERE DU DELTA DE LA DRANSE	20
1. INTRODUCTION	21
2. LE GISEMENT D'EAU	22
2.1. Les entrées du système	22
2.1.1. La Dranse	22
2.1.2. Les précipitations	33

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

	<u>Pages</u>
2.1.3. Les versants	36
A) Informations géochimiques	38
B) Enseignement du modèle	44
2.2. Les sorties du système	44
2.2.1. Le lac	44
2.2.2. Les prélèvements	47
2.3. Les variations du stock	47
2.4. Les paramètres hydrodynamiques	49
2.4.1. Les mesures de terrain	49
A) Les pompages d'essai	49
B) Carte piézométrique	51
C) Calage du modèle	52
D) Remarques sur les champs de paramètres	55
2.5. Analyse succincte des données géochimiques	58
2.6. Cadre d'une gestion rationnelle et globale	64
2.6.1. Synthèse et analyse du bilan actuel	64
2.6.2. Vulnérabilité de la ressource	68
2.6.3. Conditions d'exploitation de la ressource	69
A) Zone 1	69
B) Zone 2	72
C) Zone 3	72
D) Zone 4	72
3. LE GISEMENT D'ENERGIE	76
3.1. Comportement thermique du delta	76
3.2. Exploitation thermique du delta	78
3.3. Potentialités et limites du gisement	78
CHAPITRE III : MINIATURISATION DES MODELES D'ECOULEMENT	84
1. DE L'INTERET D'OUTILS D'AIDE A LA GESTION	85
2. LES OUTILS EXISTANTS	86
2.1. Les outils statiques	87
2.2. Les outils dynamiques	88

	<u>Pages</u>
2.2.1. Principes de base des modèles mathématiques	88
- Modèle boîte noire (modèle physique descriptif)	88
- les modèles physiques	89
2.2.2. Pratique des modèles à discrétisation spatiale	90
- Formalisation	91
- Calage	93
- Exploitation	94
2.3. Conclusion	94
3. LES FONCTIONS D'INFLUENCE	96
3.1. Qu'est-ce qu'une fonction d'influence ?	96
3.2. Propriétés de la matrice d'influence	99
3.3. Conclusion	100
4. ESSAIS POUR UN OUTIL D'AIDE A LA GESTION	101
4.1. Méthode de calcul	101
4.1.1. Approximations spatiales	101
4.1.2. Approximations temporelles	104
a) formulation de l'expression analytique	105
b) Procédure de calage	107
c) Nature de la méthode	108
4.1.3. Calcul des rabattements	109
4.2. Les procédures d'entrée-sortie	109
4.2.1. Transparence de la procédure de calcul	110
4.2.2. Langage adapté	110
4.3. Organisation générale du logiciel	110
4.4. Application à l'aquifère de Camlibel	112
4.4.1. Exemple d'exploitation	114
5. APPLICATION A L'AQUIFERE DU DELTA DE LA DRANSE	119
5.1. Présentation du logiciel adapté au delta de la Dranse	119
5.2. Exemples d'exploitation	121
6. SYNTHESE ET LIMITES DES CAPACITES DU LOGICIEL	124
CONCLUSION	126
BIBLIOGRAPHIE	130
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u>	
Figure 1 : Localisation géographique du delta de la Dranse	4
<u>CHAPITRE I</u>	
Figure 2 : Emplacement des principales activités socio-économiques	7
Figure 3 : Morphologie de la région du delta de la Dranse	3
Figure 4 : Schéma géologique de la région du delta de la Dranse	11
Figure 5 : Coupes géologiques Nord-Sud du delta et des versants	14
Figure 6 : Carte piézométrique du 22 Juin 1982	16
Figure 7 : Répartition des points de mesure des potentiels	16
Figure 8 : Schéma de fonctionnement de l'aquifère	17
<u>CHAPITRE II</u>	
Figure 9 : Distribution des débits de perte de mesure de la Dranse en fonction des débits de la Dranse	24
Figure 10 : Relation entre la pression hydraulique et la perméabilité relative	25
Figure 11 : Schéma de l'implantation du piézomètre du pont Belley	25
Figure 12 : Schéma du fonctionnement d'un drain dans le programme Newsam	26
Figure 13 : Profil en long de la Dranse	27
Figure 14 : Régression linéaire entre les hauteurs d'eau au pont Belley et les hauteurs d'eau à Bioge	29
Figure 15 : Historique des potentiels observés et calculés, sans débit limite au point Amphion Limni	30
Figure 16 : Historique des potentiels de la Dranse	30
Figure 17 : Historique des potentiels observés et calculés avec débit limite au point Amphion Limni	32
Figure 18 : Débits calculés de perte de la Dranse	32

Figure 19 : Historique de l'infiltration	37
Figure 19bis : Historique des précipitations (Juin 81-Juin 82)	37
Figure 20 : Répartition des valeurs du support Mg/Ca	39
Figure 21 : Evolution dans le temps du rapport Mg/Ca en différents points	40
Figure 22 : Evolution du rapport Mg/Ca en fonction de la distance à la Dranse	40
Figure 23 : Lieux des points de mesure Mg/Ca situés hors du delta	42
Figure 24 : Courbes de rabattement calculées en différents points suite à une injection en limite Sud (rive droite)	45
Figure 25 : Historique du débit de perte de l'aquifère vers le lac	45
Figure 26 : Lieu des pompages les plus importants	48
Figure 27 : Historique de l'évolution du stock d'eau dans le delta	48
Figure 28 : Lieu des pompages d'essais	50
Figure 29 : Carte piézométrique calculée et mesurée le 22 Juin 1981	53
Figure 30 : Répartition spatiale des transmissivités	53
Figure 31 : Répartition spatiale des porosités	56
Figure 32 : Historique des potentiels observés et calculés avec une porosité dix fois plus faible au point Amphion Limni	56
Figure 33 : Arrangements des corps sédimentaires dans une formation deltaïque	57
Figure 34 : Historique de la concentration en Cl^- en différents points	59
Figure 35 : Historique de la concentration en NO_3^- en différents points	61
Figure 36 : Historique des précipitations (Décembre 81-Décembre 82)	61
Figure 37 : Secteurs du delta affectés par une pollution notable des eaux souterraines	62
Figure 38 : Propagation de la pollution induite par la décharge	63
Figure 39 : Bilan calculé	65
Figure 40 : Rabattement spécifique	70
Figure 41 : Limites géographiques de différentes zones d'exploitation	71
Figure 42 : Bilan schématique par zone	73
Figure 43 : Exemple de surexploitation	74
Figure 44 : Carte des températures	77
Figure 45 : Maillage élémentaire	91
Figure 46 : Prélèvement et leur influence	98

Figure 47 : Fonctions d'influence	105
Figure 48 : Aquifère captif en liaison hydraulique avec un drain- Variation brusque de charge	106
Figure 49 : Organisation générale du logiciel	111
Figure 50 : Histogramme des écarts après optimisation	113
Figure 51 : Histogramme cumulation des écarts après optimisation	113
Figure 52 : Image de l'écran après introduction des données de pompage	115
Figure 53 : Image de l'écran après introduction des lieux d'observation	115
Figure 54 : Image de l'écran après sortie des résultats	116
Figure 55 : Liste des résultats édités par une imprimante	116
Figure 56 : Répartition des écarts absolus entre le calcul par le logiciel Gamme et le programme Newsam en fonction des rabattements	118
Figure 57 : Répartition des mailles de décision sur le delta de la Dranse	120
Figure 58 : Quelques fonctions d'influence	120
Figure 59 : Image écran de l'introduction des données de pompage (simulation 1)	122
Figure 60 : Image écran des résultats (simulation 1)	122
Figure 61 : Image écran de l'introduction des données de pompage (simulation 1)	123
Figure 62 : Image écran des résultats (simulation 2)	123

LISTE DES TABLEAUX

Pages

CHAPITRE II

Tableau 1	: Dates et valeurs des mesures de débit effectuées simultanément en amont et en aval du delta	24
Tableau 2	: Valeurs de lames d'eau mensuelles infiltrées (calculées)	34
Tableau 3	: Valeurs de lames d'eau mensuelles infiltrées (estimées)	35
Tableau 4	: Analyses chimiques partielles (Mg^{++} , Ca^{++} , SO_4^{--}) et rapports Mg/Ca mesurés sur des eaux prélevées aux abords du delta	42
Tableau 5	: Résultats de l'application de l'équation de mélanges avec un taux de mélange variable	42
Tableau 6	: Lieu et valeur des débits prélevés dans l'aquifère	48
Tableau 7	: Résultats de l'interprétation de pompages d'essais	50
Tableau 8	: Bilan hydrique calculé de l'aquifère (22 Juin 1981)	54
Tableau 9	: Bilan hydrique calculé de l'aquifère de Juin 1981 à Juin 1982	66
Tableau 10	: Résultats de quelques calculs économiques concernant une exploitation thermique de l'aquifère	81

CHAPITRE III

Tableau 11	: Rabattements calculés par le modèle Newsam et le modèle Gamme pour un scénario de prélèvements identique, en régime permanent	117
------------	---	-----

UNIVERSITY OF
MICHIGAN
LIBRARY
ANN ARBOR, MICHIGAN
48106-1000

INTRODUCTION

Les eaux souterraines couvrent en France 18 % de la demande en eau domestique ou industrielle ; les statistiques européennes font état d'une couverture moyenne de 29 %, elle atteint 39 % aux Etats-Unis. Il est donc vraisemblable qu'en France, les prélèvements d'eau dans les gisements souterrains se développent ces prochaines années. Cette orientation ne serait pas à rattacher à une croissance globale de la demande en eau mais plutôt à un basculement des prélèvements des eaux de surface vers les eaux souterraines. Les gisements souterrains offrent en effet une meilleure protection contre les pollutions, accidentelles ou non, que les eaux de surface qui fournissent pourtant 82 % des volumes d'eau utilisés en France. De surcroît, le prélèvement sur le lieu même de l'utilisation est un des autres avantages non négligeable des eaux souterraines.

Cependant, qu'il y ait ou non augmentation du volume des prélèvements en eau souterraine, il est aujourd'hui généralement admis que cette exploitation doit se faire dans le cadre d'une gestion rationnelle de chaque gisement. De cette gestion et de son efficacité dépendent la pérennité de la ressource et la possibilité d'extension des prélèvements. Les aquifères, et notamment l'aquifère peu profond qui nous intéresse ici sont des ressources naturelles et renouvelables, mais le taux et les processus de ce renouvellement varient beaucoup d'un système à l'autre, ainsi que les réserves propres à chaque gisement. Il convient donc d'étudier et de reconnaître précisément ces gisements afin de quantifier les différents termes de leur bilan ainsi que les caractéristiques physiques de leur matrice et la nature physico-chimique des eaux qu'ils renferment. Ensuite, pourra être défini un cadre précis pour une gestion éclairée et globale de chaque gisement exploité, ou en voie de l'être. La mise en oeuvre de cette gestion est confiée à des organismes régionaux. Une connaissance du gisement leur est fournie par les hydrogéologues sous la forme de rapports et de cartes condensant les informations recueillies sur le terrain, leur synthèse et leur analyse. Ces outils, sources d'éléments de décision, permettent aux décideurs d'orienter les exploitants vers une organisation rationnelle des prélèvements visant à conserver, voire améliorer les capacités de la ressource.

Notre étude, s'inscrivant dans ce cadre général de reconnaissance et de gestion des aquifères, peut être scindée en deux volets complémentaires.

Le premier volet consiste en une reconnaissance du delta de la Dranse situé sur la rive française du lac Léman entre les agglomérations de Thonon et d'Evian (figure 1). Cette reconnaissance fut déjà amorcée par Dray M. (1970) et

poursuivie par Poncet C. (1977). Notre approche, plus quantitative que celle de nos prédécesseurs, a néanmoins largement utilisé les résultats qu'ils avaient obtenus. Elle a porté à la fois sur les aspects hydrauliques et les aspects énergétiques de la ressource. La modélisation de l'aquifère nous a permis de vérifier la cohérence des données et des hypothèses que nous avons posées ou que MM. Dray et Poncet avaient formulées. De cette étude, nous avons tenté de dégager le cadre d'une gestion quantitative et globale de l'aquifère du delta de la Dranse.

Le second volet de notre étude, plus général avait pour objectif de rechercher un type d'outil pour la gestion locale des aquifères, dont la capacité de traitement de l'information soient comparables à celles des modèles numériques actuels. De plus, il devait être aisément utilisable et adaptable aux micro-ordinateurs peu onéreux et largement répandus. Le principe du modèle développé dans cette optique, repose sur la notion de fonction d'influence. La linéarité des équations décrivant les transferts de pression en milieu poreux permet d'écrire que la résultante en un point des influences d'un ensemble de prélèvements est égale à la somme de ces influences. A partir des informations extraites d'un modèle numérique maillé, nous avons optimisé une expression analytique, fonction du temps et du débit pompé, traduisant les rabattements en un point du gisement provoqué par un prélèvement en un autre point. Ce modèle fut concrétisé par un programme informatique. Une application de cet outil de gestion à l'aquifère du delta de la Dranse et un exemple d'utilisation, ont permis une synthèse des connaissances et des recherches effectuées durant notre étude.

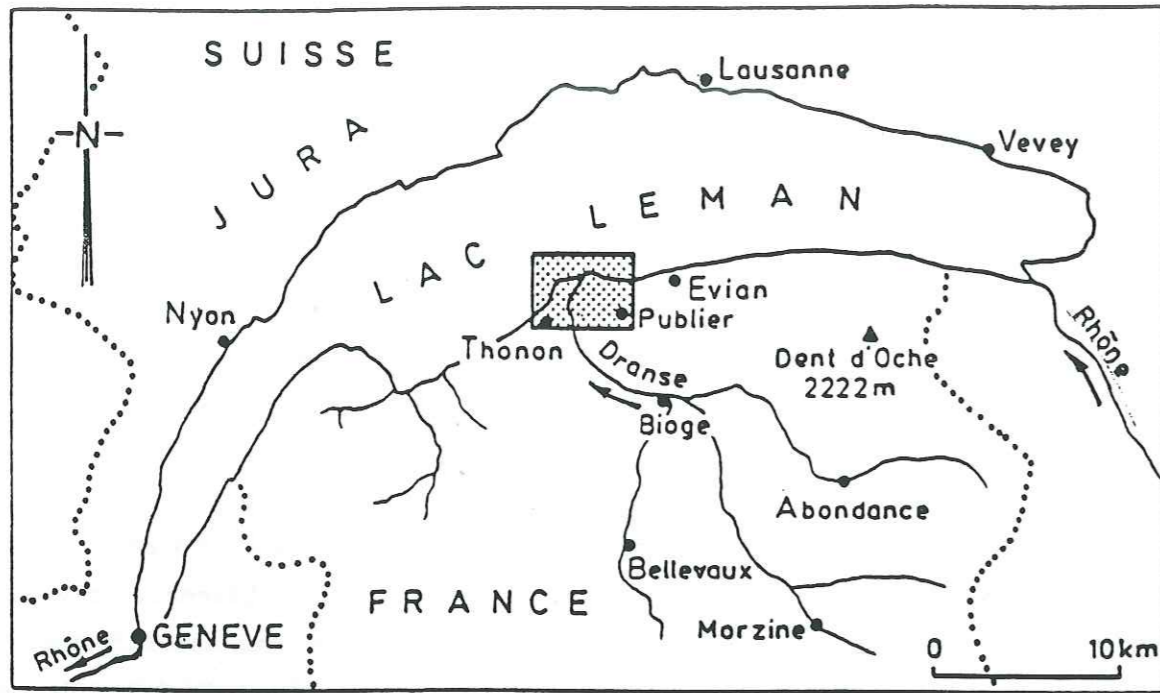


Figure 1

Situation géographique du delta de la Dranse (Haute-Savoie).

CHAPITRE 1

ASPECT SOCIAL ET NATUREL DE L'AQUIFERE DU DELTA DE LA DRANSE

1. ASPECT SOCIAL

Un puits monumental présent dans la cour du château de Ripaille témoigne d'une exploitation déjà ancienne de l'eau souterraine du delta de la Dranse.

Aujourd'hui, de nombreuses usines se sont implantées sur les zones industrielles du delta. Ce sont souvent, comme les papeteries Braunstein, des unités de production ayant une forte consommation d'eau. Le pompage dans l'aquifère a souvent été préféré à un pompage dans le lac pour des raisons de coût de transport, l'eau étant disponible sur le lieu même de l'utilisation, pour la stabilité des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines, la faible turbidité et l'absence de micro-organisme.

Quatre usines principales, employant au total plus d'un millier de personnes, sont réparties sur les deux rives (figure 2) :

- Thomson C.S.F. (rive gauche)
- Fonderies du Léman (rive gauche)
- S.A.E.M.E. (rive droite)
- Braunstein (rive droite)

D'autres entreprises sont également implantées dans le delta mais nous n'avons retenu que celles dont la consommation en eau était particulièrement importante. L'eau est utilisée soit comme matière première, soit comme liquide caloporteur pour le refroidissement de machines, soit comme agent de nettoyage par mise en suspension et évacuation de matières indésirables.

L'eau destinée à la consommation domestique est pompée principalement par les services des eaux des communes de Publier et de Thonon. Elle intervient pour une part non négligeable dans l'alimentation de ces communes et de quelques agglomérations limitrophes. Ainsi 50 % des 2.10^6 mètres cube distribués dans la commune de Publier en 1982 provenait de l'aquifère du delta de la Dranse. A Thonon, cette proportion atteignait à la même époque 10 % des 9.10^6 mètres cube distribués, le puits étant essentiellement mis à contribution pour faire face au surcroît de consommation estivale. Ces chiffres sont des valeurs moyennes annuelles. En période de sécheresse, ils peuvent être sensiblement plus élevés, lorsque les autres sources d'alimentation (souvent superficielles) du réseau viennent à diminuer voire à tarir. Remarquons que l'eau du delta de la Dranse est distribuée jusqu'à ce jour sans autre traitement que ceux imposés par le stockage et le transport de l'eau.

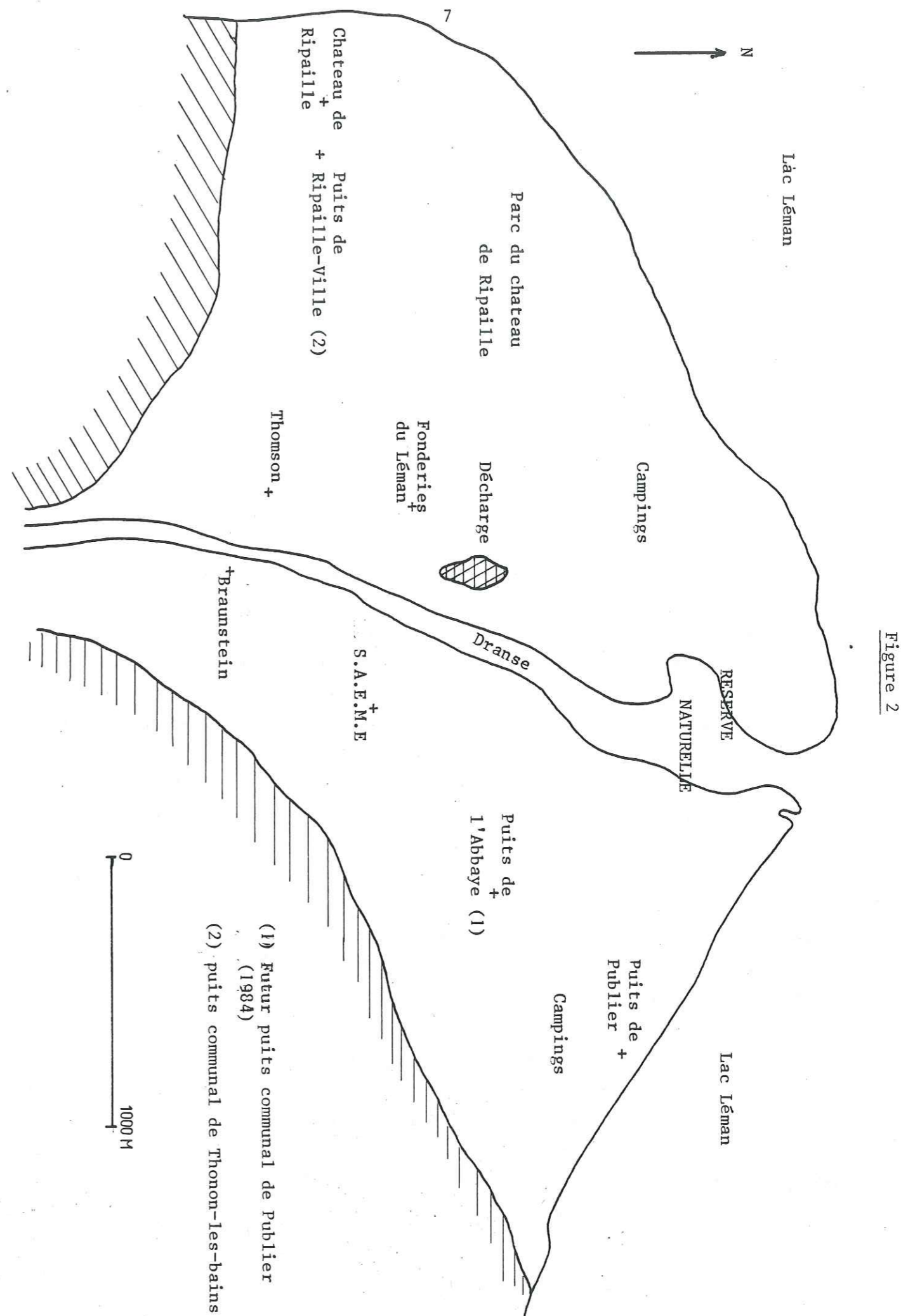


Figure 2

Quelques exploitations particulières existent également là où la surface piézométrique de la nappe est peu profonde. Ces puits, assez répandus jusque dans les années soixante (Dray M., 1970) ont souvent été bouchés lors de la mise en place du réseau d'adduction d'eau. D'autres ont été utilisés comme fosses septiques (Poncet C., 1977) montrant la nécessité d'une sensibilisation de la population aux problèmes de conservation de la ressource en eau. Aujourd'hui d'autres puits sont exploités pour l'arrosage ou pour l'alimentation de pompes à chaleur eau-eau utilisées pour le chauffage de pavillons.

Le delta de la Dranse est également le lieu d'activités très diverses telles que l'agriculture (pâturage, champs), l'exploitation de gravières ou le tourisme. La partie aval du delta constitue depuis 1982 une réserve naturelle et, on peut également noter la présence de la décharge d'ordures ménagères des communes du Bas-Chablais, implantée en bordure de la Dranse.

Ces différentes exploitations du delta de la Dranse ne peuvent être considérées indépendamment. Les interactions entre ces activités ne sont pas toujours sans conséquence quant à la conservation des potentialités d'exploitation. Ainsi, les fumées et les odeurs émanant de la décharge peuvent porter atteinte à l'intérêt touristique du delta, comme le prélèvement de graviers dans une réserve naturelle détériore le cadre et les lieux de reproduction de nombreuses espèces d'oiseaux. C. Poncet (1977) a également montré l'influence néfaste de la décharge sur les caractéristiques physico-chimiques de l'aquifère. On peut également relever l'influence générale des pratiques culturales, labours et épandages d'engrais sur les taux de nitrates dans la nappe phréatique (Dutriaux M.C., 1980).

Dans le cadre de l'exploitation de l'eau souterraine, les interactions entre plusieurs ouvrages sont également évidentes : deux pompages proches s'influenceront mutuellement, les réinjections d'eau froide en sortie de pompes à chaleur détériorent en aval les caractéristiques thermiques de l'aquifère.

Il apparaît donc que le delta de la Dranse occupe dans la vie sociale régionale une place importante. Une gestion de l'aquifère, une information des exploitants et des utilisateurs du gisement ne sauraient négliger les interactions réelles ou potentielles entre les différents ouvrages et avec les autres types d'exploitations ayant lieu sur le delta de la Dranse.

2. MORPHOLOGIE

La morphologie du paysage régional est structurée autour de trois éléments déterminants (figure 3) :

- la vallée de la Dranse,
- les versants,
- le delta de la Dranse.

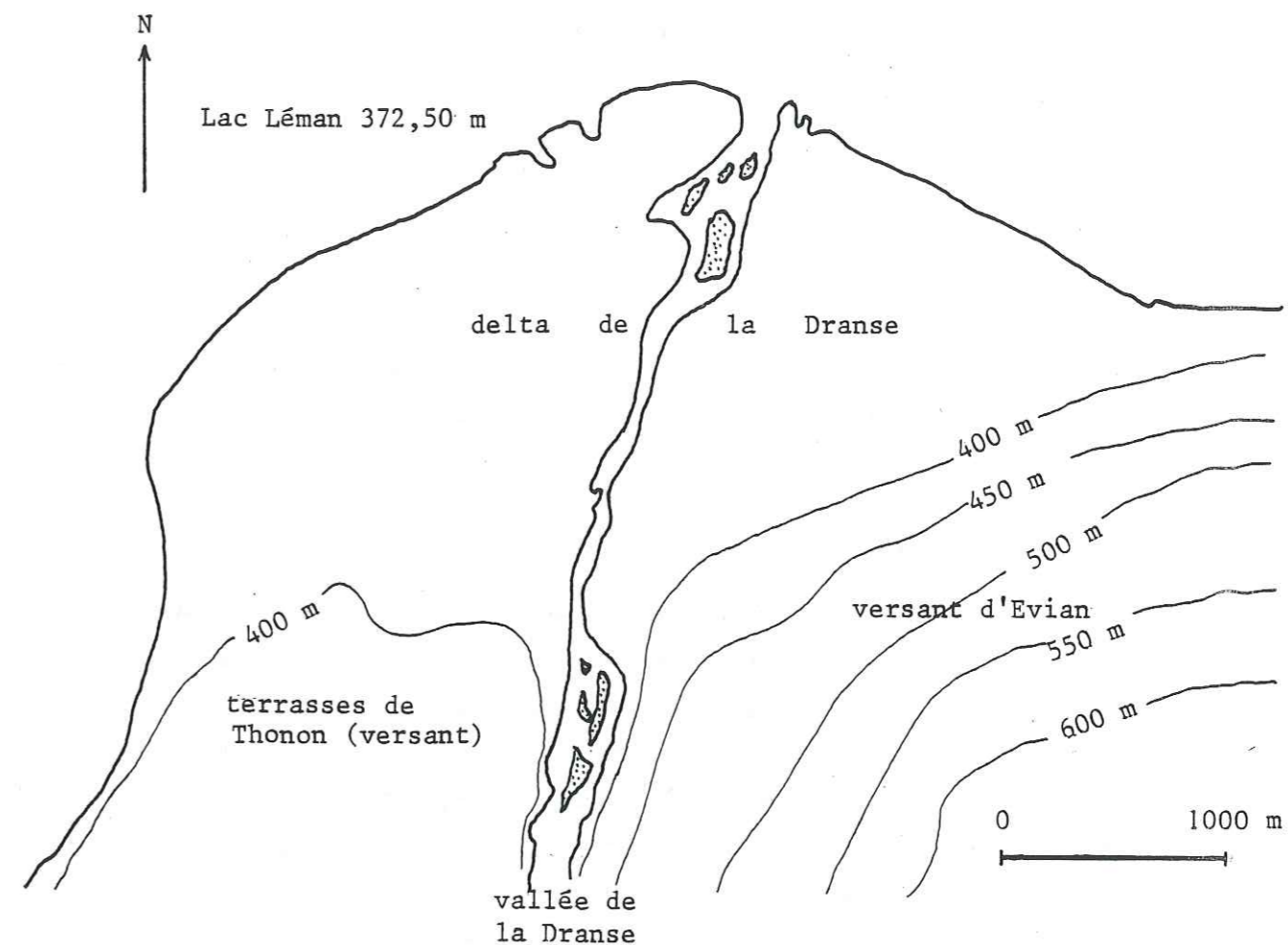


Figure 3

La vallée de la Dranse orientée Sud-Nord partage les versants en deux parties morphologiquement distinctes :

- Le versant d'Evian en rive droite est caractérisé par une pente régulière descendant du plateau de Vinzier (700 m) jusqu'au delta de la Dranse. La limite entre ces deux unités est marquée par une rupture de pente très nette dans le paysage à une altitude d'environ 400 mètres.

- Les terrasses de Thonon en rive gauche forment une série de marches descendant en escalier depuis le Nord vers le Sud. Le delta de la Dranse apparaît sur cette rive comme la dernière et la plus basse de ces marches.

A la base des versants, le delta de la Dranse est donc caractérisé par une vaste étendue plane ou subplane, dont la faible pente est orientée selon une direction Dranse-lac. Les cotes altimétriques augmentent depuis les rives du lac jusqu'aux berges de la Dranse. Une observation plus précise permet cependant de remarquer que la rive gauche est légèrement plus élevée que la droite avec quelques petites ruptures de pente délimitant des terrasses d'altitudes peu différentes.

3. GEOLOGIE

Cette étude partielle porte à la fois sur le delta de la Dranse, sur la nature des versants ainsi que sur le raccordement entre ces deux types de formations. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux terrains quaternaires qui forment la matrice des aquifères locaux (figure 4).

3.1. Les versants

La puissance maximale des formations quaternaires observées est d'environ 400 mètres au sondage des Tours (figure 4). La géologie de ces formations est très complexe dans le détail. Néanmoins, à petite échelle et dans une optique hydrogéologique, deux unités sédimentologiques peuvent être distinguées :

- Des niveaux à argiles dominantes, comportant des fractions sableuses et graveleuses non négligeables. D'origine glaciaire, ces niveaux s'apparentent aux moraines.
- Des niveaux à sables dominants, comportant des horizons argileux. Génétiquement liés aux périodes interglaciaires, ce sont des dépôts lacustres, deltaïques, fluviaux ou torrentiels, ils sont regroupés sous le terme fluvioglaciaire.

La superposition de ces deux unités forme une séquence (argile-sable) qui se répète entre deux et cinq fois suivant les sondages et les coupes naturelles considérés (Blavoux, 1971, Dray, 1971, Vial, 1976). Cette alternance est le reflet de la succession des périodes glaciaires et interglaciaires au cours du quaternaire.

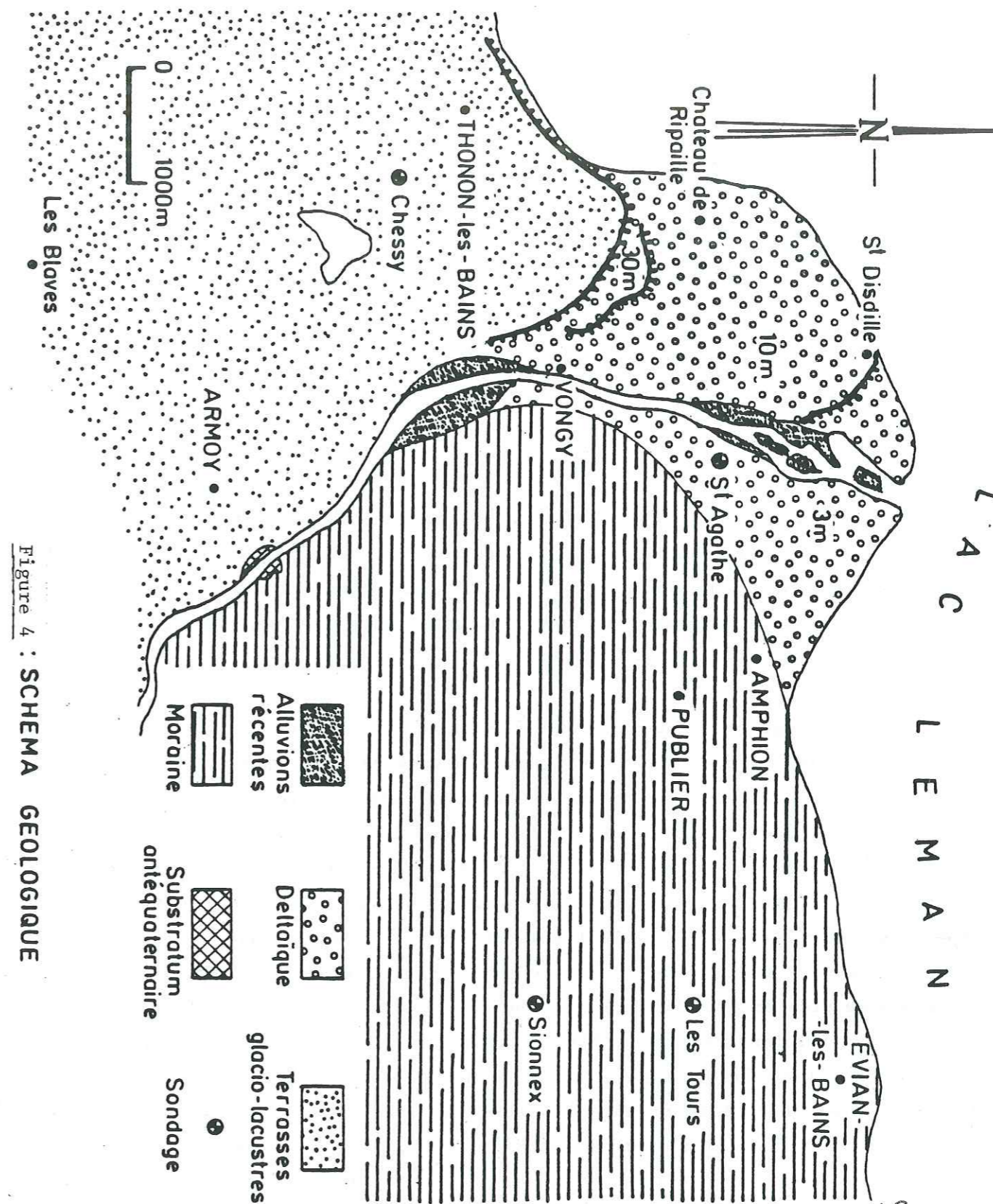


Figure 4 : SCHEMA GEOLOGIQUE

Schématiquement, le processus ayant donné naissance aux terrains quaternaires des versants est le suivant : lors d'une période froide, le glacier du Rhône occupant la dépression Lémanique rabote en certains endroits des formations antérieures et dépose en d'autres des moraines. A cette période froide fait suite une période plus chaude provoquant la fonte des neiges et des glaces. Ainsi se développent des torrents et des lacs où sédimentent les unités fluvioglaciaires. Notons que la morphologie en terrasses du versant de Thonon est liée (Favre, 1867, Gagnelin, 1937) à des dépôts lacustres latéraux au glacier rhodanien, alimentés par un cours d'eau apportant des quantités importantes de matériel détritique et empruntant vraisemblablement le cours actuel de la Dranse.

3.2. Le delta de la Dranse

La puissance de la série quaternaire a été reconnue au forage de Sainte-Agathe où elle atteint 80 mètres et repose sur une molasse tertiaire. Des études géophysiques (CPGF, 1969, BRGM, 1970) concernant uniquement la rive droite ont montré un approfondissement du toit du substratum antéquaternaire du Sud vers le Nord, atteignant vraisemblablement plus de 150 mètres sur la rive la plus septentrionale du delta. L'épaisseur de la série quaternaire est donc comprise entre 50 et 150 mètres.

Au forage de Sainte-Agathe (Sivertz, 1974), le quaternaire est purement deltaïque sur les 64 premiers mètres, les 6 mètres restant étant constitués d'une séquence représentative des versants (moraine-fluvioglaciaire-moraine) (figure 5). Les dépôts deltaïques se distinguent des dépôts fluvioglaciaires par une proportion d'éléments grossiers nettement plus importante associée à une extension horizontale et verticale beaucoup plus grande. La structure et la granulométrie de ces dépôts sont dominées par la présence de chenaux où se sont déposés des sédiments grossiers dans l'axe du chenal, là où le courant est important, passant à des sédiments de plus en plus fins vers les bords suivant une dynamique décroissante du milieu. Parallèlement des zones d'eau stagnante (mares, lacs) sont le lieu d'une sédimentation très fine, argileuse. A l'échelle décimétrique, le delta présente donc une hétérogénéité importante de faciès et une corrélation entre différents logs de forage est difficile et peu significative. Par contre, à une échelle plus importante, peuvent apparaître des variations sédimentologiques visibles sur une vaste zone et représentatives d'une évolution climatique.

Ainsi, en rive gauche apparaissent des niveaux conglomératiques qui n'ont jamais été mis en évidence sur la rive droite. Ceci est sans doute lié à une origine antérieure de ce qui est aujourd'hui la voie gauche par rapport à la droite. Cette hypothèse est corroborée par l'altitude souvent supérieure de la rive gauche, signe d'un lac sensiblement plus haut que de nos jours. Quelques datations au carbone 14 donnent un âge compris entre 9.000 et 11.000 ans pour les parties les plus hautes du delta et 2.000 et 4.000 ans pour les parties basses.

3.3. Limites entre versants et delta

Dans une optique hydrogéologique, il s'agit de définir si les niveaux sableux, donc aquifères, des versants sont en contact avec les formations deltaïques. Génétiquement, les horizons interglaciaires sont déposés entre deux périodes froides puis rabotés et/ou recouverts d'une chappe morainique lors de la période froide suivante. Dans ce schéma, le delta de la Dranse peut être représenté comme un niveau interglaciaire déposé sur une moraine (figure 5). Il apparaît donc qu'un contact entre les dépôts fluvioglaciaires des versants et la formation deltaïque est improbable. Cette hypothèse s'appuie également sur des logs de forages effectués à Evian-les-Bains en bordure du lac, à la base des versants. Ils montrent en effet un biseautage vers le Sud de plusieurs niveaux fluvioglaciaires.

4. HYDROLOGIE

Le système hydrologique du delta de la Dranse comprend quatre sous-systèmes nettement individualisés :

- la Dranse
- Le lac
- l'aquifère du delta de la Dranse
- les aquifères des versants

Le comportement hydrologique du delta résultera donc des paramètres physiques de l'aquifère et surtout des interactions avec les trois sous-systèmes évoqués plus haut.

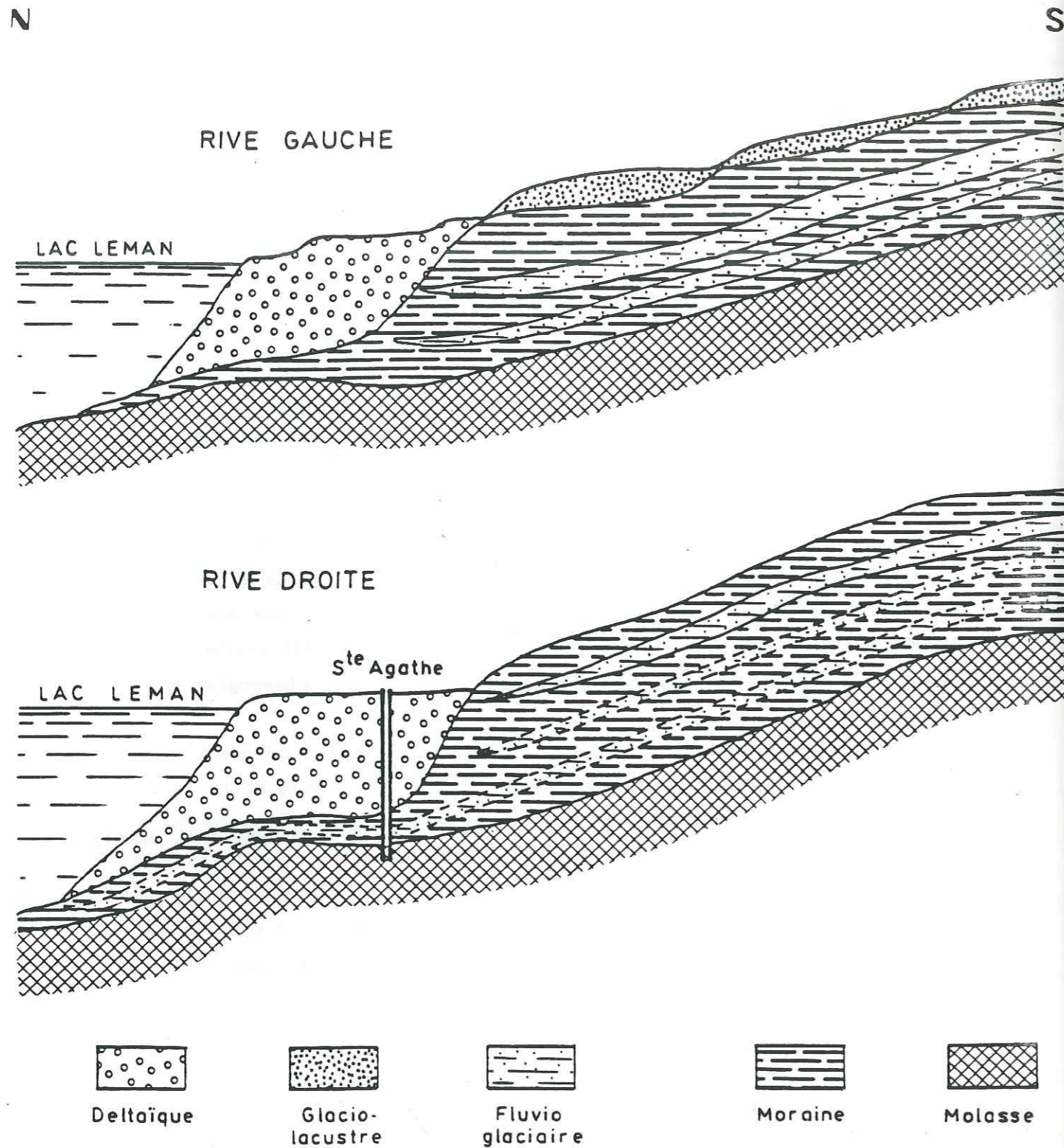


Figure 5 : COUPES NORD-SUD DU DELTA ET DES VERSANTS

4.1. Carte piézométrique du delta de la Dranse

La carte piézométrique a été relevée le 22 Juin 1982. Cette date appartient à une période de hauteur d'eau moyenne (figure 6). Elle a été tracée à l'aide de 16 points de mesure (figure 7).

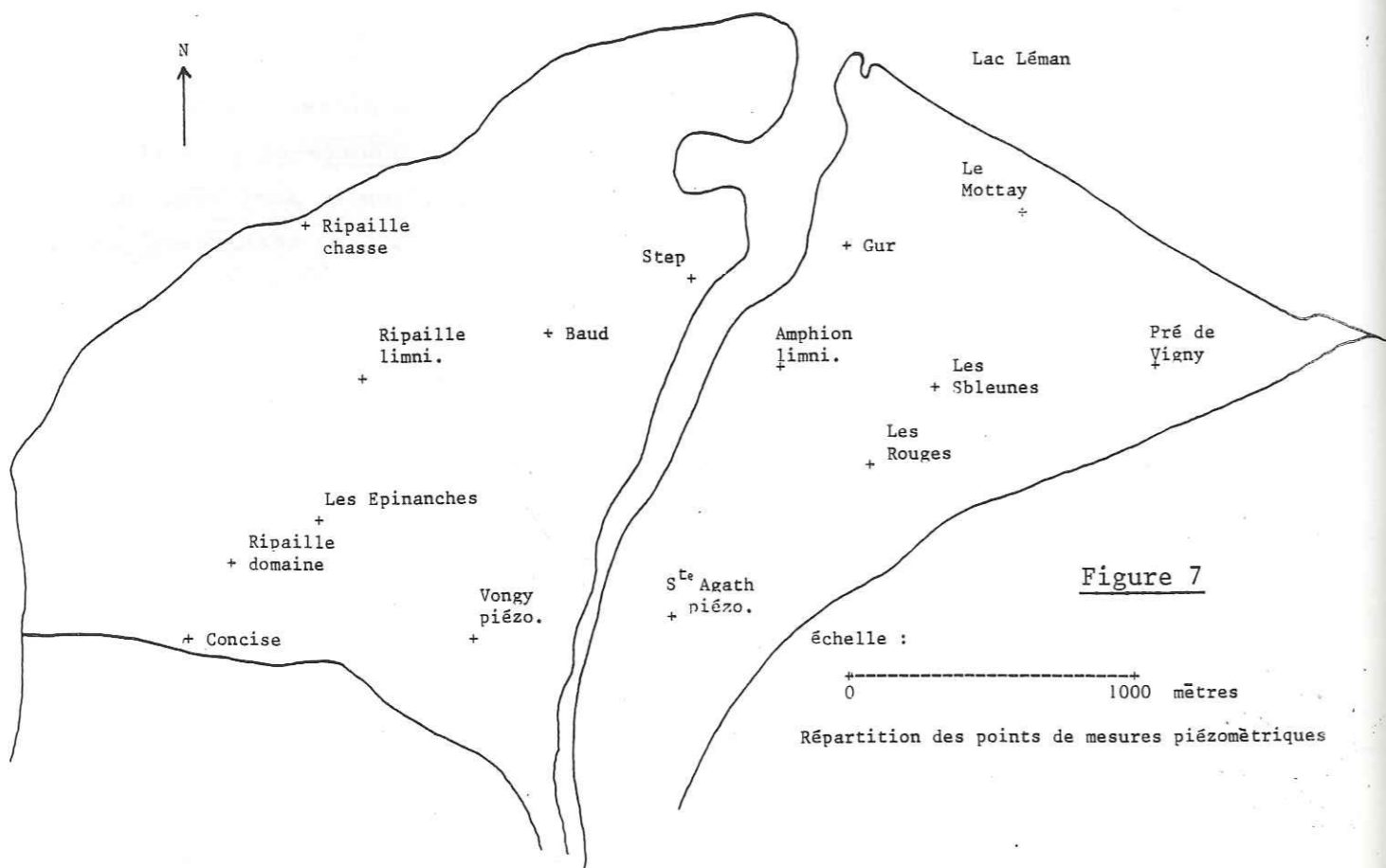
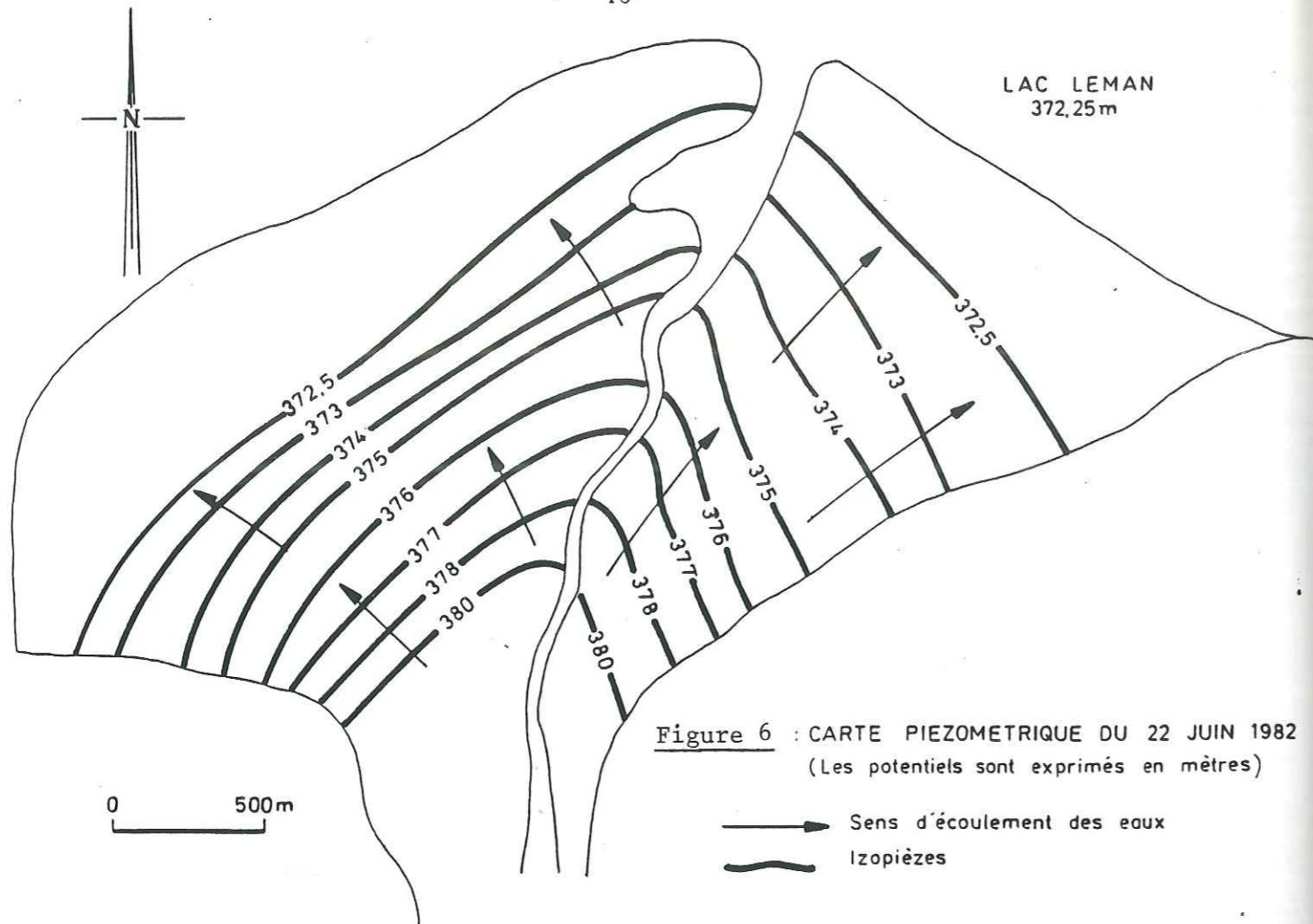
La précision du dessin des isopiezés est fonction de plusieurs facteurs :

- Approximation du tracé entre deux points de mesure.
- Erreur liée au nivellement : la cote du sommet de chaque puits ou piézomètre est rattachée au nivellement général de la France. Le nivellement a été effectué à l'aide d'un théodolite comportant un axe de rotation vertical. L'erreur sur l'altitude des points de mesure est fonction du nombre de visées effectuées, donc à la fois de la distance au point coté le plus proche, et de la pente du terrain. Suivant ce dernier critère les erreurs sont donc plus grandes à proximité des berges de la Dranse où elles peuvent être estimées au maximum à 0,30 m. Notons que les gradients hydrauliques sont importants dans cette zone minimisant l'influence de l'erreur. En conclusion, on peut considérer que les approximations liées au nivellement des points de mesure ne peuvent être à l'origine d'erreurs quant aux sens d'écoulement des eaux.

Remarquons qu'en dépit des fluctuations saisonnières, la forme de la surface piézométrique varie peu. Les sens d'écoulement déduits de la carte du 22 Juin 1982 restent donc valables en toutes périodes de l'année, sauf bien sûr lors des circonstances exceptionnelles induites par exemple par une sécheresse prolongée.

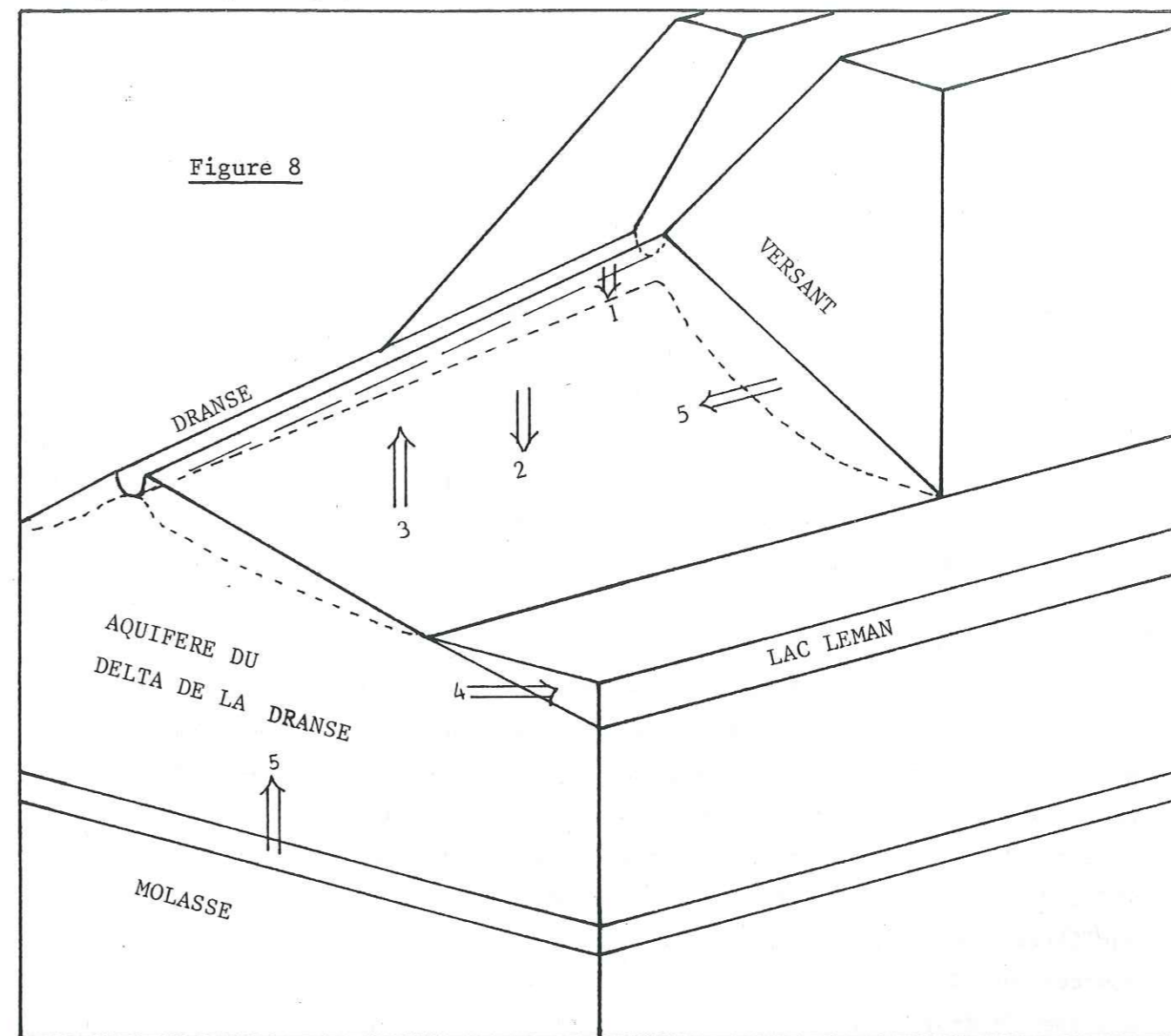
La surface piézométrique du delta de la Dranse est marquée par les traits suivants :

- Présence d'une dorsale suivant le cours de la Dranse et délimitant deux secteurs, la rive droite et la rive gauche.
- L'écoulement divergeant par rapport à cette dorsale peut être décrit par deux composantes, l'une parallèle à l'axe de la Dranse de sens Sud-Nord, l'autre perpendiculaire à cet axe et dirigée vers le lac.
- Les gradients diminuent graduellement des berges de la Dranse jusqu'au lac.



4.2. Limites et fonctionnement de l'aquifère

L'observation et l'analyse de la carte piézométrique complétées par les données géologiques, nous permettent de décrire les limites et la dynamique générale de l'aquifère. Celui-ci est à surface libre. Toutes ses limites, mis à part l'interface aquifère-atmosphère, sont le lieu d'interactions avec les trois autres sous-systèmes hydrologiques locaux.



Limite Dranse-aquifère (1)

La cote de la surface piézométrique étant inférieure à celle du drain, l'eau transite à travers la limite dans le sens Dranse-aquifère. Ceci est vrai en amont, par contre en aval les niveaux d'eau dans l'aquifère et le drain sont très proches. Leurs relations sont alors analogues à celles d'un fleuve avec sa nappe alluviale sous climat tempéré (de Marsily, 1980). La Dranse est donc un des termes source d'alimentation de l'aquifère. Ce terme est prépondérant dans la mesure où il structure la forme de la surface piézométrique.

Limite aquifère-atmosphère

L'interface entre ces deux éléments est constitué par une zone de terrains non saturés d'épaisseur variable. L'eau précipitée sur le delta percole en partie à travers cet horizon (2), l'autre partie est évapotranspirée. Le ruissellement est probablement négligeable, les pentes de la surface du delta étant très faibles. Les précipitations sont donc à l'origine du deuxième terme source de l'aquifère. Les prélèvements provoqués par les activités humaines constituent un flux inverse au précédent mais traversant la même limite. Ce flux est donc un terme de sortie du système (3).

Limite aquifère-lac (4)

L'eau s'écoulant depuis la Dranse à travers l'aquifère, termine son parcours souterrain dans le lac, exutoire de l'aquifère, si elle n'est pas prélevée. Le lac représentant une masse d'eau très grande, le niveau de sa surface n'est pas influencée par l'état hydrologique de l'aquifère. Par contre l'altitude de la surface du lac fixe la hauteur d'eau minimum dans l'aquifère. En d'autres termes, les berges du lac constituent pour l'aquifère une limite à potentiel imposé. Si pour une raison quelconque, la surface piézométrique parvient à une altitude inférieure à la surface du lac, il se produit une inversion locale des sens d'écoulement, les eaux du lac pénétrant dans l'aquifère.

Limite aquifère-versants (5)

Cette limite comprend les frontières Sud et le mur de la formation deltaïque. Les unités fluvioglaciaires des versants sont toujours aquifères. Ces nappes sont le plus souvent captives et par endroits artésiennes. Certaines sont particulièrement célèbres comme l'aquifère d'où proviennent les eaux d'Evian en rive droite ou l'aquifère de la Versoie (eaux de Thonon) en rive gauche (Dray M., 1970, 1971, Vial R., 1976, Blavoux, 1978). Les potentiels hydrauliques de ces aquifères sont toujours supérieurs à celui du delta comme l'atteste la présence de sources sur les versants. Si il y avait transfert d'eau entre les deux sous-systèmes hydrologiques, il se produirait donc des versants vers le delta. Le contact géologique entre le fluvioglaciaire des versants et les formations deltaïques étant peu probables, les transferts d'eau ont vraisemblablement lieu par drainance à travers les moraines. Il est difficile de connaître l'importance de ce phénomène, les moraines pouvant être par endroits très sableuses donc très perméables. Le tracé de la carte piézométrique du 22 Juin 1982 (figure 6), notamment à proximité des limites, s'appuie sur une hypothèse d'absence de transfert d'eau. Les

données disponibles pour l'élaboration de cette carte aurait permis d'avancer une hypothèse contraire, cependant l'intervalle d'incertitude ne permet pas d'envisager un débit important (comparable aux pertes de la Dranse) à travers cette limite. Une observation précise des évolutions piézométriques, la modélisation des écoulements dans le delta, l'utilisation de données de nature différente telle que la géochimie permettront d'éclaircir ce problème. La limite inférieure du delta est également le lieu d'un transfert d'eau. Celui-ci s'effectue dans le sens versants (inférieurs)-delta. Cette affirmation s'appuie sur l'observation de la nature artésienne de l'aquifère traversé par le forage de Sainte-Agathe (figure 5) sous les formations deltaïques et après un horizon morainique. Ce transfert d'eau s'effectue par drainance à travers ce dernier horizon très argileux. Notons également que la molasse qui par endroits peut constituer le mur de la formation deltaïque est généralement considérée comme imperméable. Les versants latéraux ou inférieurs constituent donc un des termes source de l'aquifère du delta dont l'importance paraît délicate à estimer.

5. CONCLUSIONS : VERS UNE CONNAISSANCE PLUS QUANTITATIVE

Le delta de la Dranse constitue un aquifère important aujourd'hui largement exploité. Il procure une eau généralement de bonne qualité et propre à de nombreux usages. Mais cette nappe phréatique à surface libre est particulièrement vulnérable, car elle est par nature, peu protégée des apports de surface. Ceux-ci s'effectuent rapidement à travers une zone non saturée dont les capacités d'auto-épuration sont médiocres.

Une méconnaissance des phénomènes hydrauliques souterrains a parfois déjà conduit à une détérioration locale des caractéristiques physico-chimiques de l'eau par rejet direct de polluants dans l'aquifère (décharge, fosse septique).

Il était donc évident que nous devions dépasser la reconnaissance qualitative qui ne constituait qu'une première approche de l'étude de l'aquifère du delta de la Dranse. La seconde phase de cette étude comporte une quantification des mécanismes hydrogéologiques intervenant dans la dynamique de l'aquifère. Au terme d'une telle démarche, un cadre précis et quantitatif d'une gestion rationnelle et globale a pu être élaboré.

CHAPITRE 2

ELEMENTS POUR UNE GESTION DE L'AQUIFERE

DU DELTA DE LA DRANSE

1. INTRODUCTION

Définir le cadre d'une gestion globale et rationnelle de l'aquifère implique la connaissance précise, la quantification d'un certain nombre de grandeurs. Nous avons scindé ces grandeurs en deux groupes distincts, l'un se rapportant à un aspect purement volumique et chimique où l'eau est utilisée comme matière première. L'autre est un groupe de grandeurs comprenant essentiellement les températures de l'aquifère et reflétant les potentialités d'exploitation thermique de l'aquifère. Dans cette optique, un prélèvement énergétique sur l'aquifère est considéré d'une part, comme un prélèvement de volume d'eau et d'autre part, comme un prélèvement de calories. Les interactions entre ces deux aspects ne sont cependant pas négligées.

La quantification de ces différents termes nécessite une campagne de terrain durant au minimum un cycle saisonnier annuel. A partir de ce cycle seront établies les grandes lignes du comportement de l'aquifère qui permettront de tracer un cadre rationnel à la gestion du delta de la Dranse. Des relevés piézométriques ont donc été effectués entre le mois de Juin 1981 et le mois de Juin 1982 avec une périodicité de 13 jours environ. Des mesures physico-chimiques ont également eu lieu avec la même fréquence entre le mois de Janvier 1982 et le mois de Janvier 1983.

Des mesures antérieures ont aussi été utilisées pour compléter les séries de mesures dont nous disposons (Dray, 1970, Poncet, 1977). Ces mesures ont été effectuées entre les années 1966 et 1977.

Par la suite ces informations ont été analysées, comparées entre elles et leur synthèse a permis de dresser un premier tableau du comportement de l'aquifère en des termes quantitatifs.

Cependant, il ne s'agit jusqu'ici de ne donner que des ordres de grandeur. Afin de compléter cette approche, l'aspect volumique de l'étude a fait l'objet d'une modélisation. Nous avons utilisé pour cela le programme Newsam développé au Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris (Ledoux, Tillie, 1980). Ce modèle, décrit plus précisément dans l'annexe 2, permet une discrétisation spatiale des paramètres physiques de l'aquifère et une prise en compte de la forme et de la fonction de chaque limite. A terme, il nous a donc permis de préciser zone par zone le comportement de l'aquifère. Auparavant, à l'aide de cet outil, nous avons pu vérifier et améliorer la

cohérence des données. Les résultats calculés par le modèle s'exprimant en termes de potentiels et débits ont été comparés à des informations ponctuelles mesurées sur le terrain. Ainsi, une hypothèse ou un ensemble d'hypothèses ont pu être validés lorsque, par exemple, les potentiels calculés étaient jugés suffisamment proches des potentiels observés. Ce jugement tient compte notamment des erreurs de mesure sur le terrain ou de l'influence de la discrétisation spatiale des grandeurs dans le modèle. Nous avons tenté, dans la mesure du possible, de ne tester qu'une hypothèse à la fois, tous les autres termes intervenant alors dans la simulation ayant été validés par ailleurs. Cette étape de l'étude correspond au calage du modèle. Une fois cette opération achevée, nous disposons donc d'un jeu de données cohérent comprenant les différents termes du bilan pour un cycle saisonnier complet et les champs de paramètres physiques de l'aquifère. Le comportement du système aquifère a donc pu être décrit en détail. En tenant compte de la nature non exceptionnelle de la période durant laquelle nos relevés ont été effectués, nous avons pu généraliser dans le temps, sur toutes les périodes du même type, nos remarques et nos conclusions concernant la dynamique de l'aquifère du delta de la Dranse.

Pour compléter cette première approche uniquement hydraulique du système, nous avons également intégré sa nature chimique pour établir un cadre précis de la gestion du delta de la Dranse. Celle-ci prend donc en compte à la fois l'aspect volumique et la nature chimique de l'eau renfermée dans l'aquifère.

Par la suite, nous avons tenté de définir les mécanismes, l'intérêt, les potentialités et les limites d'une exploitation thermique du delta. Nous avons également intégré dans ce volet de l'étude les conclusions de la partie précédente concernant la dynamique du système.

Ainsi, ont pu être définies les conditions d'exploitation du delta de la Dranse, ressource d'eau et d'énergie.

2. LE GISEMENT D'EAU

2.1. Les entrées du système

2.1.1. La Dranse

La Dranse alimentant l'aquifère, nous avons recherché le volume d'eau perdu par la Dranse entre l'amont du delta et l'embouchure.

Le meilleur moyen de répondre à cette question consiste à mesurer le débit de la rivière avant et après son passage sur l'aquifère. Cela signifie concrètement l'installation de deux stations de jaugeage, l'une en amont, l'autre en aval.

Cette proposition n'est hélas guère réalisable en raison de la nature de la rivière : la Dranse lorsqu'elle circule sur son delta est un torrent dont le lit, en amont, est étroit, 10 à 30 mètres, fixe et bien défini. Par contre en aval, elle se divise en de multiples bras se déplaçant après chaque crue à l'intérieur d'un lit beaucoup plus large. Celui-ci peut être entièrement inondé durant les grandes crues et mesure par endroit plus de 300 mètres.

Il était donc peu envisageable d'installer à proximité de l'embouchure une station de jaugeage qui aurait nécessité une régularisation du lit du torrent.

Seuls quelques jaugeages ponctuels ont pu être effectués donnant un ordre de grandeur des pertes d'eau et de leur variabilité en fonction des débits (tableau 1, figure 9).

Une analyse rapide de ces quelques chiffres révèle les points suivants :

- Tous les jaugeages montrent une diminution du débit de la Dranse entre l'amont et l'aval du delta indiquant une perte d'eau vers l'aquifère.
- Les débits des pertes de la Dranse dépendent peu des débits de la Dranse.

Le dernier point traduit l'influence d'un paramètre non directement dépendant du débit de la rivière, il s'agit certainement du niveau de la surface de l'eau dans l'aquifère sous-jacent.

L'étude de la carte piézométrique (figure 6) montre, en amont du delta entre le point dit piézomètre Sainte-Agathe (figure 7) et le niveau d'eau dans la Dranse située à 300 m, une différence de sept mètres soit un gradient de 2,3 %.

La valeur importante de ce gradient rend probable l'hypothèse d'une absence de connexion hydraulique entre l'aquifère et la Dranse. Stephens et Neuman (1982) ont montré qu'il se forme, sous une étendue d'eau de surface, une série d'arcs de cercles concentriques délimitant des portions de terrains dont la saturation diminue en fonction non linéaire de la distance à la surface du plan d'eau.

Une relation liant la perméabilité à l'indice de saturation a pu être décrite pour différents types de terrains.

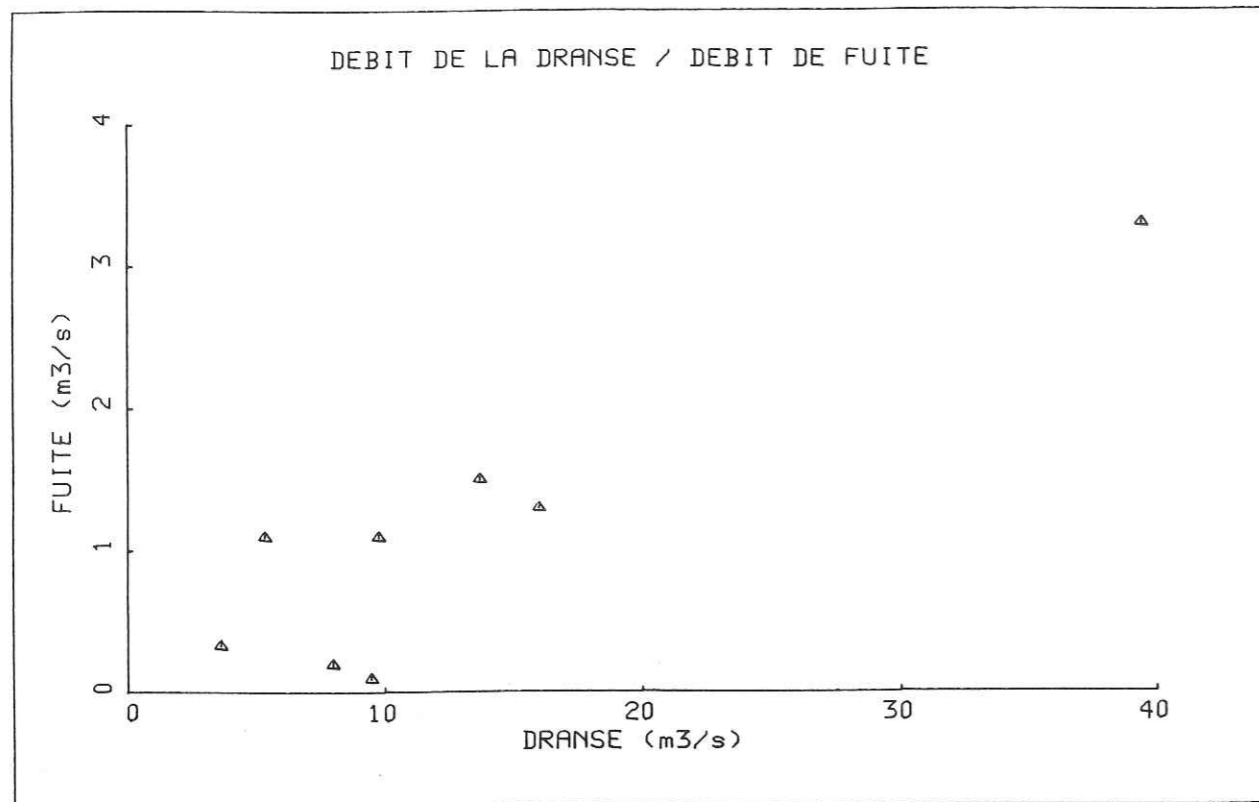
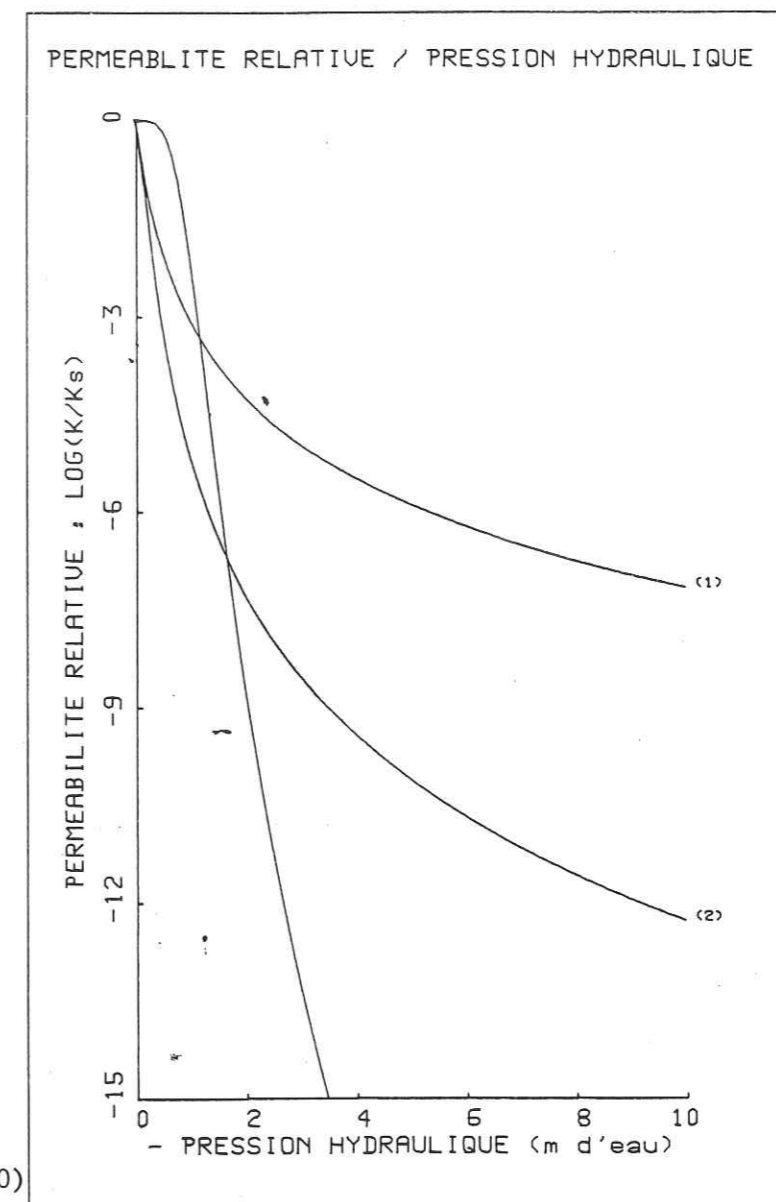


Figure 9

Tableau

Date	Amont	Aval	Déficit	%
29.07.76	16	14,7	1,3	8
09.09.76	5,4	4,3	1,1	20
23.11.76	9,5	9,4	0,1	1
24.11.76	8,0	7,8	0,2	3
29.11.76	13,7	12,2	1,5	11
03.12.76	39,5	36,2	3,3	8
31.08.76	3,7	3,3	0,4	9
18.06.81	9,8	8,7	1,1	11

Valeurs de débits mesurés simultanément en amont et en aval du delta



(Person, 1980)

Figure 10

Le débit d'eau transitant de la surface vers l'aquifère est donc d'autant plus faible que la zone non saturée est importante. Par ailleurs, un piézomètre a été implanté dans la partie amont du cours deltaïque de la Dranse, à proximité de l'usine Braunstein.

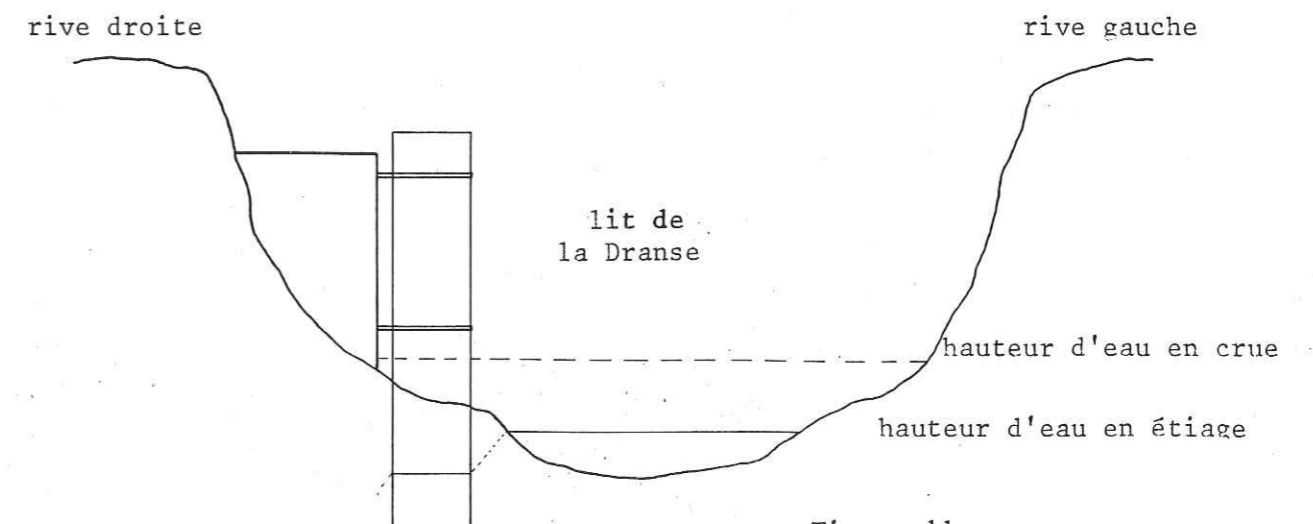


Figure 11

Comme le montre la figure 11, le tube n'est pas toujours en contact avec la rivière. Cependant, entre le mois de Décembre 1981 et le mois de Janvier 1983, un niveau d'eau a toujours pu être mesuré dans le tube traduisant l'existence d'une zone saturée autour du drain. C'est avec ces quelques données ponctuelles et remarques générales concernant le fonctionnement probable du drain que nous avons tenté de simuler son comportement sur un cycle saisonnier complet (Juin 81-Juin 82). Le modèle Newsam est prévu pour prendre en compte ce type de limite. A chaque maille traversée par le drain, est affectée une pseudo-maille.

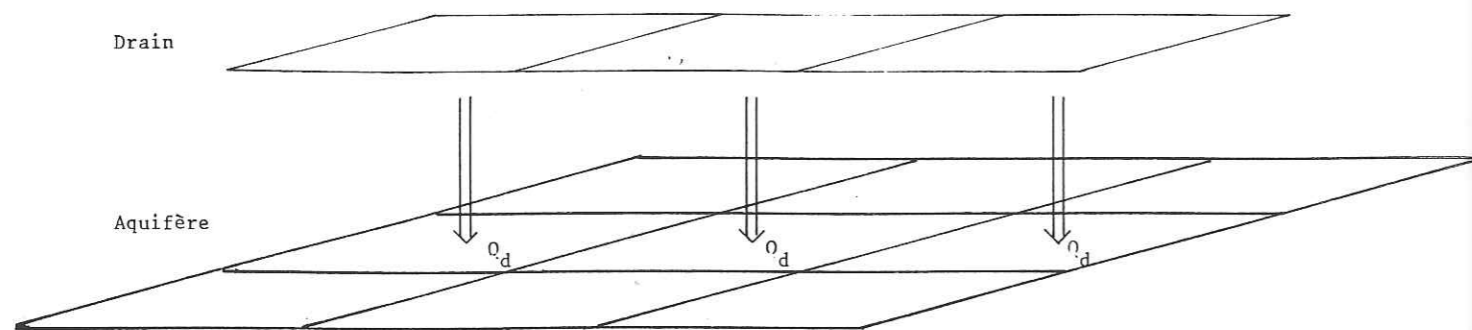


Figure 12

Ces mailles "drains" sont caractérisées par les grandeurs suivantes :

- coefficient de transfert drain-aquifère, c'est un paramètre physique du système qui peut être indépendant du temps. Sa dimension est analogue à celle d'une transmissivité (m^2/s)
- potentiel qui égale la cote de l'eau dans le drain, celui-ci est variable dans le temps
- débit limite du drain, destiné à limiter les débits transitant du drain vers l'aquifère, afin d'éviter notamment, que ces derniers soit supérieurs au débit réel de la rivière.

Les débits drain/aquifère s'écrivent alors pour une maille affectée par un drain :

$$Q_D = C(H_D - H_A)$$

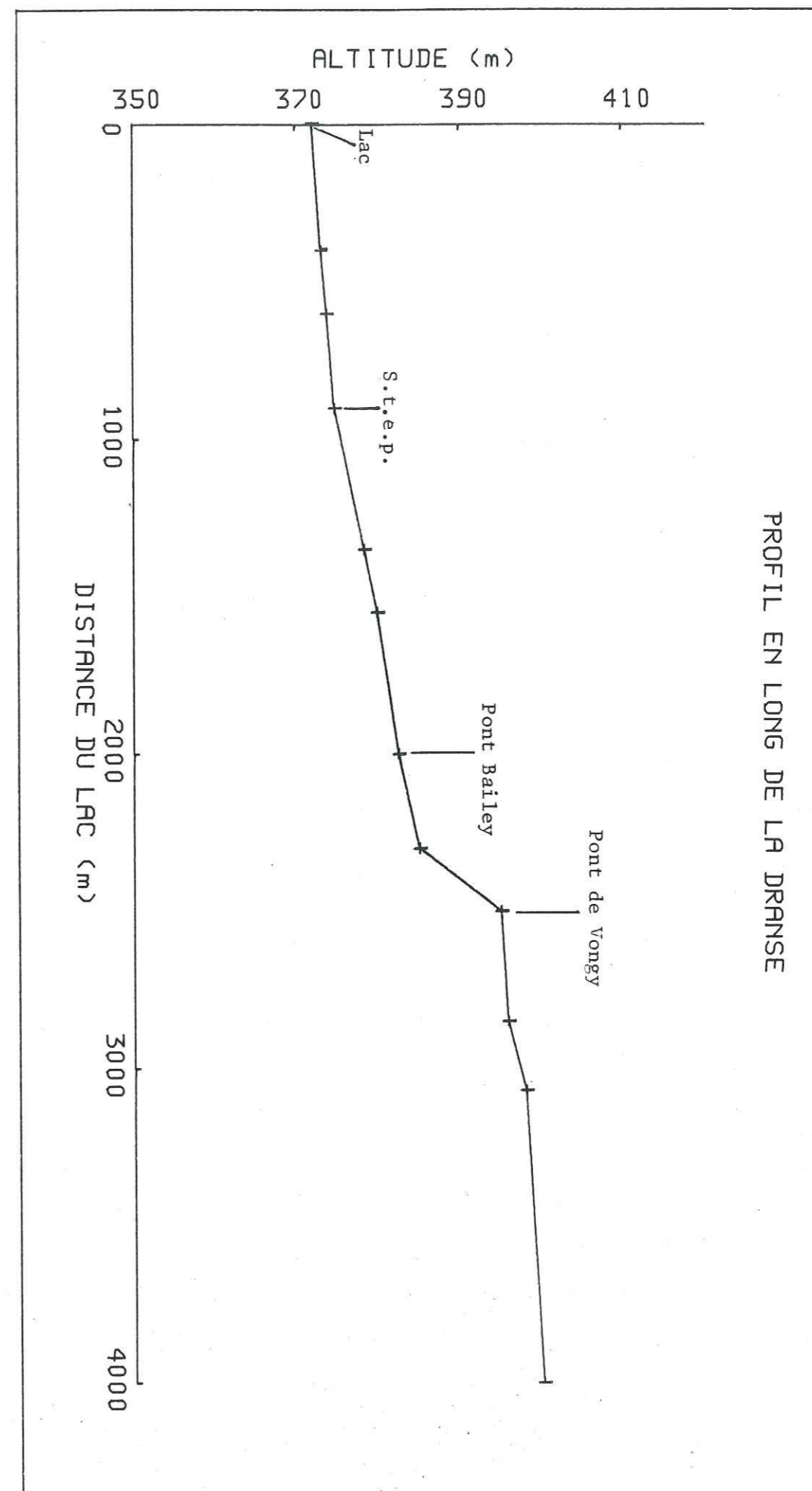


Figure 13

avec :

$$\begin{aligned} \text{si } C(H_D - H_A) < Q_{DL} & \quad \text{alors } Q_D = C(H_D - H_A) \\ \text{si } C(H_D - H_A) \geq Q_{DL} & \quad \text{alors } Q_D = Q_{DL} \end{aligned}$$

Q_D : débit drain/aquifère (m^3/s)
 H_D : potentiel du drain (m)
 H_A : potentiel de l'aquifère (m)
 C : coefficient de transfert (m^2/s)
 Q_{DL} : débit limite (m^3/s)

Pratiquement, le paramètre C est estimé lors du calage du modèle en régime permanent. Celui-ci a été effectué pour la période du 17 au 22 Juin 1981 où nous connaissons les pertes de la Dranse sur son cours deltaïque (tableau 1) et le profil en long de la rivière (figure 13).

Après une série de tests, nous sommes parvenus à un ensemble de coefficients de transfert permettant de retrouver par le modèle un débit de perte de la Dranse proche de la valeur observée (cf. II.4). Ce champ de paramètres est caractérisé par une croissance des valeurs depuis l'amont vers l'aval en passant de $0,085$ à $0,1 m^2/s$. Cette répartition rend compte, comme nous l'avons envisagé, d'une connexion hydraulique effective en aval et s'amenuisant vers l'amont. Pour la simulation, en régime transitoire, de la période Juin 81-Juin 82, les variables H_D pouvaient être mesurées sur le terrain, en dessinant un profil en long du cours deltaïque de la Dranse. Mais un tel travail ne pouvait être effectué fréquemment, nous avons donc posé l'hypothèse d'une variation uniforme des potentiels de la Dranse sur toutes les mailles en drain. La forme du profil en long du cours de la rivière fut donc supposée constante et subissant des fluctuations de hauteurs égales en tous points du profil.

Cette hypothèse implique également que l'on ne tient pas compte des variations de largeur du lit inondé. Le cours de la rivière est donc simulé avec un trajet fixe et un potentiel variable. Les potentiels initiaux décrivant la forme du profil du lit de la Dranse sont ceux observés le 18 Juin 1982.

Les variations des potentiels de la Dranse ont été calculées en un point situé à proximité de l'usine Braunstein au lieu-dit Pont-Bailey. Quelques hauteurs d'eau ont pu être mesurées en cette station où une échelle limnimétrique avait été posée en 1975. Un calcul de corrélation a été effectué entre les hauteurs mesurées à cette station et les hauteurs enregistrées à la station de Bioge en amont du delta (figure 01). L'intervalle de confiance à 95 % du coefficient de corrélation des 11 couples de mesure disponibles est $[0,92 - 0,99]$.

Une régression linéaire a également été calée. Elle s'exprime comme :

$$h_D = 0,364 h_B - 0,062$$

avec h_D : hauteur d'eau au pont-Bailey (m)

h_B : hauteur d'eau à Bioge (m)

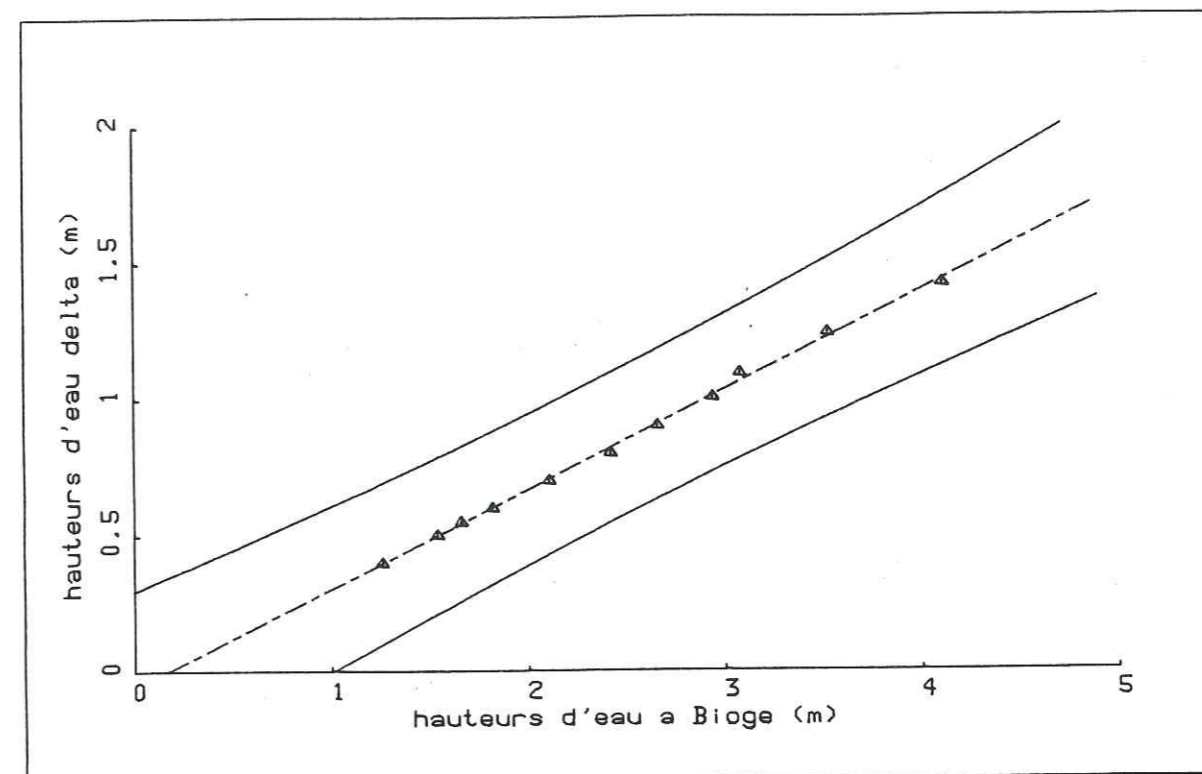
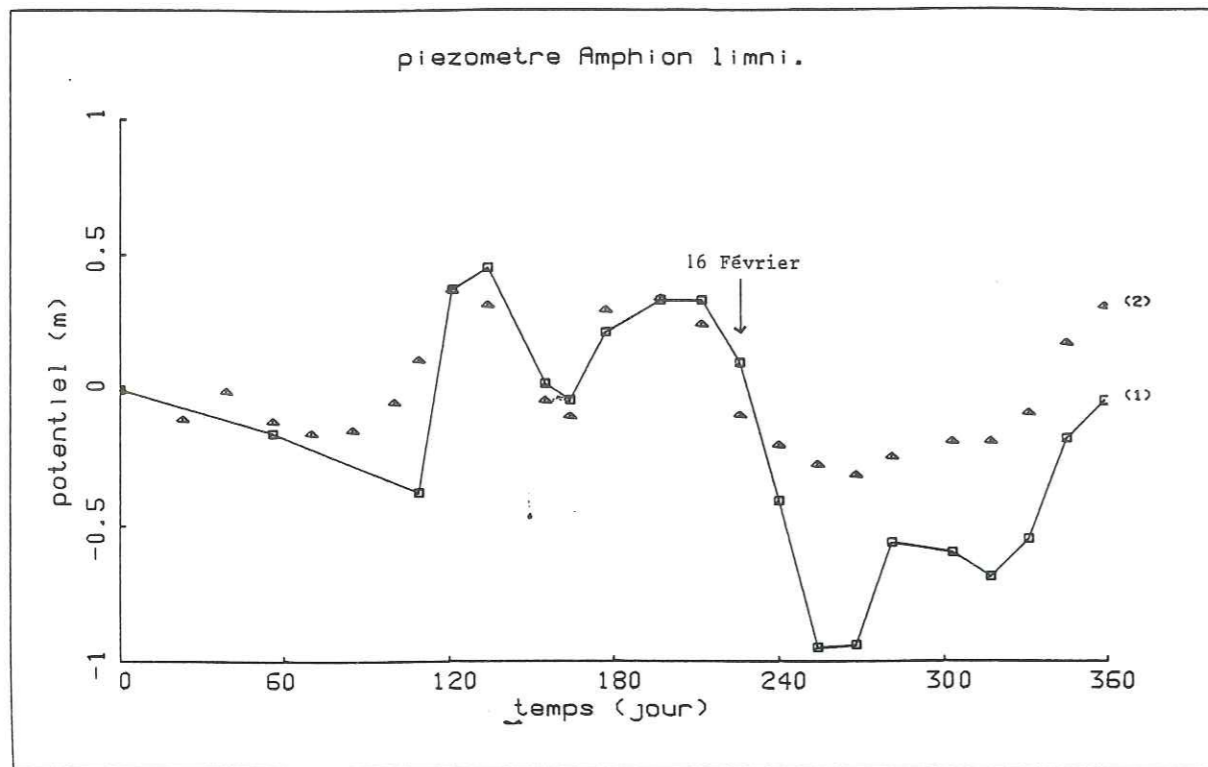


Figure 14 : Intervalle de confiance à 95 % d'une régression linéaire entre les hauteurs d'eau dans la Dranse mesurées dans la partie amont du delta et au limnigraphe de Bioge

Nous avons ainsi obtenu une série complète de valeurs de potentiel de la Dranse.

Nous avons considéré dans une première approximation que les débits limites de passage entre le drain et l'aquifère étaient de valeur infinie. Toutes ces données concernant le drain ont été intégrées dans le modèle. La figure 15 présente les potentiels calculés par le modèle et observé au piézomètre Amphion limni (figure 7). Celui-ci étant proche de la Dranse, les niveaux d'eau qui y sont enregistrés sont donc sensibles à son comportement vis-à-vis de l'aquifère. Parallèlement, nous pouvons les comparer aux variations de potentiel du drain (figure 16). Il apparaît clairement que les paramètres et les variables introduits dans le



(1) : potentiels observés
(2) : potentiels calculés

Figure 15 : Potentiels observés et calculés au piézomètre amphion limni de Juin 1981 à Juin 1982

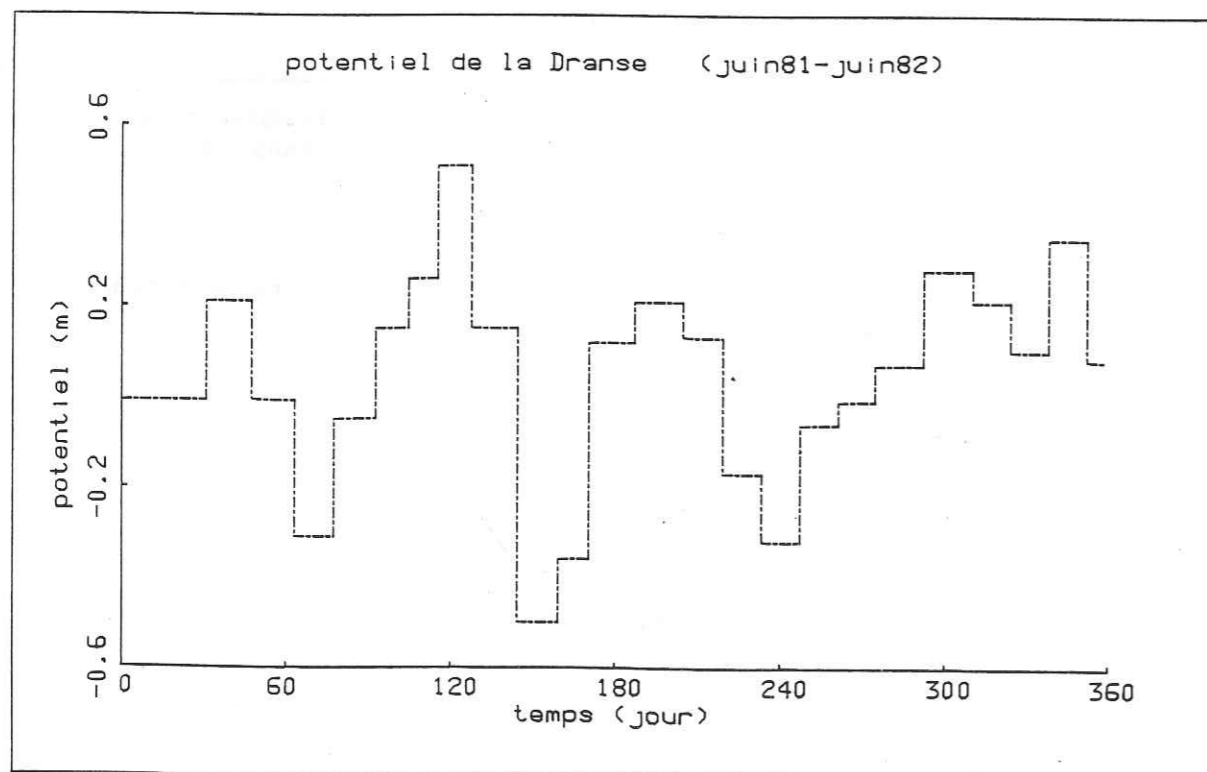


Figure 16 : Potentiels moyens de la Dranse pour des pas de temps d'environ 15 jours de Juin 1981 à Juin 1982

modèle permettent une simulation correcte du système jusqu'au 16 Février 1982. A cette date, un décalage important est observé entre les potentiels calculés et mesures sur le terrain. Cette date correspond au début d'un étiage prononcé de la Dranse et d'une période peu pluvieuse (figure 19bis).

L'écart entre les deux courbes de la figure 15 signifie des entrées d'eau trop importantes, cependant les débits de perte de la Dranse ne dépassent, ni n'égalent les débits de la Dranse.

Deux hypothèses peuvent être formulées :

- erreur dans les données de potentiel du drain,
- présence d'un phénomène physique négligé et négligeable jusqu'au 16 Février.

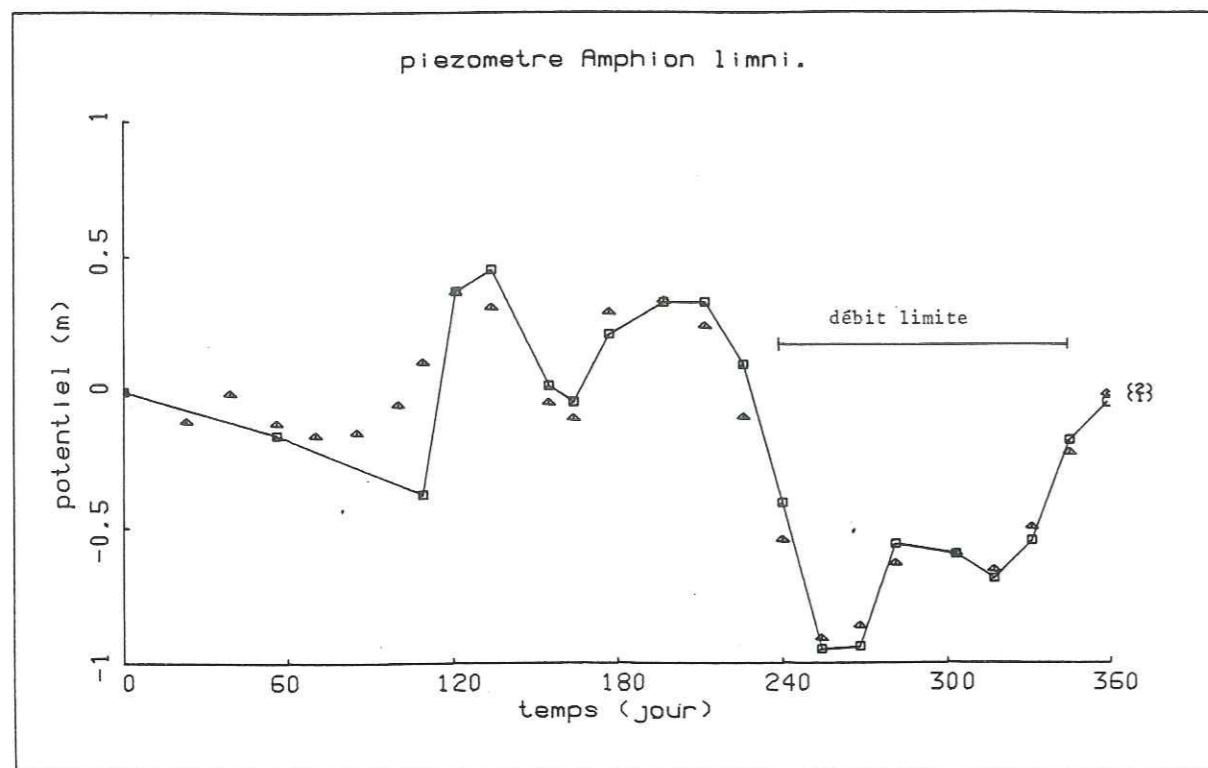
L'erreur sur les potentiels paraît peu probable, notre méthode d'estimation étant validée par les 15 premières phases de simulation. L'émergence d'un phénomène physique nouveau est vraisemblable. On peut envisager, à la suite de l'étiage de la Dranse simultanée à de faibles précipitations, une désaturation accentuée de la zone inscrite entre le drain et l'aquifère, induisant une limitation des possibilités de transfert d'eau entre les deux unités hydrologiques.

Deux solutions étaient envisageables pour simuler ce comportement :

- variation des coefficients de transfert (diminution),
- introduction de débit limite.

Bien que la première solution ait une signification physique plus nette que la seconde, nous avons choisi cette dernière pour des raisons de simplicité (aucune mesure directe de coefficients de transfert ne permettait de vérifier nos hypothèses). Elle revient à imposer un débit limite par maille affectée par le drain. C'est une méthode couramment employée pour simuler les apports d'un réseau de surface non connecté à l'aquifère (Ledoux, 1980). Il est vraisemblable que le même type de phénomène a dû se produire durant le mois d'Août 1981, mais nous ne disposons pas de données suffisantes pour tenter de le simuler. Notons également que le comportement de l'aquifère ne peut plus être décrit par des équations linéaires dès lors qu'une discontinuité fonction du potentiel apparaît dans la forme du champ de valeurs d'un paramètre.

Après quelques essais nous sommes parvenus à un ajustement convenable entre courbe observée et courbe simulée (figure 17). Les débits de fuites calculés, reportés sur la figure 18, montrent des variations assez faibles $1,2 \pm 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.



(1) : potentiels observés
(2) : potentiels calculés

Figure 17 : Potentiels observés et calculés (avec débits limites) au piézomètre Amphion Limni

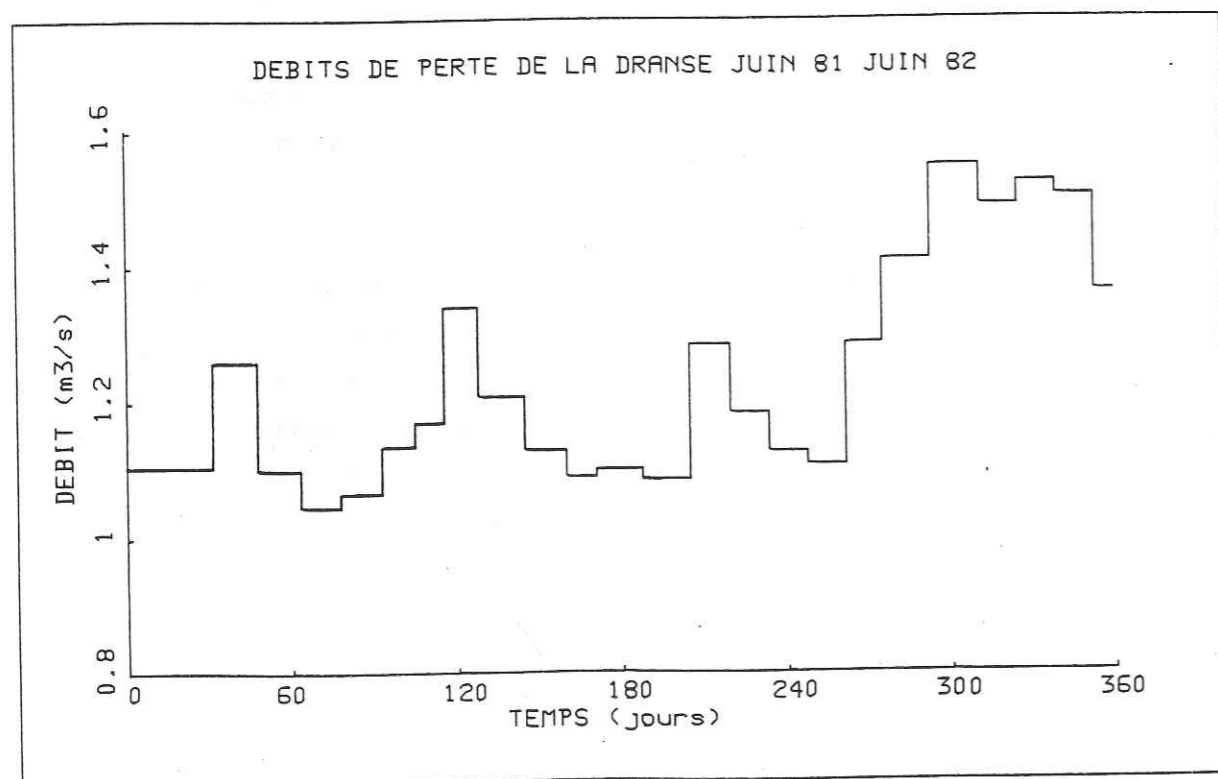


Figure 18 : Débits moyens de perte de la Dranse durant des pas de temps de 15 jours environ de Juin 1981 à Juin 1982

Nous pouvons donc conclure que le phénomène de déconnexion hydraulique semble confirmé. Les débits de perte de la Dranse sont donc fonction de la différence de potentiel entre le drain et l'aquifère à laquelle se superpose l'influence des épisodes passés, qui peut devenir prépondérante durant les périodes d'étiage.

2.1.2. Précipitations

Les précipitations moyennes annuelles à Thonon entre 1963 et 1976 ont été de 940 ± 160 mm. Le delta ayant une superficie de $8,2 \text{ km}^2$, on peut estimer le débit des pluies sur le système à $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$. L'évapotranspiration potentielle pour la même période est comprise entre 548 et 626 mm suivant les méthodes de calcul (Poncet, 1977). Elle correspond donc à une proportion de 0,60 à 0,68 % des précipitations. Ainsi si l'on suppose le ruissellement comme négligeable le débit disponible pour l'infiltration est au maximum de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ soit moins d'un dixième du débit transitant de la Dranse vers l'aquifère.

Cet ordre de grandeur étant posé, nous avons tenté de calculer avec plus de précision les hauteurs de la lame d'eau infiltrée. Deux possibilités sont alors offertes, soit par l'intermédiaire du calcul de l'évapotranspiration, soit par l'estimation directe de la lame d'eau infiltrée.

Le calcul de l'évapotranspiration est effectué le plus souvent à partir de formules empiriques de type Penman, Turc ou Thornthwite. La formule de Penman est généralement considérée comme la plus exacte, mais requiert la connaissance d'un nombre important de grandeurs dont nous ne disposons pas.

De nombreuses études concernant la mesure et le calcul de l'évapotranspiration ont été effectuées au Centre de Recherche Géodynamique de Thonon-les-Bains. Elles sont basées sur des expériences sur lysimètres et des bacs Colorado disposés à une altitude et à une orientation comparable à celle du delta de la Dranse. Il apparaît au terme de ces recherches que la loi de Primault (1963) présente une bonne adéquation avec les résultats expérimentaux (Jérémy, 1976, Blavoux, 1978). Cette formule comme celles citées précédemment donne l'expression d'une évapotranspiration potentielle :

$$ETP = J.C \left(1,03 - \frac{H_r}{100} \right) \left(\sum \frac{S_i}{n_i} + 2n \right)$$

avec ETP : évapotranspiration potentielle en mm par nombre de jours (n)

n : nombre de jours (jour)

S_i : nombre d'heures d'insolation par jour (heure)

C : constante d'altitude, elle égale 0,947 pour le delta

H_r : humidité relative

J : coefficient de correction mensuelle

Le calcul final de l'évapotranspiration réelle s'écrit comme un bilan faisant intervenir la notion de RFU (Réserve Facilement Utilisable). Cette grandeur correspondant à un volume d'eau disponible dans le sol pour la vie végétale, a une valeur limite caractérisant le type de sol.

En excluant les terrains récents à l'embouchure de la Dranse recouverts d'un sol peu épais, le delta de la Dranse présente des sols bruns d'une épaisseur comprise entre 0,8 m et 1 m (Dorioz, 1976). Nous avons donc utilisé une valeur de RFU maximum, assez forte, de 100 mm.

Les résultats présentés sur le tableau 2 concernent les huit premiers mois de l'étude de Juin 81 à Janvier 82.

Mois	Inf.mm
Juin	0
Juillet	0,8
Août	0
Septembre	39,3

Mois	Inf.mm
Octobre	161,5
Novembre	19,4
Décembre	186,7
Janvier	63,0

Tableau 2 : Valeurs de lames d'eau mensuelles infiltrées (calculées)

Notons que durant cette période, l'ETR égale l'ETP, l'influence de RFU_{max} est donc nulle sauf si elle est inférieure à 45 mm.

Parallèlement à cette approche empirique mais validée par des expériences sur lysimètres, un essai de mesures de l'infiltration in-situ a été tenté. La méthode consiste à mesurer avec précision les variations piézométriques in-

duites par les précipitations. Pour cela, nous avons recherché un point de mesure où il était possible de s'affranchir de l'influence des limites du delta. Le piézomètre Pré-de-Vigny (figure 7), équipé d'un limnigraphe a été retenu pour cette étude. L'influence du lac, situé à proximité, a pu être facilement prise en compte : les valeurs observées et enregistrées ont été corrigées des variations de niveau de la surface du lac.

En estimant la porosité efficace à 10 %, nous avons obtenu les résultats présentés sur le tableau 3.

Périodes	1 ^e estimation mm	2 ^e estimation mm	Périodes	1 ^e estimation mm	2 ^e estimation mm
Juillet	8	0,6	Janvier	9	26
Août	0	0	Février	0	0
Septembre	3	7	Mars	6	11
Octobre	50	50	Avril	0	0
Novembre	0	0	Mai	7	5
Décembre	40	105	Juin	18	18

Tableau 3 : Valeurs de lames d'eau mensuelles infiltrées (estimées)

Les sept mois communs aux tableaux 2 et 3 montrent des différences notables de lame d'eau infiltrée. Ainsi la première méthode de calcul donne une infiltration égale à 67 % des précipitations, elle égale 15 % pour la seconde (1^{ère} estimation).

Quelques remarques s'imposent :

- 67 % d'infiltration semble un chiffre très élevé, la formule ou les paramètres utilisés tendent sans doute à minimiser l'ETP.
- Un écoulement hypodermique peut être envisagé pour expliquer l'écart entre les deux tableaux.

- Une porosité efficace trop grande peut être à l'origine d'une sous-estimation des valeurs du tableau 2. Remarquons cependant qu'elle correspond aux valeurs observées en pompage d'essais et validées par le modèle lors de l'estimation des paramètres physiques de l'aquifère.

Suite à ces quelques réflexions, nous avons choisi d'introduire dans le modèle les valeurs de lame d'eau infiltrée calculée par la deuxième méthode.

Finalement, quelques corrections furent effectuées (2e estimation du tableau 4), les premières simulations ayant montré, notamment pour les mois d'hiver (Décembre, Janvier) un écart significatif entre la piézométrie observée et les potentiels calculés. L'infiltration atteint alors la proportion de 27 % des précipitations (tableau 3, figure 19). La sous-estimation de l'infiltration en hiver (le estimation) soit dans la période où elle est importante, est liée certainement à une mauvaise connaissance du phénomène de décharge de l'aquifère. Après chaque augmentation de potentiel, faisant suite à une pluie, la surface piézométrique tend à redescendre vers un niveau d'équilibre entre le niveau du lac et le débit de perte de la Dranse.

L'utilisation du modèle permet de conclure sur deux points :

- L'infiltration a une influence importante sur l'évolution piézométrique.
- Par contre, elle n'intervient que pour 4 % dans le débit total des entrées : $1,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.
- Le retard à l'infiltration après une période pluvieuse est de moins de 15 jours (pas de temps des relevés piézométriques et de calcul du modèle). Ceci est vrai pour tous les secteurs du delta : aucun décalage significatif n'apparaît entre les courbes calculées et les courbes observées aux différents points de mesures piézométriques du delta.

2.1.3. Les versants

Les échanges à travers la limite versant-delta semblent faibles (cf. 1.3.2). Pour confirmer cette première hypothèse, des précisions ont été recherchées par l'interprétation d'informations hydrochimiques et en testant à l'aide du modèle différentes hypothèses d'échanges.

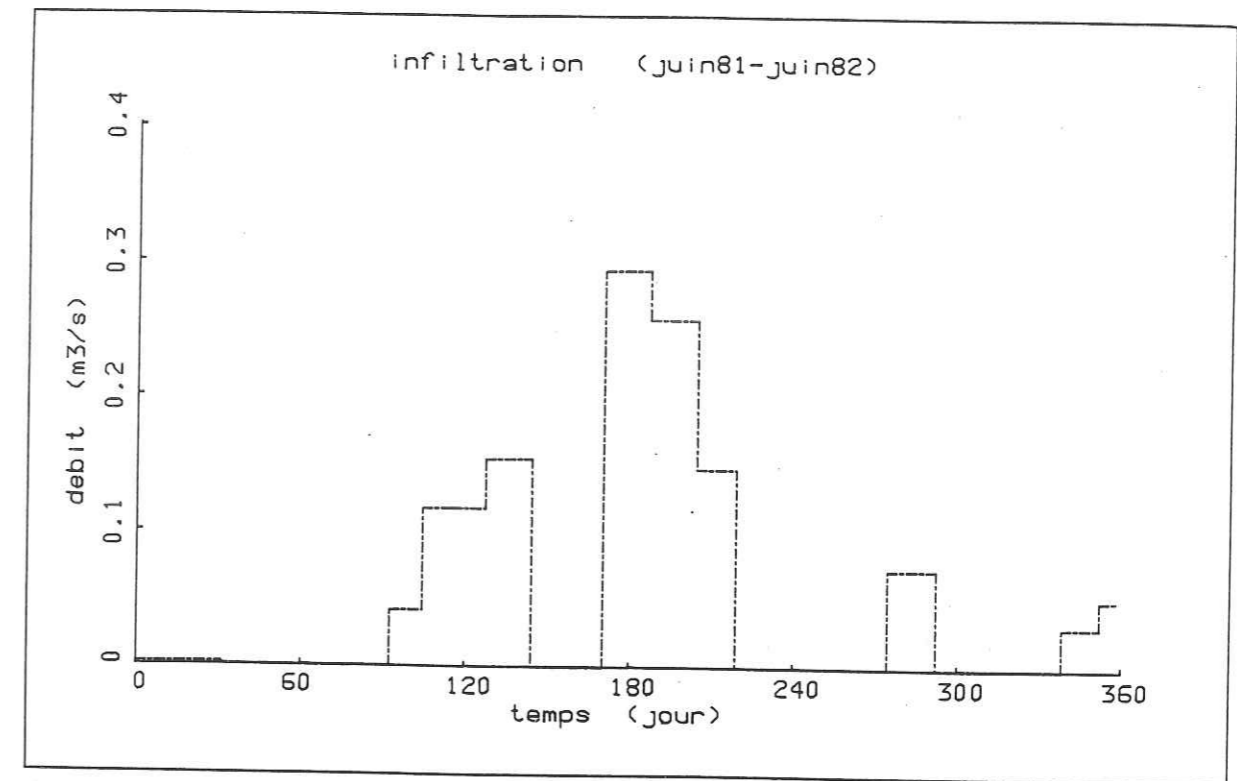


Figure 19 : Débits infiltrés de Juin 1981 à Juin 1982

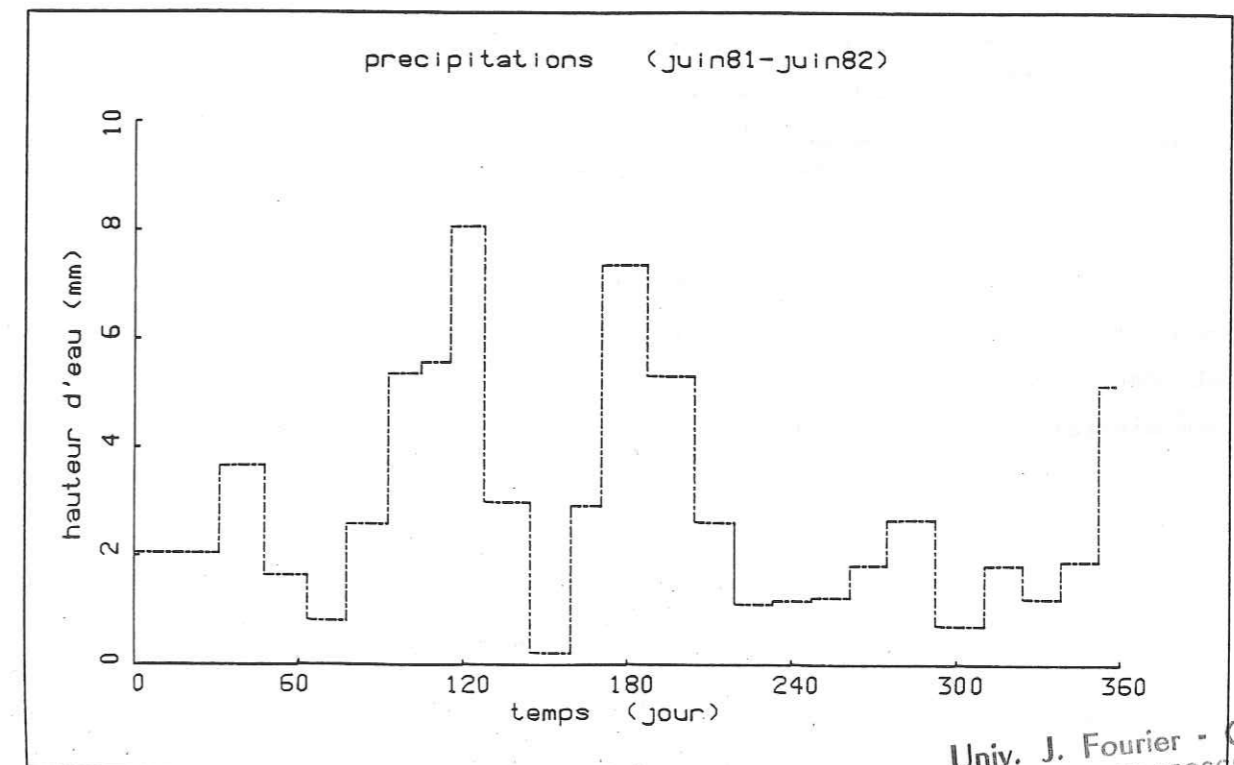
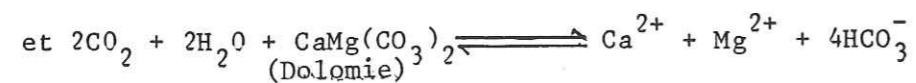
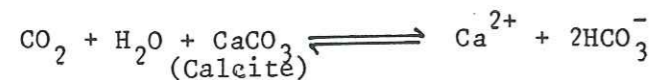


Figure 19bis : Hauteurs d'eau précipitée

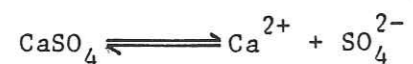
A) Information géochimique

Le rapport Mg/Ca a été choisi comme marqueur, celui-ci étant très variable en fonction des caractéristiques minéralogiques de la matrice de l'aquifère, et ce dans un milieu très carbonaté.

Cette grandeur reflète la proportion entre les minéraux de type calcite et les minéraux de type dolomie. Le delta de la Dranse étant un milieu ouvert (aquifère libre), on peut en effet écrire :



Il est nécessaire de prendre en compte le gypse présent dans le trias de la région et susceptible de libérer des ions Ca^{2+} :

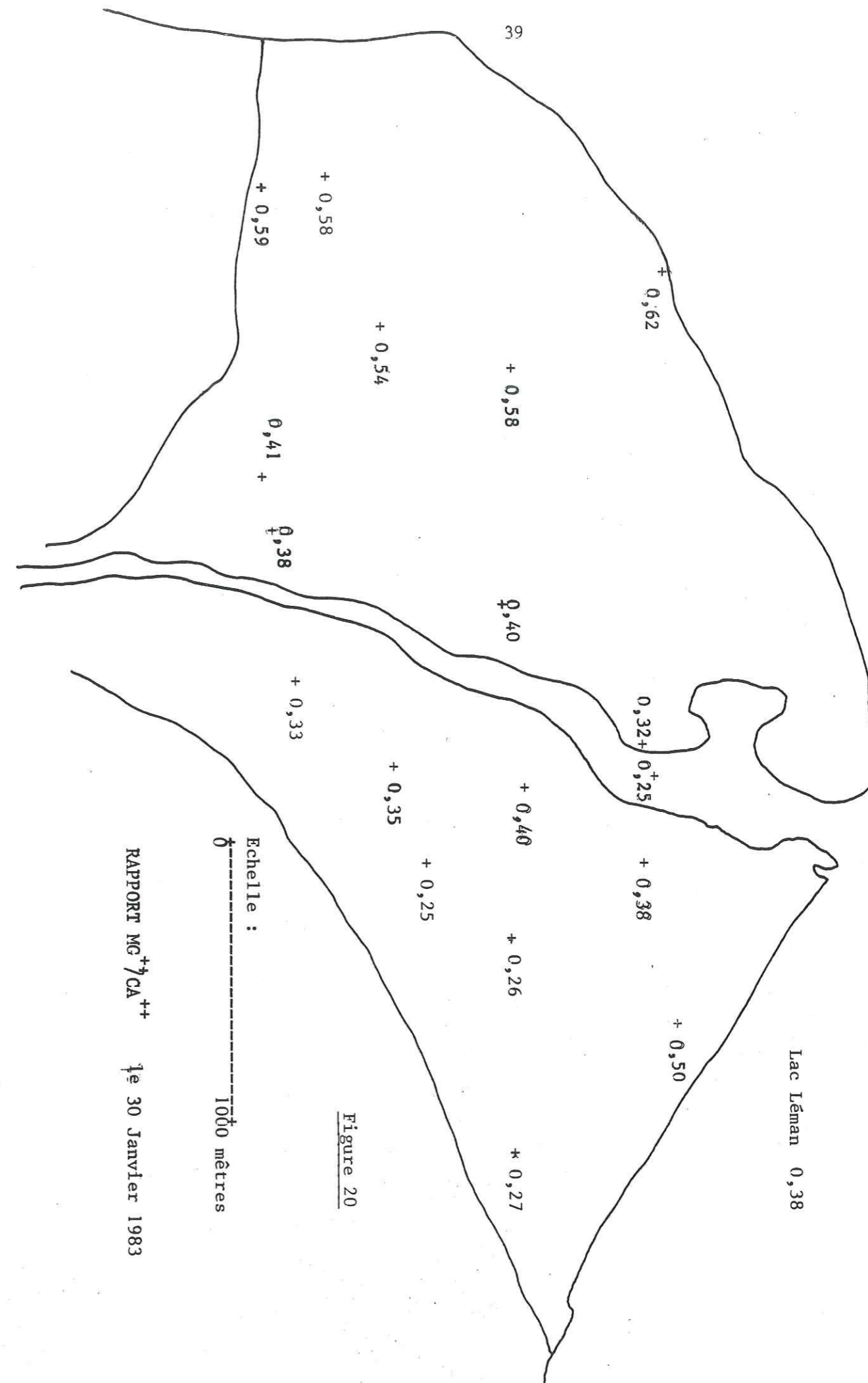


Pour que le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ soit réellement caractéristique d'une proportion Dolomie/Calcite, le nombre d'ions Ca^{2+} devra donc être diminué du nombre d'ions sulfate mesurés.

La figure 20 est une image ponctuelle de la répartition spatiale du rapport $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$. Une faible variation temporelle de cette grandeur, à l'exception des abords de la Dranse, permet d'affirmer que la figure 20 est représentative d'un champ moyen annuel de $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$ (figure 21).

Par conséquence, il apparaît que globalement le rapport $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$ augmente depuis les berges de la Dranse jusqu'au lac (figure 22). On peut interpréter simplement ce phénomène comme une évolution vers un équilibre chimique entre la nature minéralogique de la matrice et la composition chimique de l'eau. Ceci est vrai pour la rive gauche, par contre, en rive droite des anomalies importantes apparaissent.

Une zone, comprenant les piézomètres Les Rouges, Les Sbleunes, Pré-de-Vigny, se caractérise par des valeurs de $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$ très basses, souvent inférieures à celle de la Dranse.



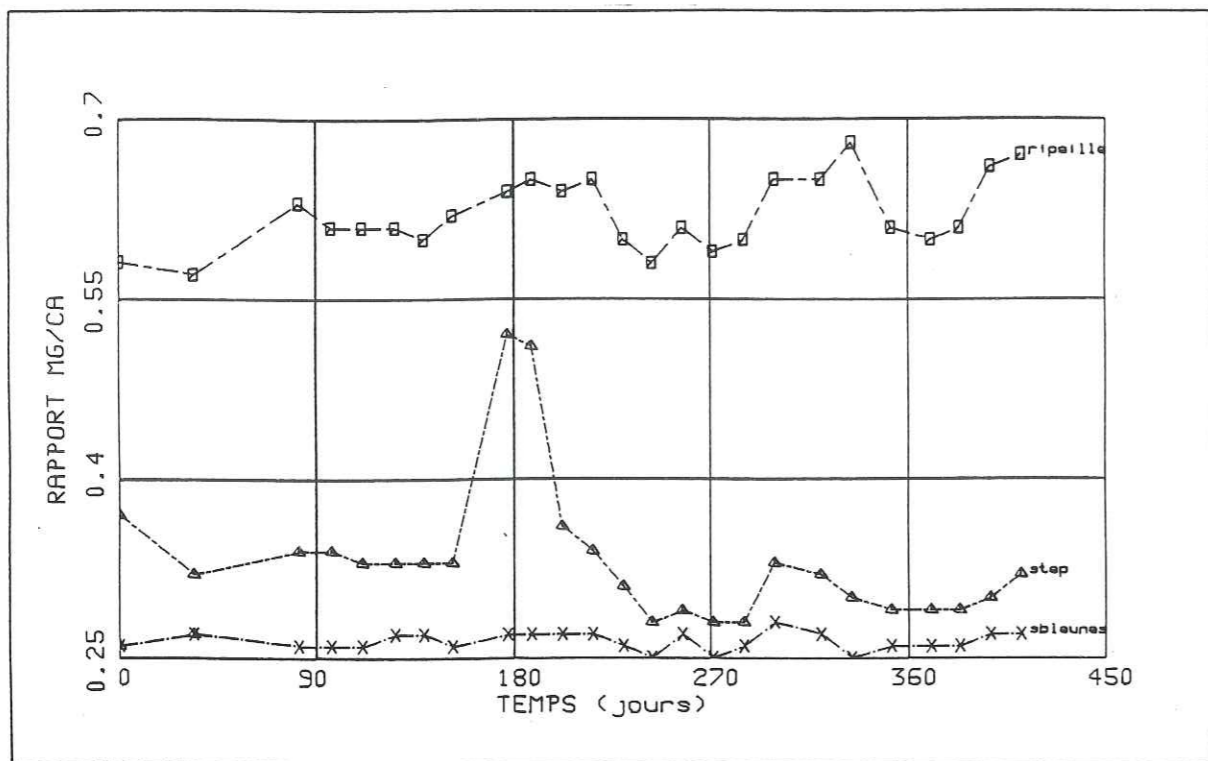


Figure 21 : Evolution du rapport Mg/Ca en fonction du temps en différents lieux du delta de Décembre 1981 à Janvier 1983.

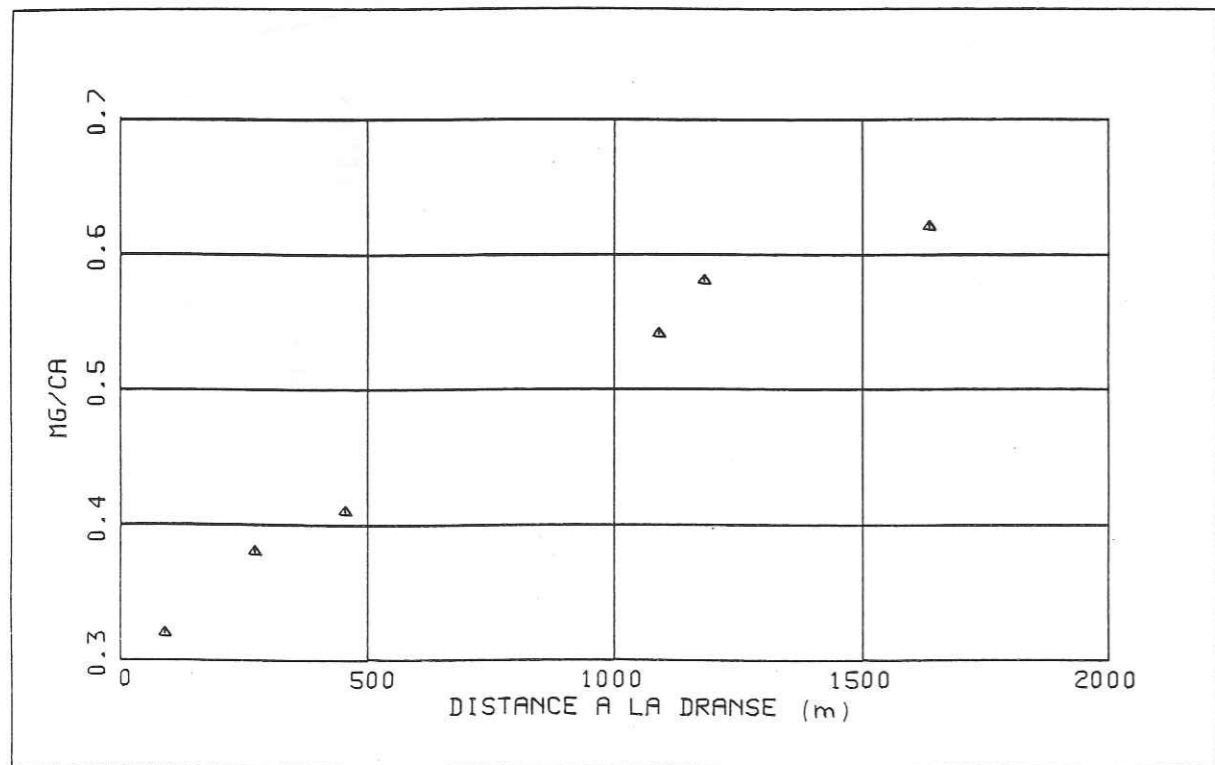


Figure 22 : Evolution du rapport Mg/Ca en fonction de la distance entre les points de mesure en rive gauche et le lit de la Dranse

Trois hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ces concentrations anormales :

1. alimentation à partir des versants
2. hétérogénéité locale des terrains
3. contamination des eaux souterraines

Hypothèse 1 : Si il y a alimentation de l'aquifère à partir des versants, il était donc possible de déterminer le taux de mélange entre les eaux deltaïque et les eaux des versants. Ce calcul simple peut être effectué à l'aide de la concentration en Ca, Mg et SO_4 des eaux en présence. Nous devons également estimer la composition d'une eau purement deltaïque aux lieux du mélange. En supposant les terrains du delta homogène et les vitesses de circulation comparables d'une rive à l'autre, nous avons pu estimer les concentrations en Mg, Ca, SO_4 de cette eau. Nous disposions par ailleurs de quelques analyses d'eaux prélevées aux abords du delta (tableau 4) et dont les situations sont précisées sur la figure 23. Nous avons donc appliqué une équation simple de mélange qui peut s'écrire pour l'ion Ca^{++} :

$$Ca_{\text{vers}} = \frac{CA_{\text{obs}} - (1 - x) Ca_{\text{est}}}{x}$$

avec x : proportion d'eau provenant des versants (fixée)

Ca_{est} : concentration en ion Ca^{++} dans une eau purement deltaïque au lieu du mélange (estimée)

Ca_{vers} : concentration en ion Ca^{++} de l'eau provenant des versants (calculée)

Ca_{obs} : concentration en ion Ca^{++} de l'eau du delta effectivement (mesurée)

En fixant x successivement à des valeurs différentes, nous avons recherché des concentrations en Mg, Ca et SO_4 susceptibles de caractériser une eau des versants.

Un tel calcul a été effectué pour le piézomètre Pré-de-Vigny. Il apparaît que les concentrations obtenues pour une eau des versants ne sont réalistes que pour un taux de mélange supérieur à 40 %.

La comparaison entre les tableaux 4 et 5 montre que :

- S'il y a mélange, il n'est pas simple et plusieurs types d'eau des versants y participe. En effet aucune des eaux du tableau 4 ne peut être véritablement rapprochée d'une eau du tableau 5.

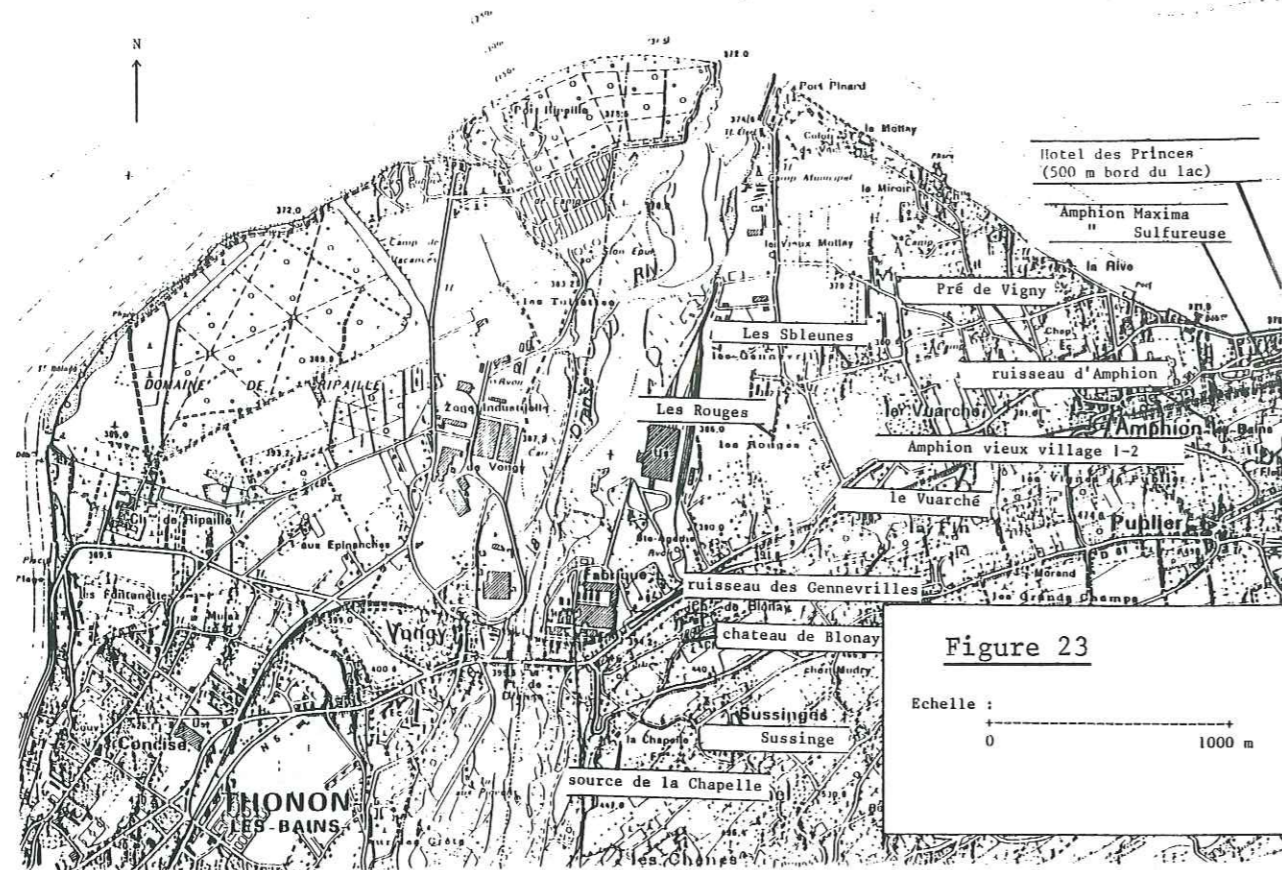


Figure 23

Echelle : 0 1000 m

EMPLACEMENTS	CA ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁻⁻	Mg/CA
SOURCE DE LA CHAPELLE	3.50	0.60	0.41	0.19
CHATEAU DE BLONAY	3.14	0.98	0.36	0.35
SUSSINGES	3.36	0.77	0.44	0.26
AMPHION VIEUX VILLAGE 1	2.03	1.10	0.11	0.57
AMPHION VIEUX VILLAGE 2	1.98	1.09	0.11	0.58
LE VUARCHE	2.79	0.60	0.27	0.23
RUISSEAU DES GENEVRILLES	3.17	0.68	0.41	0.25
RUISSEAU D'AMPHION	2.34	0.67	0.24	0.32
MAXIMA AMPHION	2.57	0.64	0.35	0.39
AMPHION SULFUREUSE	2.34	0.87	0.45	0.34
HOTEL DES PRINCES	1.39	0.97	0.05	0.72

Tableau 4

X	CA ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁻⁻
0.40	4.67	0.52	0.04
0.50	4.09	0.59	0.11
0.60	3.70	0.63	0.16
0.70	3.42	0.66	0.19
0.80	3.21	0.68	0.21

Tableau 5

- Il apparaît que les concentrations calculées se rapprochent du groupe des eaux des versants pour des valeurs importantes du taux de mélange. Ceci est en contradiction avec les conclusions que nous avons déduites de l'analyse de la carte piézométrique du 22 Juin 1982 (cf. I.3.2.).

Hypothèse 2 : La valeur relativement basse du rapport Mg^{++}/Ca^{++} dans les secteurs des piézomètres Pré-de-Vigny, Les Sbleunes, Les Rouges s'explique par une concentration en Ca^{++} plus forte que sur le reste du delta. Par contre la concentration en Mg^{++} est peu différente de celle observée aux autres points du delta (annexe 1). On peut interpréter cette observation par une concentration en calcite minérale plus importante dans la matrice de cette zone. Une telle hétérogénéité locale des terrains peut avoir comme origine :

- Un ancien cours de la Dranse dont les zones d'alimentation en matériel détritique ont pu changer au cours du temps, induisant ainsi, des variations de minéralogie de la matrice de l'aquifère.
- Un apport de matériel détritique directement issu des versants par l'intermédiaire de ruisseaux comme celui des Genevrières (aujourd'hui canalisé) ou celui d'Amphion.

Hypothèse 3 : Les teneurs en nitrates relevées dans cette zone sont supérieures aux concentrations observées à la plupart des autres points de mesure. Cela peut signifier la proximité d'une source de pollution liée soit à l'agriculture, active dans la plaine d'Amphion, soit à des fuites du réseau d'assainissement ou de fosses septiques non étanches. Cette proximité est confirmée par des concentrations en ions Cl^- également élevée dans cette zone.

L'anomalie locale de la valeur du rapport Mg/Ca est donc vraisemblablement liée à une hétérogénéité locale des terrains associée à des infiltrations de polluants organiques (assainissement) ou chimiques (agriculture). Cependant, les informations géochimiques ne permettent pas de rejeter définitivement l'hypothèse de transfert d'eau depuis les versants jusqu'à l'aquifère.

Finalement, à la lumière d'une synthèse des informations géologiques, des données hydrologiques et chimiques, il semble que les passages d'eau depuis les versants en rive droite vers l'aquifère sont faibles ou négligeables.

En rive gauche, nous disposons de moins d'informations, cependant la distribution spatiale des rapports Mg/Ca n'indiquait aucun comportement particulier comparable à celui relevé en rive droite.

B) Enseignements du modèle

Pour certifier l'hypothèse exprimée ci-dessus, nous avons effectué quelques tests à l'aide du modèle de simulation. Le principe de ce test consiste à observer les réponses du modèle suite à des injections de débits variables, uniformément réparties sur la limite Sud en rive droite du delta.

Les résultats de ces simulations pour des débits variant de 1 l/s à 2 m³/s sont présentés dans la figure 24.

Chaque courbe est l'expression du rabattement induit par les injections sur la limite pour un piézomètre donné. Chaque variation de débit a donné lieu à une simulation en régime permanent. Sur chaque verticale les points expriment les résultats d'une simulation. Les paramètres utilisés pour ces simulations sont ceux obtenus après calage du modèle. Il apparaît ainsi, par exemple, que la variation de potentiel induite par un débit de 100 l/s serait comprise entre 1,1 m aux Sbleunes et 0,20 m à Pré-de-Vigny. Notons donc qu'une injection à débit constant sur la limite Sud implique une augmentation du potentiel, ce qui pourrait être compensé par une modification du champ de paramètres physiques de l'aquifère. Mais elle implique également une modification de la forme des courbes piézométriques liées à la nature différentielle des variations de potentiel. Celle-ci devient réellement sensible pour un débit supérieur à 0,1 m³/s, l'écart entre les variations de potentiels aux Rouges et aux Sbleunes dépasse alors 0,90 m.

Nous avons donc conclu suite à ces quelques réflexions et calculs que, s'il est effectif, le débit de transfert entre les versants et l'aquifère du delta de la Dranse est faible et en tous cas inférieur à 0,1 m³/s. Lors des simulations antérieures et futures, nous avons négligé ces transferts.

2.2. Les sorties du système

2.2.1. Le lac

Le lac Léman constitue la plus longue limite du delta de la Dranse, il est son exutoire naturel. Un premier ordre de grandeur des débits passant de l'aquifère vers le lac a pu être déterminé à l'aide de la carte piézométrique du 22 Juin 1982. En effet, l'équation de la diffusivité régissant les transferts de pression en milieu poreux s'écrit, suivant un axe OX perpendiculaire à un axe OY, en régime permanent :

$$T \frac{dh}{dX} = Q \quad (1)$$

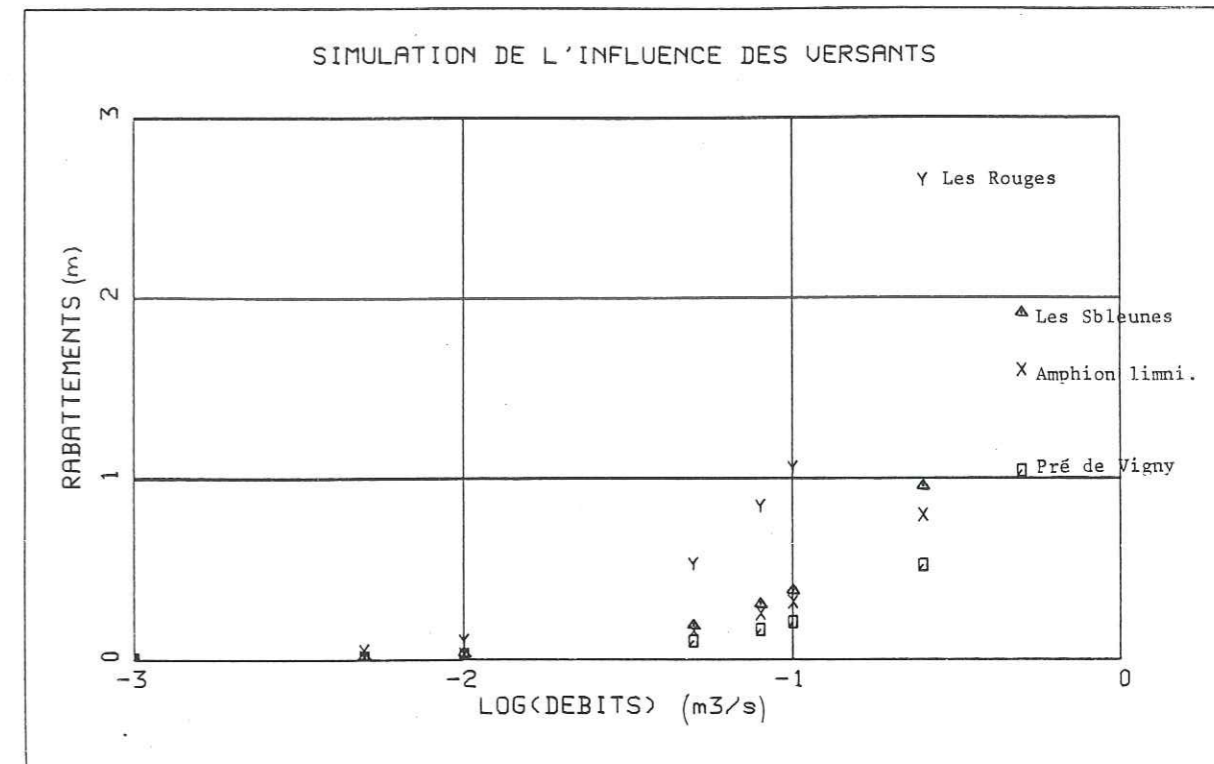


Figure 24 : Rabattements provoqués par une injection d'un débit de 1 l/s à 0,5 m³/s sur la limite Sud-Est.

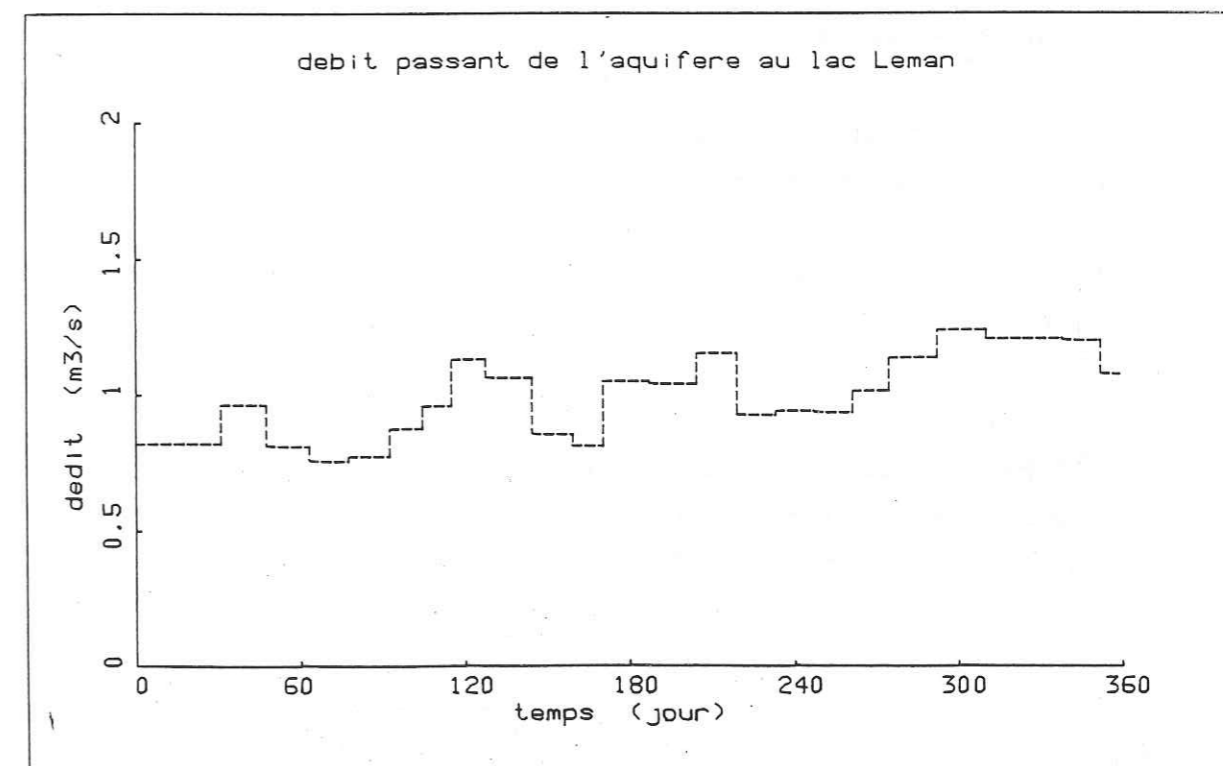


Figure 25 : Débit moyen transitant de l'aquifère au Lac, par pas de 15 jours environ. De Juin 1981 à Juin 1982.

T : transmissivité (m^2/s)

$\frac{dh}{dX}$: gradient de potentiel

Q : débit prélevé ou injecté par unité de longueur dy ($(m^3/s)/m$)

soit pour une limite de longueur L :

$$Q_L = \int_0^L T \frac{dh}{dX} dy$$

en considérant en tout point l'écoulement comme perpendiculaire à la limite et $T \frac{dh}{dX}$ invariant selon OY alors :

$$Q_L = T \frac{\Delta h}{\Delta X} L$$

Nous avons estimé :

$$T = 0,16 \text{ m}^2/s$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta X} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ sans unité}$$

$$L = 5400 \text{ m}$$

$$\text{d'où } Q_L = 1,47 \text{ m}^3/s$$

Il aurait été possible de calculer cette grandeur pour chaque pas de temps de la simulation, mais cela aurait été fastidieux et peu précis dans la mesure où l'estimation du gradient peut être entaché d'une erreur importante. Les débits échangés entre l'aquifère et le lac n'ont donc pas été un élément du calage du modèle en régime transitoire.

Le modèle de simulation calcule le débit traversant les limites du potentiel imposé en appliquant l'équation du bilan classique faisant intervenir la transmissivité du milieu et la différence de potentiel entre l'aquifère et le lac. Le caractère imposé du potentiel de la limite signifie de plus qu'il est invariant. Ceci n'est pas tout à fait exact pour le lac Léman, l'altitude de sa surface étant réglée par des vannes à son exutoire. L'amplitude moyenne des variations est comprise entre 0,5 et 0,8 m à l'exception des années bissextiles où le niveau de la surface est descendu de plus d'un mètre pour faciliter l'entretien d'ouvrages portuaires. Nous avons cependant considéré que, pour chaque phase de la simulation, le niveau restait constant et égal à sa moyenne durant le pas de temps. D'un pas de temps à l'autre, par contre, le niveau varie.

L'historique des hauteurs du lac a été enregistré au C.R.G. de Thonon, nous avons introduit dans le modèle les valeurs observées sans autre traitement qu'une moyenne sur le pas de temps de simulation. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 25.

2.2.2. Prélèvements

Les débits sont prélevés dans l'aquifère grâce à différents ouvrages dont les emplacements ont été représentés sur la figure 26 et leurs débits respectifs sur la tableau II6. Ces valeurs nous ont été communiquées par l'Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, les entreprises et les communes concernées. Les pompages de nature domestique n'ont pas été pris en compte, leurs débits cumulés restant faibles. Leur emplacement, le plus souvent proche du lac, réduit encore leur influence sur la dynamique du système.

2.3. Les variations du stock

Se traduisant par des évolutions piézométriques, mesurées précisément, ce dernier terme du bilan a été utilisé pour valider les hypothèses concernant les entrées et les sorties du système.

Des enregistrements concernant la piézométrie du delta de la Dranse sont disponibles depuis l'année 1965 (Dray, 1970). Ils amènent quelques remarques générales :

- Le niveau moyen interannuel varie en fonction des tendances climatiques. Il ne semble pas que l'on puisse relever des indications signifiant une surexploitation du système.
- Les variations moyennes montrent deux minima : l'un relatif a lieu à l'automne, l'autre, plus marqué, est lié à la faiblesse et à la nature (neige) des précipitations hivernales. On relève également la présence de deux maxima dont l'un, faible, a lieu au printemps lors de la fonte des neiges, l'autre, plus prononcé, résulte des fortes précipitations de fin d'automne, en Novembre et Décembre.

Nos relevés portant sur la période Juin 1981 à Juin 1982 présentent le même type de comportement avec deux maxima et deux minima.

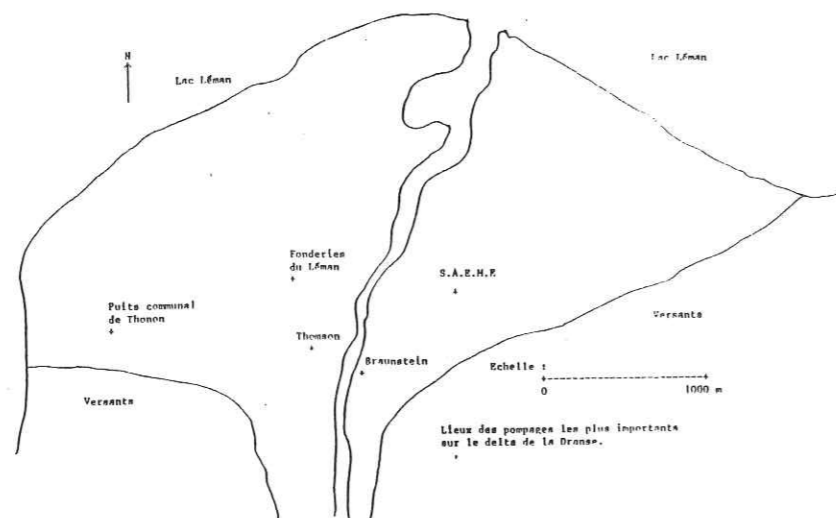


Figure 26

Nom	Débit moyen annuel (m^3/s)
Usine Braunstein	$1,7 \cdot 10^{-1}$
Usine Thomson	$3,0 \cdot 10^{-2}$
Usine SAEME	$1,6 \cdot 10^{-2}$
Usine Fonderie du Léman	$1,8 \cdot 10^{-2}$
Agglomération de Thonon	$5,7 \cdot 10^{-2}$

Nota : Le pompage de la ville de Publier à proximité immédiate du lac n'est pas pris en compte

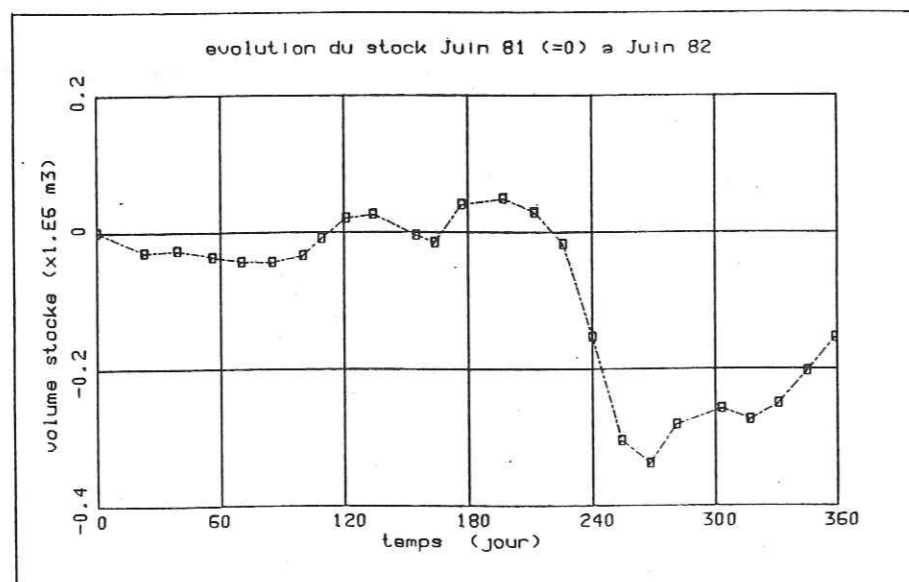


Figure 27

Nous disposons donc avec nos mesures piézométriques pluviométriques et limnigraphiques d'une représentation d'une année, non pas moyenne mais, tout à fait ordinaire vis-à-vis des 18 années antérieures. Les variations cumulées du stock, calculées à l'aide du modèle sont reportées figure 27.

2.4. Les paramètres hydrodynamiques

Les paramètres du système sont les transmissivités, les porosités et les coefficients de transfert Drain-Aquifère.

Les valeurs de ces paramètres, mis à part le coefficient de transfert, sont mesurables ponctuellement sur le terrain lors de pompages d'essais. Par la suite, l'utilisation du modèle nous permettra d'intégrer toutes ces informations et, tenant compte des entrées et de l'état du système, d'identifier les champs des paramètres physiques.

2.4.1. Les mesures de terrain

A) Les pompages d'essais

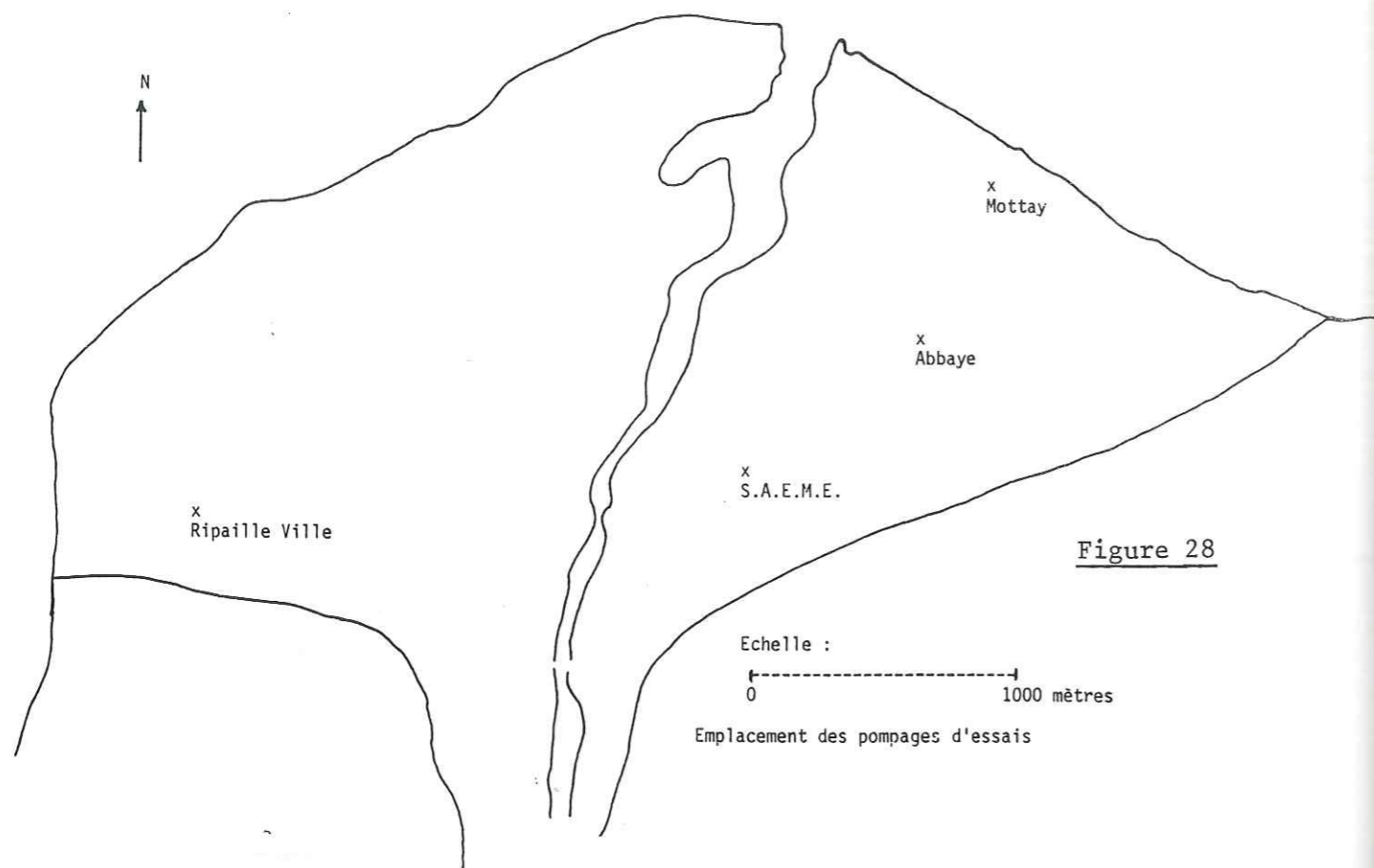
Ils ont été effectués en quatre lieux différents (figure 28). Les données reproduites en annexe 3 ont été analysées suivant différentes méthodes.

Les résultats sont reportés sur le tableau 7.

Les conditions d'application de ces méthodes et leur utilisation effective appellent quelques précisions.

Les conditions de réalisation de ces pompages d'essais ne correspondent pas toujours aux limites de validité des méthodes d'analyses employées :

1. Puits ponctuel, soit très étroit (Jacob, Theis)
2. Puits complet atteignant le mur de l'aquifère (Jacob, Theis, Papadopoulos)
3. Nappe captive (Jacob, Theis, Papadopoulos)
4. Rabattements mesurés dans un piézomètre (Jacob, Theis)



Les puits étant généralement de grand diamètre, l'effet de capacité ne peut être négligé (1), il est pris en compte par la méthode de Papadopoulos et Cooper. Aucun puits étudié n'atteint le substratum, ils ont généralement une profondeur mouillée comprise entre 20 et 25 mètres. La transmissivité obtenue après analyse des courbes de rabattement n'est donc représentative que de cette portion de l'aquifère. La condition de nappe captive implique des rabattements faibles induisant une composante verticale faible du déplacement de l'eau. Cette condition est en général vérifiée sauf pour le puits de la SAEME où le rabattement atteint 20 % de la profondeur mouillée du puits.

Malgré ces quelques remarques, en ne tenant compte que des ordres de grandeur des transmissivités, il apparaît une distribution structurée de ce paramètre.

Assez faible à proximité de la Dranse, aux alentours de $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, la transmissivité devient plus forte vers le lac jusqu'à atteindre des valeurs de $1 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$.

la distribution des coefficients d'emmagasinement semble plus aléatoire et leur valeur est fonction de la méthode d'interprétation de l'essai. Ainsi si la transmissivité au puits du Mottay passe de 0,22 à $0,16 \text{ m}^2/\text{s}$ suivant la méthode utilisée, le coefficient d'emmagasinement varie lui de plusieurs ordres de grandeur : 10 % obtenu par la méthode de Jacob, 0,01 % avec celle de Papadopoulos et Cooper.

Les coefficients d'emmagasinement sont donc plus sensibles à la méthode d'interprétation de l'essai de pompage que les transmissivités. Ceci est certainement lié au dénoyage d'une partie de l'aquifère où le coefficient d'emmagasinement devient à l'interface zone noyée-zone non saturée, un coefficient de drainage (Neuman, 1974).

B) Carte piézométrique

Une observation rapide de la figure 29 montre une répartition spatiale des gradients tout à fait semblable aux potentiels. Les gradients présentent des valeurs fortes près de la Dranse qui diminuent de moins en moins rapidement en se rapprochant du lac. Suivant l'équation écrite dans le paragraphe 2.2.1., cette évolution spatiale des gradients peut avoir deux origines : une variation du paramètre T (transmissivité) augmentant depuis la Dranse vers le lac ou une diminution

Lieu	Paramètres	Méthode		
		Jacob	Theis	Papadopoulos et Cooper
Mottay	T	0,24		0,16
	S	0,1		$1 \cdot 10^{-4}$
Abbaye	T	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	
	S	0,13	0,11	
SAEME*	T	$8,8 \cdot 10^{-3}$		
	S	0,27		
Ripaille ville*	T	$8 \cdot 10^{-3}$		

*(Données Dray M, 1970, Poncet C., 1977)

Tableau 7 : Résultats de l'interprétation des pompes d'essais

du débit s'écoulant à travers une longueur unitaire de la section de l'aquifère. Cette dernière hypothèse est qualitativement vérifiée lorsque l'on observe la forme de la surface piézométrique. Un débit Q par unité de longueur du drain traversera des isopièzes dont la longueur totale s'accroît vers le lac. Ces isopièzes représentent des sections de l'aquifère, le débit par longueur unitaire de section a donc tendance à diminuer depuis la Dranse vers le lac.

Les deux hypothèses étant plausibles et ayant les mêmes conséquences, il est difficile de conclure sur la répartition spatiale des transmissivités uniquement à l'aide de la carte piézométrique.

C) Calage du modèle

Les simulations visant à identifier le champ des transmissivités peut être fait en régime permanent en éliminant ainsi les effets induits par les coefficients d'emmagasinement.

En effet, l'équation de la diffusivité ne fait apparaître des termes en S (coefficients d'emmagasinement) qu'en facteur du terme temporel $\frac{dh}{dt}$.

Estimer les transmissivités au centre de chaque maille discrétisant le système, nécessitait la connaissance précise de tout les termes intervenant dans le bilan réel à un moment donné où les variations piézométriques étaient faibles. Nous avons choisi pour cela la période du 18 au 22 Juin 1982. Nous connaissions alors avec une bonne précision les pertes de la Dranse sur le delta et nous avons estimé les débits échangés avec le lac. Les débits de prélèvement sont bien connus. Seule l'infiltration restait à préciser ; faible en cette saison, elle ne pouvait être nulle, les périodes précédentes ayant été pluvieuses et la surface de l'aquifère étant stable.

L'estimation a ainsi pu être contrôlée à l'aide des courbes piézométriques tracées pour le 22 juin et des termes du bilan.

La première simulation nous a permis de tester l'hypothèse d'une répartition homogène des transmissivités, celles-ci étant égales à la valeur obtenue au puits du Mottay.

Les résultats de cette première étape ainsi que les mesures de terrain peuvent être comparés sur le tableau 8.

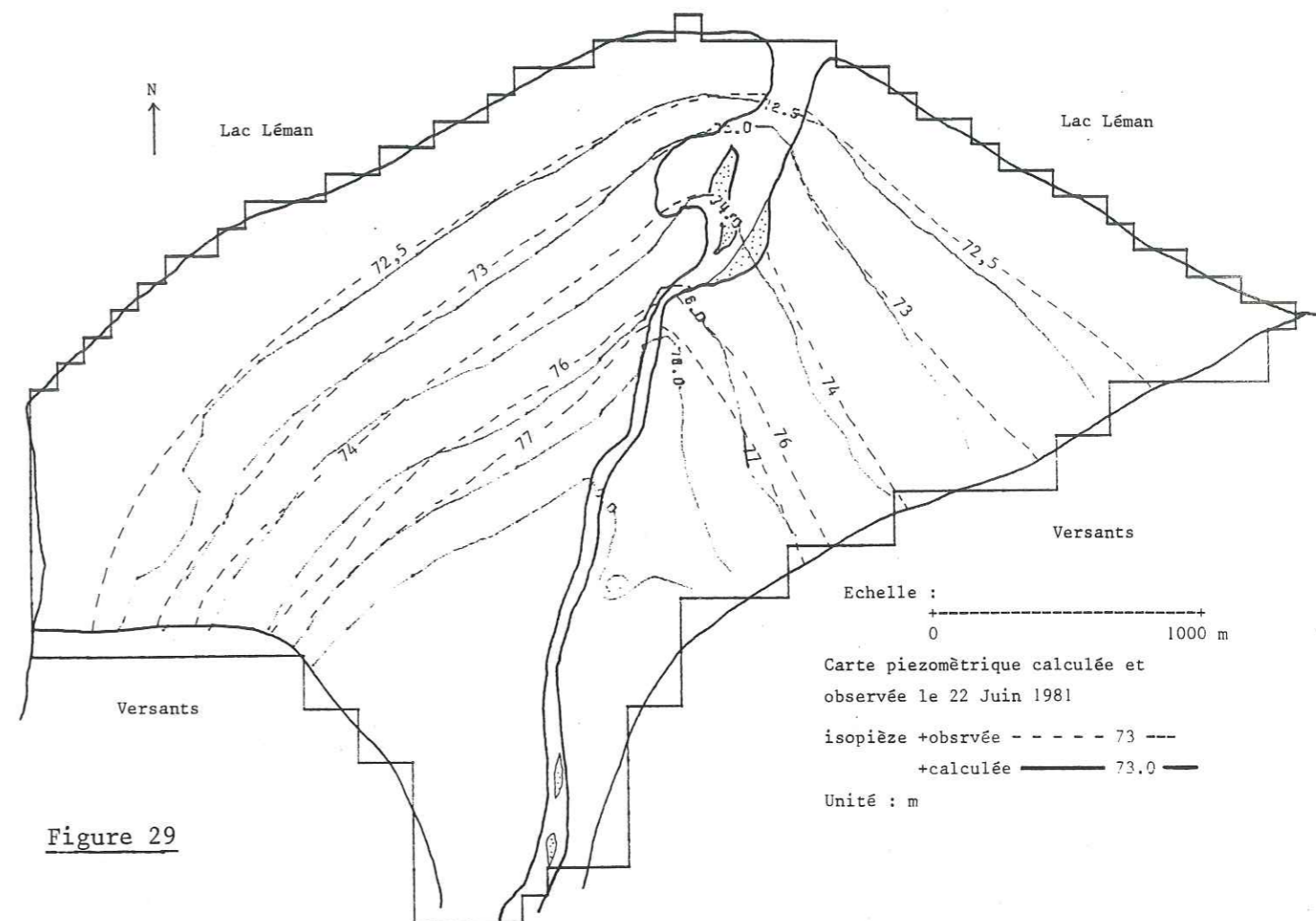


Figure 29

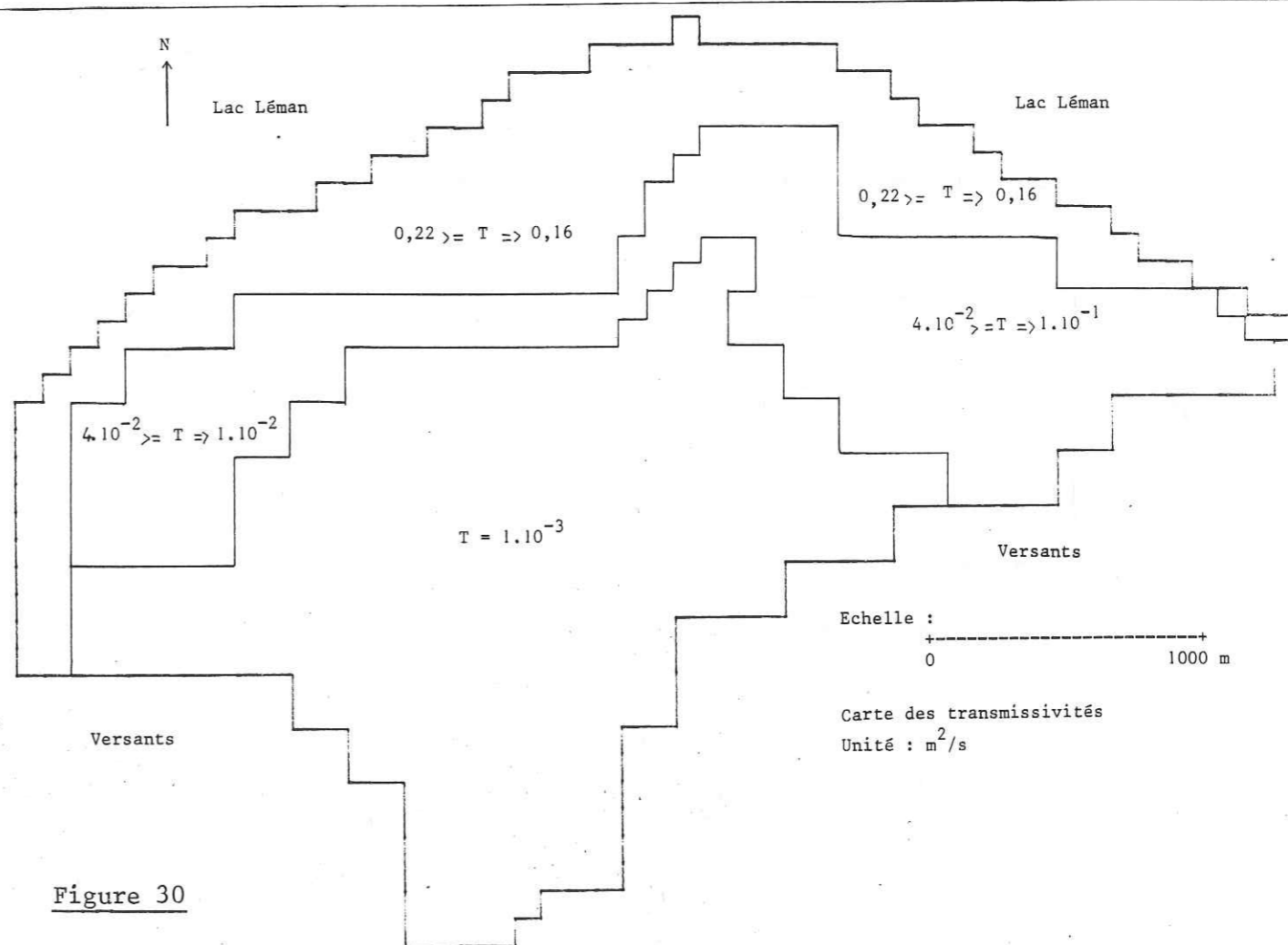


Figure 30

Il paraît évident dès à présent que cette hypothèse n'est pas réaliste, cette conclusion est confirmée par la carte piézométrique calculée montrant une évolution des gradients positive depuis le lac vers la Dranse. Mais ils restent en-deça des gradients observés.

Nous déduisons donc de cette première simulation :

- que les débits qui transitent dans le modèle sont trop importants,
- que la divergence des sens d'écoulement ne suffit pas à expliquer l'évolution spatiale des gradients.

Pour diminuer les entrées d'eau calculées et augmenter les gradients de la surface piézométrique du modèle, nous avons repris la répartition spatiale indiquée par les pompages d'essais.

Finalement, après de nombreux essais et compte tenu des erreurs liées à la mesure de la piézométrie, nous avons obtenu le champ de transmissivité présenté sur la figure 30. Une telle répartition spatiale de ce paramètre nous a permis de calculer une carte piézométrique proche de celle observée le 22 Juin 1981. Les débits calculés transitant dans le modèle sont également comparables aux débits estimés ou mesurés sur le terrain (tableau 8).

Tableau 8

Bilan hydrique de l'aquifère (régime permanent, 22 Juin 1981)

Termes du bilan	estimation	lere simulation	modèle calé
Lac	1,5 \pm 0,5	5,3	0,8
Dranse	-1,1 \pm 0,5	-5,5	-1,1
Prélèvements	0,3	0,3	0,3
Infiltration	-0,1 (?)	-0,1	-0,1

Débit entrant < 0

Débit entrant > 0

Unité : m³/s

Les coefficients d'emménagement sont calés lors de phases de simulation en régime transitoire, il y avait donc interférence entre la précision des entrées du système et l'identification du champ de ce paramètre.

De surcroît, les données de terrain sont très variables suivant la méthode d'interprétation des essais. Nous avons donc estimé les coefficients d'emménagement à partir des ordres de grandeur des résultats des interprétations par les méthodes de Jacob ou de Theis. Suite à plusieurs essais, nous sommes parvenus à un champ de coefficients d'emménagement présenté sur la figure 31.

Cependant, il faut remarquer qu'une variation d'un ordre de grandeur sur ce paramètre n'a pas une influence notable sur le comportement de l'aquifère. Ceci indique que durant ces simulations, le terme $\frac{dh}{dt}$ reste faible par rapport au terme permanent à l'exception de la période d'étiage en Février-Mars 1982 où l'écart devient important (figure 32).

D) Remarques sur les champs de paramètres

La répartition spatiale des paramètres physiques est étroitement liée à la nature granulométrique et à la structure sédimentologique de la matrice. Suivant cette remarque, nous avons recherché les causes à l'origine de la forme caractéristique du champ des transmissivités.

Dans un premier temps, on peut considérer que dans un système deltaïque comme celui de la Dranse, les sédiments les plus grossiers se déposent en amont et à proximité de l'axe du lit de la rivière. En s'éloignant de cet axe et vers l'aval, la vitesse du courant diminue. La rivière perd ainsi sa capacité à transporter des éléments de taille importante, la sédimentation est donc plus fine. En se basant sur cette observation, les milieux devraient être plus perméables en amont et à proximité de la rivière que vers l'aval. Ceci est l'inverse de ce que l'on observe sur le terrain.

Nous avons donc complété cette analyse globale par une analyse plus fine de la structure sédimentologique du delta (cf. chapitre 3). Il en résulte que le delta est constitué de chenaux à perméabilité importante associés à des zones très argileuses à perméabilité très faible. Selon une coupe verticale de la formation deltaïque, on observerait une succession de lentilles argileuses et de lentilles graveleuses étroitement imbriquées. par contre, un plan horizontal présenterait des chenaux graveleux divergents par rapport à l'axe Nord-Sud du delta, au milieu d'une matrice plus argileuse.

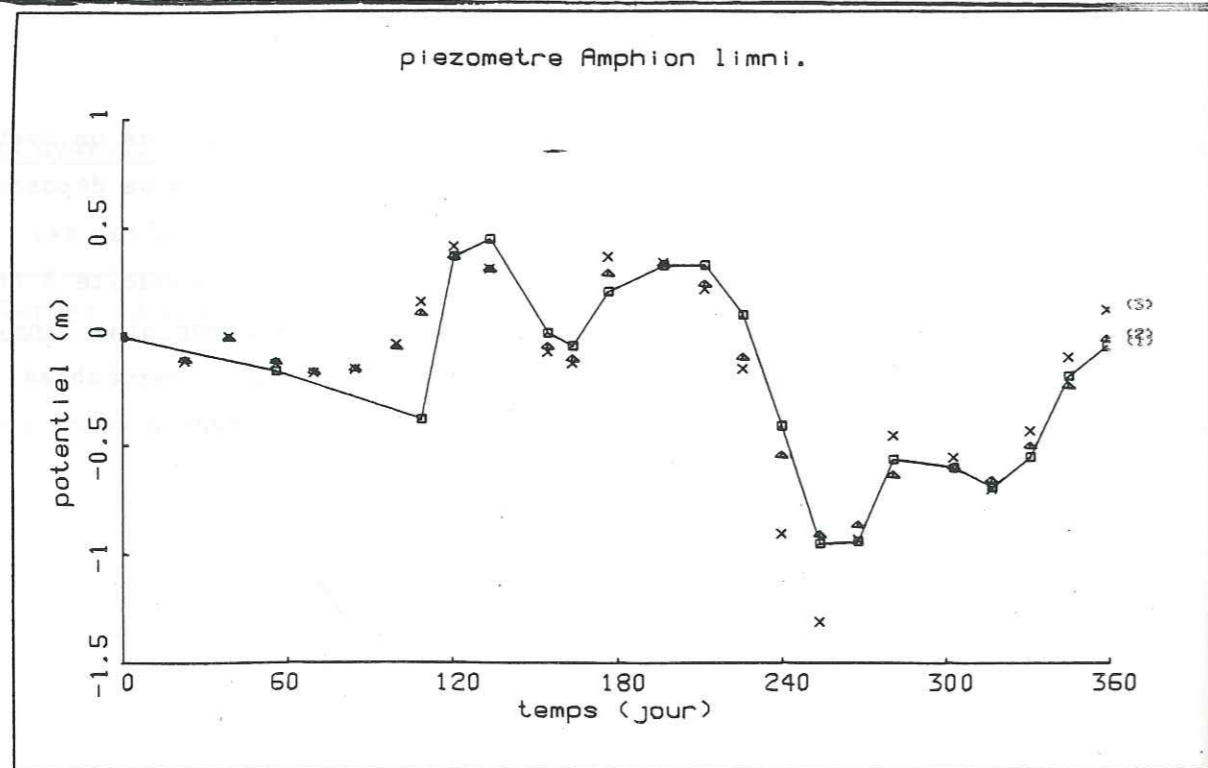
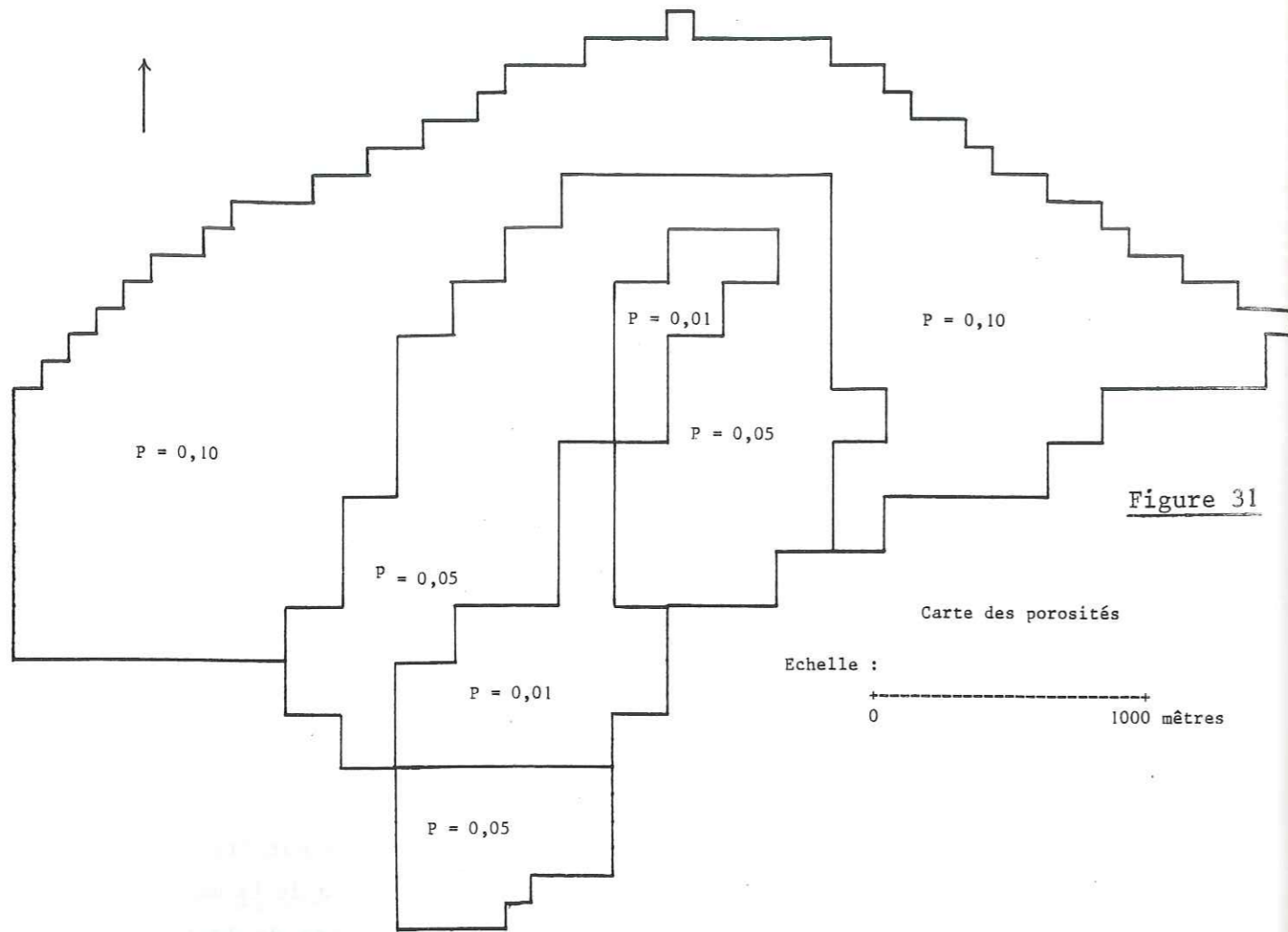


Figure 32

- (1) potentiels observés
- (2) " calculés (calage)
- (3) " " (porosités divisées par 10)

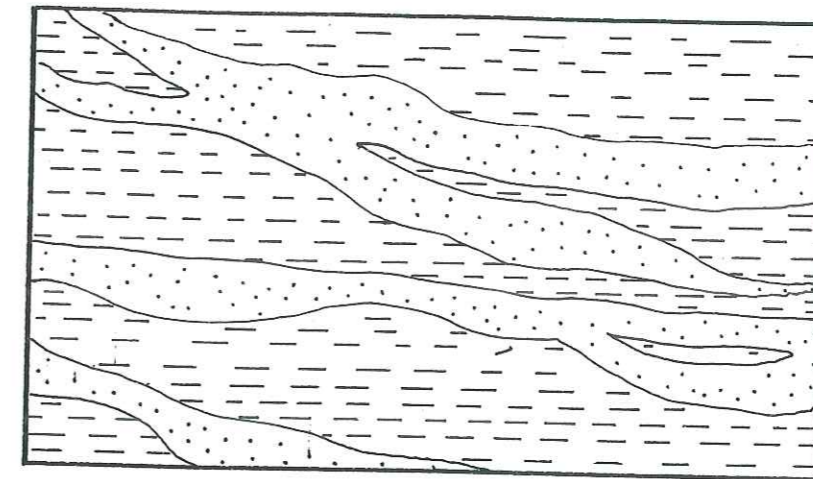


Figure 33
Arrangements des corps sédimentaires dans une formation deltaïque.
Sables
Argiles

Figure 33

Nous suggérons à la suite de ces remarques que les écoulements à faible composante verticale se produisent préférentiellement à travers des zones perméables. Par contre les écoulements à forte composante verticale doivent traverser des lentilles argileuses moins perméables. La transmissivité apparente suivant ce raisonnement, sera donc d'autant plus faible que les gradients sont forts. Plus précisément, on peut dire que la nature divergente des écoulements par rapport à l'axe de la Dranse provoque un écoulement à composante verticale non négligeable à proximité de la Dranse induisant des transmissivités apparentes plus fortes. On peut également supposer que la forme du champ de perméabilité résulte du même phénomène.

E) Validité des champs de paramètres

Ces champs ont été estimés et sont validés pour le cycle saisonnier allant de Juin 1981 à Juin 1982, mais seront-ils valables pour d'autres périodes ?

Le total des précipitations durant le cycle considéré à été de 970 mm et la moyenne annuelle entre les années 1963 et 1976 a été de 940 ± 160 mm. La période Juin 1981 à Juin 1982 n'est donc pas une année exceptionnelle. les paramètres physiques de l'aquifère identifiés pour cette période sont donc représentatifs du gisement pour des conditions climatiques habituelles.

2.5 Analyses succinctes des données géochimiques

Des échantillons prélevés régulièrement entre Décembre 1981 et Décembre 1982 ont été analysés (annexe 1) afin d'obtenir les concentrations en différents éléments majeurs. L'observation de la répartition spatiale de certains de ces éléments ou de leur évolution dans le temps en un point précis permet de tirer quelques conclusions qualitatives quant au comportement du système au niveau du transport de matières en solution.

Le chimisme de l'eau dans l'aquifère du delta de la Dranse dépend principalement de quatre facteurs :

- 1- Le volume des précipitations infiltrées
- 2- La concentration d'éléments dissouts dans la Dranse
- 3- La nature de la matrice
- 4- Les infiltrations de polluants d'origine agricole, domestique ou industrielle

Le point 3 a été présenté dans le paragraphe II.1.2., montrant l'évolution des eaux, de la rivière vers le lac, suivant les sens d'écoulement. Afin d'illustrer les 3 autres points, nous avons choisi de présenter l'évolution de la concentration en ions Cl^- , en fonction du temps, en différents points du delta (figure 34). Le choix de l'ion Cl^- a été fait en considérant les faibles interactions qu'il subit vis-à-vis de la matrice de l'aquifère. Nous pouvons ainsi nous affranchir de l'influence de la composition de la matrice.

Quelques remarques doivent être faites au vue de ces courbes :

- 1- Les valeurs moyennes sont spatialement variables et de façon non structurée : aucun rapprochement ne peut être fait entre la position du point, notamment sa distance à la Dranse, et la valeur moyenne observée.
- 2- La Dranse présente un maximum durant l'hiver particulièrement marqué en Février et Mars. Il correspond à la période de salage des routes du bassin versant de la Dranse.
- 3- Ce maximum est perceptible, quoique aplati, aux piézomètres de la S.T.E.P. avec un décalage de 2 mois et demi, et de Ripaille Limni avec un décalage de 4 mois (point 2).
- 4- Les points Sbleunes et Ripaille ville présentent des concentrations plus élevées que sur le reste du domaine, signe sans doute, d'une pollution liée à des rejets d'eaux usées dans l'aquifère ou liée à des pratiques culturelles (point 4).

Les principales conclusions qui résultent de ces remarques font apparaître que la chimie du delta est bien liée à l'évolution des concentrations en

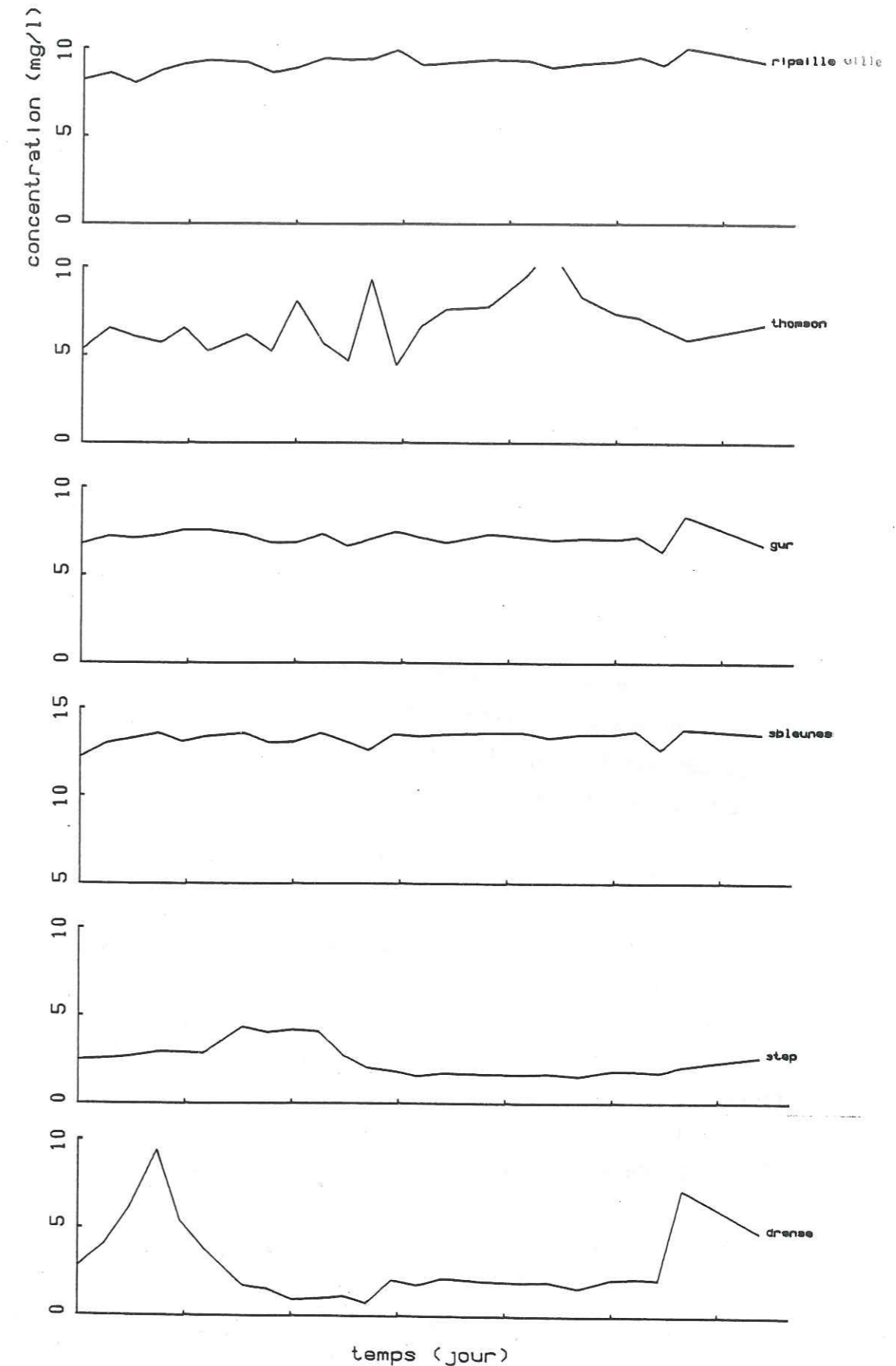


Figure 34 : Concentration en Cl^- de Décembre 1981 à Janvier 1983

éléments dissous dans la Dranse. Cette influence est d'autant plus nette que l'on se trouve à proximité des berges. Les effets de dispersion et les mélanges provoquent un aplatissement puis un effacement des pics de concentration en chlorures observés dans la Dranse.

Les concentrations en NO_3^- reportées sur la figure 35 confirme le point 4 pour le puits de Ripaille ville et le piézomètre de Sbleunes.

En effet, les valeurs de NO_3^- en ces lieux sont nettement plus élevées que sur les autres points. A Ripaille ville, ceci peut être mis en relation avec la proximité de vignes. Aux Sbleunes, les pratiques culturales ne sont peut-être pas les seules en cause, du fait de la présence de nombreux pavillons reliés à un réseau d'assainissement.

L'évolution au cours du temps des teneurs en NO_3^- est intéressante, la courbe correspondant à la Dranse étant relativement plate. Notons que cette absence de variations notables est signe d'un flux de NO_3^- directement proportionnel au débit des cours d'eau. Les différences de concentrations au cours du temps aux différents points du delta doivent être reliées aux infiltrations provenant de la surface : l'eau précipitée et infiltrée sur le delta percole à travers le sol, entraînant des nitrates en solution vers la zone saturée. Le flux de NO_3^- sera donc fonction du volume des précipitations et de la quantité de NO_3^- disponible dans le sol.

Parallèlement à ces remarques, on peut également noter que l'eau de l'aquifère du delta est très carbonatée calcique avec un titre hydrotimétrique variant de 15 à 30 T°H (degrés français). Les caractéristiques de cette eau satisfont aux normes européennes de potabilité (Degremont, 1976) sauf en deux secteurs (figure 37) :

- 1- A proximité du puits du Mottay, rive droite
- 2- En aval de la décharge intercommunale en rive gauche

Le secteur 1 présentait jusqu'à une date récente (Avril 1976) une concentration en chrome hexavalent de 0,25 mg/l dépassant la norme européenne. Cependant depuis 1980, en raison de l'arrêt des rejets d'une usine de chromage située à proximité (Chassaing, Poncet, 1977, Poncet 1977), la concentration en cet élément est devenue inférieure à la concentration maximale réglementaire de 0,05 mg/l. On a montré par ailleurs la présence de solvants, comme le trichloréthylène, rendant l'eau impropre à des usages domestiques (Léon, 1981).

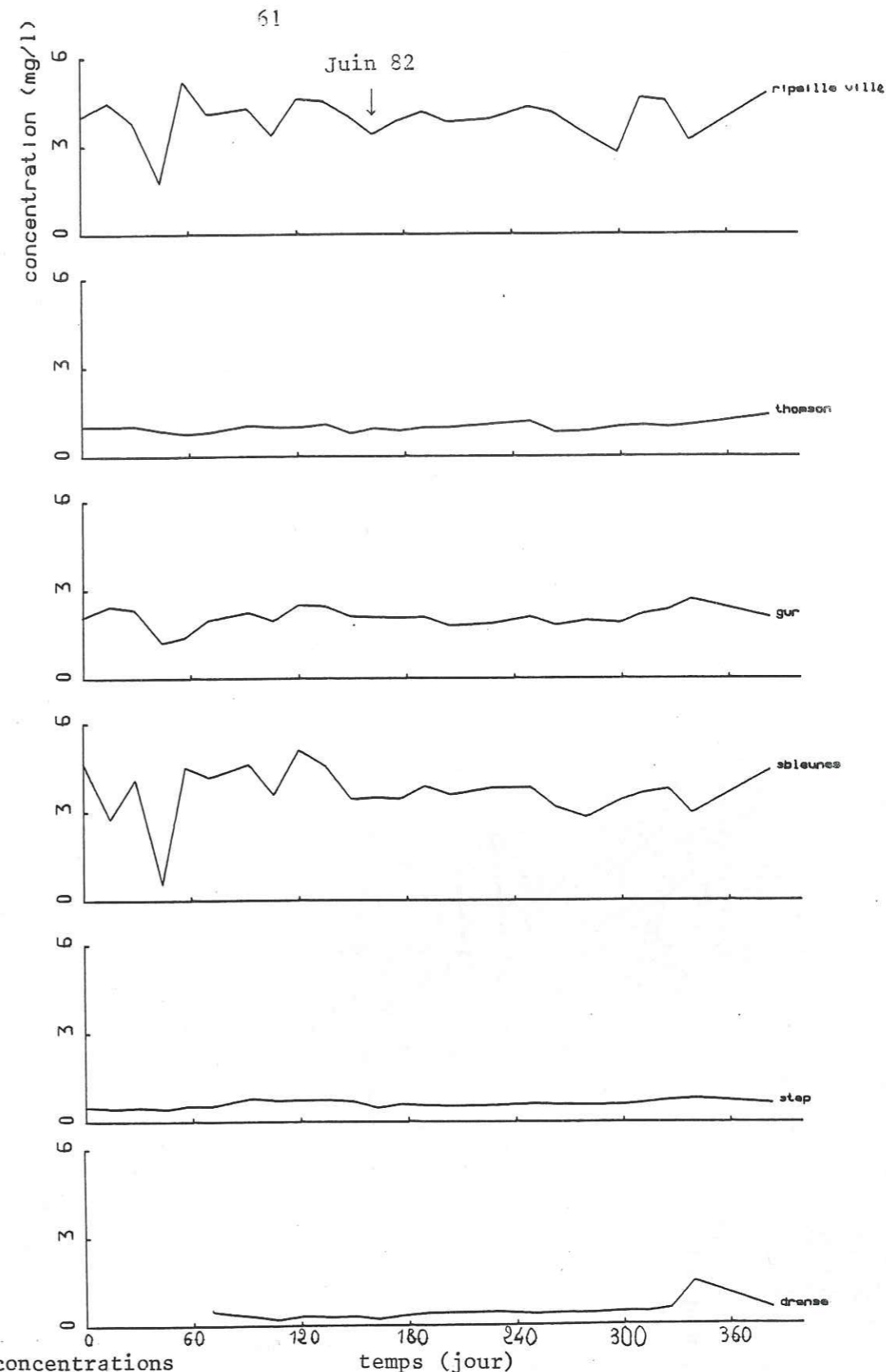


Figure 35 : Evolution des concentrations en NO_3^- en différents points de Décembre 1981 à Janvier 1983

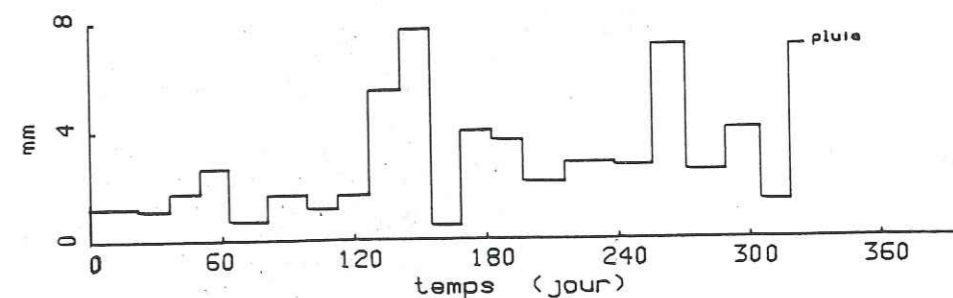
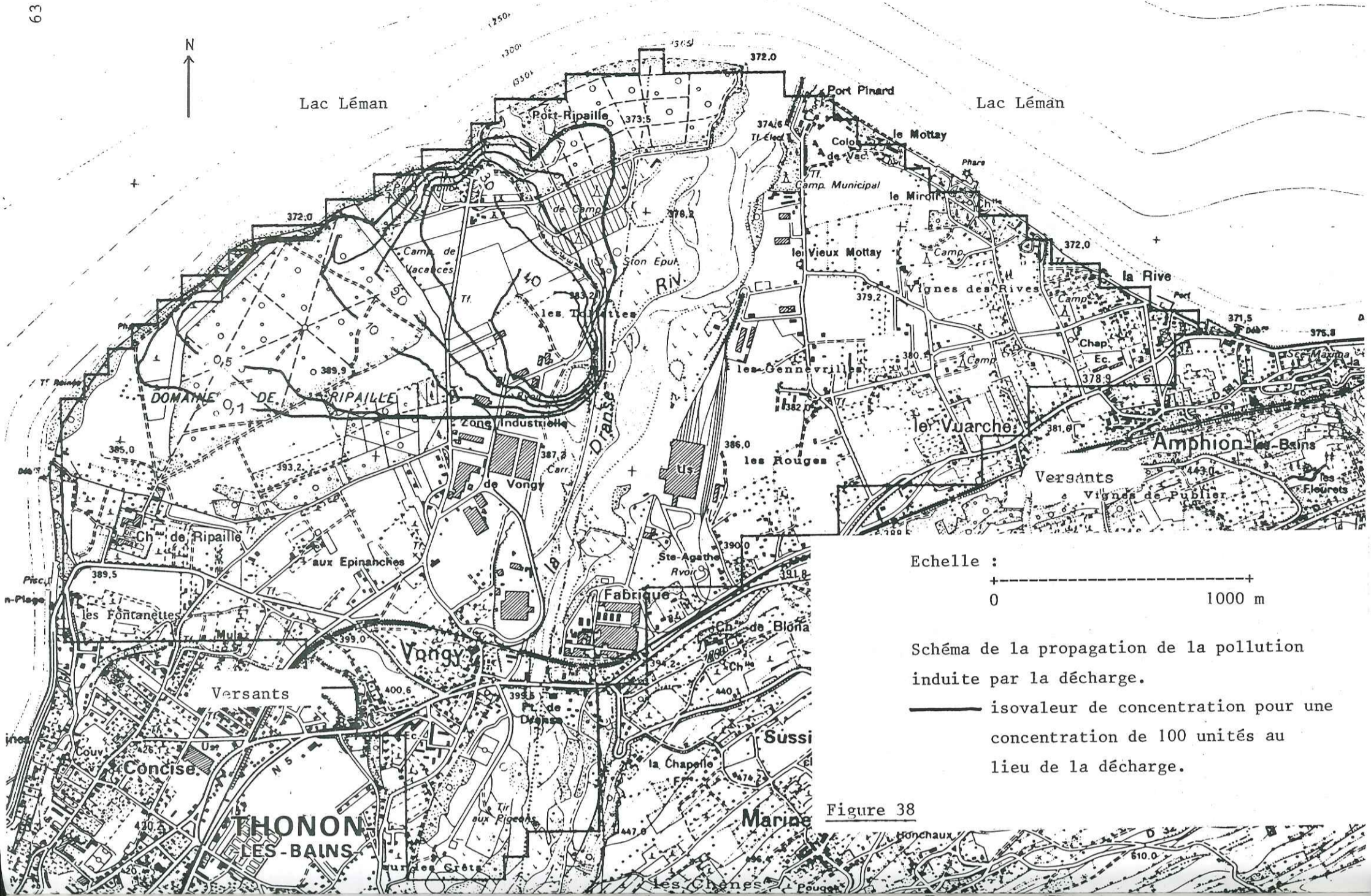


Figure 36 : Hauteur des précipitations de Décembre 1981 à Décembre 1982



Echelle :
 +-----+
 0 1000 m

Schéma de la propagation de la pollution induite par la décharge.

— isovaleur de concentration pour une concentration de 100 unités au lieu de la décharge.

Figure 38

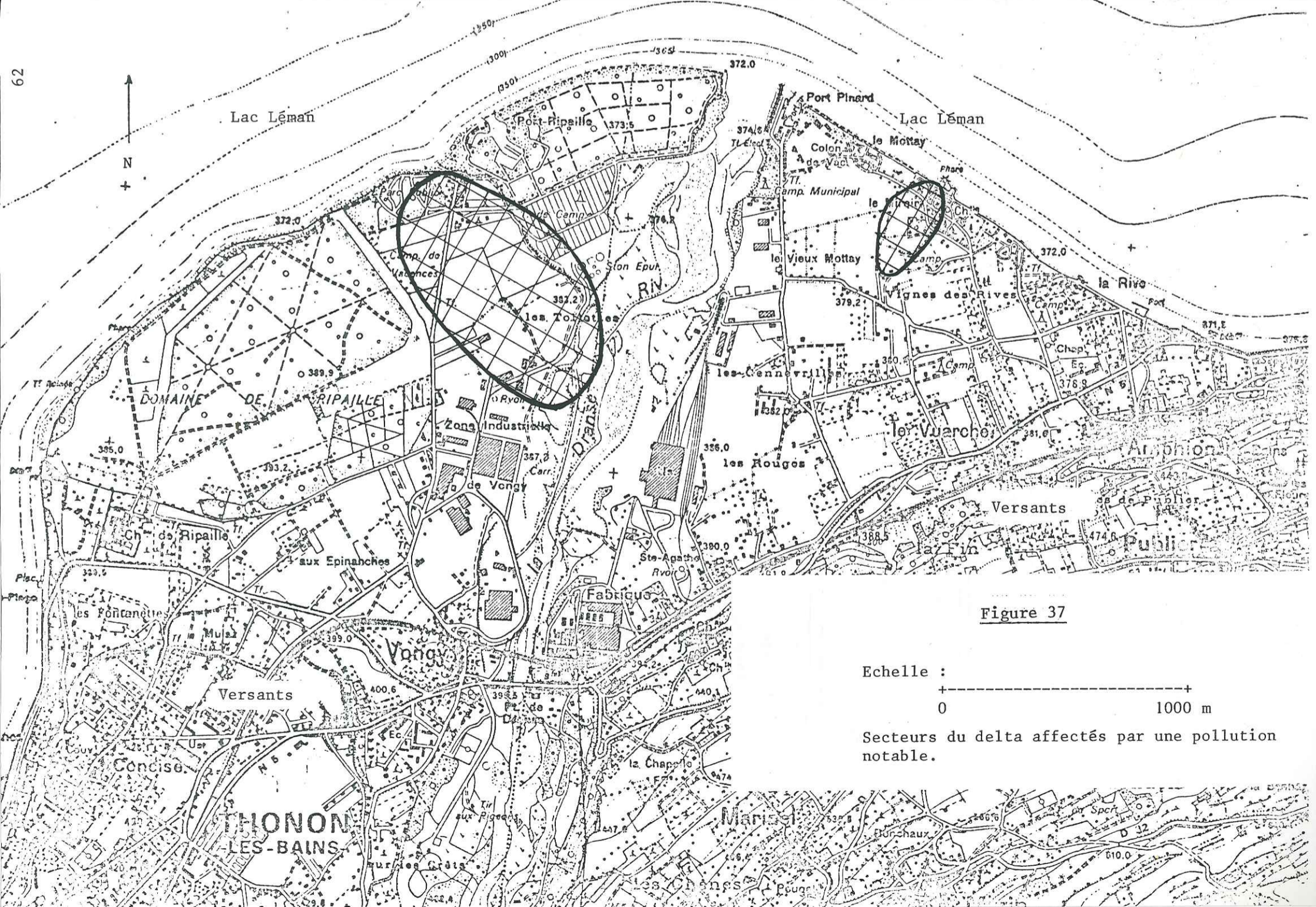


Figure 37

Echelle :
 +-----+
 0 1000 m

Secteurs du delta affectés par une pollution notable.

Les analyses d'eau prélevées à des piézomètres situés en zone 2 présentent les particularités suivantes :

- caractéristique d'un milieu réducteur
- déséquilibre de la balance ionique (indiquant que des éléments généralement à l'état de traces et non analysés sont ici à des concentrations non négligeables)
- eau brune, odeur désagréable (H_2S)

Ceci signifie à l'évidence que cette eau n'est pas potable et peut même présenter des dangers dans le cadre d'une utilisation industrielle (infection de blessure suite à un contact avec l'eau provenant d'un pompage, ingestion accidentelle de cette eau...).

Les limites de cette zone sont floues. Nous avons tenté de mieux les définir à l'aide du programme Newsam. Notons au préalable que ce modèle ne prend en compte que les phénomènes de convection en négligeant les phénomènes de dispersion. Les résultats présentés sur la figure 38 doivent donc être utilisés avec précaution, les valeurs exprimées ne représentent que des ordres de grandeur. La figure 38 montre la répartition spatiale de la concentration en un élément quelconque en régime permanent pour une concentration imposée de 100 au lieu de la décharge.

2.6. Cadre d'une gestion rationnelle et globale

2.6.1. Analyse du bilan actuel

L'année climatique courant du mois de Juin 1981 au mois de Juin 1982 est une année ordinaire dans la série des précipitations moyennes annuelles enregistrées à Thonon. Le bilan des débits entrant et sortant du delta est donc représentatif des années climatiques normales.

Sur la figure 39 sont représentés les différents termes du bilan calculés par le modèle ; l'intégration de ces courbes donne les résultats suivants en million de m^3 et en m^3/s (débit moyen).

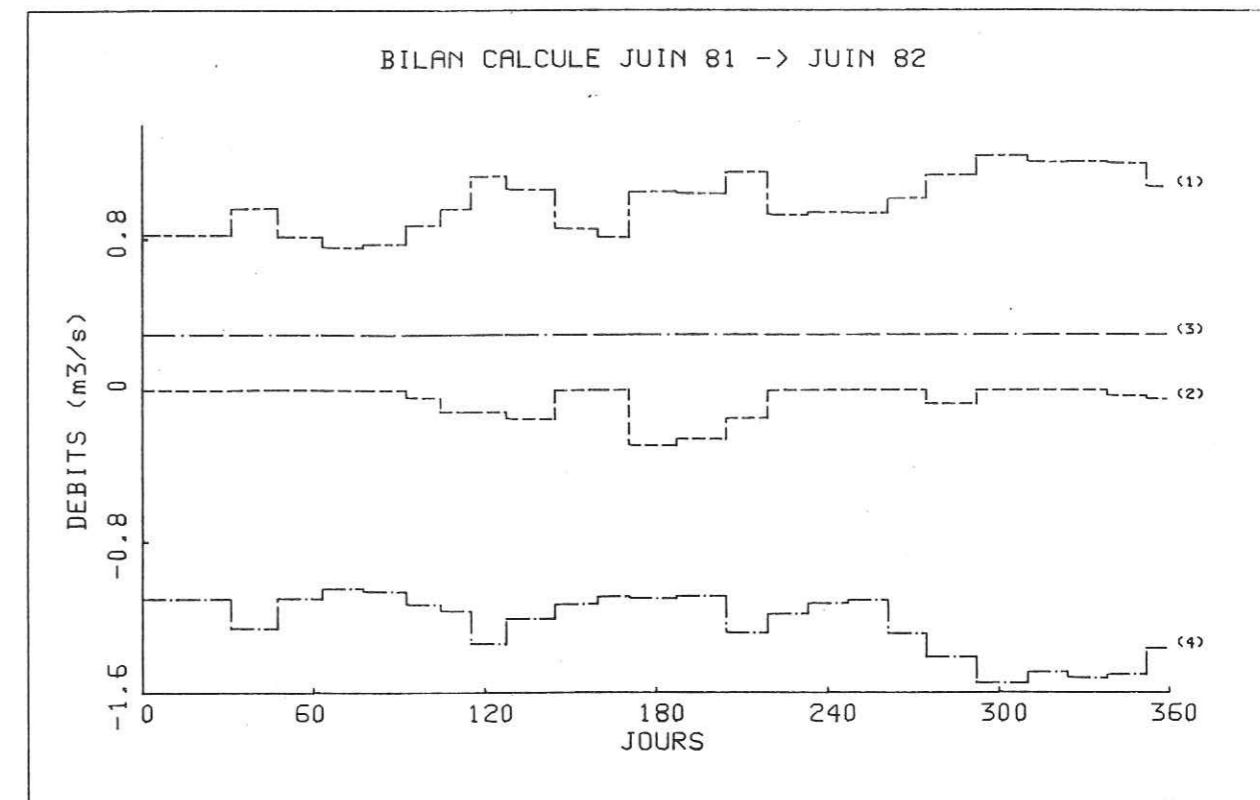


Figure 39

Evolution des différents termes du bilan hydraulique du delta de la Dranse de Juin 1981 à Juin 1982.

- (1) débits passant de l'aquifère vers le lac Léman.
- (2) débits d'infiltration.
- (3) somme des débits prélevés.
- (4) débits de perte de la Dranse vers l'aquifère.

+ débits entrant dans l'aquifère > 0
 + débits sortant de l'aquifère < 0

Termes du bilan		$\times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$	$\times 1 \text{ m}^3/\text{s}$
Entrée	Dranse	38	1,2
	Précipitations	2	$0,6 \cdot 10^{-1}$
	Total	40	1,3
Sortie	Lac	31	$9,8 \cdot 10^{-1}$
	Prélèvements	9	$2,9 \cdot 10^{-1}$
	Total	40	1,3

Tableau 9 : Bilan hydrique de l'aquifère pour la période Juin 81 - Juin 82

Les variations du volume d'eau contenu dans l'aquifère se soldent par un déficit de 0,14 million de m^3 soit 0,3 % du volume d'eau concerné par le bilan. Cette valeur étant négligeable, on peut considérer ce bilan comme bouclé avec une variation de stock nulle.

Le volume d'eau du gisement, en considérant une profondeur moyenne mouillée de 60 mètres et une porosité comprise entre 0,07 et 0,03 se situe vraisemblablement entre 15 et 35 millions de m^3 . Il transite donc chaque année à travers l'aquifère un volume d'eau comparable au volume d'eau qu'il contient. Remarquons que l'on peut alors estimer le temps de renouvellement global à 1 an.

Un volume de 40 millions de m^3 transitant par an dans l'aquifère ne signifie pas qu'un volume identique soit disponible pour satisfaire une éventuelle demande entropique :

- Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau ne sont pas constantes sur tout le domaine. Le volume d'eau disponible ne peut donc être considéré comme une ressource homogène. Ainsi suivant la nature de la demande, l'exploitant pourra prélever une eau dont les caractéris-

tiques physico-chimiques doivent être comprises dans des normes différentes (industrielles, domestiques). Par exemple, un ouvrage de pompage alimentant un circuit d'eau domestique ne pourra être implanté en aval de la décharge ou à proximité du puits de Mottay (figure 37). Cette première remarque a donc tendance à minorer le potentiel d'exploitation de l'aquifère du delta de la Dranse.

- Des prélèvements, situés à proximité des rives du lac, en déprimant la surface piézométrique, induisent une pénétration d'eau d'origine lacustre. Le bilan global de l'aquifère est alors modifié, le lac devenant un terme source du système. Suivant cette seconde remarque, le débit potentiel d'exploitation du delta de la Dranse est bien supérieur à 40 millions de m^3 , si l'on place les ouvrages de pompage à proximité du Léman. Le débit maximum théorique est alors égal à celui du Rhône à l'exutoire du lac soit $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $630 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.

L'évaluation du potentiel d'exploitation de l'aquifère du delta de la Dranse est donc particulièrement délicate. Sa définition doit être faite à l'intérieur de contraintes telles que :

- l'exploitation de ressources renouvelables dans une période donnée,
- les rabattements induits par les prélèvements, à proximité des ouvrages de pompage, doivent être inférieurs à 20 mètres afin d'en éviter le dénoyage ; la profondeur mouillée des puits étant généralement de cet ordre.

La présence du lac et sa fonction du potentiel imposé longeant les limites Nord, Est et Ouest du delta de la Dranse nécessite de poser une contrainte supplémentaire (que l'on peut ou non satisfaire) :

Limitier les conséquences des prélèvements du delta au seul système hydraulique compris dans le périmètre du delta (aquifère du delta + Dranse).

Notons qu'il paraît utile de définir des règles visant à préserver un débit significatif de la Dranse à son embouchure (dans une optique de conservation des milieux naturels). En effet, l'étude des mécanismes qui régissent les échanges entre la Dranse et l'aquifère a montré que même lors de périodes sèches, le débit potentiel de perte de la Dranse ne dépassait, ni n'approchait le débit de la Dranse. Ainsi, on peut penser au vu de ces résultats (cf. II.1.1.) que plus l'étiage sera prononcé, plus le débit de perte sera faible, décrivant ainsi un système d'autorégulation vraisemblablement efficace.

2.6.2. Vulnérabilité de la ressource

La conservation et l'amélioration de la ressource en eau du delta de la Dranse nécessitent de porter une grande attention à toutes les activités ayant lieu dans son périmètre et susceptibles de porter atteinte aux propriétés physico-chimiques de l'eau. Ces risques, pouvant induire une modification des capacités de la ressource, sont d'autant plus importantes que l'aquifère est libre. L'eau s'infiltrant depuis la surface, entraîne en suspension ou en solution un certain nombre de substances qui peuvent détériorer la nature chimique de l'eau de l'aquifère. Néanmoins, en percolant à travers la zone non saturée, l'eau est en partie épurée par adsorption sur les particules fines en présence. La matière organique peut également être partiellement dégradée par des bactéries aérobies. Cette épuration est d'autant plus efficace que la zone non saturée est épaisse et/ou que le temps de percolation de l'eau est long avant d'atteindre la surface de la nappe. Sur le delta de Dranse, l'eau transite à travers la zone non saturée en moins de 15 jours. Cette période relativement brève implique une épuration naturelle vraisemblablement peu efficace.

Par ailleurs, les sources de pollutions sont très nombreuses, réelles ou potentielles. Elles sont liées à toutes les occupations et activités humaines sur le delta ; des habitations aux industries, elles sont ou risquent d'être à l'origine d'altérations de la ressource :

- infiltration des eaux de pluie ayant lessivé des terres agricoles, entraînant ainsi des nitrates vers l'aquifère ;
- rejets d'effluents industriels ;
- fuites des réseaux d'assainissement ;
- fuites de fosses septiques ;
- décharges ménagères ou industrielles.

Les systèmes hydrauliques alimentant l'aquifère sont également susceptibles de détériorer la ressource : une pollution importante de la Dranse se répercutera rapidement dans l'aquifère où elle sera particulièrement sensible à proximité des berges. En s'éloignant, les risques diminuent par dilution et dispersion du polluant éventuel. Le même type de phénomène pourrait apparaître à proximité du lac, induit par une pollution du Léman associée à des pompages importants à quelques dizaines de mètres des rives.

2.6.3. Conditions d'exploitation de la ressource

En intégrant les informations de nature physico-chimique et hydrodynamique, nous avons pu diviser le delta de la Dranse en quatre zones (figure 40) caractérisées par :

- la nature de l'eau que l'on peut y prélever ;
- les valeurs des paramètres hydrodynamiques et la présence de limites de l'aquifère impliquant des rabattements plus ou moins importants. Les valeurs de ces rabattements conditionnent en partie le prix de l'exploitation. Plus les rabattements sont importants, plus le puits devra être profond et la pompe puissante, la colonne d'eau à remonter étant d'autant plus haute. Nous avons reporté sur la figure 41 des courbes d'égal rabattement au lieu des pompages, pour un débit unitaire de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Notons à ce sujet que tout rabattement au lieu d'un pompage sera directement proportionnel à la valeur indiquée sur la carte :

$$R_E = Q_E \times R_C$$

avec R_E : rabattement effectif lors de l'exploitation (m)

Q_E : débit d'exploitation (m^3/s)

R_C : rabattement spécifique ($\text{m}/(\text{m}^3/\text{s})$)

Zone 1

Situation géographique : lit et berges de la Dranse

Caractéristiques d'exploitation : il transite à travers cette zone l'équivalent du débit de perte de la Dranse. Cette eau alimente le reste de l'aquifère ou rejoint directement le lac aux abords de l'embouchure de la Dranse. Les caractéristiques physico-chimiques de cette zone sont très variables. Elles sont étroitement liées aux caractéristiques des eaux de la Dranse. La proximité de cette source d'alimentation induit donc un risque de pollution non négligeable. Ce risque résulte du faible temps de transfert des eaux entre la Dranse et les pompages situés dans cette zone, réduisant ainsi le rôle épurateur de l'aquifère. Rappelons également qu'une chasse particulièrement violente du barrage du Jotty, situé en amont de Bioge, provoqua, il y a quelques années, une infiltration de limon très fin vers l'aquifère. Ces limons se retrouvèrent rapidement dans les puits de l'usine Braunsstein situés à quelques dizaines de mètres de la Dranse. Ils provoquèrent alors de graves problèmes techniques à l'entreprise (Poncet, 1977). Notons également que toute pollution dans cette zone se répercutera dans les zones avalées. Un exemple démonstratif de ce type de situation est donné par la décharge intercommunale qui induit en aval une pollution très importante de l'aquifère. Par ailleurs les

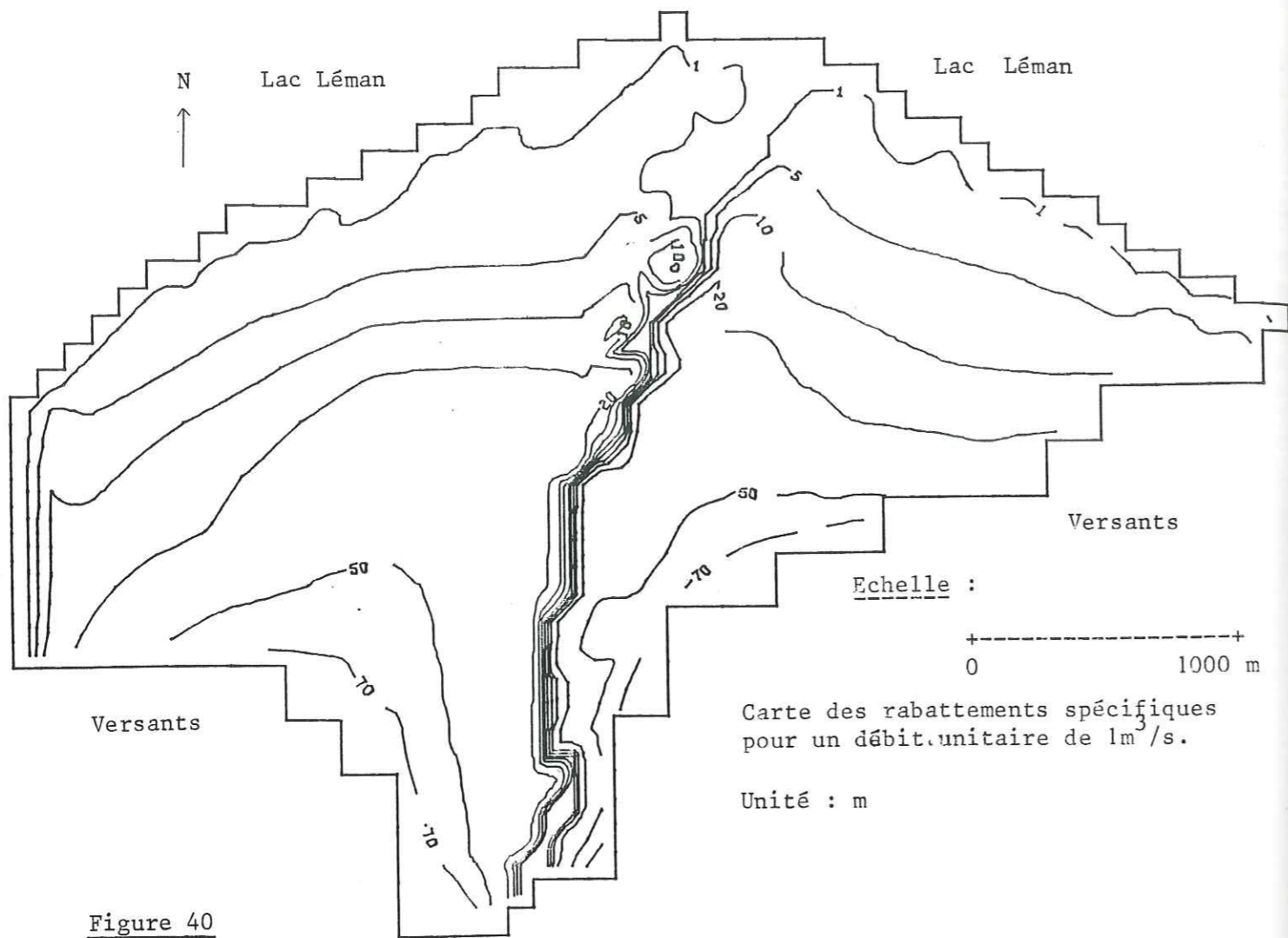


Figure 40

Nota : La conception de cette figure s'appuie sur un comportement linéaire de l'aquifère. Elle ne revêt donc un sens quantitatif que pour des prélèvements induisant des rabattements faibles aux abords de la Dranse. En effet, si une zone non saturée apparaît dans l'axe du drain, les paramètres physiques du système changent et son comportement devient donc non linéaire. Plus généralement, tout rabattement important (significatif par rapport à l'épaisseur de l'aquifère) induit une modification importante des paramètres physiques. La transmissivité s'écrivant :

$$T = \int_{\text{toit}}^{\text{mur}} K dh \quad (\text{mur} = \text{surface piézométrique pour un aquifère libre})$$

si K est la perméabilité, paramètre spécifique de la matrice de l'aquifère et dh hauteur unitaire mouillée de l'aquifère, une diminution importante de la profondeur mouillée implique une diminution du même ordre de T.

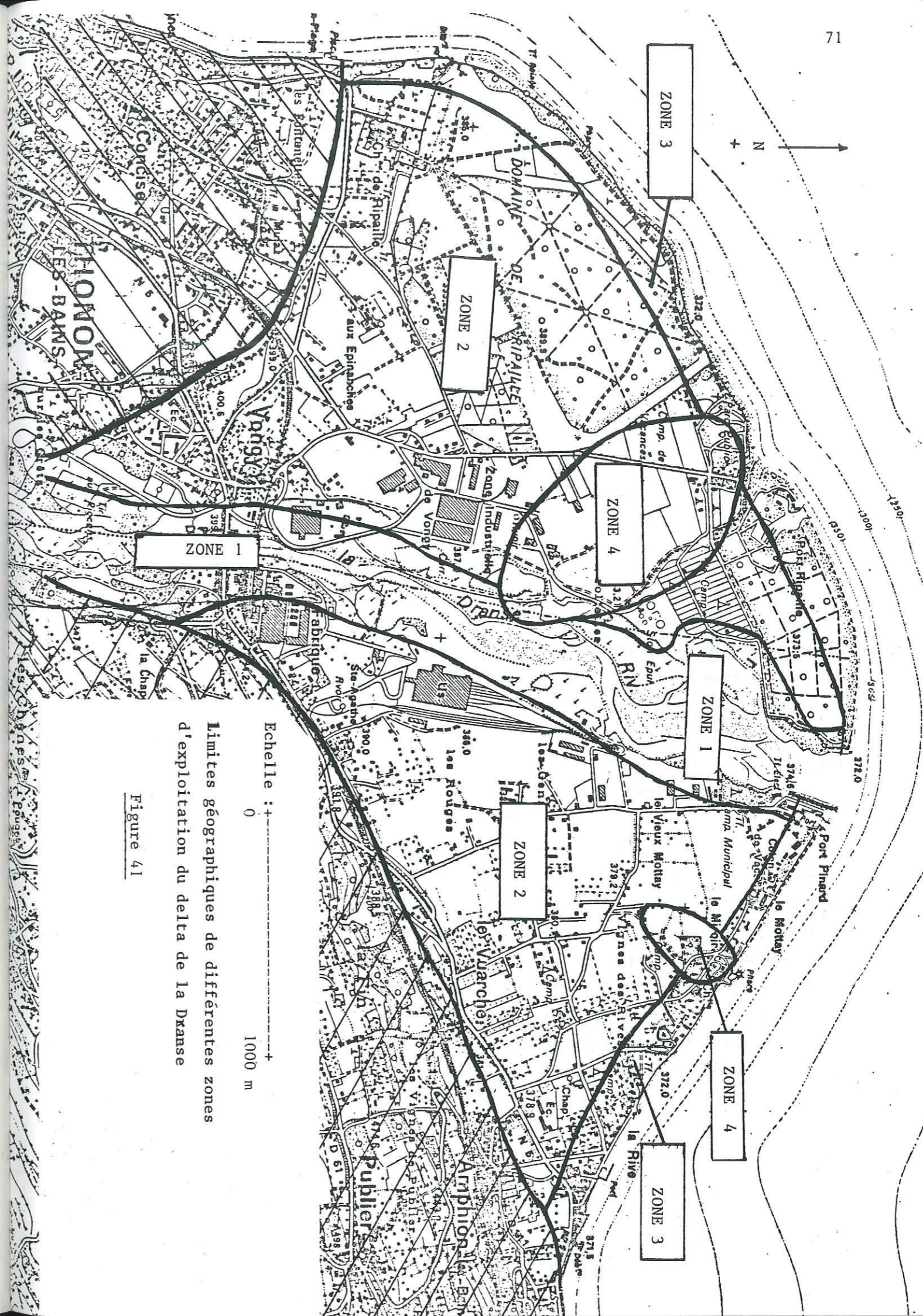


Figure 41

Limites géographiques de différentes zones d'exploitation du delta de la Dranse

rabattements spécifiques dans cette zone sont généralement faibles à proximité immédiate de la Dranse. Par contre, dès que la distance aux berges augmente, les rabattements deviennent beaucoup plus forts notamment en amont du delta.

Zone 2

Situation géographique : elle englobe les deux rives du delta à l'exclusion des abords de la Dranse, des rives du lac et des zones polluées définies dans le paragraphe 2.5.

Caractéristiques d'exploitation : ce secteur plus éloigné de la rivière est moins exposé aux risques de pollution accidentelle de la Dranse. Par contre la présence de zones industrielles, de lotissements et de terres agricoles implique une connaissance précise et une surveillance continue des sources potentielles de pollution.

A l'heure actuelle, les caractéristiques physico-chimiques des eaux de cette zone sont conformes aux normes européennes de consommation domestique. Rappelons à ce propos que les réseaux de distribution d'eau des agglomérations de Thonon-les-Bains et Publier sont alimentés en partie par des prélèvements dans cette zone.

Les rabattements spécifiques sont médiocres au sud où ils atteignent des valeurs de 50 m. Cette situation est liée d'une part à la proximité des limites à flux nul qui constituent les versants et d'autre part aux faibles valeurs des transmissivités dans cette zone. Vers le Nord et vers le lac, les rabattements spécifiques s'améliorent jusqu'à des valeurs de 5 m.

Zone 3

Situation géographique : rives du lac.

Caractéristiques d'exploitation : cette zone est l'exutoire de tous les autres secteurs. Elle est principalement caractérisée par la présence du lac, imposant localement un niveau piézométrique égal à l'altitude de sa surface. Ainsi tout pompage dans cette zone provoque des venues d'eau du lac Léman susceptibles d'altérer à terme les caractéristiques d'exploitation de l'ouvrage. Cela s'est produit à l'ancien pompage de Publier (figure 2) où des algues sont apparues à l'intérieur du forage impliquant un traitement adapté de l'eau avant distribution. Pratiquement, un ouvrage implanté dans ce secteur pompe de l'eau d'origine lacustre filtrée par quelques dizaines de mètres de graviers argileux.

Les paramètres hydrodynamiques de cette zone sont particulièrement favorables, les rabattements spécifiques étant de l'ordre de 1 à 2 mètres.

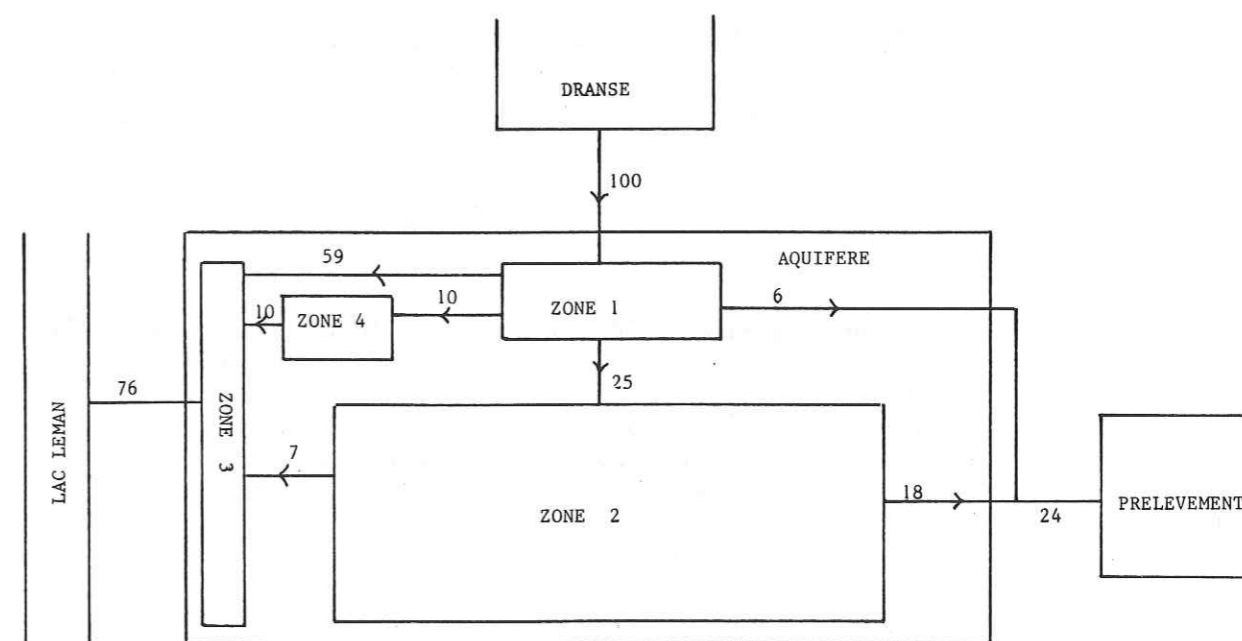
Zone 4

Situation géographique : elle comprend les zones polluées citées dans le paragraphe 2.5, situées aux abords du Puits du Mottay et en aval de la décharge.

Caractéristiques d'exploitation : ces deux secteurs présentent des eaux non conformes aux normes de potabilité. La zone du Mottay est cependant moins touchée que le secteur situé en aval de la décharge, elle se prêterait plus facilement à une exploitation à des fins industrielles.

Soulignons cependant que tout pompage important à proximité de ces zones impliquerait une modification des sens d'écoulement provoquant la pollution d'une zone plus étendue que celle qui est actuellement concernée.

Un essai de quantification des termes du bilan pour chaque zone a été effectué. Ce calcul a été mené à l'aide du modèle Newsam qui nous a permis de préciser les débits entrant et sortant de chaque zone. Les simulations ont été effectuées en régime permanent pour des données correspondant à la période du 18 au 22 Juin 1981. L'infiltration ayant été très faible entre ces deux dates, les débits calculés ne représentent que l'influence de la Dranse sur l'aquifère (figure 42).



Bilan par zone de l'influence de la dranse pour un débit de perte de 100 unités.

Figure 42

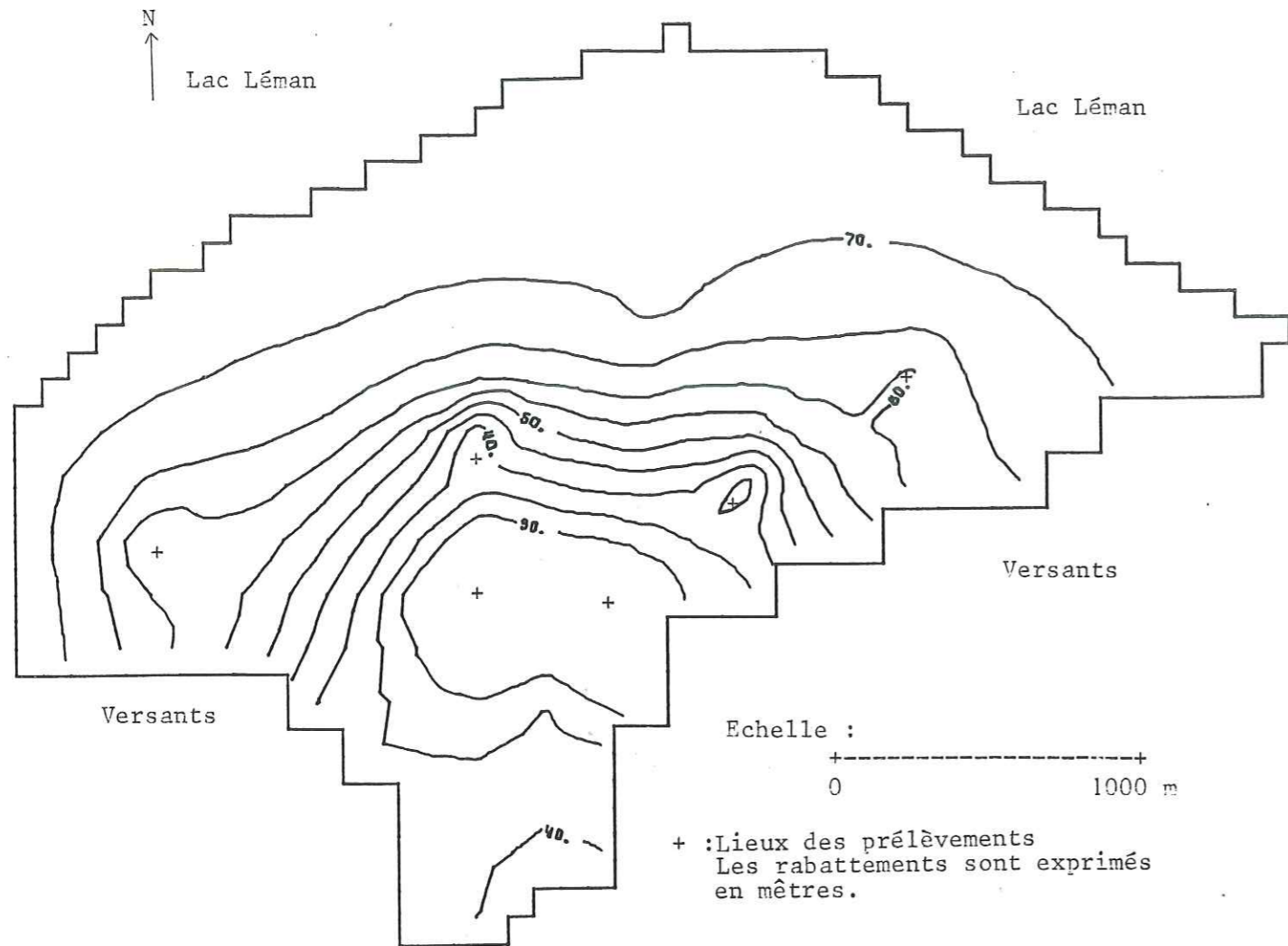


Figure 43 : Rabattements provoqués par un ensemble de 6 pompages dont les débits cumulés égalent $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nota : Les rabattements induits par les 6 pompages étant important, il a été tenu compte de l'évolution des transmissivités en fonction de la variation de l'épaisseur mouillée de l'aquifère.

Ces chiffres montrent un fait important : l'écoulement des eaux dans le delta de la Dranse se fait principalement suivant l'axe de la Dranse. La composante divergente par rapport à cet axe ne concerne que 30 % du débit de perte de la Dranse. Ces 30 % se divisent respectivement en 10 % pour la zone 4 en aval de la décharge et 10 % pour chaque rive. A ces chiffres, il est nécessaire d'ajouter l'influence de l'infiltration des précipitations. Celle-ci est directement proportionnelle à la surface de chaque zone et concerne donc plus particulièrement la zone 2 qui occupe les $3/4$ de la surface du delta.

Cette observation signifie que tout prélèvement important (supérieur à $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$) sur l'une ou l'autre berge provoquera une modification importante des sens d'écoulement ; ils induiront donc des transferts de débits d'une zone vers l'autre sans détériorer pour autant les capacités de la ressource. Il apparaît cependant préférable de ne pas dépasser un total de 1 à $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ de prélèvements repartis à peu près également sur les deux parties (rive droite, rive gauche) de la zone 3 soit environ $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ par rive. Si le débit d'exploitation dépassait $2 \text{ m}^3/\text{s}$ par seconde le niveau de l'aquifère baisserait, la Dranse ne suffisant plus à l'alimentation de la nappe. Par la suite, un équilibre s'établirait avec pénétration d'un débit d'eau d'origine lacustre venant compléter le débit de perte de la Dranse pour alimenter l'aquifère.

Nous avons calculé à l'aide du modèle, les conséquences d'une exploitation de ce type. Nous avons considéré les ouvrages actuels de prélèvements auxquels ont été affectés des débits de l'ordre du mètre cube par seconde. La somme des débits prélevés dans l'aquifère s'élèverait ainsi à $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit limite de la Dranse fut fixé à environ $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Les résultats de cette simulation en régime permanent, présentés sur la figure 43 sous la forme de courbes piézométriques calculées, montrent que le niveau de la surface piézométrique est en tous points inférieur à l'altitude de la surface du lac. Cette situation implique une pénétration importante d'eau d'origine lacustre. L'aquifère du delta de la Dranse est alors principalement alimenté par le lac Léman. La limite des débits d'exploitation pour les situations de ce type est fournie par la profondeur des puits. En effet, le dénoyage éventuel de la crépine pour des débits trop importants implique l'existence d'un débit de prélèvement que l'on ne peut physiquement pas dépasser. Ceci est vrai pour les pompages situés à quelque distance des rives du lac. Les ouvrages implantés à proximité immédiate des rives n'encourent pas ce type de problèmes, eu égard à la proximité d'un potentiel imposé.

3. LE GISEMENT D'ENERGIE

Les aquifères peu profonds apparaissent aujourd'hui comme un gisement d'énergie techniquement et économiquement exploitable (Iris, 1980).

Le principe d'une telle exploitation est simple : il consiste à prélever une quantité de chaleur à basse température pour la transférer à plus haute température dans un circuit d'eau chaude. Généralement ce circuit d'eau chaude est un système de chauffage individuel ou collectif, domestique ou industriel. Cette opération est effectuée à l'aide d'une pompe à chaleur dont nous rappelons rapidement le principe en annexe 3.

Après avoir décrit et analysé rapidement le comportement thermique du delta, nous illustrerons l'intérêt de cet usage de l'eau souterraine par quelques calculs économiques qui permettront de situer les conditions économiques de ce type d'exploitation de l'aquifère du delta de la Dranse. Enfin nous tenterons de préciser les potentialités d'exploitation thermique de l'aquifère.

3.1. Comportement thermique du delta de la Dranse

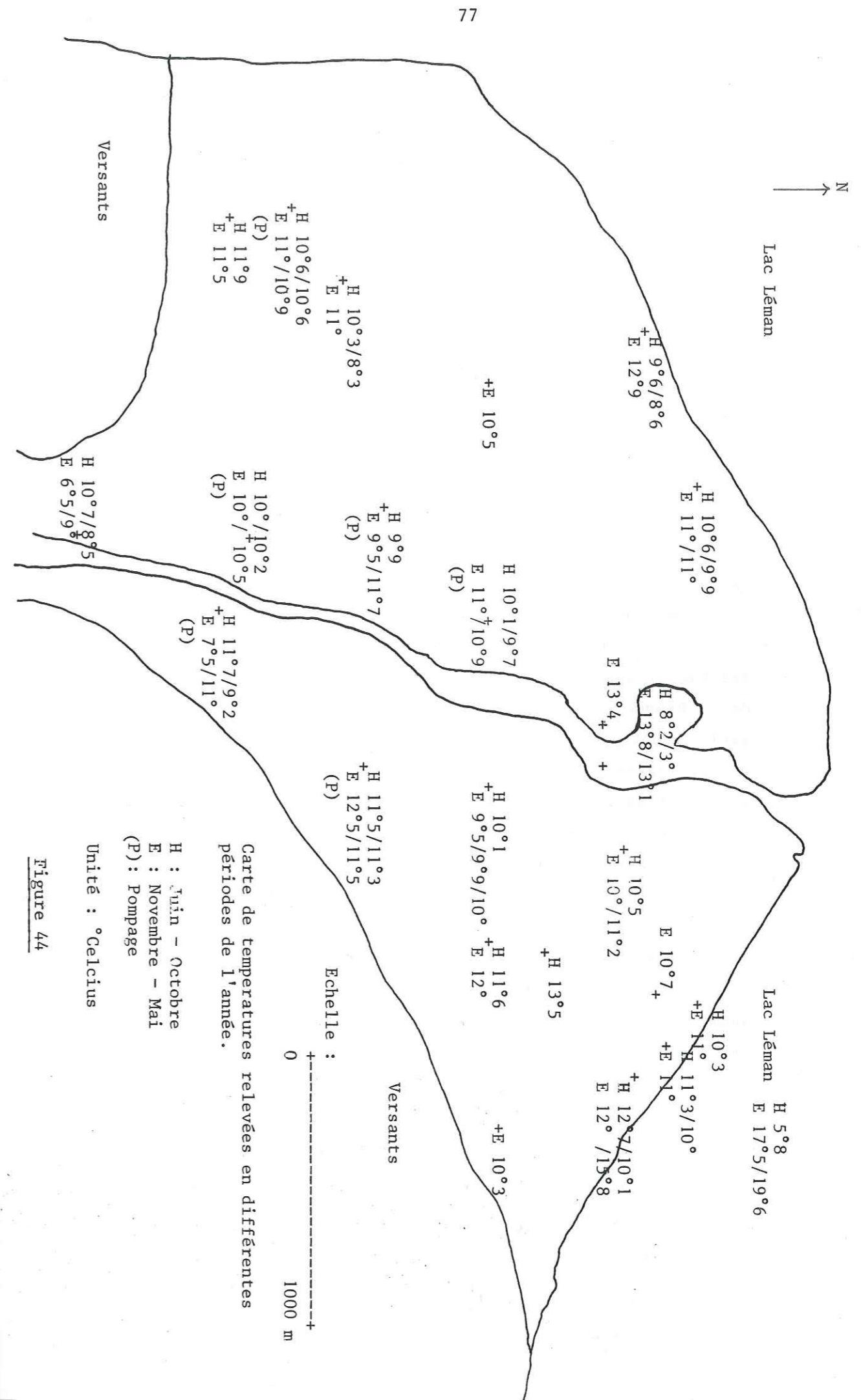
En règle générale, la température du sol à quelques mètres sous la surface est sensiblement invariante et égale à la température moyenne annuelle de l'air. Par ailleurs, l'eau en pénétrant dans un milieu poreux parvient très rapidement à un équilibre thermique avec la matrice (deux heures pour des galets de 10 cm, une minute pour des graviers de 1 cm, moins d'une seconde pour du sable de 1 mm (Houpert, et al, 1956)).

Ces deux remarques d'ordre général nous permettent d'analyser correctement la carte des températures relevées dans l'aquifère du delta de la Dranse (figure 44).

La surface de l'aquifère étant à une profondeur de 5 à 20 m, les températures relevées sont peu variables si l'on exclut les points proches des limites :

$$T_{\text{moyen}} = (10,7 \pm 0,9)^\circ\text{C}$$

A proximité du lac ou de la Dranse, les variations de température de l'aquifère sont beaucoup plus importantes, de l'ordre de 4°C. Ce comportement est lié à la pénétration d'eau de surface dont la température est très variable suivant



les saisons. Au printemps, l'eau de la Dranse résulte principalement de la fonte des neiges, sa température est donc proche de 0°C. En pénétrant dans l'aquifère, l'eau parvient à un équilibre thermique avec la matrice en prélevant au milieu poreux une certaine quantité de calories. Ainsi, durant l'hiver et jusqu'à la fin du printemps, l'aquifère, aux abords de la Dranse, a tendance à se refroidir en cédant de la chaleur à l'eau froide hivernale pénétrant dans le système. En revanche, l'été, le comportement de l'aquifère est exactement inverse et les échanges de calories ont alors lieu depuis l'eau vers la matrice.

Le même type de phénomène peut se produire aux abords du lac à la faveur de prélèvements à proximité des rives. A ce phénomène de convection vient se rajouter à la limite aquifère-lac un phénomène de conduction. Un flux de calories se produit sans déplacement de matière du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. L'importance de ce dernier facteur est difficile à évaluer mais il influence certainement l'évolution des températures à proximité immédiate du lac.

Deux secteurs principaux peuvent être distingués pour les capacités d'exploitation thermique de l'aquifère :

- Un secteur comprenant les zones 2 et 4 définies dans le paragraphe précédent, englobant les deux rives du delta à l'exception des berges de la Dranse et des rives du lac Léman. Ce secteur est le plus favorable à des prélèvements pour un usage thermique de l'aquifère. En effet, les performances des pompes à chaleur sont notamment liées à la stabilité de la température de la source froide. Des températures peu fluctuantes permettent de dimensionner convenablement la pompe et d'obtenir des performances stables.
- Un secteur comprenant les zones 1 et 3, dont les caractéristiques thermiques sont relativement moins bonnes avec des températures de l'aquifère plus variables. Cette variabilité sera d'autant plus accentuée que le nombre de prélèvements dans cette zone sera grand et augmentera les transferts d'eau donc, par voie de conséquence, les transferts de calories.

3.2. Exploitation thermique du delta

3.2.1. Calculs économiques

Les exemples présents ici concernent les systèmes de chauffage d'habitats collectifs munis de pompes à chaleur sur nappe. Les logements considérés sont de type classique, munis d'un chauffage central au fuel avec circulation d'eau chaude.

L'habitat peut donc être déjà construit sans que l'on ait initialement prévu l'installation d'une pompe à chaleur. L'isolation thermique du bâtiment n'est pas particulièrement étudiée avec un coefficient G^* égal à $1,3 \text{ W/m}^3/\text{°C}$. A titre d'exemple, un logement très bien isolé doit atteindre des valeurs de G de l'ordre de $0,9 \text{ W/m}^3/\text{°C}$ (norme actuelle d'isolation).

Nous nous situons donc dans le cas d'un habitat moyen, déjà construit selon des normes largement répandues. La pompe à chaleur est supposée branchée sur le circuit de chauffage en parallèle avec la chaudière préexistante. Les besoins de chauffage sont assurés par la pompe à chaleur seule durant la plus grande partie de la saison de chauffe. La chaudière au fuel fonctionne en soutien de la pompe à chaleur durant les périodes les plus froides de l'année.

Par ailleurs, dans les différentes hypothèses d'exploitation du gisement, l'eau prélevée dans l'aquifère est rejetée après usage dans le réseau pluvial ou directement vers la Dranse ou le lac par un réseau propre.

Le calcul économique d'une telle installation fait intervenir les facteurs suivants :

- A- Coût de l'implantation de la pompe à chaleur
- B- Gain de fonctionnement réalisé par rapport au fuel seul
- C- Frais financier

A) Coût de l'installation

Dans ce terme sont compris : le prix de la pompe à chaleur et des équipements annexes, le prix du forage et des canalisations véhiculant l'eau depuis le lieu de prélèvement jusqu'à la pompe à chaleur ou depuis la pompe à chaleur jusqu'au réseau d'eau pluviale.

B) Gain de fonctionnement produit par l'installation de la pompe à chaleur

Celui-ci est calculé par rapport à un système de chauffage équipé d'une chaudière à fuel seule dont le rendement est de 75 %. Sont pris en compte dans ce facteur, la consommation d'électricité de la pompe à chaleur, à laquelle est ajoutée celle des auxiliaires du pompage, et en règle générale de tous les équipements liés à la présence de la pompe à chaleur.

* G exprime la déperdition d'énergie en W/m^3 par degré d'écart entre la température extérieure et intérieure. C'est une grandeur utilisée pour quantifier le degré d'isolation, ou la somme des pertes thermiques, d'un logement.

C) Frais financiers

On suppose que l'achat de la pompe à chaleur a été effectué à l'aide d'un emprunt plus ou moins favorable suivant les cas. On fait intervenir dans ce facteur les notions de taux et de durée de l'emprunt ainsi que le pourcentage annuel d'inflation.

D) Calculs de rentabilité

Un programme informatique prenant en compte le détail de tous ces facteurs a été utilisé pour tester un certain nombre d'hypothèses.

Néanmoins, toutes ces hypothèses ont en commun une profondeur du puits de pompage de 30 m afin de simuler une implantation sur n'importe quelle zone du delta. La température de l'eau prélevé dans l'aquifère a été fixé à 10°C.

Les calculs ont été effectués pour un climat de vallée alpine donc vraisemblablement plus rigoureux que celui du delta, très tempéré par la présence du lac.

Le tableau 10 résume les données et les résultats calculés suivant les diverses configurations et les paramètres testés. Des remarques générales ont pu être déduites de ces résultats, d'autres concernent plus spécifiquement l'exploitation du delta de la Dranse :

- Suivant les cas 1, 2 et 3, il apparaît que la pompe à chaleur doit être convenablement choisie. Notamment le liquide frigorigène doit avoir son point d'évaporation situé à une température proche de la température de retour maximum du circuit de chauffage. Une température maximale à l'évaporation trop basse entraîne un non fonctionnement de la pompe à chaleur durant les périodes les plus froides.
- Le nombre de logements est également déterminant dans l'intérêt économique de l'opération. Il apparaît qu'en-dessous du nombre de 20 logements, même assortie de conditions préférentielles de crédit (cas n° 4), l'installation d'une pompe à chaleur est peu intéressante. Ce résultat est lié aux frais fixes engendrés par l'opération dont le poste le plus important, et véritablement invariant suivant le nombre de logements, est le forage du puits. Ainsi, la profondeur maximale forée paraît être de $30/20 = 1,5$ m/logement. En effet, pour 20 logements et 30 mètres de puits l'opération peut être intéressante si l'on bénéficie de conditions de crédit favorables. Nous avons également

N°	Nombre de logement	Température			Emprunt			Temps de retour ans	Intérêt
		D ⁽¹⁾	R ⁽²⁾	E ⁽³⁾	Taux %	Durée ans	Inflation %		
1	50	80	60	45	15	8	10	10,7	- -
2	50	80	60	60	15	8	10	5,2	+ +
3	50	70	55	55	15	8	10	5	+ +
4	10	70	55	55	10	15	10	14,5	- - -
5	20	70	55	55	15	8	10	7,7	-
6	20	70	55	55	13	15	10	7,7	+
7	500 (3 km de conduite) ⁽⁴⁾	70	55	55	13	15	8	5,7	+ +
8	500 (100 km de conduite)	70	55	55	13	15	10	11	-
9	50	70	55	55	13	15	8	4,6	+ + +

- (1) température maximale de l'eau au départ du circuit
 (2) température maximale de l'eau au retour du circuit
 (3) température maximale d'évaporation du liquide frigorigène
 (4) le prix de la conduite est de 700 F le mètre linéaire

Tableau 10

étudié le cas d'un ensemble de 500 logements reliés à un système de chauffage central. Au préalable, soulignons que les cas précédents ne faisaient pas intervenir de conduite d'amenée ou de sortie d'eau, les logements étant supposés placés à la verticale du forage. En observant qu'il n'existe pas, même en prévision, d'ensemble de 500 logements sur le delta, nous avons fait intervenir, dans le calcul économique, le prix d'une conduite d'eau reliant le pompage à la chaufferie. Le tableau 10 fait apparaître que pour des conditions de crédit favorables, cette opération est réalisable si les conduites d'amenée d'eau ont une longueur inférieure à 10 km soit 20 mètres par logement.

Les opérations de chauffage par pompe à chaleur sur l'aquifère du delta de la Dranse paraissent donc viables si l'on respecte un certain nombre de conditions se rapportant au choix du liquide frigorigène, au nombre de logements par mètre de forage, à la longueur des conduites d'eau par logement. Les conditions plus ou moins favorables de crédit interviennent également.

Remarquons pour conclure qu'une telle démarche, visant à réduire globalement une consommation d'énergie en prélevant des calories dans une ressource renouvelable, s'inscrit parfaitement dans les politiques énergétiques actuelles. De surcroît, si la pompe à chaleur fonctionne à l'électricité, il résulte de sa mise en oeuvre une économie globale d'énergie et une substitution partielle du fuel par de l'électricité.

3.2.2. Potentialité de l'aquifère

A partir des résultats obtenus précédemment, nous avons tenté de définir les potentialités de l'aquifère en tant que source de calories. En considérant un logement de 70 m^2 ayant un coefficient G de 1,3, la chaudière, quelle qu'elle soit, devra pouvoir fournir une puissance s'écrivant comme :

$$G.V(\Delta \text{ } ^\circ\text{C}) = \text{Puissance nominale de la chaudière}$$

$$\text{avec } G = 1,3 \text{ W/m}^3/\Delta \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V = \text{volume du logement} : 70 \times 2,6 = 185 \text{ m}^3$$

$$\Delta \text{ } ^\circ\text{C} = \text{écart de température maximal entre l'intérieur et l'extérieur} \\ (16 - (-9)) = 25^\circ\text{C} \text{ (} 3^\circ\text{C d'apports gratuits par rayonnement solaire)}$$

la puissance nominale est alors égale à 6 Kw.

Admettons par ailleurs que la pompe à chaleur est susceptible de fournir la totalité du chauffage à partir de 4°C extérieur. Alors, la puissance nominale de la pompe à chaleur s'écrit :

$$GV(16-4) = 3 \text{ Kw}$$

soit 50 % de la puissance nominale de la chaudière.

Pour un cop^* de 3, la nappe fournit donc :

$$\frac{3 (\text{cop} - 1)}{(\text{cop})} = 2,25 \text{ Kw}$$

En considérant que 5°C sont extraits de l'eau pompée de l'aquifère, le débit sera donc :

$$\frac{2,25 \times 0,87}{5} = 0,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{logement}$$

avec 0,87 : nombre de m^3 d'eau dont on peut élever la température de 1°C avec 1 Kwh (thermie)

L'économie réalisée à l'aide d'une pompe à chaleur peut être estimée à 0,5 teps, soit 1,25 tonnes de fuel économisé, par logement et par an. Si l'on réserve $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ des $1 \text{ m}^3/\text{s}$ exploitable à l'us-ge des pompes à chaleur, on peut donc estimer le nombre de logements chauffables à :

$$\frac{0,5 \times 3600}{0,4} = 4500 \text{ logements}$$

soit un potentiel de tonnes de fuel économisées de :

$$4500 \times 1,25 = 5625 \text{ teps/an}$$

Ces quelques calculs ne forment qu'une approche très partielle des potentialités d'exploitation thermique de l'aquifère. En effet, nous avons considéré jusqu'ici que l'eau froide sortant des pompes à chaleur était rejetée directement vers le lac, la Dranse ou le réseau pluviale. Or cette eau peut être employée à d'autres usages ; soit directement, soit après réinjection dans l'aquifère et pompage ultérieur. Dans cette dernière hypothèse la potentiel hydraulique de l'aquifère est conservé. Mais les réinjections d'eau froide dans l'aquifère rendent nécessaire une connaissance approfondie des phénomènes de transfert de chaleur et un modèle de simulation du comportement thermique de l'aquifère pourra s'avérer très utile.

*cop : coefficient de performance d'une pompe à chaleur. Il correspond au rapport de l'énergie thermique fournie à la pompe à chaleur par l'énergie mécanique absorbée.

CHAPITRE III

MINIATURISATION DES MODELES D'ECOULEMENT

Contribution à la conception d'outils d'aide à la gestion
locale des ressources en eaux souterraines,
application à l'aquifère du delta de la Dranse

1. INTRODUCTION

Les capacités d'un aquifère à être exploité comme une ressource hydraulique ou énergétique sont liées à ses paramètres physiques, à ses interactions avec le milieu extérieur et aux caractéristiques physico-chimiques de l'eau qu'il renferme. La qualification de ressource, attribuée à un aquifère est également fonction des conditions sociales et économiques locales. Elles s'expriment par exemple comme le volume de la demande ou le prix auquel on accepte de payer l'eau. Ce coût comprenant à la fois le coût du prélèvement, le coût du transport d'eau et, éventuellement, le coût du traitement.

Une fois l'aquifère en exploitation, la pérennité de la ressource procède de la manière dont il est exploité. A titre d'exemple, des prélèvements trop intensifs ou mal répartis, affectant une nappe d'eau côtière, peuvent provoquer la pénétration et la remontée d'un biseau d'eau salée vers les ouvrages d'exploitation. Cette pénétration induit une dégradation des caractéristiques physico-chimiques de l'eau eu égard aux usages classiques qu'il en est fait (alimentation domestique, nettoyage...). L'aquifère n'est plus alors exploitable dans les conditions économiques antérieures. En effet, pour des caractéristiques physico-chimiques comparables aux caractéristiques initiales, l'eau prélevée doit maintenant être désalée. Si ce coût est inacceptable pour les utilisateurs, l'aquifère perd alors sa qualité de ressource. Cet exemple peut-être un peu trop caricatural, montre bien cependant la nécessité de reconnaître et de structurer l'exploitation de la ressource en eau souterraine. Ce rôle est confié aujourd'hui à des organismes tels que les Agences Financières de Bassin, ou les Services Régionaux d'Aménagement des Eaux (SRAE). Leur fonction, en tant que gestionnaire des ressources en eau, peut être scindée en deux actions successives :

- Reconnaître le système aquifère constituant la ressource et rassembler les informations concernant les prélèvements existants et les demandes exprimées par les exploitants actuels ou potentiels.
- Connaissance qui permet, dans un second temps d'inciter les exploitants à orienter leur politique de prélèvement vers un objectif de maintien ou d'amélioration globale de la ressource.

La première tâche consiste donc à rechercher, rassembler, organiser l'information qui concerne le gisement d'eau (les chapitres I et II sont un exemple de ce type de travail). Elle s'exprime en terme de quantité d'eau (potentiel d'exploitation, débit spécifique) et de caractéristiques physico-chimiques de l'eau (vulnérabilité, concentration en divers éléments). Cette information doit

concerner également la demande exprimée par les différentes structures économiques ou sociales, intéressées par l'exploitation du gisement. Cette demande pouvant être déjà satisfaite ou à l'état de projet.

Une fois cette information centralisée, l'organisme gestionnaire est en mesure d'organiser des prélèvements en incitant les exploitants à utiliser "au mieux" la ressource. "Au mieux" a ici une signification collective vis-à-vis de tous les utilisateurs actuels ou potentiels. La seconde tâche du gestionnaire est donc de satisfaire le plus grand nombre d'intéressés. Une telle démarche, pour être significative et efficace se doit d'être globale. Elle doit ainsi prendre en considération, pour un système aquifère donné, l'ensemble des exploitants et confronter leurs demandes aux possibilités de la ressource. On recherche finalement à déterminer l'influence de chacun des ouvrages et de prévoir leurs incidences sur l'évolution de la ressource. Pour accomplir ce travail, le gestionnaire utilise des outils élaborés par les hydrogéologues et dont les formes et les principes peuvent être très variés. Dans cette optique, notre étude a consisté à rechercher et à définir un type d'outil adapté aux besoins et aux moyens des organismes gestionnaires. Cet outil, utilisé directement par les organismes décideurs, devait rassembler une grande partie de l'information contenue dans les modèles numériques maillés de simulation d'aquifère, sous une forme facilement utilisable et peu onéreuse. Il se devait, plus que de tester une politique d'exploitation, de suivre l'évolution d'un système aquifère et de permettre aux gestionnaires d'organiser une exploitation qui se modifie et se développe petit à petit. Cet instrument intègre l'information hydraulique concernant le gisement à l'exclusion de toute grandeur énergétique ou géochimique. Il permet donc de manipuler aisément cette information pour observer et prévoir, par exemple, l'influence d'un nouvel ouvrage de pompage. Après avoir passé rapidement en revue les différents types d'outils opérationnels d'aide à la gestion, nous tenterons d'en dégager les intérêts et les limites. En se basant sur ces premières remarques, nous définirons la forme et le principe d'un outil qui se veut, à l'origine, pratique, peu onéreux et source d'éléments de décision. Ces objectifs nous conduiront à élaborer un modèle de simulation simple dont le principe de calcul des rabattements sera fondé sur la linéarité de l'équation de la diffusivité. Ce modèle prendra finalement la forme d'un programme informatique que nous adapterons à l'aquifère du delta de la Dranse.

2. LES OUTILS EXISTANTS

Ces objets sont avant tout des moyens de présentation et de traitement de l'information, ils correspondent dans un premier temps à une démarche donnant la

forme de l'outil. Celle-ci est transposable d'un système aquifère à un autre, sans modification, mais sous la contrainte des limites de validité inhérentes à la méthode choisie.

Par la suite, l'outil est adapté à l'objet naturel étudié en y intégrant ses caractéristiques. Ces données issues de l'information brute de terrain, sont traitées en fonction du type de démarche adoptée.

Des différentes formes d'outils qui existent aujourd'hui, on peut citer les cartes, les abaques, les modèles analogiques, mathématiques, etc... Nous avons choisi de les scinder en deux groupes, l'un comprenant les outils statiques, l'autre les outils qualifiés de dynamiques.

2.1. Les outils statiques

Ils regroupent essentiellement les outils de forme cartographique. On peut en dénombrer un grand nombre dont les plus classiques sont les cartes de productivité d'un aquifère, de coûts de production, de caractéristiques chimiques, de vulnérabilité, de contraintes d'exploitation...

Chaque type de carte concerne un type d'information (piézométrie, géochimie) ou un ensemble précis de caractères analysés fournissant une information élaborée (carte de production).

L'objectif de ce type d'outil est de fournir une représentation claire qui soit une synthèse des connaissances sur un point donné d'un système aquifère et, d'être pour le décideur une source d'informations facilement utilisables comme éléments d'aide à la décision (Margat J., 1979).

Les limites de la cartographie résident dans son aspect qualitatif. Une zone est caractérisée par la valeur moyenne locale de la grandeur cartographiée, ponctuellement, aucune information quantifiée n'est disponible.

Pour le décideur, les réponses de l'instrument à une interrogation précise ne sont pas toujours aussi claires qu'on pourrait le désirer. A un exploitant curieux de l'influence d'un pompage sur les ouvrages voisins, le gestionnaire, à l'aide de cartes, le renseignera en termes de tendances ou en fixant les limites de ce qui paraît probable à la lecture des documents.

Les abaques et les rapports fournis par des hydrogéologues sont également à placer dans le groupe des outils dit statiques. Bien que moins perçus que les cartes en tant qu'instruments d'aide à la décision, ils n'en constituent pas moins une source d'information élaborée concernant un système aquifère.

2.2. Les outils dynamiques

Ces outils rendent compte d'une réalité dynamique, de processus physiques ayant lieu dans et autour d'un aquifère ; il s'agit en fait de modèles.

Nous ne ferons que citer les modèles analogiques pour ne retenir que les modèles numériques de simulation.

Les modèles de simulations d'un aquifère sont constitués d'une série de relations entre paramètres physiques du système et variables d'état. La qualité première de ces modèles est leur capacité à donner une représentation du comportement du système aquifère, à simuler les mouvements d'une surface piézométrique ou l'évolution d'un exutoire.

Pour un problème précis comme le pompage d'un débit Q durant un temps t au point défini par les coordonnées (X, Y) , la réponse sera exprimée sous la forme d'un ensemble de valeurs de potentiels. Notons que ces valeurs n'auront un sens, une validité, que dans la mesure où les données et les paramètres introduits dans le modèle appartiennent à l'intervalle de validité défini pour chaque modèle.

On conçoit ici quel principe essentiel sépare les outils que nous avons qualifiés de statiques et les outils dynamiques. Pratiquement, ces modèles de simulation seront utilisables sous la forme de programmes informatiques souvent importants, implantés sur des ordinateurs assez puissants.

2.2.1. Principes de bases des modèles mathématiques

A- Modèle boîte noire/Modèle physique (descriptif)

Globalement un modèle mathématique peut être considéré comme une série d'équations qui à un vecteur d'entrée donné fait correspondre un vecteur de sortie calculé.

Il faut donc, dans un premier temps, définir la formulation des équations décrivant le système.

Deux solutions sont alors envisageables :

- Les équations sont purement empiriques et ne prétendent pas être une représentation d'un phénomène physique. Elles ne sont susceptibles de reproduire le fonctionnement d'un système réel que dans le cas précis pour lequel elles ont été conçues, les paramètres de ces équations ne représentent donc pas des paramètres physiques mesurables sur le terrain. Ces modèles sont alors appelés "boîte noire".
- Les équations sont censées décrire la réalité des phénomènes physiques moyennant quelques approximations simplificatrices qui permettent d'alléger les procédures de calcul. Ces modèles peuvent alors être qualifiés de modèles physiques ou descriptifs.

Les équations des modèles physiques prennent en compte :

- Des paramètres physiques mesurables sur le terrain et intéressants dans la dynamique du système. On citera par exemple la perméabilité mesurée lors de pompages d'essais.
- Des variables d'état décrivant le comportement du système tel qu'un potentiel hydraulique ou un débit d'un pompage.

Elles sont l'expression d'un bilan sur le domaine étudié :

- les entrées égalent les sorties si le régime est permanent ;
- en régime transitoire, la variation du volume stocké égale la différence entre le volume des entrées et celui des sorties.

D'une application à l'autre, le modèle peut être utilisé sans modifier les équations, seuls changent les paramètres physiques décrivant l'aquifère.

Dans un premier stade de cette étude, nous nous intéresserons essentiellement à ces modèles physiques.

B- Les modèles physiques

L'équation décrivant le bilan hydrique d'un système aquifère est appelée équation de la diffusivité (de Marsily, 1980) :

$$\text{div } T(\text{grad } h) = S \frac{dh}{dt} + Q \quad (1)$$

Soit pour un volume élémentaire :

$\text{div } T(\text{grad } h)$: interaction avec les volumes voisins

Q : prélèvements

$S \frac{dh}{dt}$: variation du stock

Avec comme paramètres physiques :

T : transmissivité du milieu : $\int_{\text{mur}}^{\text{toit}} K dx$ (K : perméabilité)

S : coefficient d'emménagement (nappe captive)
ou porosité efficace (nappe libre)

Les variables d'état sont :

Q : débit entrant ou sortant du volume élémentaire

h : potentiel hydraulique

Il existe plusieurs solutions à cette équation différentielle linéaire. Chacune de ces solutions prend en compte des situations différentes associées à des conditions aux limites précises (puits complet ou non, aquifère plan ou incliné, infini, semi-infini...). Les plus classiques sont celles de Theis, Hantush ou Boulton.

La linéarité de l'équation (1) permet de plus, de simuler des scénarios complexes (plusieurs pompages, plusieurs limites de types différents, etc...) en utilisant le principe de superposition ou le principe des images. L'équation (1) étant linéaire en h et Q , toute combinaison linéaire de solutions est également solution de (1).

Un certain nombre de modèles de simulations ont ainsi été développés à partir de solutions analytiques de l'équation de la diffusivité (Ulrick James S., 1982, Herbert R., 1978). Mais la limite fondamentale de ce type de modèle réside dans l'impossibilité d'intégrer l'hétérogénéité d'un système aquifère se traduisant par un champ non uniforme de ses paramètres physiques.

Pour représenter les variations spatiales des paramètres physiques et des variables d'état de l'aquifère les modélisateurs ont fait appel à la notion de discrétisation spatiale des équations. Un système aquifère est alors décrit par un certain nombre de points ou domaines caractérisés par leurs coordonnées géographiques et leurs paramètres physiques.

2.2.3. Pratique des modèles à discrétisation spatiale

Trois stades peuvent être distingués dans la mise en oeuvre d'un tel outil.

Le premier consiste à formaliser le problème sous l'aspect final d'un programme informatique, le modèle doit ensuite être adapté au système aquifère étudié avant de passer enfin à la phase d'exploitation du modèle.

A- Formalisation

L'ensemble des points ou domaine constitue un maillage continu sur l'ensemble du domaine étudié.

Ces points peuvent représenter suivant le schéma de discrétisation :

- un centre de maille rectangulaire ou carré (différence finie);
- un noeud du maillage (éléments finis).

Une équation de bilan est écrite pour chaque maille ou pour chaque espace se rapportant aux noeuds.

En considérant un maillage en mailles carrées pour un système monocouche, une maille c voisinant avec quatre mailles N, E, S, W,

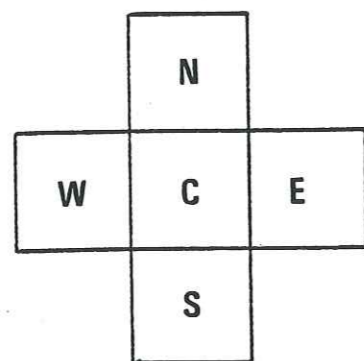


Figure 45

l'équation (1) en différences finies s'écrit (Levassor A., 1978) :

$$T_{NC} H_{NC}^t + T_{EC} H_{EC}^t + T_{SC} H_{SC}^t + T_{WC} H_{WC}^t = Q^t + Sa^2 \left(\frac{dH_c}{dt} \right) \quad (2)$$

Avec :

T_{NC} : moyenne harmonique entre la transmissivité de la maille C et celle de la maille N

H_{NC}^t : différence entre le potentiel de la maille N et celui de la maille C au temps t

Q^t : débit positif ou négatif extrait de la maille C

$\left(\frac{dH_c}{dt} \right)$: dérivée de la courbe des rabattements en fonction du temps au temps t dans la maille C

a^2 : aire de la maille C

S : coefficient d'emmagasinement

Pour un domaine comprenant N mailles dont N_{pi} mailles à potentiel imposé, un système de $n = N - N_{pi}$ équations devra être résolu. Cet ensemble d'équations peut être écrit sous forme matricielle :

$$[T] [H] = [Q] + a^2 [S] \frac{dH^t}{dt} \quad (3)$$

[T]: matrice des transmissivités, celle-ci est symétrique

[H]: matrice colonne de potentiels hydrauliques

[Q]: matrice colonne des débits injectés ou pompés

[S]: matrice diagonale des coefficients d'emmagasinement

L'équation (3) n'a de solution que s'il existe au moins une maille à potentiel imposé dans le modèle. A chaque simulation, caractérisée par une matrice [Q] et un temps, cette équation est résolue par inversion de la matrice [T], soit par une méthode directe, soit par une méthode itérative du type Gauss-Seidel. Cette opération peut nécessiter un temps de calcul non négligeable fonction du nombre de mailles du modèle et des moyens de calcul utilisés. Or, dans un système se comportant de manière linéaire et en particulier si l'aquifère est captif ([T] indépendant de [H]), [T] et [S] sont invariants et d'une simulation à l'autre, seules les variables d'état [H] et [Q] ainsi que le terme transitoire $\frac{dH}{dt}$ changent. Il apparaît donc en écrivant l'équation (3) résolue :

$$[H] = [T]^{-1} ([Q] + a^2 [S] \frac{dH^t}{dt})$$

qu'il est envisageable, à chaque simulation, de ne calculer que le terme de droite du second membre de cette équation.

On perçoit donc ici, une fois [T] et [S] complètement déterminés et si le système est linéaire, une possibilité de réduire de façon importante le temps de calcul nécessaire à la résolution de l'équation (3).

B- Calage

- L'adaptation du programme informatique au cas étudié est réalisé par :
- une phase géométrique ou de maillage schématisant le système. Les mailles de taille différente seront plus nombreuses là où l'information disponible est la plus importante et où une précision plus grande est recherchée.
 - Reconnaissance de la nature des limites, potentiel imposé, débit imposé, drain...
 - Identification de la forme des champs des paramètres physiques de l'aquifère.

Ces trois points principaux forment la liaison entre la reconnaissance du terrain et la modélisation, on peut définir une démarche type de cette étape :

- reconnaissance de terrain, recueil des données,
- synthèse et organisation des données,
- identification à l'aide du modèle des données manquantes.

L'identification ou calage du modèle consiste à reconstituer un ou plusieurs historiques observés de sorties du système (débits de rivière et/ou états piézométriques) en modifiant les paramètres du système. Le champ de paramètres recherché est connu ponctuellement lors de pompage d'essais. Des indications plus qualitatives peuvent être obtenues également par l'analyse de cartes piézométriques.

Finalement, après une série de simulations d'essais, le modèle est dit calé lorsque l'écart entre l'historique réel et l'historique calculé est jugé suffisamment faible, eu égard aux données disponibles et aux objectifs poursuivis.

Il faut toutefois noter que plusieurs champs de paramètres peuvent résulter du calage. L'ensemble de ces jeux est défini par leur capacité à rendre compte, par l'intermédiaire du modèle, d'un comportement réel du système.

Ces deux premiers stades de formalisme et de calage relèvent essentiellement d'un aspect "recherche". Leur objectif est double :

- élaborer un outil d'aide à la gestion de la ressource en eau ;
- dans une optique purement scientifique, étudier et reconnaître un système naturel.

C- Exploitation

Cette phase se caractérise par un objectif différent des deux précédents. Il s'agit maintenant d'utiliser un outil dont les résultats ont été préalablement validés (calage), pour obtenir des informations, des éléments d'aide à la décision.

Elle intéresse donc particulièrement le gestionnaire de la ressource en eau. Dans les faits, il apparaît cependant que le décideur manipule rarement directement le modèle et ce pour les raisons suivantes :

- Il est nécessaire de disposer d'une logistique informatique souvent assez importante.
- L'utilisation correcte d'un modèle requiert une connaissance même superficielle de son fonctionnement, impliquant une information mathématique, physique et informatique.
- Les interrogations ne sont pas toujours faciles à formuler et à transcrire en données assimilables par le modèle.
- Les réponses ne sont pas toujours aisément exploitables.

Ceci est principalement lié à la complexité de ces modèles conçus au départ plus pour des chercheurs que pour des gestionnaires.

Dans la pratique, le besoin de simulations, exprimé par les gestionnaires, est satisfait par les organismes concepteurs de modèles. Après simulation, ces derniers rassemblent et analysent les résultats pour fournir au décideur des documents (cartes, abaques, rapports), source d'éléments d'orientation et de décision. Il se produit donc le plus souvent entre le modélisateur et le gestionnaire une perte d'informations et de possibilités de la traiter.

2.3. Conclusions : vers des outils mieux adaptés

Après ce rapide aperçu des différents types d'outils pouvant être utilisés dans le cadre de la gestion de la ressource en eau, il apparaît que les modèles sur support informatique sont les mieux adaptés à une gestion quantitative et globale d'un système aquifère. Dans cette optique, nous avons recherché une meilleure adaptation de ce type d'outil aux besoins et aux moyens du gestionnaire tout en conservant autant que possible les capacités de ces modèles. Nous avons ainsi pu établir un certain nombre d'objectifs définissant le cadre de notre étude et les objectifs de notre recherche. Il s'agit de développer un outil de traitement de l'information qui soit :

- Puissant : susceptible de traiter une grosse masse d'informations pour prendre en compte le comportement global du domaine.
- Quantitatif : les réponses de l'outil se présentent sous une forme quantitative.
- Global : qui prenne en compte le comportement de l'ensemble du domaine étudié.
- Commode : le temps de réponse à une interrogation doit être bref. Les entrées et les sorties du modèle doivent être formulées en des termes se rapportant directement à l'exploitation. Les paramètres physiques et de calcul n'apparaîtront pas. En un mot, les procédures de calculs doivent être entièrement transparentes pour l'utilisateur.
- Adapté aux moyens du gestionnaire : l'utilisation de l'outil ne doit pas être subordonné à la disposition d'un matériel lourd ou onéreux.

Cet outil, modèle de simulation, devrait donc pouvoir être implanté sur des calculateurs largement répandus, du type micro-ordinateur et fonctionner en mode conversationnel.

Pour le principe du traitement de l'information, nous sommes partis des constats faits dans le paragraphe II.2.2.3. Dans un modèle linéaire, [T] reste constant et pour un pas de temps donné, [H] est fonction de [Q] et [T], [Q] étant signifié par l'interrogation, si [T] est connu, [H] l'est également.

Ces quelques remarques caractérisent en partie la notion de fonction d'influence que nous allons décrire plus en détail.

3. LES FONCTIONS D'INFLUENCE

Plusieurs modèles ont été développés à partir de ce principe (Verdin D.K., Morel Seytoux H.J., 1981, Hubert P., Levassor A., 1982) dans un souci d'économie de temps de calcul, mais, sans être explicitement destinés à être utilisés par les décideurs.

3.1. Qu'est-ce qu'une fonction d'influence ?

Nous supposons disposer d'un modèle de simulation à discrétisation spatiale. En partant d'un état initial constitué d'un régime permanent, nous mesurons les rabattements dans chaque maille.

A partir du temps $t = 0$, nous appliquons un pompage unitaire dans une maille i et nous le maintenons indéfiniment.

Ce prélèvement (ou cette injection) provoquera dans toutes les mailles j un rabattement α_{ij} fonction du temps et des paramètres physiques de l'aquifère.

Il tendra vers une limite A_{ij} pour autant que le système possède au moins une limite à potentiel imposé.

$\alpha_{ij}(t)$ est appelé fonction d'influence de la maille i sur la maille j .

Cette fonction est définie pour $t \geq 0$ mais son domaine de définition peut être étendu en posant :

$$\alpha_{ij} = 0 \quad \text{si } t < 0$$

A_{ij} est le coefficient d'influence de la maille i sur la maille j en régime permanent.

Dans l'hypothèse d'un système linéaire, ce qui n'est réalisé en toute rigueur que dans une nappe captive, le rabattement $r_{ij}(t)$ provoqué dans la maille j par un pompage $q_i(t)$ dans la maille i soit :

$$q_i(t) = 0 \quad \text{si } t < 0$$

$$q_i(t) = Q_i \quad \text{si } t \geq 0$$

$$\text{sera égal à } r_{ij}(t) = \alpha_{ij}(t) \cdot Q_i \quad (4)$$

Plus généralement, en supposant un ensemble de prélèvements $q_i^k(t)$ dans la maille i définis par :

$$q_i^k(t) = 0 \quad \text{si } t < t_i^k$$

$$q_i^k(t) = Q_i^k \quad \text{si } t \geq t_i^k$$

provoquera dans la maille j un rabattement :

$$r_{ij}(t) = \sum_k \alpha_{ij}(t - t_i^k) \cdot Q_i^k$$

Si nous sommions pour la maille j les influences des pompages sur toutes les mailles du modèle :

$$r_j(t) = \sum_i \sum_k \alpha_{ij}(t - t_i^k) \cdot Q_i^k \quad (5)$$

Nous supposons maintenant un pompage unitaire appliqué à partir du temps $t = 0$, mais seulement pendant une durée Δt .

On peut alors considérer les effets d'un tel prélèvement $q_i(t)$ comme la superposition de deux prélèvements $q_i'(t)$ et $q_i''(t)$ avec :

$$\begin{cases} q_i'(t) = 0 & \text{si } t < 0 \\ q_i'(t) = 1 & \text{si } t \geq 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} q_i''(t) = 0 & \text{si } t < \Delta t \\ q_i''(t) = -1 & \text{si } t \geq \Delta t \end{cases}$$

$r_{ij}(t)$ s'écrit donc comme la somme de ces deux prélèvements soit :

$$r_{ij}(t) = \alpha_{ij}(t) - \alpha_{ij}(t - \Delta t)$$

Ces prélèvements et leur influence α_{ij} peuvent être schématisés :

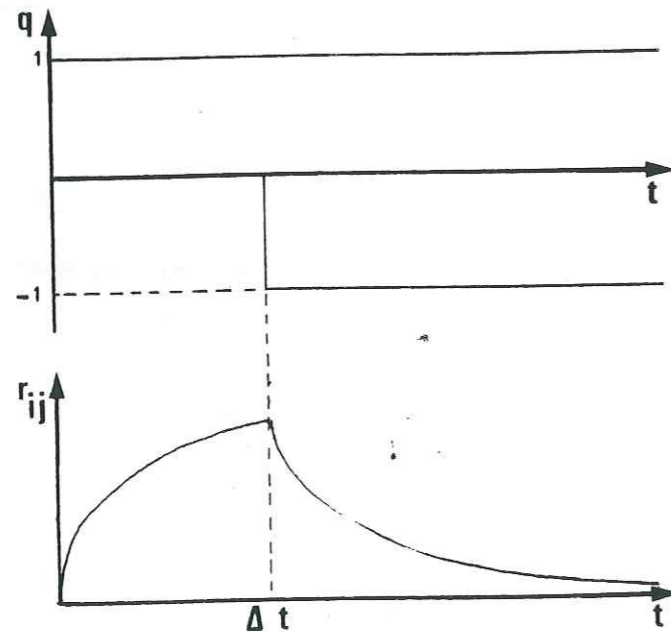


Figure 46

Par la suite, nous noterons $\beta_{ij}(t, \Delta t)$ cette fonction relative à un prélèvement unitaire de durée Δt :

$$\beta_{ij}(t, \Delta t) = \alpha_{ij}(t) - \alpha_{ij}(t - \Delta t)$$

$$\beta_{ij}(t) = \alpha_{ij}(t) \quad \text{si } t < \Delta t$$

$$\text{d'où } \beta_{ij}(t) = 0 \quad \text{si } t < 0$$

$$\text{et } \beta_{ij}(t, \Delta t) \rightarrow 0 \quad \text{si } t \rightarrow \infty$$

En envisageant k prélèvements de ce type sur l'ensemble des mailles du modèle, le rabattement dans une maille j s'écrit :

$$r_j(t) = \sum_i \sum_k \beta_{ij}(t - t_i^k, \Delta t_i^k) \cdot Q_i^k$$

Pratiquement les $\alpha_{ij}(t)$ concernant toutes les mailles sont calculés grâce à un modèle de simulation. Cela représente N simulations dont résultent N^2 coefficients (N égal au nombre de mailles du modèle). Ces coefficients forment une matrice d'influence $[\alpha_{ij}(t)]$ qui intègre toute l'information contenue dans le modèle maillé pour un pas de temps de calcul t .

3.2. Propriétés de la matrice d'influence

Une matrice d'influence est carrée, elle comprend $N \times N$ éléments. Pratiquement, cette matrice est toujours réduite à n^2 éléments où $n = N - N_{pi}$, N_{pi} étant le nombre de mailles à potentiel imposé.

En régime permanent (6) peut s'écrire :

$$[r] = [A] [Q] \quad (7)$$

où $[r]$ est la matrice colonne des rabattements

$[A]$ est la matrice des coefficients d'influence en régime permanent

$[Q]$ est la matrice colonne des débits

On peut remarquer que cette équation présente la même forme que l'équation (3) qui, en régime permanent s'écrit :

$$[T] [H] = [Q] \quad (8)$$

où $[T]$ est la matrice symétrique des transmissivités

$[H]$ est de même nature que $[r]$

(8) peut donc s'écrire :

$$[r] = [T]^{-1} [Q]$$

d'où en comparant avec (7), il vient :

$$[T]^{-1} = [A]$$

$[T]$ étant symétrique, $[T]^{-1}$ l'est également ainsi que $[A]$. Il apparaît donc que $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$ c'est-à-dire que l'influence d'un pompage unitaire dans la maille i provoque un rabattement α_{ij} en j égal à celui que provoquerait dans la maille j le même pompage dans la maille i . On considèrera par la suite qu'il en est de même pour toute matrice d'influence.

3.3 Conclusion

L'intérêt essentiel de ce type de modèle réside dans une économie substantielle du temps de calcul lors du traitement de l'information :

- la matrice $[T]$ n'est plus inversée à chaque simulation,
- le calcul des rabattements peut être effectué ponctuellement.

Par contre cette méthode implique le calcul et le stockage des matrices $[\alpha_{ij}(t)]$. Pour un pas de temps donné, n simulations seront nécessaires et l'on mémorisera $n(n+1)/2$ coefficients en tenant compte de la symétrie des matrices d'influence. Nous verrons par la suite qu'il est possible de limiter ces inconvénients, notamment en distinguant des mailles d'observation sur l'ensemble du maillage et, en calant une courbe de rabattement $h(t)$ sur chaque fonction d'influence.

4. PROPOSITIONS POUR UN OUTIL D'AIDE A LA GESTION

Cet instrument est conçu comme un logiciel écrit en langage basic, adapté à des micro-ordinateurs de table, et dont la prétention à l'origine est de répondre aux objectifs définis dans le paragraphe 2.3.

4.1. Méthode de calcul

Nous avons donc repris le principe des fonctions d'influence avec un objectif qui consiste à réduire le volume des données à stocker (coefficients $\alpha_{ij}(t)$) tout en gardant une bonne précision, c'est-à-dire en limitant les pertes d'informations.

Deux catégories d'approximations ont été effectuées ou tentées. L'une est spatiale, l'autre temporelle.

4.1.1. Approximation spatiale

Le nombre de mailles d'un modèle peut devenir très grand, imposant un volume de calcul et de stockage de coefficients très important.

Ainsi, un modèle de $n = 500$ mailles implique des matrices d'influence de $n^2 = 2,5 \cdot 10^5$ coefficients ; soit $n(n+1)/2 = 1,2525 \cdot 10^5$ coefficients effectivement stockés sous forme binaire et, à raison de 9 octets par chiffre, une matrice d'influence occupe $1,1 \cdot 10^6$ octets. Cette dernière valeur est bien souvent supérieure à la capacité de stockage d'un ou même de deux disquettes qui sont le support de mémoire le plus répandu des micro-ordinateurs le plus répandu.

Il était donc impératif de pouvoir diminuer le nombre de coefficients à mémoriser.

Pour cela nous avons utilisé le principe d'une distinction des n mailles du modèle en mailles d'observation et en mailles de décision dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Une maille de décision est un lieu où un pompage peut être simulé.
- Une maille d'observation est un lieu où l'influence d'un pompage est directement connue.

L'intersection de ces deux ensembles peut être non vide, les mailles d'observation pouvant être mailles de décision. Par contre, leur union ne recons-

titue pas obligatoirement l'ensemble des n mailles du modèle, certaines étant ni maille de décision, ni maille d'observation. Notons cependant qu'elles jouent un rôle dans la dynamique du système mais n'interviennent pas dans les problèmes de gestion de la ressource.

Le nombre de coefficients à stocker pour les simulations, si L est le nombre de mailles d'observation et D le nombre de mailles de décision, sera :

$$C = D L$$

Remarquons que le nombre des coefficients $\alpha(t)$ est fonction de L autant que de D , par contre le nombre de simulations à effectuer pour calculer ces valeurs égale D .

On obtient donc une matrice rectangulaire. L'économie du nombre de valeurs à stocker, liée à la ségrégation des mailles, n'est pas obligatoirement réelle par rapport à celle dérivant de la propriété de symétrie de la matrice $[\alpha_{ij}(t)]$. La différence du nombre de coefficients à calculer s'écrit :

$$C = D L - n(n + 1)/2$$

$$\text{Si } D = n \text{ alors } C = n L - n(n + 1)/2$$

Ainsi, pour que la distinction soit génératrice d'un gain de volume de mémoire utile, il est nécessaire que :

$$L < \frac{n + 1}{2}$$

Donc si l'ensemble des mailles sont des mailles de décision, le nombre de mailles d'observation devra être inférieur à la moitié du nombre total de mailles du modèle.

La caractérisation des mailles entraîne obligatoirement une perte d'information ayant une incidence sur l'utilisation future du modèle, elle doit donc être effectuée avec beaucoup de soins après une étude approfondie de l'exploitation actuelle de l'aquifère et de ses développements.

Parallèlement, nous avons recherché une méthode permettant d'estimer les rabattements sur les mailles qui ne sont pas d'observation. Le même type de procédé

pourrait être employé pour estimer l'influence d'un pompage ayant lieu dans une maille qui ne serait pas de décision. Par ailleurs, il est peu réaliste d'envisager l'estimation conjointe de rabattements et de pompages, l'incertitude liée au résultat serait trop importante.

La démarche visant à reconstituer les rabattements peut être rapidement décrite en précisant que les mailles d'observation sont alors appelées mailles directrices. Pour une maille n'étant pas support d'information, les rabattements seront calculés à partir des données fournies par les mailles directrices situées à proximité. Cette démarche implique un surplus de calcul de par la recherche des mailles voisines et l'estimation des rabattements. La disposition géographique sur l'ensemble du domaine des points directeurs doit répondre à plusieurs critères :

- bonne couverture de tout le domaine,
- couverture plus serrée lorsque les variations spatiales de la piézométrie sont grandes,
- couverture plus serrée là où les résultats doivent être plus précis.

Une répartition peut être qualifiée à l'aide d'un outil statistique tel que le krigeage (Delhomme, 1976, Delhomme, Delfiner, 1973). Dans un premier temps, les mailles directrices sont choisies à proximité des limites et réparties, entre ces limites, de manière régulière en tenant compte des secteurs où une précision plus grande est requise. Dans un deuxième temps, les coefficients d'influence des mailles directrices sur elles-mêmes sont krigés et l'on obtient ainsi un champ d'écart-types d'estimation.

La distribution de ces écarts permettra de juger la répartition choisie des mailles directrices en fonction des objectifs que l'on s'était fixés (vecteurs où la précision requise est plus ou moins bonne). Remarquons cependant que le test sur le coefficient d'influence d'une maille sur elle-même n'est qu'un test partiel. Un test complet consisterait en L vérifications de l'écart type d'estimation des D coefficients d'influence (L étant le nombre de mailles directrices et D le nombre de mailles de décision).

Le principe utilisé, pour la reconstitution et l'estimation de l'information repose sur une approximation logarithmique des rabattements.

Si l'on désire connaître le rabattement r_q , sur la maille q non directrice, on recherchera les 4 mailles directrices les plus proches : d_1, d_2, d_3, d_4 . Les rabattements sur ces mailles seront ensuite calculés par la formule de Jacob. solution analytique approchée de l'équation (1) en régime transitoire :

$$H = \frac{Q}{4T} \operatorname{Ln} \frac{2.25 Tt}{R^2 S} \quad (8)$$

Q : débit m³/s

T : transmissibilité m²/s

R : distance au point de pompage

S : coefficient d'emmagasinement

t : temps de pompage

Si un pompage Q_p est effectué dans la maille p, H₁, H₂, H₃, H₄, H_q sont calculés par :

$$H_j = \frac{Q_p}{4T_p} \operatorname{Ln} \frac{2.25 T_p t_p}{S_p R_{pj}^2}$$

$$j = 1, 2, 3, 4, q$$

En régime permanent, t_p est fixé très grand.

Parallèlement, r₁, r₂, r₃, r₄ sont calculés par la méthode des fonctions d'influence et finalement l'estimation de r_q s'écrit :

$$r_q = H_q - \frac{\sum_{j=1,4} (H_j - \alpha_j) / R_j}{\sum_{j=1,4} (1/R_j)}$$

R_j : distance entre la maille non directrice et la maille directrice j.

4.1.2. Approximation temporelle

Préciser le type de pas de temps utilisé par le décideur peut s'avérer relativement difficile et surtout très contraignant pour l'utilisation future du modèle. Nous avons donc recherché une solution plus souple, limitant le volume de calcul et le nombre de valeurs à mémoriser. Les matrices d'influence [α(t)] représentent pour chaque maille une valeur discrète se plaçant sur une courbe de rabattement ou fonction d'influence. La prise en compte de plusieurs de ces matrices peut permettre de caler une expression analytique, formulée a priori, sur chaque fonction d'influence.

a) Formulation de l'expression analytique

Cette fonction du temps et du rabattement a été défini après de nombreux essais, elle devrait :

- décrire correctement toutes les fonctions d'influence,
- ne contenir qu'un nombre restreint de paramètres à caler.

La forme des courbes de rabattement peut être assez variable, quelques-unes, caractéristiques, ont été reportées sur la figure 47.

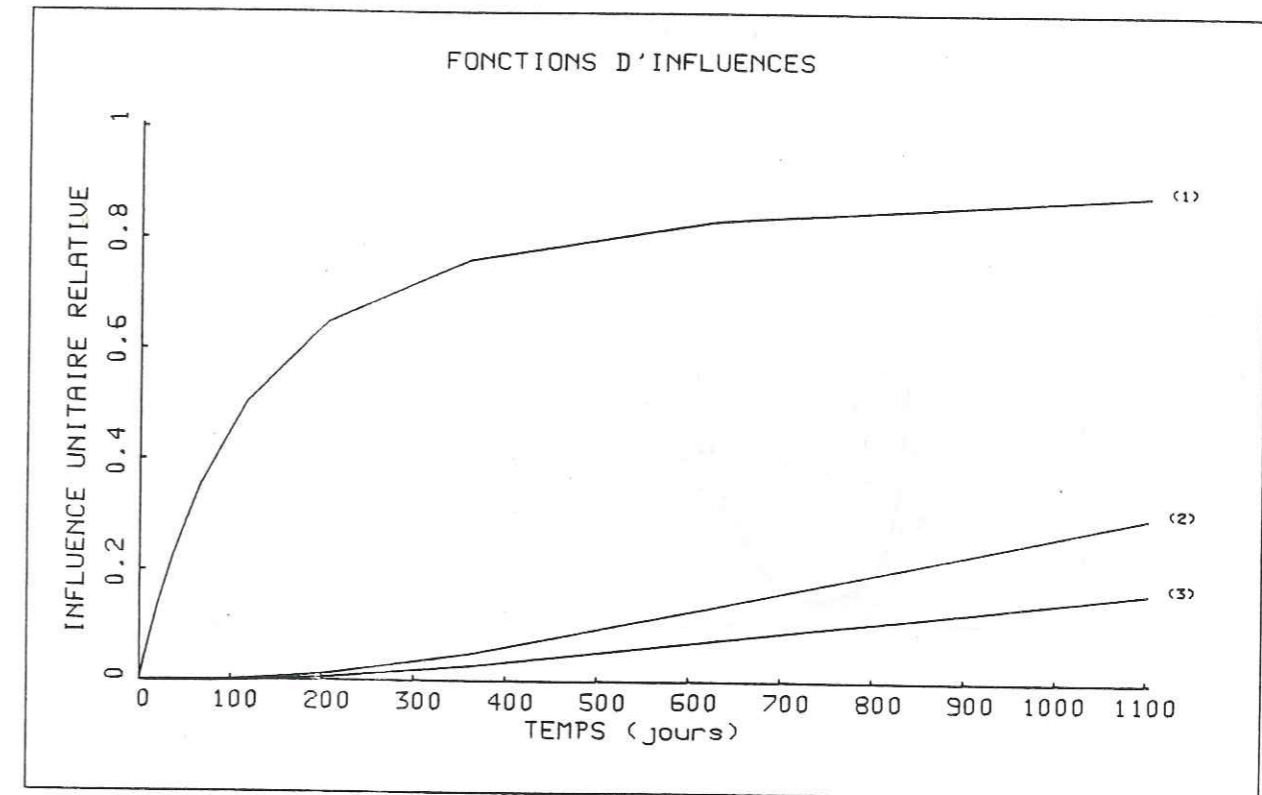


Figure 47

Toutes les formes intermédiaires entre 1 et 3 sont présentes.

La formulation de l'équation devra donc rendre compte :

- d'une pente à l'infini nulle rejoignant l'asymptote horizontale (t) = A (A : rabattement en régime permanent),
- d'une pente à l'origine prenant des valeurs allant de zéro jusqu'à l'infini.

Le choix de l'expression, au départ entièrement empirique, s'est peu à peu rapproché de formulations plus courantes en hydrogéologie mathématique.

Mis à part les mailles sur lesquelles est effectué le pompage unitaire qui réagissent suivant une courbe de Theis :

$$H = \frac{Q}{4T} W(u) \quad \text{avec } W(u) : \text{ fonction de Theis,}$$

toutes les autres mailles réagissent en définitive à une variation de charge dans les mailles voisines.

Des solutions à l'équation de la diffusivité ont été développées pour des conditions se rapprochant de ce type de situation : variation brusque de charge à la limite d'un aquifère captif semi-infini.

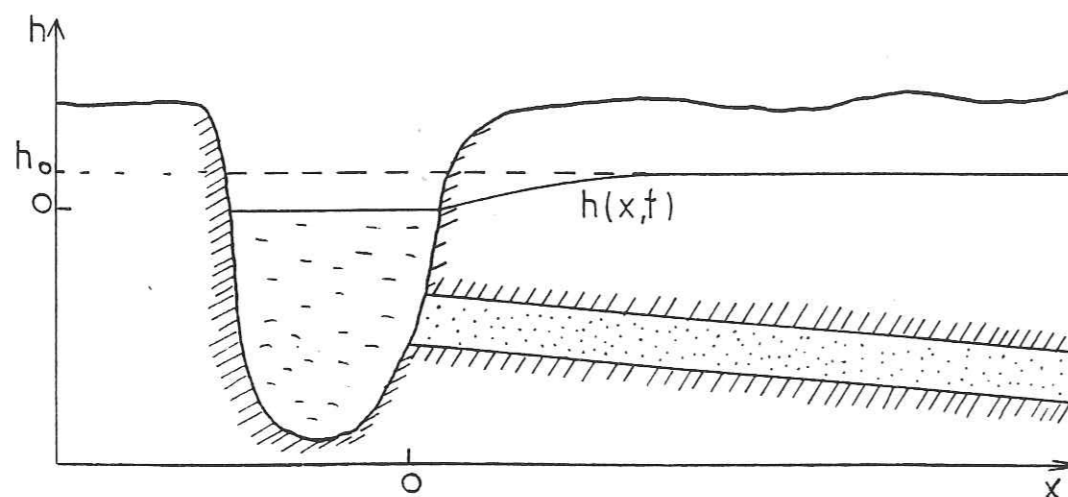


Figure 48

Une solution analytique pour des écoulements à une dimension a été donné par Carslaw et Jeager (1959).

$$h(x, t) = h_0 \operatorname{erf}\left(x \sqrt{\frac{S}{4Tt}}\right) \quad \text{avec } h(x, 0) = h_0 \quad \text{et } h(0, t) = 0, \quad t > 0$$

$$\text{ou } h(x, t) = h_0 \operatorname{erfc}\left(x \sqrt{\frac{S}{4Tt}}\right) \quad \text{avec } h(x, 0) = 0 \quad \text{et } h(0, t) = h_0, \quad t > 0$$

La maille pompage est alors assimilée à la rivière et h_0 à α_p . Les paramètres à caler seront alors (x) et $(S/4T)$.

Cependant, les conditions d'application n'étant pas rigoureusement respectées :

- la variation de la charge dans la maille pompage est fonction du temps,
- l'influence des limites est subordonnée au temps de pompage (pour des temps de pompage courts, le système peut être considéré comme infini), les paramètres obtenus ne sont pas représentatifs des paramètres physiques de l'aquifère.

Finalement, après de nombreux essais, l'écriture de la fonction recherchée ne conserve que la forme générale de l'équation (10) en $\operatorname{erfc}(1/\sqrt{T})$:

$$h(t) = A \left(a_1 t + a_2 \operatorname{erfc}\left(\frac{a_3}{\sqrt{t + a_4}}\right) \right) \quad (11)$$

A, a_1, a_2, a_3, a_4 étant les paramètres variant pour chaque fonction d'influence. La fonction erfc est calculée à l'aide d'une approximation polynomiale (Abramowitz M., Stegun A.R., 1970).

Cette formulation est le fruit d'une première approche, d'autres expressions plus simples et mieux adaptées peuvent, peut-être, être trouvées.

b) Procédure de calage

Les courbes d'influence sont décrites par un certain nombre de rabattements, pour des pas de temps en progression géométrique, afin de bien décrire les phénomènes transitoires se produisant à l'origine des phases de pompage.

Le pas de temps maximum devrait être, en théorie, le temps nécessaire à l'acquisition du régime permanent, ou pseudo-permanent entre les deux mailles les plus distantes. Cette proposition peut entraîner des pas de temps maximaux très longs ayant des conséquences peut réalistes, si l'on se fixe a priori le nombre de pas de temps,

- espacement trop important des premiers pas de temps,
- calcul de nombreuses valeurs de rabattement identiques, la plupart des mailles ayant atteint leur régime permanent.

Cette première proposition visant une description exhaustive du système est donc inapplicable.

La définition du pas de temps maximal devra donc se faire en fonction de la dynamique de l'aquifère, du type de la demande en eau et de projets des décideurs.

En pratique, les rabattements sont calculés à chaque pas de temps et normés par la valeur du rabattement en régime permanent.

Les calages ou estimations des paramètres de l'équation (11) sont réalisés grâce à un logiciel de programmation non linéaire utilisant un algorithme de gradient réduit généralisé (Hubert P., 1979).

Ce programme résout des problèmes de la forme :

Minimiser $G(x)$, $G(x)$ étant la fonction objectif

avec les contraintes :

$$m(j) \leq X_j \leq M(j) \quad j = 1, N$$

Soit, dans le cas qui nous intéresse :

$$G(X) = \sum_{l=1, k} (h(l) - \alpha_{ij}(l))^2 / K \quad K : \text{nombre de pas de temps}$$

A posteriori, un histogramme des valeurs de $G(X)$ permet de contrôler la validité de la fonction utilisée et des contraintes définies sur X_j . En effet, $G(X)$ pouvant avoir plusieurs minima plus ou moins marqués le programme ne retient que le premier minimum atteint. Il est donc particulièrement important de définir convenablement l'espace de variation des X_j et ce pour toutes les mailles de l'aquifère. Un couplage modèle de simulation, modèle d'optimisation, nous a permis d'automatiser le processus, après détermination de la fonction (11) et des contraintes $m(j)$, $M(j)$.

c) Nature de la méthode

Le modèle proposé dans ce document traite des fonctions temporelles discrétisées spatialement reliant des paramètres a_1, a_2, a_3, a_4, A , à des variables d'état Q, h . Les paramètres a_1, a_2, a_3, a_4 ne représentent aucune grandeur physique classiquement utilisée en hydrogéologie (perméabilité, porosité, diffusivité) mais ils sont l'expression d'une synthèse de l'information contenue dans un modèle physique linéaire, à discrétisation spatiale. Par contre, le coefficient A_{ij} a une signification physique très simple, il représente le rabattement dans une maille i pour un pompage unitaire dans la maille j au bout d'un temps infini, il est donc analogue à un débit spécifique. Cette démarche nécessite, une fois le modèle physique calé, un travail important d'élaboration et de traitement de l'information :

- Construction des matrices $[x_{ij}(t)]$ par $D(K+1)$ simulations si K est le nombre de pas de temps choisi pour la définition des matrices d'influence et D le nombre de mailles de décision.
- Synthèse de l'information par LD optimisation des paramètres d'une fonction unique si L est le nombre de mailles d'observation (si l'ensemble des mailles d'observation est l'ensemble des mailles de décision le nombre d'optimisation sera de $n(n+1)/2$).

4.1.3. Calcul des rabattements

Rappelons avant tout que le calcul des rabattements ne peut être effectué que pour un système linéaire. Le rabattement s'exprime comme la somme de l'influence de chaque prélèvement.

En régime transitoire, sans reconstitution des rabattements sur les mailles qui ne sont pas des mailles d'observation, le calcul du rabattement sur une maille i , avec m mailles de pompage s'écrit :

- Si le temps de pompage est supérieur ou égal à la durée de la simulation :

$$r_i = \sum_{j=1}^m Q_j A_{ij} [a_{1ij} t_p + a_{2ij} \operatorname{Erfc}(a_{3ij} / \sqrt{a_{4ij} + t_p})]$$

- Si le temps de pompage est inférieur à la durée de la simulation :

$$r_i = \sum_{j=1}^m Q_j A_{ij} [[a_{1ij} t_p + a_{2ij} \operatorname{Erfc}(a_{3ij} / \sqrt{a_{4ij} + t_p})] - [a_{1ij} T + a_{2ij} \operatorname{Erfc}(a_{3ij} / \sqrt{a_{4ij} + T})]]$$

avec t_p : durée du pompage (heure)

T : durée de la simulation - date de la fin pompage (heure)

Q_j : prélèvements dans la maille j (m^3 /heure)

En régime permanent, ce même calcul s'écrira :

$$r_i = \sum_{j=1}^m Q_j A_{ij}$$

4.2. Les procédures d'entrée-sortie

Le logiciel a été conçu pour effectuer des travaux en mode conversationnel. Ceci a été rendu possible par le faible volume de calcul à effectuer pour

chaque simulation. Un souci particulier a été porté à l'élaboration d'un langage clair permettant de converser avec l'ordinateur pour définir les données des travaux à effectuer et écrire ou visualiser les résultats.

En pratique, deux objectifs ont été définis pour simplifier au maximum la procédure d'entrée-sortie :

- transparence de la procédure de calcul,
- langage clair, proche de celui du décideur.

4.2.1. Transparence de la procédure de calcul

Cela signifie qu'aucune grandeur mathématique ne doit être précisée lors d'une simulation.

Le principe des fonctions d'influence est parfaitement adaptée à cette contrainte, les calculs étant particulièrement simples. Ils ne font intervenir aucun critère, aucune grandeur liés à la résolution mathématique tel que critère de convergence, nombre d'itérations, pas de temps critique, etc...

La notion de transparence du calcul signifiait également la disparition visuelle de la structure du maillage, paraissant peut-être quelque peu artificielle aux décideurs. Les calculs sont néanmoins effectués au centre des mailles.

4.2.2. Langage adapté

Les termes régissant les procédures d'entrée-sortie ont été limités à des mots, des notions proches de celles que manipulent les décideurs. Ainsi, les entrées s'expriment en termes de coordonnées géographiques, débit et temps, les sorties en termes de coordonnées géographiques et rabattements. Elles sont signifiées sous forme de tableaux de valeurs et de cartes.

4.3. Organisation générale du logiciel

Le logiciel présenté ci-dessus, baptisé "Gamme" a été concrétisé par un programme informatique écrit en langage basic et implantable sur micro-ordinateur. Il a été développé sur un appareil Tektronics 4051, mais pourrait être adapté à tout autre type de micro-ordinateur au prix d'une modification partielle des procédures d'entrée-sortie et du langage de programmation basic qui difère légèrement d'un fabricant à l'autre.

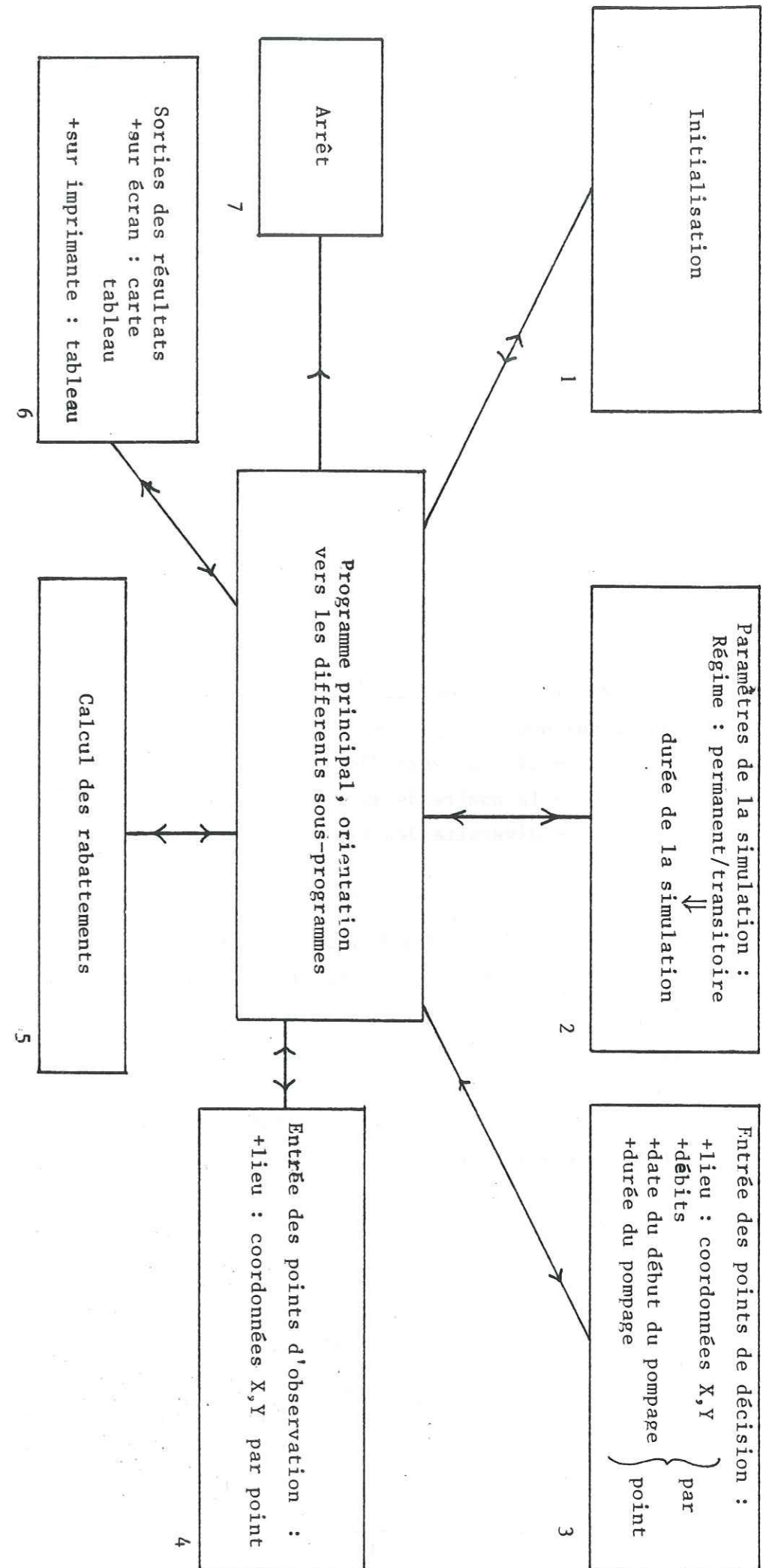


Figure 49 : Organisation générale du logiciel (1,2,3,...,7 = numéro des sous-programmes)

La mise en oeuvre du programme "Gamme" peut être divisé en plusieurs tâches, telles que l'introduction du type de régime de la simulation, de la durée de la simulation, l'introduction des points d'observation, le calcul des rabattements, ou l'impression des résultats. Leur organisation dans le programme est présenté sur la figure 49.

L'ordre d'exécution des tâches doit respecter dans un premier temps la numérotation de 1 à 4 (cf. figure 49). Une fois ces tâches accomplies et les données nécessaires introduites, l'ordre peut être quelconque entre les tâches 2 à 6.

4.4. Application à l'aquifère de Camlibel

Cet exemple illustre les principales étapes de l'adaptation et de l'exploitation du logiciel à un cas précis. La modélisation de cet aquifère est souvent utilisé comme exemple d'application lors des séminaires sur l'utilisation des modèles à discrétisation spatiale au C.I.G. de l'Ecole des Mines de Paris. Il se situe en territoire Turc, plus précisément en Anatolie Centrale dans le bassin de Camlibel. Ce système bien réel, présentait plusieurs caractéristiques intéressantes qui nous ont incité à l'utiliser pour la mise au point du programme :

- il peut être décrit convenablement par des équations linéaires,
- le nombre de mailles est limité à 102,
- diversité des types de limites :
 - . Drain
 - . Débit imposé

Le calcul des fonctions d'influence a été effectué à l'aide du modèle Newsam (Ledoux, E., Tillie, B, 1980), en 102 simulations de 12 pas de temps de 1 à 88 jours en progression géométrique de raison 1,75. A cela s'ajoutent 102 simulations en régime permanent.

Nous avons ensuite procédé à l'optimisation des courbes de rabattements $h(t)$. Le nombre des mailles n'étant pas très important et aucune n'étant à potentiel imposé, nous avons donc retenu tous les centres des mailles comme support de l'information. Nous avons ainsi effectué $n(n+1)/2$ optimisations des paramètres de la fonction (10) contrainte par les fonctions d'influence.

La qualité des calages effectués est figurée sur 2 histogrammes :

- Un histogramme des valeurs de $G(X)$ (figure 50) montre un maximum pour la valeur $10^{-2.2}$ soit 0,06 ou une distance moyenne par rapport aux valeurs relatives de $\alpha_{ij}(t)$ de 0,1. Les valeurs relatives $\alpha_{ij}(t)/A_{ij}$ variant de 0 à 1, cet écart est donc de 10 %.

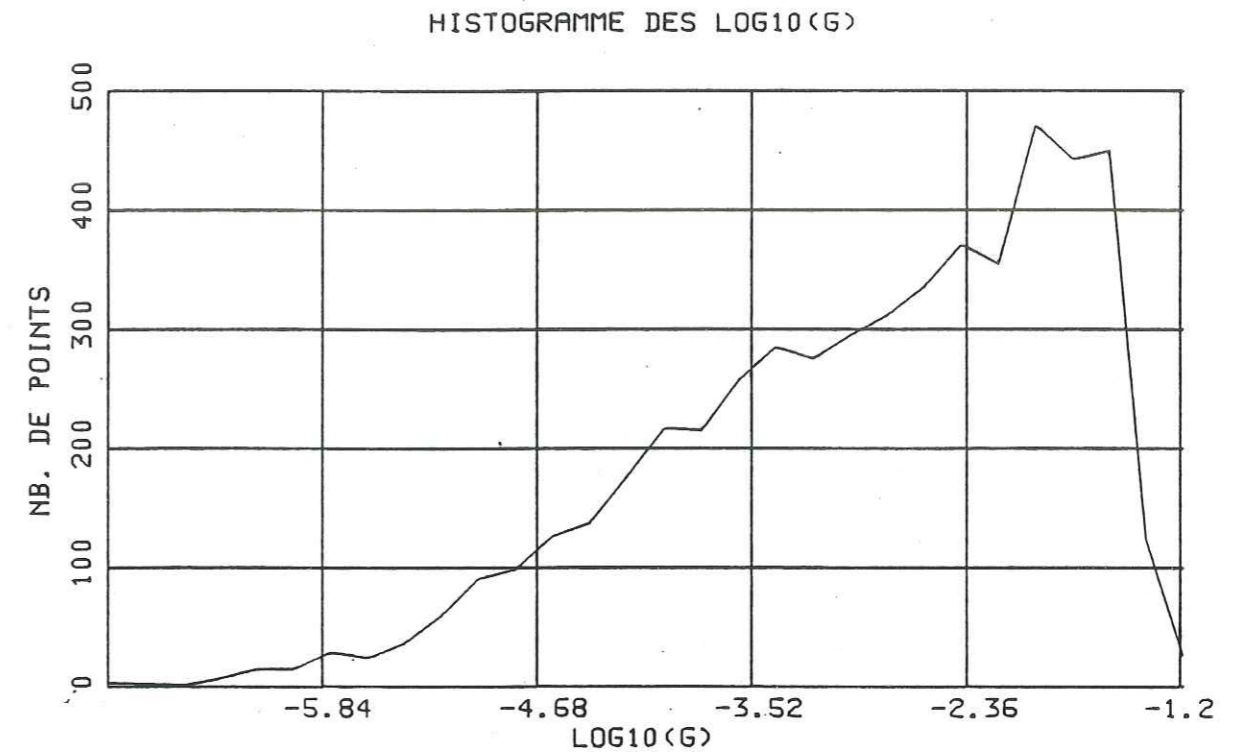


Figure 50

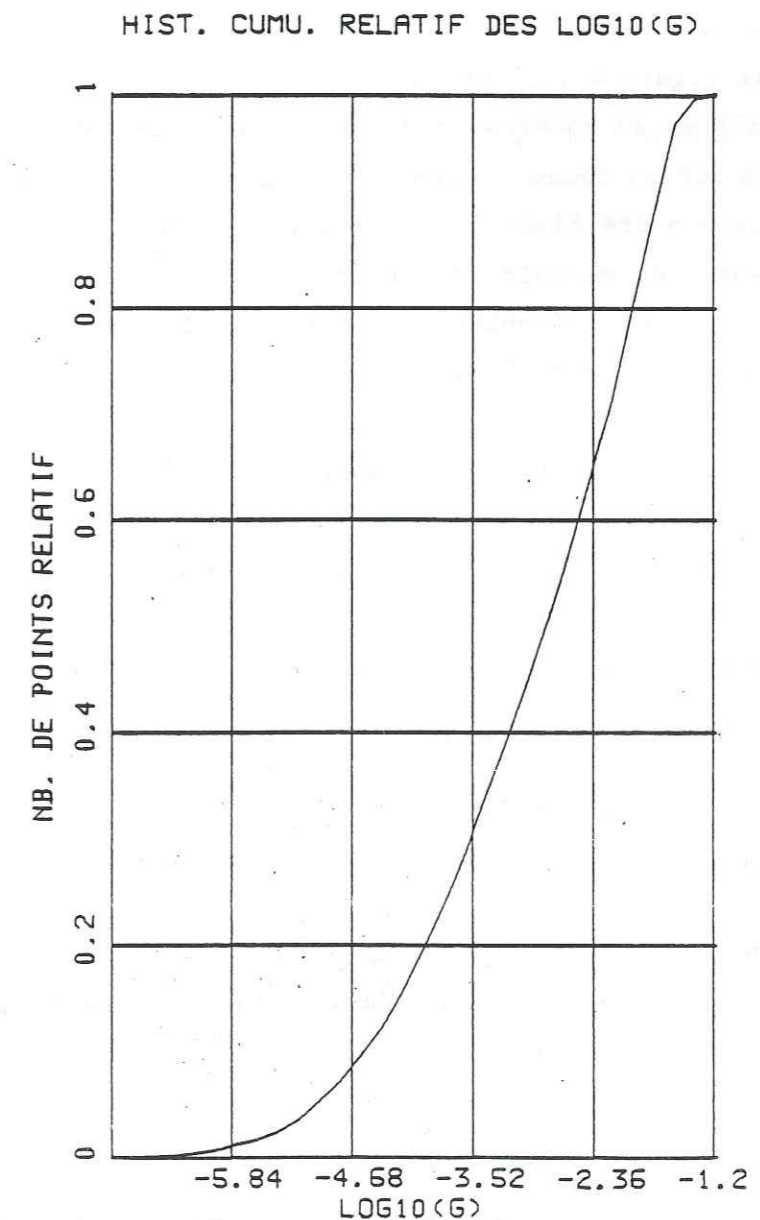


Figure 51

L'écart minimum est négligeable, $G(X)$ maximum atteint $10^{-1.2}$ soit 25 %, valeur importante mais ne concernant que 0,5 % des calages.

- Un histogramme cumulatif (figure 5D) montre que 80 % des valeurs de $G(X)$ se situent sous la barre de 10^{-2} soit 10 % d'erreur relative.

Dans le cadre d'un premier essai, nous avons considéré ces valeurs comme convenables, qualifiant ainsi la fonction (11) de représentative des fonctions d'influence, et les paramètres A, a_1, a_2, a_3, a_4 comme une bonne synthèse de l'information.

4.4.1. Exemples d'exploitation

Le scénario envisagé ici à titre purement démonstratif a fait l'objet de deux simulations effectuées sur le logiciel "Gamme" décrit ci-dessus. L'une des simulations correspond à un calcul en régime permanent, l'autre simulation est un calcul en régime transitoire. Les résultats de ces calculs furent par la suite comparés aux résultats obtenus avec le programme Newsam. La répartition des lieux de pompage identiques sur la simulation est représentée sur la figure 52. Cette image de l'écran tel qu'il se présente à l'utilisateur correspond au stade 3 précisé sur la figure 49. L'ensemble des lieux d'observation choisis englobe l'ensemble des mailles du modèle. Un autre ensemble ne comprenant que quelques points aurait pu être défini comme le montre la figure 53. En régime transitoire, la durée de la simulation a été fixée à 200 jours, le début et la fin de chaque prélèvement ayant également été indiqués (figure 52). Après le calcul des rabattements (stade 5), ces derniers sont présentés (stade 6) sous forme de carte (figure 54) ou édités sur une imprimante (figure 55).

Les résultats et les rabattements calculés par le modèle Newsam pour un scénario identique sont reportés sur le tableau 11 et figure 56. Il apparaît que les écarts absolus ou relatifs entre les deux séries de résultats en régime permanent sont toujours nuls. Ceci est lié à la simplicité des calculs qui se résument en une série de sommes sans aucune approximation.

Par contre, en régime transitoire, l'imperfection du calage de l'expression 11 sur les fonctions d'influence est à l'origine d'écarts perceptibles entre les deux séries de résultats.

Soulignons cependant que la plupart des écarts absolus sont inférieurs à 5 cm. Cette valeur, très faible, est du même ordre que les erreurs affectant les mesures effectuées sur les terrains. La valeur maximale de l'écart absolu entre les deux séries de résultats

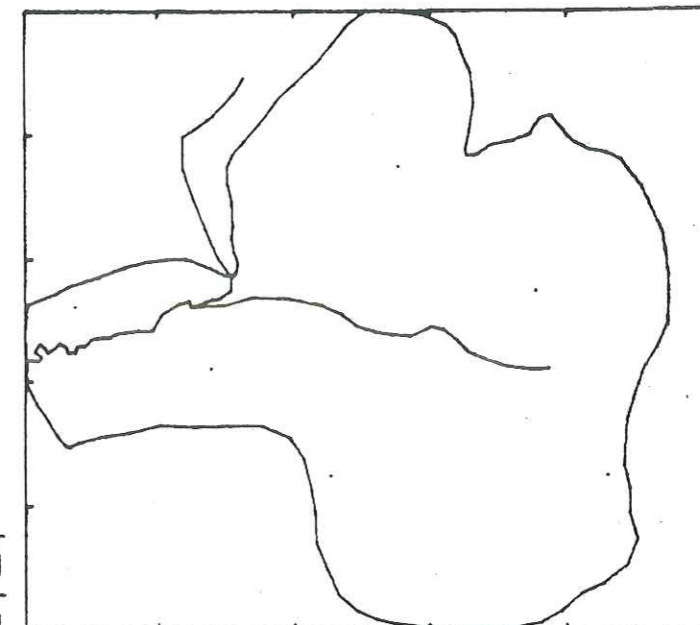
POMPAGES

Régime : transitoire

Nb. de pompages : 6

lcoor.x	lcoor.y	debits	lt.deb.	durée
5500	7500	300	0	150
750	5250	360	50	150
7500	5500	600	100	50
2750	4250	100	0	200
4500	2500	130	150	50
8500	2500	200	50	150

Figure 52



Unités :

rabattements (m)
débits (m³/h)
temps (jour)

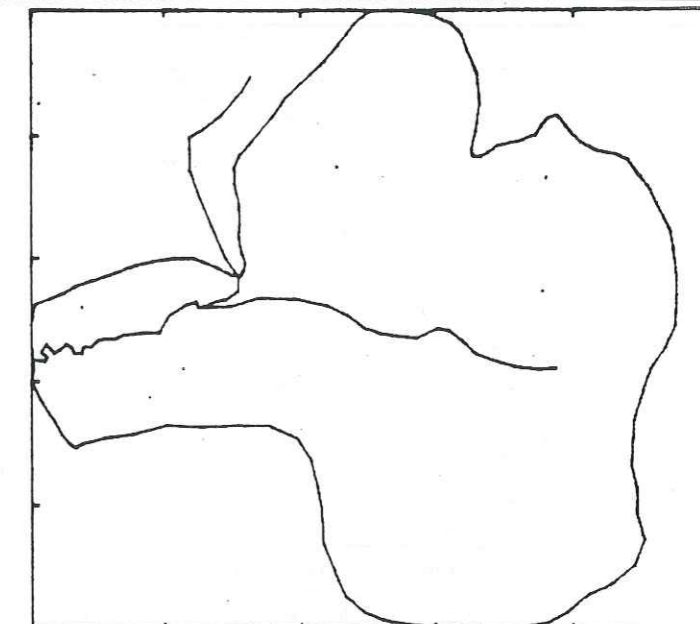
POINTS D'OBSERVATIONS

calcul sur tout le domaine o/n : n

Nb. de points : 6

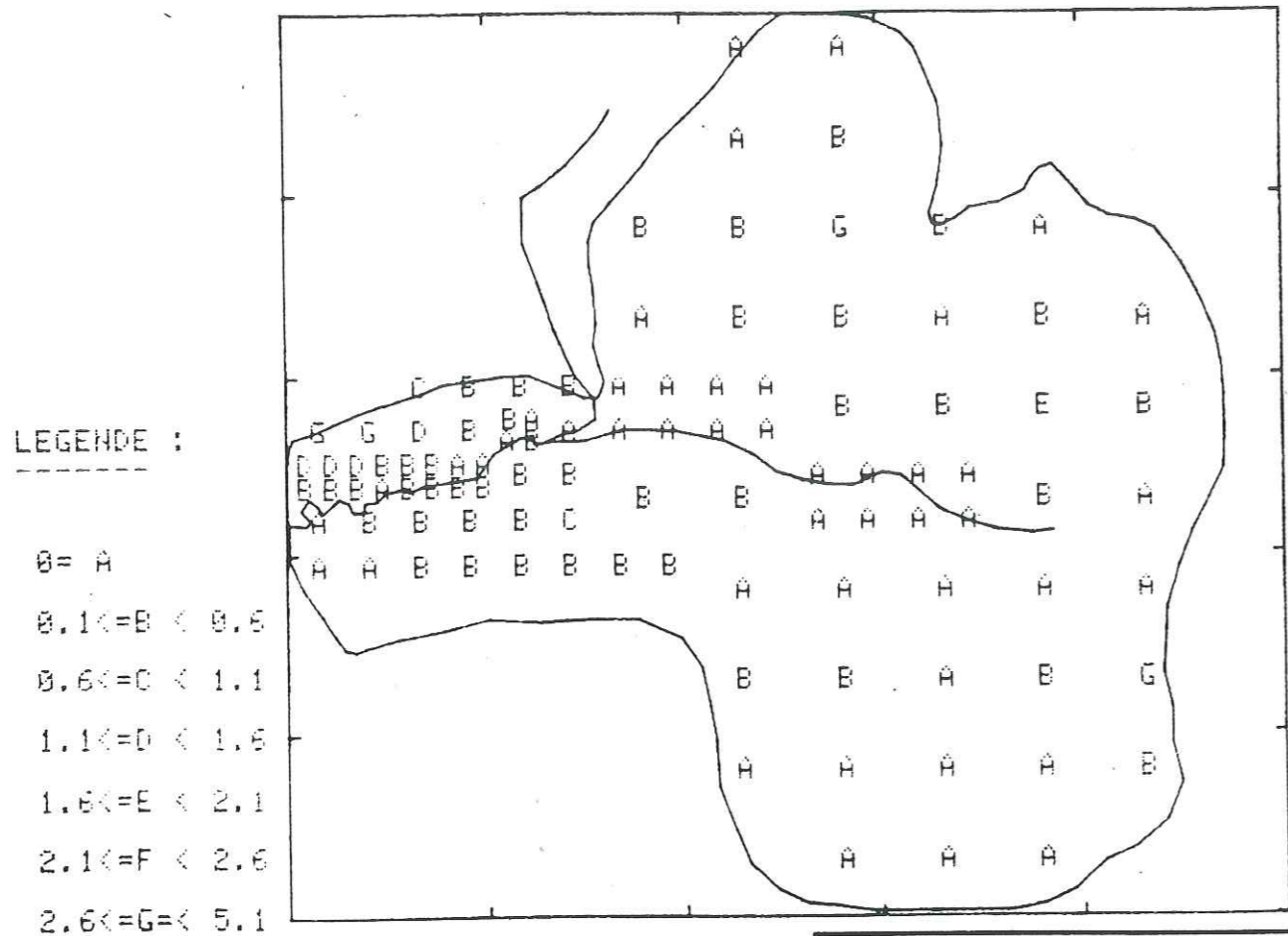
lcoor.x	lcoor.y
7500	5510
750	5240
2250	4250
110	8530
4500	7520
1750	3750

Figure 53



le point 4 est hors du domaine

suite : presser la touche return



LEGENDE :

- 0 = A
- 0.1 ≤ B < 0.6
- 0.6 ≤ C < 1.1
- 1.1 ≤ D < 1.6
- 1.6 ≤ E < 2.1
- 2.1 ≤ F < 2.6
- 2.6 ≤ G < 5.1

Unités:
 rabattements (m)
 débits (m3/h)
 temps (jour)

RESULTATS DE LA SIMULATION DU 21-OCT-83

Figure 54

Figure 55

Régime : transitoire

durée de la phase : 200.00 jours

pompages :

n°	icoor	xicoor	yl	deb	lt deb	durée
1	15500.01	17500.01	300.00	0.01	150.01	
2	1750.01	15250.01	360.00	50.01	150.01	
3	17500.01	15500.01	600.00	100.01	50.01	
4	12750.01	14250.01	100.00	0.01	200.01	
5	14500.01	12500.01	130.00	150.01	50.01	
6	18500.01	12500.01	200.00	50.01	150.01	

rabattements :

N°	icoor	Xicoor	YdeltaH	N°	icoor	Xicoor	YdeltaH	N°	icoor	Xicoor	YdeltaH	N°	icoor	Xicoor	YdeltaH
1	17500.01	15510.01	1.81	2	1750.01	15240.01	5.11	3	12250.01	14250.01	0.51	4	14500.01	17520.01	0.41
5	1750.01	13750.01	0.21												

Tableau 11 : Rabattements calculés par le modèle Newsam et le modèle Gamme pour un scénario de prélèvements identique, en régime permanent.

Maille	no.	newsam	gamme	abs.	relat.	Maille	no.	newsam	gamme	abs.	relat.	Maille	no.	newsam	gamme	abs.	relat.
	1	4.14	4.14	0.00	0.00		2	4.22	4.22	0.00	0.00		3	4.04	4.04	0.00	0.00
	4	4.29	4.29	0.00	0.00		5	2.91	2.91	0.00	0.00		6	3.87	3.87	0.00	0.00
	7	4.53	4.53	0.00	0.00		8	6.77	6.77	0.00	0.00		9	8.87	8.88	0.00	0.00
	10	2.21	2.21	0.00	0.00		11	4.16	4.16	0.00	0.00		12	4.08	4.08	0.00	0.00
	13	6.31	6.31	0.00	0.00		14	9.69	9.69	0.00	0.00		15	10.43	10.44	0.00	0.00
	16	0.24	0.24	0.00	0.00		17	0.29	0.29	0.00	0.00		18	0.34	0.34	0.00	0.00
	19	0.58	0.58	0.00	0.00		20	1.06	1.06	0.00	0.00		21	1.27	1.27	0.00	0.00
	22	1.53	1.53	0.00	0.00		23	1.80	1.80	0.00	0.00		24	0.05	0.05	0.00	0.00
	25	0.08	0.08	0.00	0.00		26	0.17	0.17	0.00	0.00		27	0.28	0.28	0.00	0.00
	28	0.22	0.22	0.00	0.00		29	0.11	0.11	0.00	0.00		30	0.22	0.22	0.00	0.00
	31	0.53	0.53	0.00	0.00		32	0.26	0.26	0.00	0.00		33	0.28	0.28	0.00	0.00
	34	0.35	0.35	0.00	0.00		35	0.46	0.46	0.00	0.00		36	0.54	0.54	0.00	0.00
	37	2.21	2.21	0.00	0.00		38	4.70	4.70	0.00	0.00		39	12.53	12.53	0.00	0.00
	40	11.76	11.76	0.00	0.00		41	0.04	0.04	0.00	0.00		42	0.04	0.04	0.00	0.00
	43	0.04	0.04	0.00	0.00		44	0.01	0.01	0.00	0.00		45	0.06	0.06	0.00	0.00
	46	0.11	0.11	0.00	0.00		47	0.26	0.26	0.00	0.00		48	0.62	0.62	0.00	0.00
	49	0.02	0.02	0.00	0.00		50	0.02	0.02	0.00	0.00		51	0.03	0.03	0.00	0.00
	52	0.08	0.08	0.00	0.00		53	0.73	0.72	0.00	0.00		54	1.35	1.34	0.00	0.00
	55	2.92	2.92	0.00	0.00		56	6.97	6.97	0.00	0.00		57	1.88	1.88	0.00	0.00
	58	1.44	1.44	0.00	0.00		59	0.42	0.42	0.00	0.00		60	0.65	0.65	0.00	0.00
	61	1.45	1.45	0.00	0.00		62	2.75	2.75	0.00	0.00		63	2.02	2.02	0.00	0.00
	64	1.84	1.84	0.00	0.00		65	1.78	1.78	0.00	0.00		66	2.77	2.77	0.00	0.00
	67	0.54	0.54	0.00	0.00		68	0.60	0.60	0.00	0.00		69	0.92	0.92	0.00	0.00
	70	1.46	1.46	0.00	0.00		71	3.79	3.79	0.00	0.00		72	4.63	4.63	0.00	0.00
	73	7.16	7.16	0.00	0.00		74	9.58	9.58	0.00	0.00		75	11.15	11.16	0.00	0.00
	76	12.78	12.79	0.00	0.00		77	0.61	0.61	0.00	0.00		78	0.88	0.88	0.00	0.00
	79	1.49	1.49	0.00	0.00		80	2.14	2.14	0.00	0.00		81	2.05	2.05	0.00	0.00
	82	2.01	2.01	0.00	0.00		83	2.49	2.49	0.00	0.00		84	4.00	4.00	0.00	0.00
	85	7.04	7.04	0.00	0.00		86	10.79	10.80	0.00	0.00		87	13.54	13.54	0.00	0.00
	88	18.04	18.04	0.00	0.00		89	16.78	16.78	0.00	0.00		90	13.58	13.59	0.00	0.00
	91	21.75	21.75	0.00	0.00		92	21.94	21.94	0.00	0.00		93	27.67	27.67	0.00	0.00
	94	26.89	26.89	0.00	0.00		95	16.81	16.81	0.00	0.00		96	23.21	23.21	0.00	0.00
	97	28.62	28.62	0.00	0.00		98	35.93	35.93	0.00	0.00		99	35.25	35.25	0.00	0.00
	100	26.28	26.28	0.00	0.00		101	30.12	30.12	0.00	0.00		102	34.50	34.51	0.00	0.00

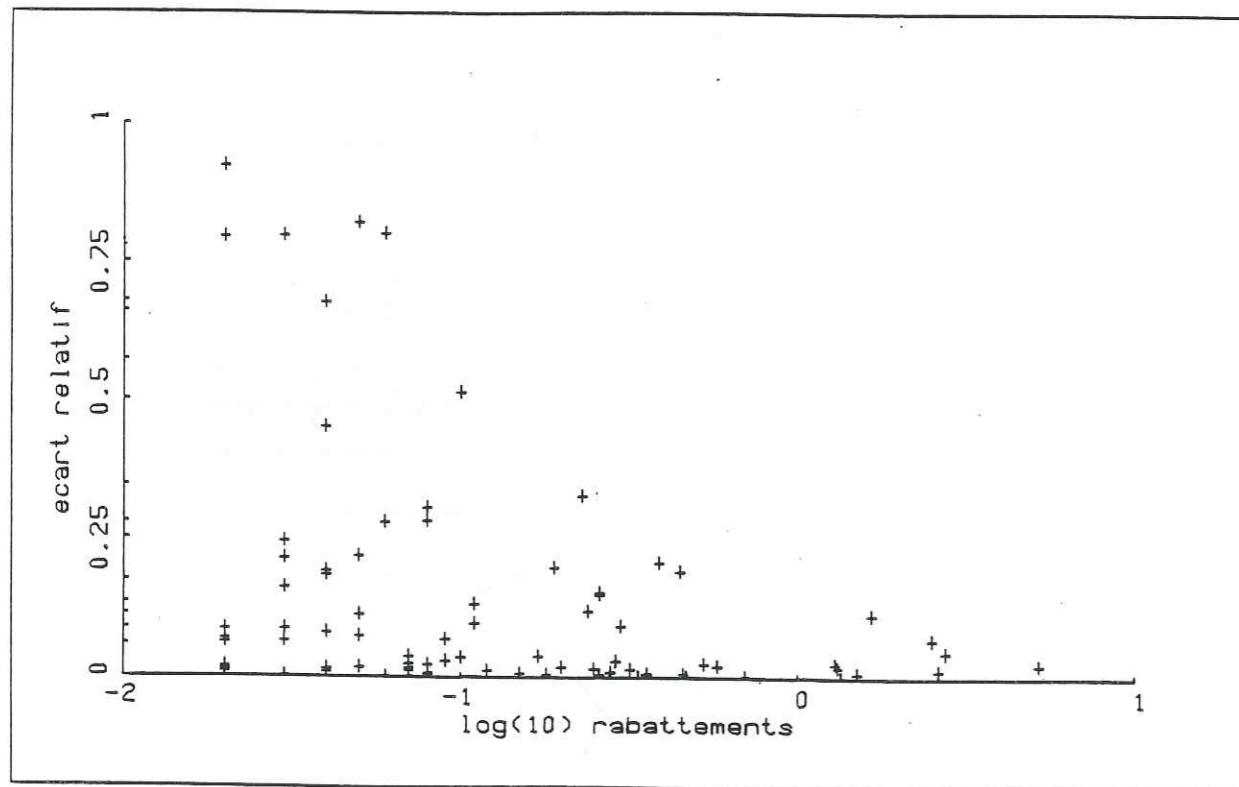
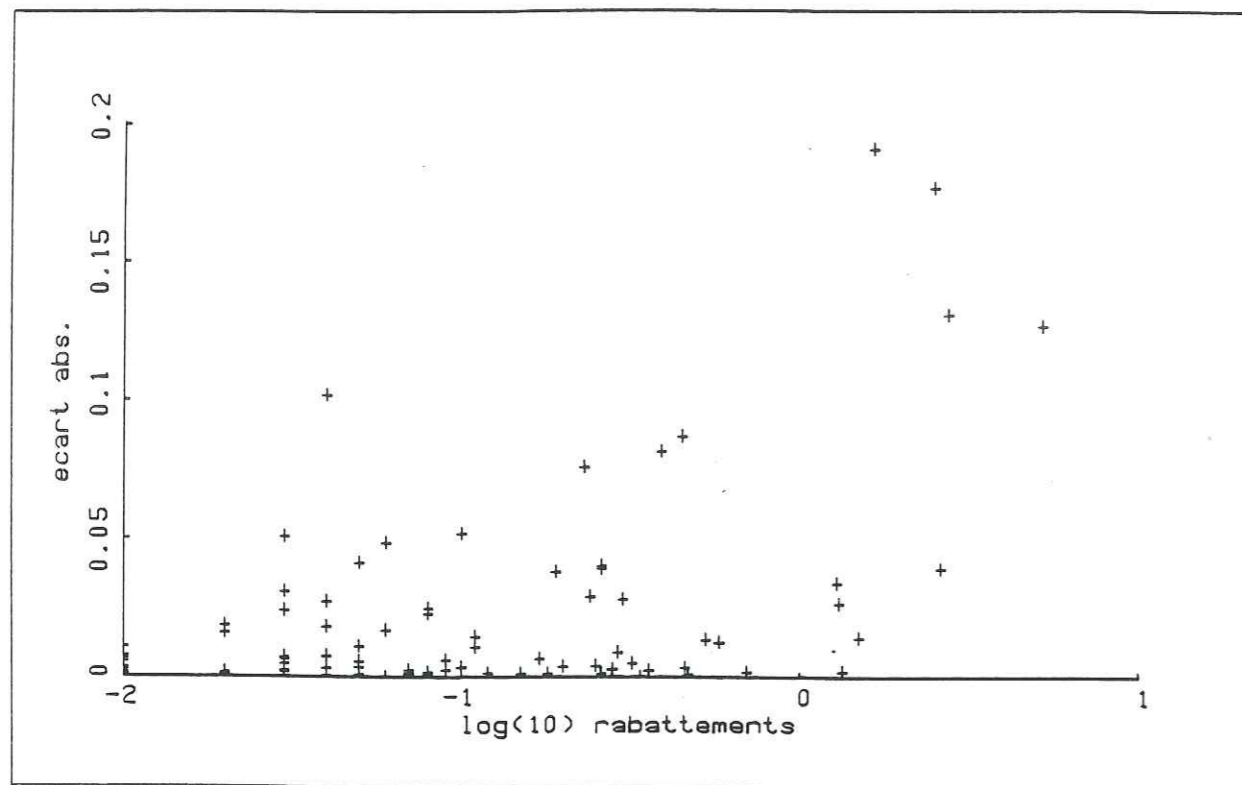


Figure 56

Répartition des écarts absolus et relatifs par rapport au rabattements calculés par le modèle Newsam en régime transitoire.

tats est toujours inférieure à 20 cm. Les écarts relatifs sont fonction des rabattements calculés, assez forts pour des valeurs faibles de rabattements, ils deviennent très faibles, inférieurs à 10 %, pour des valeurs de rabattement supérieures à 1 mètre.

Les simulations de ce scénario d'exploitation et l'analyse de leurs résultats ne permet pas de conclure précisément sur la fiabilité du logiciel. Malgré cela, l'observation des histogrammes de la grandeur G (figure 51) et l'exemple présenté ci-dessus montre que le logiciel a fourni des résultats relativement précis notamment pour des valeurs fortes de rabattements. Rappelons que cette précision résulte à la fois de la précision du modèle utilisé pour calculer les fonctions d'influence (modèle Newsam) et de la qualité de l'optimisation des paramètres de l'expression II visant à décrire ces courbes.

5. APPLICATION A L'AQUIFERE DU DELTA DE LA DRANSE

En reprenant les résultats obtenus dans le 2^e chapitre, nous avons adapté le logiciel "Gamme" à l'aquifère du delta de la Dranse. Nous tenterons de montrer quel type d'enseignements pratiques il est possible de dégager de l'utilisation de cet outil d'aide à la gestion.

5.1. Présentation du logiciel adapté au delta de la Dranse

Le domaine du delta de la Dranse, modélisé à l'aide du programme Newsam, comporte 345 mailles. A partir de cet ensemble, nous avons distingué un groupe de 20 mailles de décision dont la position des centres est précisée sur la figure 57. L'ensemble des mailles d'observation compte 239 éléments. Les mailles à potentiel imposé, dont par nature le potentiel est invariant, et les mailles en drain, de peu d'intérêt pour le gestionnaire, n'ont pas été retenues comme mailles d'observation.

Les mailles de décision ont été choisies en fonction des ouvrages de pompage actuels et des zones les plus propices au développement de l'exploitation de l'aquifère. Nous avons également tenu compte de leur distance à la Dranse. En effet, comme nous l'avons montré dans le 2^e chapitre, le comportement de l'aquifère n'est pas toujours linéaire. Ce dernier étant à surface libre, tout rabattement important provoquera une modification des valeurs de transmissivité. Ceci est

Figure 57

Localisation des mailles de décision.

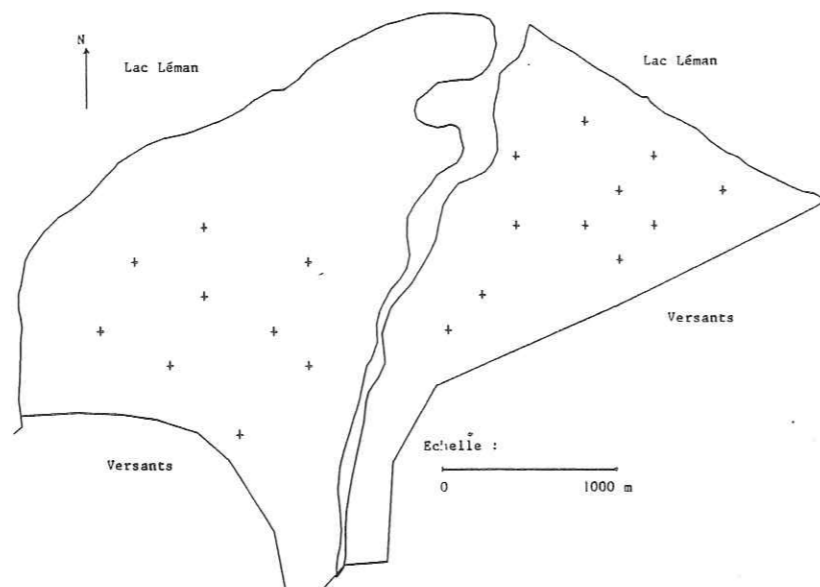
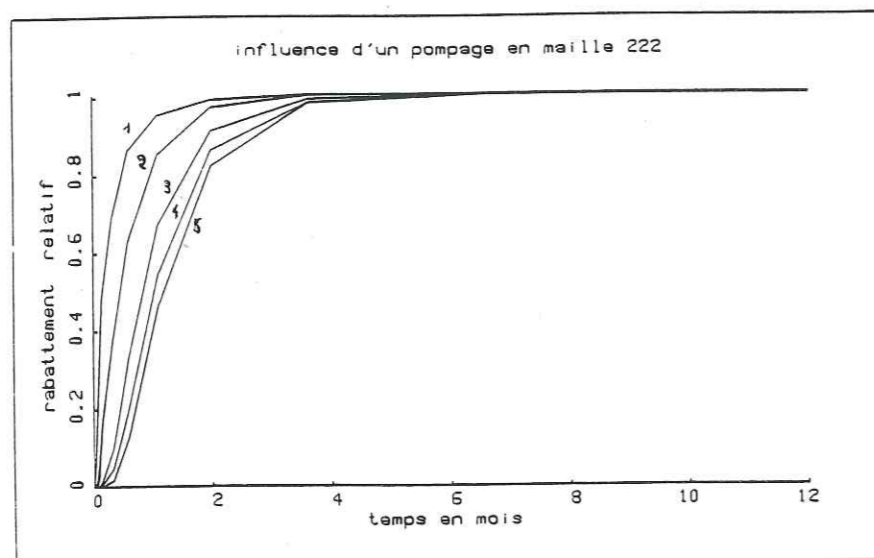


Figure 58

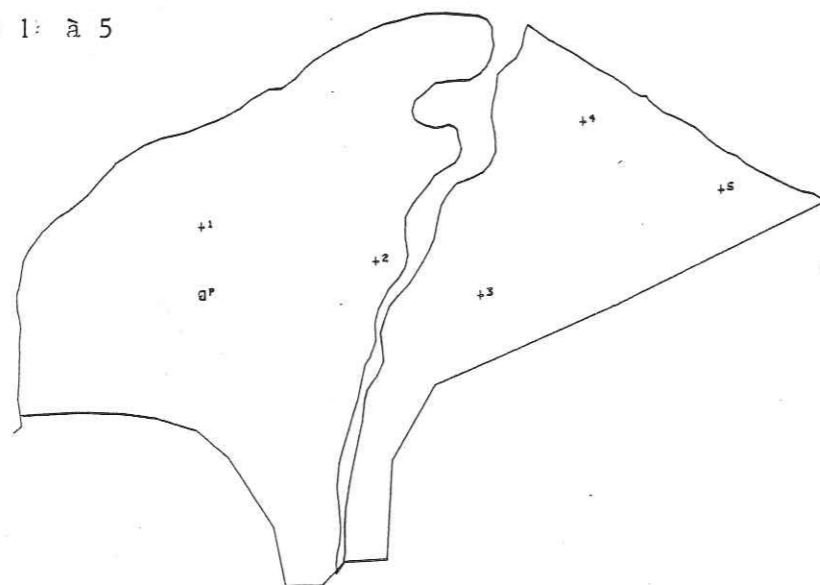
Rabattements relatifs = $r(t)/A$

avec :
 $r(t)$ = rabattements en régime transitoire
 A = rabattement en régime permanent



Localisation des points 1: à 5

P : lieu du pompage (maille 222)



particulièrement sensible aux abords de la Dranse où des rabattements supérieurs à 1 mètre provoquent une déconnection hydraulique partielle, entre la Dranse et l'aquifère, entraînant une diminution des débits alimentant l'aquifère. Or, le logiciel Gamme ne s'applique en toute rigueur qu'aux systèmes linéaire. C'est pourquoi :

- les mailles de décision sont relativement éloignées de la Dranse,
- les résultats fournis par le logiciel "Gamme" auront une signification quantitative en dehors des périodes d'étiage accentués et si les rabattements provoqués par les prélèvements ne sont pas trop importants aux abords de la Dranse.

Par ailleurs, le lac Léman qui constitue la limite de l'aquifère au Sud et à l'Ouest impose un potentiel invariant sur les 2/3 du périmètre du delta. En conséquence, comme le montre la figure 58, les courbes de rabattement en fonction du temps tendent rapidement vers une valeur asymptotique égale au rabattement en régime permanent. Nous avons donc choisi de présenter, pour le delta de la Dranse, une application du logiciel effectuant les calculs de rabattement uniquement en régime permanent.

5.2. Exemples d'exploitation

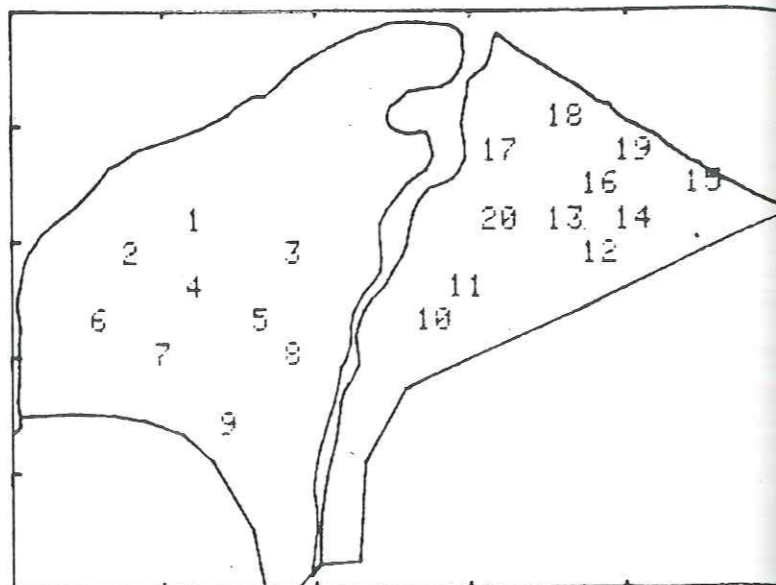
Parmi les différents usages auxquels se prête l'aquifère du delta de la Dranse, nous avons évoqué l'utilisation de l'eau souterraine comme une source de calories. Il était apparu que, si l'on satisfaisait un certain nombre de conditions, ce type d'exploitation de l'aquifère pouvait s'avérer particulièrement intéressant. Suite à ces remarques, un rapide calcul nous avait permis de préciser que le besoin en eau par logement était égal à $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ durant les périodes les plus froides. Nous avons donc choisi de simuler l'influence de prélèvements destinés à cet usage. L'hypothèse du chauffage d'un certain nombre de logements dans la ville de Thonon a été retenue à titre d'exemple.

La figure 59 montre les données du premier scénario de prélèvement avec un débit total pompé de $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ soit $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$. Un débit de cet ordre permet en principe de chauffer 3000 logements. Les répercussions de ces prélèvements sur l'aquifère sont présentées sur la figure 60. La perturbation s'observe essentiellement en rive gauche où elle est comprise, mis à part les lieux même des pompages, entre 0,2 m et 21 m. En rive droite, la perturbation s'observe également en amont où elle ne dépasse jamais 0,8 m. Les rabattements aux abords de la Dranse restent faibles garantissant ainsi la précision des résultats. Un scénario analogue a

POMPAGES

Régime : permanent

Nb. de pompages : 4



Inumero/debits	
1	300
6	300
4	300
7	300

Unités :
rabattements (m)
débits (m3/h)

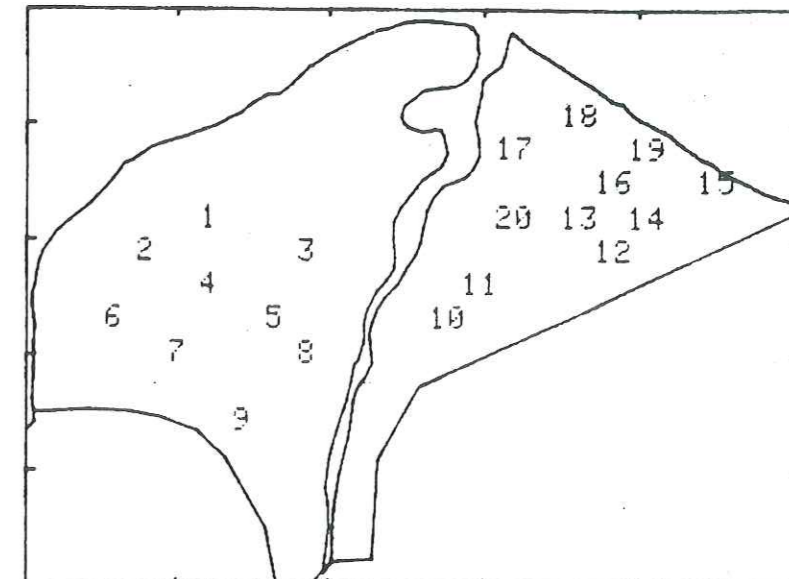
Figure 59 :

Nota : pour chaque pompage sont introduits le numéro de la maille de décision affectée par le prélèvement, et le débit pompé.

POMPAGES

Régime : permanent

Nb. de pompages : 4

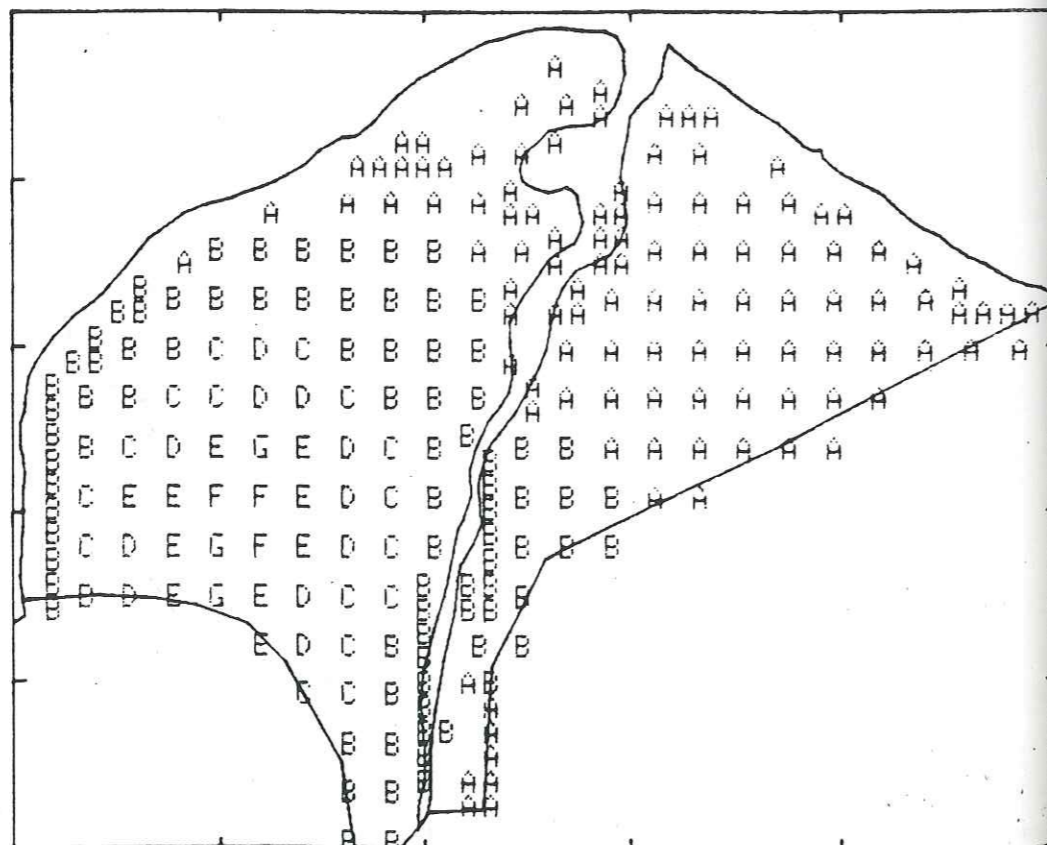


Inumero/debits	
1	500
4	500
6	500
7	500

Unités :
rabattements (m)
débits (m3/h)

Figure 61

Figure 60

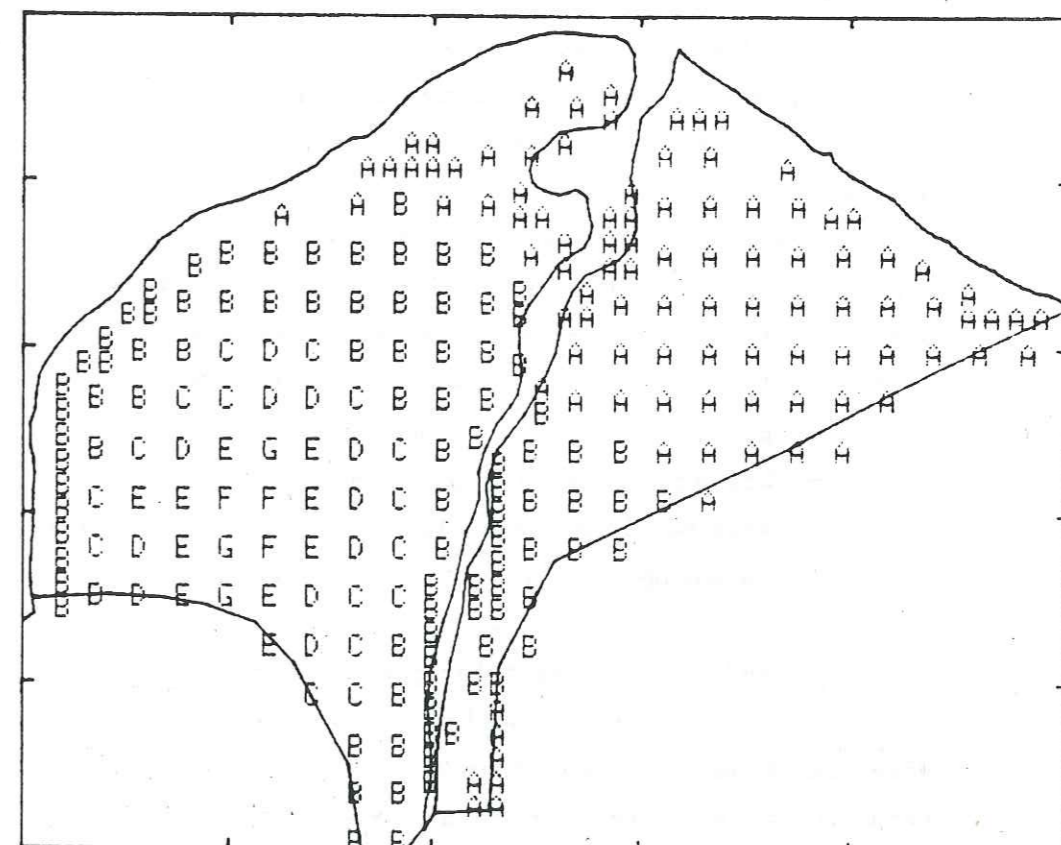


LEGENDE :

- 0 = A
- 0.1 <= B < 0.8
- 0.8 <= C < 1.5
- 1.5 <= D < 2.1
- 2.1 <= E < 2.8
- 2.8 <= F < 3.5
- 3.5 <= G < 5.1

suite : presser la touche return

Figure 62



LEGENDE :

- 0 = A
- 0.1 <= B < 1.3
- 1.3 <= C < 2.4
- 2.4 <= D < 3.6
- 3.6 <= E < 4.7
- 4.7 <= F < 5.9
- 5.9 <= G < 8.5

suite : presser la touche return

également été simulé mais pour un débit total égal à $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ soit $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 61). Les résultats, présentés en figure 62, montrent des rabattements nettement plus importants allant jusqu'à 8,5 m. Ajoutés à l'influence des prélèvements destinés à d'autres usages, ils peuvent atteindre en certains points 10 mètres. Cette valeur paraît un peu trop forte, le risque de dénoyage de certains puits n'étant plus négligeable surtout en période d'étiage. Ces périodes se situent notamment entre Octobre et Mars, c'est-à-dire pendant la période de chauffe. Remarquons également que les rabattements indiqués sur la figure 60 constituent certainement une vision optimiste de la réalité. En effet, les rabattements aux abords de la Dranse sont de l'ordre de 1 à 2 m et il est donc probable que le scénario testé provoque une désaturation partielle de l'aquifère à l'aplomb de la Dranse. Cette situation est à l'origine d'une rupture du comportement linéaire de l'aquifère. Or le champ de rabattement présenté serait réaliste si le système était effectivement linéaire. La non linéarité se traduisant par une diminution des débits de perte de la Dranse, les rabattements présentés sont certainement inférieurs à ceux que l'on observerait réellement à la suite d'un scénario d'exploitation semblable. Nous sommes donc ici à la limite de validité du modèle "Gamme".

6. SYNTHESE ET LIMITES DES CAPACITES DU LOGICIEL

Les limites d'application du logiciel présenté dans ce document résident dans la nature même des aquifères concernés. En effet, le calcul des rabattements est conçu à partir du principe de superposition qui ne s'applique en toute rigueur qu'aux systèmes linéaires. Dans ces systèmes, l'influence d'un ensemble de prélèvements égale la somme de ces influences. Ceci n'est plus vrai pour les systèmes non linéaires dont l'alimentation ou les paramètres physiques sont fonction des débits prélevés. Les exemples les plus fréquents de ce type d'aquifère sont :

- les aquifères libres lorsque les rabattements ne sont plus négligeables par rapport à la profondeur mouillée de l'aquifère.
- Les aquifères alimentés par un drain dont le débit de perte est limité soit par le débit de la rivière, soit par des phénomènes équivalents à un colmatage du lit de la rivière en fonction des potentiels de l'aquifère.

Cependant, en fixant les prélèvements dans certaines normes définies par le modélisateur et pour lesquelles un système peut être assimilé à un système linéaire, la plupart des aquifères peuvent alors être convenablement décrits. Cet outil sera alors un indicateur relativement précis de l'influence de telle ou telle perturbation apportée à un système aquifère.

Mais, plus qu'un programme particulier, c'est une méthode d'utilisation et de conception des outils informatiques d'aide à la gestion que nous proposons. Dans ce cadre, nous avons recherché une répartition des tâches entre concepteur de modèles et utilisateur, plus claire et mieux adaptée aux besoins. Le modélisateur conçoit et adapte son outil à chaque cas en organisant la cohésion des données, condense l'informatique et fournit au décideur un moyen adapté pour la traiter.

C'est là une méthode qui peut aider le gestionnaire à répondre au mieux à la demande en incitant les exploitants à s'orienter vers une politique logique et globale de prélèvements.

CONCLUSION

Nous nous sommes attachés durant cette étude à relier des travaux de nature purement scientifique, comme la reconnaissance d'un aquifère, à des préoccupations pratiques, telles que la gestion des ressources en eaux souterraines.

Le premier aspect de cette démarche est illustré par l'étude qualitative puis quantitative de l'aquifère du delta de la Dranse en tant qu'objet naturel soumis à une exploitation, source d'eau et d'énergie. La synthèse des résultats a permis de définir un cadre précis, pour une exploitation rationnelle et éclairée de la ressource ; elle est en cela l'expression du second aspect de notre démarche. Cette dernière phase est complétée par l'étude d'un outil puissant et pratique, source d'éléments de décision, adapté aux moyens et aux besoins des organismes locaux chargés de la gestion des ressources en eau. En d'autres termes, cet outil est l'expression de la synthèse et de l'analyse de l'information acquise lors de l'étude d'un aquifère et présentée sous une forme aisément manipulable.

La reconnaissance de l'aquifère du delta de la Dranse comportait une phase de terrain et une phase de simulation sur modèle numérique. Elle a permis de dégager plusieurs éléments importants :

- Le bilan hydraulique moyen du système a été estimé à l'aide du programme Newsam. Il transite à travers l'aquifère un débit moyen de l'ordre de $1,2 \text{ m}^2/\text{s}$ qui s'écoule principalement de la Dranse vers le lac. Les ressources hydrauliques exploitables de l'aquifère, tout en étant limitées par cette grandeur, sont fonction de la répartition spatiale des ouvrages de pompage. En effet, la nature physico-chimique de l'eau est variable selon les zones du delta. Dans certains secteurs, l'eau n'est plus utilisable, dans d'autres, elle doit être réservée à des usages précis eu égard à la nature de l'eau. Par ailleurs, l'influence réciproque de deux pompes peut devenir un facteur limitant les possibilités d'exploitation. Pour fournir aux gestionnaires et aux utilisateurs de la ressource un moyen d'organiser des prélèvements, en intégrant ces différents facteurs, un modèle de simulation simple et facilement utilisable a été mis au point. Son utilisation permettra une gestion "éclairée" de la ressource.
- Nous avons montré dans cette étude la faisabilité d'une exploitation thermique de l'aquifère. Techniquement, elle s'opère par l'intermédiaire de pompes à chaleur qui sont des machines aujourd'hui couramment utilisées. Quelques calculs simples mais significatifs ont démontré l'in-

térêt économique d'une telle exploitation. La gestion de cette ressource doit être envisagée au travers d'une gestion globale du système intégrant les aspects hydrauliques et thermiques.

- L'aquifère du delta de la Dranse est par nature très sensible aux infiltrations provenant de la surface. Il est par ailleurs le lieu de multiples activités socio-économiques qui sont autant de sources potentielles de pollution. La conjonction de ces deux facteurs engendre des risques très importants de dégradation de la ressource hydraulique du delta de la Dranse. Il nous semble donc très important de souligner que la pérennité de la ressource hydraulique de cet aquifère procède de la manière dont il est et sera exploité, mais également, pour une large part, de l'attention qui sera portée à toutes les sources potentielles de pollution de la ressource.

Parallèlement, les recherches concernant un outil d'aide à la gestion locale d'aquifère ont été orientées vers la miniaturisation des modèles numériques de transfert de pression à discrétisation spatiale. De ce type de modèle, nous n'avons en fait conservé que le principe du maillage découpant géographiquement la zone d'étude. Le calcul des résultats, s'exprimant en terme de rabattement, fait appel au concept de fonction d'influence. L'utilisation de ce concept est justifié par la linéarité de l'équation de la diffusivité, expression mathématique qui décrit les écoulements de fluide en milieu poreux. Le rabattement en un point du maillage s'écrit alors comme la somme des rabattements induit par chaque prélèvement.

Le rabattement pour un débit unitaire, ou influence, d'un point sur un autre est calculé préalablement à l'aide d'un modèle numérique en différence finie, en tout lieu du maillage où cela aura été jugé nécessaire. Dans la forme, nous nous sommes attachés à concevoir un programme informatique écrit en langage Basic, adapté aux micro-ordinateurs et fonctionnant en mode conversationnel. Le langage de commande forme l'interface entre l'outil et l'utilisateur. Il a été étudié afin d'être aussi proche que possible des notions classiquement manipulées par les gestionnaires des ressources en eau. Au-delà la conception d'un logiciel particulier, nous avons voulu montrer l'intérêt et la faisabilité d'un tel outil de simulation, peu onéreux et source d'éléments de décision.

Au terme de cette étude, plusieurs points nous semblent devoir être approfondis. Dans un premier temps, rappelons que la modélisation de l'aquifère du delta de la Dranse a nécessité un certain nombre d'approximations notamment en ce qui concerne l'évaluation des débits entrant dans le système. Il résulte de ces approximations une imprécision quant aux résultats prédictifs de la modélisation. Ainsi, il nous paraît intéressant et utile d'étudier et de caler un modèle d'infiltration sur les valeurs que nous avons estimées concernant la période courant de Juin 1981 à Juin 1982. De même, une modélisation effective des phénomènes de variation de la perméabilité, en fonction du degré de saturation de la zone comprise entre le drain et la surface de l'aquifère, contribuera à accentuer le caractère prédictif du modèle.

Par ailleurs, dans un deuxième temps, il nous semble important de poursuivre en collaboration étroite avec les futurs utilisateurs, le développement de modèles de simulation de petite taille, pour l'aide à la gestion locale des ressources en eaux souterraines.

Suivant une dénomination aujourd'hui couramment utilisée, il s'agit finalement de concevoir un "système expert" en hydrogéologie utilisable directement par les gestionnaires des ressources en eaux souterraines.

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES CITES ET UTILISES

- Abramowitz M., Stegun I.A., 1965 : Handbook of Mathematical function. Dover Publication. Inc. New York, 1046 p.
- Blavoux B., Dray, M., 1971 : Les sondages dans le complexe quaternaire du Bas-Chablais et leurs enseignements stratigraphiques. Leur intérêt pour l'hydrogéologie et l'hydrochimie régionales. Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., vol. XIII, fasc. I, 17-34, Paris.
- Blavoux B., 1966 : Les sources minérales d'Evian. Thèse de 3e cycle, hydrogéologie, Université des Sciences de Paris.
- Blavoux B., 1978 : Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse doc. d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 333 p.
- Bodelle J., Margat J., 1980 : L'eau souterraine en France, Masson, 208 p.
- Carslaw H.S., Jaeger J.C., 1959 : Conduction of heat in solids. Oxford at the Ealrendon Press, 2e édition.
- C.P.G.F., 1969 : La région d'Evian, Compagnie de Prospection Géophysique Française.
- Delhomme J.P., 1976 : Application de la théorie de variables généralisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 130 p.
- Delhomme J.P., Delfiner P., 1973 : Application du krigeage à l'optimisation d'une campagne pluviométrique en zone aride. Colloque UNESCO-OMM-AIHS, Madrid, Acte du Colloque, Tome 1, pp. 191-210.

- Dutriaux M.C., 1980 : Essais sur l'origine des Nitrates dans les eaux souterraines, Thèse de 3e cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Dorioz J.M., 1976 : Etude pédologique de la région de Thonon-les-Bains. Rapport de DEA, Université de Grenoble.
- Dray M., 1970 : Etude hydrogéologique du quaternaire de la région de Thonon. Thèse de 3e cycle, Université de Paris VI.
- Dray M., 1971 : Le sondage de Chessy, contribution nouvelle à la géologie du quaternaire du Bas-Chablais. Arch. Sci. Genève, vol. 24, fasc. 1, 57-112.
- Herbert R., 1978 : Programs for the TI59 suitable for hydrogeologists : overseas. Report NoWD/OS/78/40 Hydrogeologie Unit, Maclean Building, Crowmarsh Gifford, Wallingford, Oxfordshire OX108BB.
- Houpeurt A., Debourier J., Ifly R., 1965 : Fonctionnement d'un doublet hydraulique de refroidissement, Mémoires et travaux de la SHF, n° 1.
- Hubert P., Levassor A., 1977 : Planification à long terme de l'exploitation d'une nappe d'eau souterraine. Association internationale des Hydrogéologues, Mémoire, Vol. XIII-1, A13-A23, Birmingham Congress.
- Hubert P., Levassor A., 1982 : Soutient des étiages par stockage intersaisonnier en milieu aquifère, CIG, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, LHM/RD/82/28.
- Hubert P., Severac de E., 1979 : Quantité et qualité, Eau du Québec, volume 12, n° 2, Montréal.
- Hubert P., 1979 : GRG notice d'utilisation, adaptation. CIG, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, LHM/RD/79/5.
- Hubert P., 1980 : Eaupuscule, CIG, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, LHM/RD/80/20.

- Iris P., 1980 : Contribution à l'étude de la valorisation énergétique des aquifères peu profonds, Thèse de docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Jeremie J.J., 1976 : Contribution à l'étude des paramètres hydrologiques de la région lemanique. Thèse 3e cycle, 247 p.
- Kruseman G.P., Ridder(de) N.A., 1973 : Analysis and evaluation of pumping test data, ILRI, Bull. 11, Wageningen.
- Ledoux E., Tillie B., 1981 : Programme NEWSAM, principe et notice d'emploi, CIG, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, LHM/RD/81/40.
- Ledoux E., 1980 : Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique, thèse de docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
- Léon J., 1981 : Aquifère du delta de la Dranse : contribution à l'étude de cette nappe et modélisation, mémoire DEA, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, CRG Thonon-les-Bains, Publication n° 227.
- Léon J., 1982 : Puits de l'Abbaye, Interprétation des essais de pompage, Rapport interne CRG Thonon-les-Bains, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Léon J., 1982 : Première modélisation des transferts de pression dans le delta de la Dranse, communication, 9^e Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Société Géologique Nationale, Paris.
- Levassor A., Talbot A., 1976 : Sur le débit spécifique, l'interprétation des essais de puits et les pertes de charges dans les forages, LHM/RD/76/8.
- Levassor A., 1978 : Simulation et gestion des systèmes aquifères, Thèse de doctorat de 3e cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

Margat J., 1979 : La cartographie des ressources en eau souterraine. BRGM 79 SMG 783 HYD, Orléans.

Marsily G. de, 1981 : Hydrogéologie Quantitative, Masson, 215 p.

Neuman S.P., 1974 : Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. Water Resources Research, vol. 10(2), p. 303-312.

Papadopoulos I.S., Cooper H.H., 1967 : Drawdown in a well of large diameter Water Resources Research, Vol. 3, p. 241-244.

Person J.P., 1981 : Caractérisation des propriétés thermo-hydrauliques d'un sol non saturé, Thèse de Docteur Ingénieur, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Poncet C., 1977 : Le delta de la Dranse. Thèse de 3e cycle, Université de Paris VI.

Poncet C., Chassaing B., 1977 : Exemple de contamination d'une nappe par du chrome hexavalent et décontamination, Coll. Nat. BRGM

Primault B., 1963 : Du calcul de l'évapotranspiration Arch. für Meteo, Geophys. und Bioklimologie, 12,1, pp. 124-150.

Siwertz E., 1973 : Etude expérimentale par le tritium et l'oxygène 18 de l'infiltration sur les lysimètres et le bassin de Thonon. Thèse 3e cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

Siwertz E., 1974 : Rapport géologique sur le forage de Sainte-Agathe, Société Anonyme des Eaux Minérale d'Evian, Evian-les-Bains, Haute Savoie.

Stephens D.B., Neuman S.P., 1982 : Free surface and saturated-unsaturated analyses of borehole infiltration tests above the water table, Adv. Water Resources, vol. 5, June, P. 11-116.

Trepeau L., 1981 : L'aquifère captif d'Evian. Etats des connaissances en 1981. Mémoire DEA, Université de Paris VI, CRG, Thonon-les-Bains.

Ulrick James S., 1982 : Groundwater and surface water hydrology programs for the HP41C. David Heilh Todd, Berkeley.

Verdin D.K., Morel Seytoux H.J., 1981 : User's manual for Aquisim. Fortran IV programs for discret kermels generation and for simulation. Colorado State, University, Fort Collins, Colorado.

Vial R., 1976 : Etude géologique et hydrogéologique de la région de Thonon-Douvaine, Thèse de 3eme cycle, Université de Grenoble.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GEOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 B.P. 53
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 00 58
 Mail: plalour@ujf-grenoble.fr

ANNEXES

- 1- Mesures de potentiel sur le terrain et analyses chimiques
- 2- Le programme Newsam : principes et application au delta de la Dranse
- 3- Pompages d'essais : mesure de terrains
- 4- Pompes à chaleur : principes généraux de fonctionnement

ANNEXE 1

- Relevés piézométriques du 22 Juin 1982 au 22 Juin 1982
- Analyses chimiques de prélèvements effectués entre le 26 Janvier 1982 et le 22 Mars 1983

Localisation	Cote N.G.F du repère	Niveau de l'eau / repère										
		Date → Nb. Jours →	2e Juin 81 0	17 Août 56	9 Octobre 109	20 Octobre 120	2 Novembre 133	23 Novembre 153	2 Décembre 163	15 Décembre 176	4 Janvier 83 196	19 Janvier 211
Concise	399,85		25,98	26,01	26,71	26,01	25,89	25,91	25,97	26,02	25,84	25,73
Ripaille piézo	388,53		15,64	15,71	15,98	15,69	15,57	15,70	15,76	15,78	15,60	15,55
S.T.E.P.	379,22		4,87	4,90	5,11	4,44	4,42	4,82	4,73	4,48	4,57	4,67
Amphion limni.	383,79		8,88	9,04	9,26	8,54	8,43	8,86	8,92	8,67	8,55	8,55
Gor (Vieux-Mottay)	379,72		6,64	6,72		6,40	6,33	6,67	6,62	6,50	6,34	6,34
Mottay (Evian)	375,78			3,44	3,38	3,23		3,47	3,43	3,30	3,29	3,29
Les Sblevnes	381,53		8,33	8,42	8,47	8,13	8,07	8,24	8,35	8,25	7,97	7,97
Pré de Vigny	379,23		6,82	6,67	6,78	6,43	6,45	6,63	6,63	6,55	6,41	6,41
Lac (CRG)	372,00		0,18	0,18	0,24	0,37	0,30	0,21	0,21	0,24	0,21	0,15
Dranse Pont Bailey	384,94		0	-0,02 *	0,19 *	0,56 *	0,34 *	40,06 *	-0,02 *	0,18 *	0,19 *	0,31 *

* Estimation

Prélèvements effectués le :

4 Mai 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES
CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	ρ ₂₅ g/cm ³	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en : mg/l								Σ ⁺	ANIONS en : mg/l								Σ ⁻		
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ mg/l	Sr	Mn	Al		Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	PO ₄ ⁻ mg/l	Ptotal ug/l			
Drainx Vongy 26/4/82	8,15	358						3,14	64,8	8,34	1,82	0,84	0,070	0,60					4,039	1,64	46,3	185,0		0,30	0,0031	0,016	0,021	4,065
Drainx Bioge 3/5/82	8,20	330						2,82	55,8	8,03	1,66	0,78	0,029	0,45					3,549	1,48	29,7	178,1		0,23	0,0014	0,007	0,009	3,596
Piezo Epinanche 4/5/82	7,8	555						6,30	86,6	22,6	3,93	1,31	0,017	1,21					6,413	6,53	48,1	307,0		2,27	0,0050	0,001	0,000	6,379
" Vongy "	7,8	546						5,70	96,0	16,6	4,10	3,36	0,012	0,95					6,442	5,37	70,4	288,4		1,97	0,0038	0,001	0,001	6,484
" Baud "	7,8	938						8,90	121,8	42,4	4,71	4,50	1,125	2,7					11,870	58,2	3,2	493,9		0,04	0,0002	0,001	0,007	3,806
" St Agathe "	7,7	529						6,85	93,4	13,0	5,71	1,39	0,011	0,90					6,035	3,08	66,0	274,3		0,04	0,0012	0,002	0,002	5,959
" Conise "	7,75	629						9,30	92,0	27,6	7,41	1,39	0,015	0,78					7,237	12,2	32,9	349,9		3,76	0,0022	0,052	0,064	7,037
Drainx Vongy 3/5/82	8,15	365						3,05	61,6	8,41	1,66	0,74	0,022	0,60					3,872	1,55	43,2	178,6		0,21	0,0021	0,020	0,022	3,887
									CATIONS en :								Σ ⁺	ANIONS en :								Σ ⁻		
Ripaille Ville 4/5/82	7,6	591						7,20	87,8	26,5	4,66	1,65	0,014	1,37					6,838	8,62	45,0	329,4		3,34	0,0000	0,005	0,007	6,817
Ripaille Piezo "	7,7	541						6,40	85,5	24,8	6,94	1,29	0,010	1,27					6,671	6,50	55,5	316,7		1,52	0,0000	0,005	0,006	6,637
Thomson "	7,8	521						5,45	89,5	14,2	3,85	1,37	0,026	1,08					5,863	5,18	63,5	264,5		0,98	0,0007	0,006	0,007	5,873
Evian Nottay "	8,15	455						4,45	60,3	14,9	6,11	1,3,8	0,018	0,44					4,864	7,12	44,4	216,7		1,50	0,0008	0,022	0,036	4,785
SAEME "	7,9	498						5,75	77,8	13,9	13,6	2,01	0,013	0,57					5,672	10,6	45,2	263,5		1,97	0,0004	0,025	—	5,701
STEP "	7,95	475						4,20	80,8	15,0	4,84	1,15	0,014	0,91					5,527	4,01	78,2	206,9		0,72	0,0009	0,003	0,003	5,182
Sbleunes "	7,8	722						8,30	133,5	19,4	7,81	1,80	0,008	0,33					8,651	13,0	35,6	429,9		3,55	0,0024	0,002	0,003	8,407
Vieux Nottay Gur "	7,9	550						6,30	92,0	16,8	5,87	1,37	0,014	0,66					6,279	6,82	48,1	299,6		1,96	0,0002	0,004	0,004	6,244

Observations : • Accident dans Autoclave pour Ptotal -

Prélèvements effectués le :

29 Mars 1982

20 Avril 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES
CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	ρ ₂₅ g/cm ³	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en : mg/l								Σ ⁺	ANIONS en : mg/l								Ptotal mg/l	Σ ⁻	
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ mg/l	Sr	Mn	Al		Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	PO ₄ ⁻ mg/l				
Ripaille Ville 29.3.82	7,7	591						7,35	90,7	26,7	4,91	1,78	0,010	1,37					7,013	9,31	42,2	327,0		4,08	0,0000	0,006	0,008	6,792
" Piezo "	7,65	580						6,70	88,1	25,9	7,44	1,41	0,010	1,32					6,967	7,71	48,3	322,1		1,62	0,0000	0,012	0,012	6,618
Thomson "	7,75	523						5,60	90,7	14,9	3,85	1,40	0,021	1,13					5,982	5,21	61,4	264,5		0,89	0,0012	0,006	0,008	5,823
Nottay Evian "	8,15	457						4,50	61,8	15,0	5,92	1,1,9	0,009	0,44					4,890	7,75	46,6	220,1		1,36	0,0004	0,008	0,009	4,893
SAEME Amphion "	7,9	306						2,25	47,3	6,78	3,82	1,49	0,011	0,48					3,134	5,01	49,0	111,8		0,45	0,0003	0,060	0,064	3,031
STEP "	8,05	402						4,65	68,3	9,41	6,02	1,29	0,006	0,77					4,495	2,85	52,2	192,8		0,53	0,0000	0,006	0,009	4,365
Sbleunes "	7,7	717						8,45	136,6	19,2	8,01	1,51	0,005	0,33					8,790	13,4	33,3	425,5		4,16	0,0003	0,036	0,038	8,345
Vieux Nottay Gur "	7,85	546						6,55	92,4	17,1	5,87	1,30	0,005	0,68					6,321	7,58	45,4	297,7		2,00	0,0007	0,008	0,010	6,181
Drainx Bioge 1.2.82	8,05	399						4,06	70,3	9,69	3,48	1,13	0,076	0,69					4,506	3,79	44,9	207,4		0,48	0,0101	0,035	0,042	4,478
" " 15.2.82	8,0	394						3,54	66,8	9,37	2,87	1,02	0,156	0,60					4,280	2,93	35,1	202,5		0,46	0,0061	0,045	0,051	4,169
" " 15.3.82	8,3	469						3,05	79,3	11,5	5,91	1,34	0,060	0,96					5,220	9,16	61,7	219,1		0,41	0,0043	0,038	0,050	5,166
Drainx Vongy 16.3.82	8,1	517						2,40	91,9	11,5	4,28	1,70	0,062	1,11					5,791	5,34	87,1	227,4		0,49	0,0056	0,098	0,138	5,734
" " 22.3.82	8,35	498						3,60	91,7	11,4	4,38	1,66	0,099	1,00					5,776	5,81	75,1	232,3		0,59	0,0059	0,064	0,071	5,582
" " 29.3.82	8,3	431						2,84	80,3	9,58	3,27	1,37	0,060	0,80					4,995	3,78	56,2	209,4		0,47	0,0048	0,038	0,046	4,744
									CATIONS en :								Σ ⁺	ANIONS en :								Σ ⁻		
Ripaille Ville 20/4/82	7,8	589						6,60	93,0	26,3	4,84	1,82	0,010	1,37					7,093	9,20	43,1	329,9		4,28	0,0005	0,004	0,004	6,869
" Piezo "	7,65	545						6,15	88,2	25,3	7,21	1,37	0,005	1,27					6,860	6,91	55,1	317,2		1,64	0,0000	0,004	0,004	6,657
Thomson "	7,70	508						5,20	92,7	14,8	3,91	1,40	0,018	1,11					6,075	6,19	63,8	264,0		1,06	0,0005	0,004	0,004	5,905
Nottay Evian "	8,1	455						4,15	62,7	15,2	6,04	1,1,6	0,008	0,46					4,949	7,51	47,2	218,6		1,68	0,0006	0,013	0,014	4,898
SAEME Amphion "	8,0	325						2,20	50,7	7,40	4,62	1,50	0,024	0,48					3,390	5,45	47,0	126,4		0,48	0,0008	0,037	0,038	3,241
STEP "	7,9	473						3,95	83,1	11,3	5,16	1,19	0,010	0,90					5,352	4,33	80,7	205,4		0,81	0,0004	0,009	0,009	5,226
Sbleunes "	7,7	722						7,85	134,6	19,3	8,29	1,65	0,033	0,35					8,717	13,6	33,6	429,9		4,62	0,0008	0,011	0,013	8,459
Vieux Nottay Gur "	7,8	673						6,00	92,7	17,2	5,99	1,28	0,011	0,69					6,352	7,25	46,8	300,1		2,26	0,0002	0,006	0,005	6,258
Dr Vongy 5/4/82	7,8	381						2,86	70,4	8,03	2,29	1,23	0,012	0,58					4,318	2,68	38,2	202,5		0,60	0,0049	0,062	0,063	4,238
" " 13/4/82	8,05	368						3,12	66,5	8,03	1,81	1,00	0,097	0,55					4,103	2,07	36,0	192,3		0,39	0,0048	0,022	0,023	3,989
" " 19/4/82	8,15	361						2,92	65,1	7,98	1,62	0,84	0,033	0,56					4,012	1,69	36,7	184,5		0,32	0,0023	0,029	0,033	3,861

Observations :

Prélèvements effectués le :

29 Juin 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	p _{H2O} 10 ⁻¹ cm	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en : <i>mg/l</i>								Σ ⁺	ANIONS en : <i>mg/l</i>							Σ ⁻
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	SP ⁺⁺	Mn	Al		Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ⁻	
Ripaille Ville 23.6.82	7,2	600			7,2	31,23	25,35	4,7	1,96	0,003	1,31				6,927	3,300	39,44	330,4			3,38	0,0010	0,001	0,003	6,741
Ripaille Piezo 23.6.82	7,15	588			6,7	90,49	21,83	6,99	1,56	0,005	1,30				6,936	8,710	47,51	329,4			1,05	0,0009	0,002	0,004	6,703
Thomson 23.6.82	7,2	541			6,61	95,14	11,56	4,91	1,63	0,022	1,06				6,227	9,32	56,8	275,2			0,95	0,002	0,001	0,003	6,023
Thomson 23.6.82	7,35	598			6,25	73,68	18,43	5,7	8,28	0,022	0,56				5,968	7,77	41,84	281,6			0,76	0,0026	0,001	0,004	5,759
SAEME 23.6.82	7,45	584			7,05	31,02	16,21	14,64	2,26	0,006	0,58				6,587	13,66	41,91	312,8			2,28	0,0010	0,012	0,016	6,529
STEP 23.6.82	7,60	363			4,1	61,91	8,20	3,34	1,19	0,008	0,61				3,955	2,09	31,28	121,3			0,47	0,0001	0,001	0,003	3,777
Sableuses 23.6.82	7,05	724			8,35	137,12	18,94	7,47	1,68	0,006	0,31				8,777	12,56	33,38	483,3			3,48	0,0014	0,001	0,004	8,415
Vieuvallée 23.6.82	7,25	562			7,3	96,84	16,74	5,96	1,66	0,010	0,68				6,521	7,07	47,54	306,0			2,08	0,0010	0,001	0,003	6,352
Dr. Vongy (21) 23.6.82	7,22	921			9,65	118,53	41,5	42,4	5,63	2,63	2,60				11,576	43,3	1,21	52,2			0,01	0,0003	0,001	0,011	9,478
Piez Les Roches 23.6.82	7,02	725			8,35	132,88	18,18	8,95	2,21	0,011	0,33				8,588	13,33	20,18	438,7			2,64	0,0003	0,001	0,005	8,336
P. Bailleuse 23.6.82	8,18	343			5,2	61,52	7,40	1,77	1,13	0,016	0,47				3,736	1,82	29,42	189,3			0,28	0,0030	0,002	0,003	3,786
Vancy 21.6.82																									
Dr. Bailleuse 23.6.82	7,62	362			3,0	68,97	4,86	0,76	0,50	0,005	0,48				3,898	0,71	42,82	174,2			0,22	0,0001	0,003	0,014	3,7824

Observations :

Prélèvements effectués le :

16 Juin 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	p _{H2O} 10 ⁻¹ cm	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en : <i>mg/l</i>								Σ ⁺	ANIONS en : <i>mg/l</i>							Σ ⁻
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	SP ⁺⁺	Mn	Al		Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ⁻	
Ripaille Ville 16.06.82	7,7	569			6,75	89,7	25,3	4,52	1,72	0,012	1,32				6,831	9,32	45,4	328,9			4,00	0,0006	0,004	0,007	6,884
Ripaille Limni 15.06.82	7,65	530			6,35	89,7	24,8	7,17	1,34	0,009	1,28				6,892	8,29	49,1	326,0			1,52	0,0005	0,002	0,003	6,707
Thomson "	7,8	472			4,90	83,2	12,7	3,63	1,34	0,013	0,99				5,412	4,63	54,4	236,7			0,78	0,0005	0,001	0,003	5,197
Puits Mottay "	7,85	455			4,10	59,9	14,7	5,94	1,63	0,019	0,42				4,888	7,78	43,7	211,3			1,62	0,0014	0,001	0,003	4,707
SAEME Amphion 16.6.82	7,65	523			6,70	92,2	16,6	16,7	2,24	0,017	0,58				6,764	13,25	46,6	319,6			2,39	0,0018	0,015	0,017	6,753
STEP 15.30.15.682	8,0	408			3,90	69,9	9,12	3,52	1,06	0,008	0,73				4,435	2,70	50,1	198,1			0,69	0,0005	0,005	0,006	4,415
Sableuses 16.6.82	7,95	710			7,95	133,8	19,0	8,11	1,79	0,015	0,33				8,651	13,1	36,5	428,0			3,42	0,0056	0,013	0,018	8,392
" Gur " 15.6.82	7,9	552			6,20	93,0	16,6	5,94	1,38	0,022	0,65				6,316	6,65	44,5	297,7			2,11	0,0011	0,004	0,008	6,144
Baud Piezo "	7,7	917			8,80	118,0	43,2	42,1	5,84	2,370	2,50				11,648	49,0	1,94	501,2			0,03	0,0007	0,003	0,013	9,639
Dr. Vongy P. Bailleuse 7.6.82	7,9	306			2,56	50,4	6,80	1,15	0,74	0,081	0,41				3,158	1,01	32,8	146,4			0,29	0,0034	0,012	0,016	3,132
" " " 15.6.82	7,85	327			2,98	56,3	6,38	1,24	0,69	0,040	0,40				3,418	1,13	26,9	171,8			0,33	0,0029	0,026	0,029	3,433

Observations :

Pélèvements effectués le :

24 Aout 1982
14 Septembre 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES
CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	R ₂₅ μS/cm	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en : ms/l										Σ ⁺	ANIONS en : ms/l							Σ ⁻
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ mg/l	Sr	Mn	Al	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	PO ₄ ⁻ μg/l	P _{Total} μg/l		
																										NO ₃ ⁻ mg/l	
Ripaille Ville 24.8.82	7,35	588			6,90	87,9	25,7	7,36	1,86	0,012	1,38				6,900	9,35	47,8	322,1		3,92	0,0000	0,001	0,001	6,817			
" Piezo "	7,35	578			6,15	88,2	24,6	7,16	1,38	0,000	1,30				6,801	8,10	61,5	319,6		1,37	0,0000	0,001	0,002	6,844			
Thomson "	7,50	500			5,00	84,8	13,9	4,85	1,57	0,003	1,02				5,649	7,76	76,4	240,6		1,11	0,0000	0,000	0,002	5,831			
Mottay Evian "	7,70	465			4,25	62,3	15,3	6,01	1,46	0,003	0,47				5,013	7,81	52,8	220,6		1,63	0,0008	0,001	0,006	5,051			
SAEME	7,65	515			5,50	80,1	14,3	12,4	1,93	0,000	0,56				5,774	11,5	54,6	263,0		2,10	0,0006	0,001	0,015	5,922			
STEP	7,70	354			4,00	54,2	7,61	2,59	1,16	0,004	0,63				3,487	1,67	38,8	175,2		0,56	0,0003	0,001	0,004	3,766			
Sbleunes	7,15	732			7,60	128,4	19,1	7,80	1,23	0,006	0,34				8,357	13,6	39,2	428,5		3,82	0,0115	0,011	0,015	8,497			
Vieux Mottay Gur	7,30	557			6,30	90,3	17,4	6,08	1,29	0,002	0,69				6,250	7,33	56,6	307,0		1,89	0,0032	0,001	0,004	6,551			
Baud Z.I.	7,35	846			3,00	100,0	35,9	38,0	5,61	3,28	2,0				10,018	41,8	1,90	446,5		0,03	0,0030	0,000	0,010	8,539 7,9%			
Dransac Jony P. Belley 16.8.82	8,5	455			3,62	75,6	11,3	2,75	1,38	0,097	0,95				4,885	2,27	96,4	197,2		0,46	0,0206	0,050	0,063	5,340			
" " " 24.8.82	8,3	439			3,80	75,9	10,1	2,28	1,12	0,043	0,89				4,769	1,96	86,2	198,1		0,46	0,0089	0,024	0,032	5,131			
" " " 30/8/82	8,1	397			3,20	73,3	10,1	2,11	0,92	0,008	0,79				4,620	1,73	63,5	200,6		0,34	0,0032	0,021	0,032	4,684			
" " " 6/9/82	7,9	494			4,12	86,2	12,2	2,75	1,14	0,157	1,13				4,816	2,48	109,9	211,8		0,44	0,0080	0,175	0,194				
" " " 13/9/82	8,25	435			3,94	75,6	10,9	2,28	1,12	0,002	0,85					1,91	69,9	203,0		0,39	0,0057	0,026	0,032	4,866			
									CATIONS en :										Σ ⁺	ANIONS en :							Σ ⁻
Ripaille Ville 14.9.82	7,75	607			7,25	89,7	26,0	5,09	1,76	0,005	1,31				6,912	9,29	47,6	331,4		4,34	0,0000	0,003	0,003	6,994			
" Piezo "	7,65	534			6,50	86,5	24,3	7,20	1,29	0,002	1,31				6,691	7,28	59,0	316,2		1,43	0,0000	0,003	0,004	6,717			
Thomson "	7,80	500			5,25	87,9	14,4	4,41	1,38	0,002	1,02				5,821	9,52	70,8	249,4		1,20	0,0000	0,002	0,003	5,915			
Mottay Evian 13.9.82	8,10	509			5,60	73,3	17,5	6,32	1,04	0,000	0,53				5,650	7,82	53,3	261,1		1,33	0,0003	0,004	0,008	5,704			
SAEME 14.9.82	8,00	544			6,25	82,9	15,2	13,9	2,03	0,001	0,57				6,056	12,0	45,5	286,5		2,48	0,0003	0,011	0,012	6,159			
STEP "	8,00	352			4,20	57,7	8,09	2,72	1,09	0,002	0,65				3,706	1,64	37,8	176,7		0,62	0,0002	0,005	0,007	3,773			
Sbleunes "	7,70	723			8,15	130,4	18,8	8,16	1,86	0,012	0,34				8,464	13,6	40,2	425,5		3,82	0,0430	0,011	0,014	8,471			
Vieux Mottay Gur 13.9.82	7,85	549			6,45	94,1	17,4	6,14	1,32	0,000	0,70				6,443	7,15	54,6	306,5		2,11	0,0004	0,012	0,033	6,513			
Baud Z.I. 14.9.82	7,80	813			3,50	99,3	36,8	38,3	5,41	0,560	2,10					40,4	2,51	453,8		0,04	0,0013	0,004	0,016				

Observations :

Prélèvements effectués le :

10 Aout 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES
CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	R ₂₅ μS/cm	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en : ms/l										Σ ⁺	ANIONS en : ms/l							Σ ⁻
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ mg/l	Sr	Mn	Al	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	PO ₄ ⁻ μg/l	P _{Total} μg/l		
																										NO ₃ ⁻ mg/l	
Ripaille Ville 10.8.82	7,9	571			7,05	89,3	25,8	4,65	1,68	0,005	1,34				6,854	9,17	40,5	329,4		3,80	0,0000	0,000	0,004	6,771			
" Piezo "	7,95	583			6,40	88,5	24,9	6,99	1,31	0,010	1,27				6,831	8,06	49,7	325,0		1,35	0,0003	0,004	0,006	6,885			
Thomson "	8,05	499			5,10	84,7	13,8	4,35	1,42	0,009	0,99				5,610	7,61	61,6	242,0		0,99	0,0006	0,002	0,005	5,533			
Mottay Evian 9.8.82	8,0	553			6,45	85,7	20,2	5,89	1,59	0,009	0,59				6,351	7,76	48,2	303,0		1,29	0,0006	0,003	0,007	6,280			
S.A.E.M.E. 10.8.82	8,0	517			6,10	84,4	14,8	13,7	1,98	0,007	0,56				6,088	11,9	42,0	279,1		2,10	0,0010	0,014	0,020	5,935			
STEP "	8,10	349			4,10	68,1	7,66	2,76	1,04	0,010	0,63				3,691	1,73	31,8	177,1		0,54	0,0004	0,003	0,007	3,652			
Sbleunes "	7,8	726			8,05	134,3	18,9	8,07	1,59	0,041	0,34				8,658	13,5	34,6	431,9		3,56	0,147	0,005	0,011	8,444			
Vieux Mottay Gur	8,0	557			6,25	93,9	17,1	6,14	1,28	0,008	0,67				6,408	6,83	46,4	304,5		1,80	0,0013	0,007	0,017	6,278			
Baud Piezo "	?	829			3,40	106,6	37,8	40,4	5,46	3,120	2,24				10,599	39,5	2,11	473,4		0,03	0,0012	0,002	0,017	8,919 8,4%			
Dr Jony P. Belley 28.8.82	8,2	429			3,64	74,4	5,46	2,42	1,04	0,090	0,87				4,320	3,94	43,3	195,2		0,37	0,0143	0,044	0,058	4,243			
" " " 9.8.82	8,4	435			3,78	77,9	5,54	2,56	1,08	0,052	0,87				4,505	2,16	38,5	200,6		0,44	0,0178	0,045	0,059	4,195			
									CATIONS en :										Σ ⁺	ANIONS en :							Σ ⁻

Observations :

Prélèvements effectués le :

16 Novembre 1982
29 Novembre 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	R ₂₅ 10 ⁻³ cm ²	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en :										Σ ⁺	ANIONS en :							Σ ⁻
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Br	Mn	Al	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ⁻	Total mg/l		
Ripaille Ville 16.11.82		7,6	620					6,75	85,8	25,7	4,73	1,78	1,38	0,008				6,828	9,49	38,1	334,8		4,64	0,000	0,005	0,008	6,849
" Piezo "		7,75	591					6,15	85,1	24,3	6,74	1,37	1,31	0,006				6,603	7,55	46,8	315,2		1,40	0,000	0,005	0,008	6,453
Thomson "		7,8	534					5,10	87,2	14,0	4,38	1,43	1,07	0,017				5,755	7,10	54,2	255,2		1,06	0,005	0,000	0,007	5,586
Mottay Evian "		8,0	507					5,10	65,9	16,7	6,07	9,75	0,51	0,009				5,411	7,96	42,6	250,8		1,59	0,005	0,005	0,007	5,335
SAEME		7,9	506					5,15	75,3	13,3	12,0	1,94	0,55	0,006				5,424	11,0	35,9	253,3		2,07	0,001	0,012	0,016	5,357
STEP		7,95	363					4,15	58,3	7,88	2,92	1,44	0,65	0,013				3,737	1,84	32,6	179,1		0,67	0,003	0,003	0,004	3,714
Sblevnes		7,2	740					7,85	130,3	18,8	7,78	1,52	0,35	0,055				8,437	13,7	31,8	433,8		3,64	0,0198	0,012	0,016	8,420
Vieux Mottay Gur		7,45	581					6,70	94,6	17,1	6,07	1,34	0,65	0,003				6,441	7,22	44,8	312,3		2,42	0,009	0,000	0,002	6,427
Baud Z.I.		7,45	838					9,20	97,3	36,9	36,5	5,44	2,20	2,58				9,851	45,9	3,72	451,9		0,03	0,000	0,000	0,008	8,781 5%
Dr. Vongy Limni 8.11.82		8,35	490					4,45	83,0	11,1	2,46	1,06	0,97	0,071				5,216	2,05	64,6	217,6		0,48	0,0148	0,034	0,038	5,007
" " 15.11.82		8,30	415					4,10	73,6	8,75	2,16	1,07	0,68	0,026				4,531	2,17	41,0	215,2		0,45	0,0047	0,022		4,476

Observations : * formation de mousse au cours de la mesure -

Prélèvements effectués le :

15 Octobre 1982
3 Novembre 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	R ₂₅ 10 ⁻³ cm ²	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en :										Σ ⁺	ANIONS en :							Σ ⁻
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Br	Mn	Al	Cl ⁻	SO ₄ ⁻		HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ⁻	Total mg/l		
Ripaille Ville 15.10.82		7,90	551					6,90	90,4	25,9	4,86	1,74	0,010	1,30				6,928	9,12	41,0	330,9		3,45	0,005	0,004	0,017	6,780
" Piezo 14.10.82		7,80	523					6,10	86,8	24,2	7,06	1,44	0,012	1,21				6,695	6,98	51,9	312,8		1,23	0,001	0,012	0,022	6,492
Thomson 15.10.82		7,85	503					5,25	95,0	14,3	4,34	1,38	0,021	1,08				6,167	8,26	60,6	264,0		0,85	0,000	0,002	0,009	5,881
Mottay Evian "		7,55	633					7,25	101,5	23,0	6,33	1,19	0,009	0,63				7,277	8,19	45,0	351,4		2,39	0,006	0,001	0,007	7,097
SAEME "		8,00	477					5,75	83,8	14,7	13,8	1,92	0,011	0,57				6,054	11,2	42,4	274,7		1,75	0,009	0,011	0,015	5,826
STEP 14.10.82		8,15	354					4,00	59,2	7,90	2,92	1,11	0,009	0,64				3,774	1,55	33,5	176,2		0,58	0,008	0,001	0,007	3,670
Sblevnes "		7,80	725					7,75	132,3	18,6	8,19	1,74	0,132	0,36				8,550	13,5	34,8	426,0		2,80	0,007	0,008	0,016	8,288
Gur "		7,90	578					6,45	96,8	17,1	6,64	1,36	0,031	0,71				6,579	7,11	46,2	310,4		1,98	0,010	0,005	0,010	6,391
Baud Z.I. "		7,80	769					9,0	98,5	36,9	39,1	6,32	2,350	2,20				10,033	44,7	4,84	439,2		0,04	0,0023	0,003	0,012	8,563 7,9%
Chablais Béton "		7,70	900					13,9	104,2	24,0	34,0	43,2	1,520	1,30				9,857	45,8	22,7	583,2		0,61	0,010	0,001	0,011	11,367 6,9%
Dr. Vongy Limni 11.10.82		8,20	419					3,72	73,7	9,10	1,93	1,13	0,059	0,66				4,558	1,58	45,0	211,8		0,39	0,0078	0,027	0,031	4,483
" " 18.10.82		8,15	366					3,50	66,5	7,19	1,61	1,08	0,018	0,45				4,019	1,44	27,4	202,5		0,40	0,0068	0,014	0,019	3,960
" " 25.10.82								3,76	71,5	7,98	1,82	1,18	0,067	0,55				4,351	1,82	34,3	280,7		0,40		0,043	0,053	4,404

Observations :

Prélèvements effectués le :

8 Février 1983
22 Mars 1983

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	R ₄₅ à 1 cm	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en : mg/l								Σ ⁺	ANIONS en : mg/l							Σ ⁻									
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ mg/l	Fe	Mn	Al		Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	PO ₄ ⁻ mg/l		P _T total mg/l								
Drans Vergy Limn. 7/2/83	8,0	442						4,15	78,9	3,59	3,84	1,32	0,115	0,77											4,952	5,20	56,6	215,2		0,59	0,007	0,052	0,063	4,899
" " 21/2/83	8,0	485						4,00	84,1	11,3	3,63	1,47	0,340	0,98											5,366	3,99	74,5	213,7		0,56	0,008	0,074	0,079	5,212
" " 28/2/83	8,0	441						3,85	76,3	3,04	4,06	1,49	0,163	0,72											4,794	5,85	51,1	207,9		0,60	0,007	0,047	0,052	4,683
" " 7/3/83	8,2	452						3,45	78,7	3,87	3,36	1,38	0,093	0,78											4,945	3,96	59,4	212,3		0,52	0,007	0,052	0,062	4,870
Ripaille Limn. 8/2/83	7,7	593						6,25	88,7	24,4	6,40	1,38	0,023	1,23											6,776	7,20	48,9	318,2		1,21	0,001	0,004	0,004	6,522
S.T.E.P 8/2/83	8,0	429						4,15	73,6	10,1	3,18	1,11	0,020	0,76											4,689	2,72	54,3	196,7		0,64	0,001	0,002	0,002	4,476
Ripaille Limn. 22/3/83	7,8	552						6,10	87,1	24,4	6,40	1,29	0,010	1,25											6,694	6,78	53,6	211,3		1,29	0,000	0,002	0,002	6,501
S.T.E.P 22/3/83	8,0	432						4,15	72,9	10,1	3,24	1,17	0,063	0,80											4,662	2,90	55,0	197,2		0,64	0,001	0,001	0,001	4,504
Drans Vergy Limn. 14/3/83	8,1	412						3,15	74,3	8,25	2,61	1,14	0,084	0,68											4,950	3,15	46,4	201,1		0,45	0,005	0,040	0,047	4,386
												CATIONS en :								Σ ⁺	ANIONS en :							Σ ⁻						

Observations :

Prélèvements effectués le :

13 Décembre 1982

UNIVERSITÉ DE PARIS
FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHES GÉODYNAMIQUES - THONON

Repérage Date et lieu de prélèvement	T °C	pH	R ₄₅ à 1 cm	Résidu sec		O ₂ mg/l	CO ₂ mg/l	SiO ₂ mg/l	CATIONS en : mg/l								Σ ⁺	ANIONS en : mg/l							Σ ⁻									
				à 110 °C	à 500 °C				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺ mg/l	Fe	Mn	Al		Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l	PO ₄ ⁻ mg/l		P _T total mg/l								
Ripaille Ville 13/12/82	7,30	605						7,05	30,1	25,7	4,90	1,82	0,013	1,36											6,901	10,0	44,6	336,2		3,18	0,001	0,003	0,001	6,947
Ripaille Piezo "	7,35	575						6,15	85,4	24,3	6,63	1,36	0,006	1,28											6,613	7,41	61,0	317,2		1,21	0,000	0,001	0,006	6,763
Thomson "	7,45	519						4,95	88,1	13,9	3,66	1,43	0,020	1,05											5,760	5,86	73,8	253,8		1,07	0,000	0,000	0,007	5,936
Mottay Evian "	7,30	635						7,40	100,0	23,7	6,42	1,32	0,005	0,62											7,267	9,41	50,0	363,4		2,19	0,001	0,001	0,006	7,418
SAEME "	7,75	544						6,00	82,4	14,8	13,1	1,95	0,004	0,56											5,962	11,86	43,1	286,0		2,12	0,001	0,014	0,013	6,071
STEP "	7,80	378						4,40	61,7	8,27	2,68	1,23	0,008	0,68											3,923	2,09	46,0	185,4		0,80	0,001	0,003	0,001	4,112
Sbleunes "	7,20	727						7,45	131,2	18,6	7,71	1,47	0,081	0,35											8,463	13,81	38,4	429,4		2,94	0,071	0,012	0,010	8,442
Vieux Mottay Gur "	7,40	596						7,20	98,2	17,4	6,92	1,57	0,009	0,71											6,689	8,40	60,0	314,8		2,68	0,002	0,003	0,001	6,836
Baud Z.I. "	7,45	829						9,20	97,3	36,6	35,0	5,74	4,050	2,10											9,871	43,7	1,10	449,0		0,00	0,024	0,001	0,003	8,616
Dr. Vergy Limn. 6/12/82	8,25	439						4,15	78,0	10,4	2,53	1,23	0,149	0,85											4,919	2,30	71,3	217,2		0,45	0,007	0,030	0,041	5,143
" " 13/12/82	8,10	494						5,50	86,2	9,95	5,14	4,06	0,712	0,52											5,510	7,22	40,3	270,4		1,46	0,044	0,130	0,212	5,594
												CATIONS en :								Σ ⁺	ANIONS en :							Σ ⁻						

Observations :

ANNEXE 2

PROGRAMME NEWSAM

- Généralités
- Application au delta de la Dranse

I. GENERALITES

Le modèle Newsam a été développé au Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris. C'est un modèle de simulation de transferts de pression et de masse en régime permanent ou transitoire. Les transferts horizontaux sont simulés suivant un schéma bidimensionnel, les écoulements verticaux (multicouche, drains) sont monodimensionnels.

L'équation classique de la diffusivité :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = S \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

avec T_x, T_y : transmissivité suivant un repère orthonormé OX, OY (m^2/s)
 h : potentiel hydraulique (m)
 q : débit par unité de surface [$(m^3/s)/m^2$]
 S : coefficient d'emmagasinement
 t : temps (s)

est discrétisée sur un réseau de mailles carrées, emboîtées et de tailles différentes

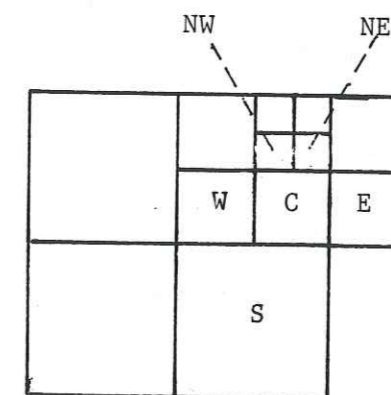


Figure : A2-1

Pour une maille C, l'équation (1) discrétisée s'écrira :

$$T_{NW}(H - N_{NW}) + T_{NE}(H - N_{NE}) + T_W(H - H_W) + T_E(H - H_E) + T_S(H - H_S) + Q = a^2 S \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

avec T_{NW} = moyenne harmonique des transmissivités entre la maille C et la maille NW soit :

$$\frac{2 T_{NW} T_C}{T_{NW} + T_C}$$

a^2 = aire de la maille C

Q = débit échangé entre la maille C et le milieu extérieur

Les conditions aux limites peuvent être les suivantes :

1- Potentiel imposé, le potentiel d'une maille, en bordure du maillage ou non, est affecté d'un potentiel invariant. Cette condition permet de simuler des lacs, rivières, etc.

2- Débit imposé, le débit échangé entre une maille et le milieu extérieur est fixé et invariant. On peut ainsi simuler des pompes, des injections, une infiltration.

3- Potentiel imposé avec débit limite. Cette condition, combinaison entre les deux précédentes, est utilisée pour simuler des drains. Le débit transitant du drain vers l'aquifère s'écrira :

$$Q_D = T_D(h_D - h)$$

où T_D = coefficient de transfert vertical ayant la dimension d'une transmissivité

h_D = potentiel de la maille fictive

Le paramètre T_D permet de décrire des rivières dont le lit est plus ou moins colmaté.

La condition de débit limite signifie que si

$$Q_D \geq Q_{DL} \rightarrow Q_D = Q_{DL}$$

Q_{DL} = débit limite

$$Q_D < Q_{DL} \rightarrow Q_D = T_D(h_D - h)$$

Remarquons que le modèle Newsam est également conçu pour simuler des nappes libres où la transmissivité varie suivant l'épaisseur mouillée.

Les transferts de masse sont simulés de manière analogue. L'équation de la dispersion régissant le transfert des corps dissous dans un milieu est simplifiée en négligeant le terme de dispersion :

$$\text{div}(VC) + S \frac{dC}{dt} = 0 \quad (3)$$

avec V = vitesse de Darcy

C = concentration du corps dissous

L'équation (2) décrit uniquement des phénomènes convectifs, les résultats des simulations de transfert de masse doivent donc n'être considérés que comme des ordres de grandeur.

Des conditions aux limites du type 1 et 2 peuvent également être utilisées.

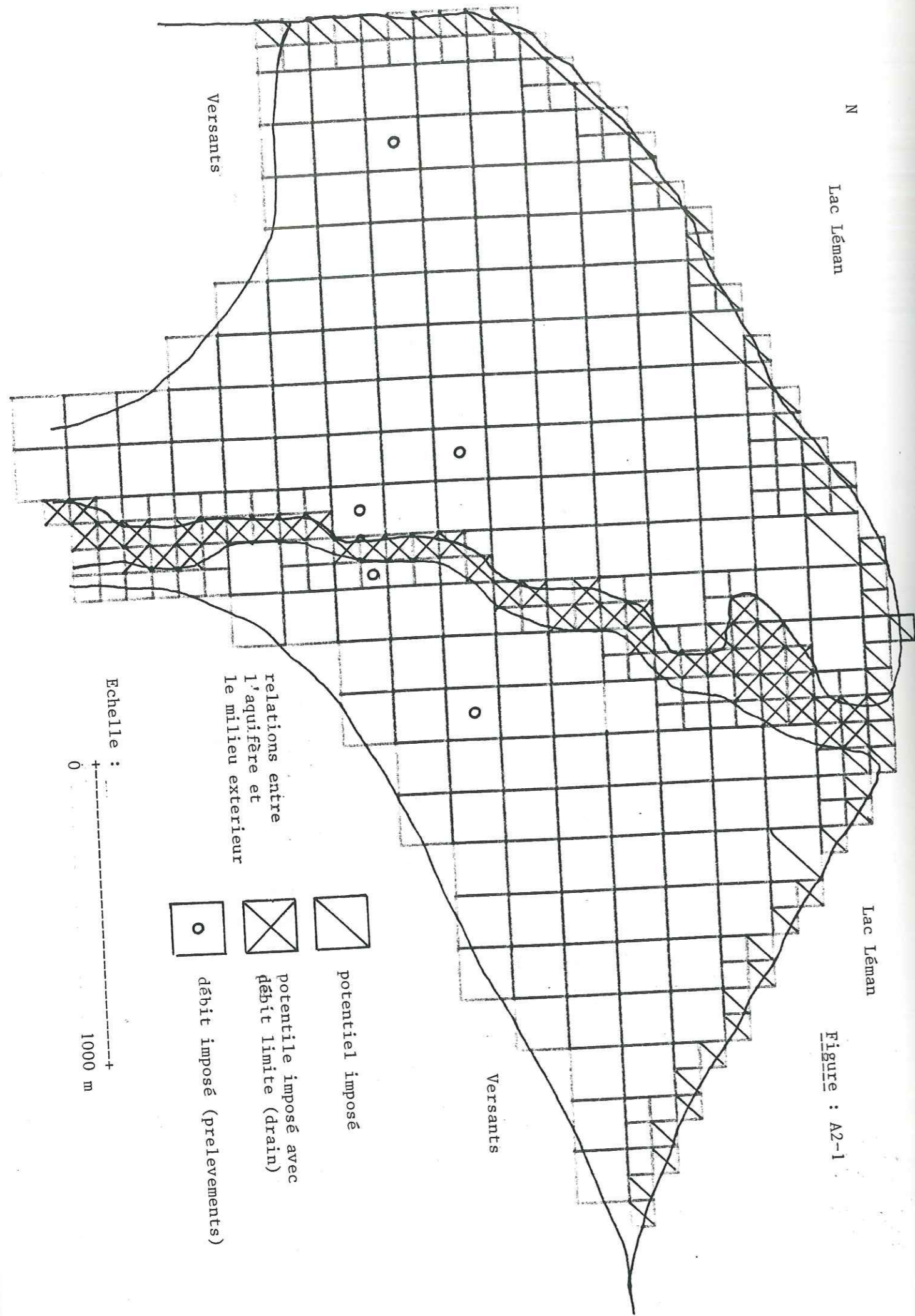
La résolution des équations (2) est effectuée numériquement par une méthode itérative du type Gauss Seidel avec sur-relaxation.

Le processus itératif est initialisé par un champ de potentiel aussi proche que possible de la solution. L'arrêt des itérations est provoqué lorsque la convergence est atteinte, c'est-à-dire lorsque l'écart entre deux champs de potentiel calculés après deux itérations successives a atteint une valeur donnée. Cette valeur correspond à une tolérance de convergence. Cette convergence ne sera atteinte que s'il existe au moins une maille dans le réseau dont le potentiel soit imposé.

En régime transitoire, la méthode de résolution est dite implicite et les termes transitoires $\frac{dH}{dt}$ et $\frac{dC}{dt}$ sont assimilés à des différences finies $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ et $\frac{\Delta C}{\Delta t}$.

Δt représente alors le pas de temps de calcul.

A chaque pas de temps, le système d'équation (2) est résolu par itérations.



II. APPLICATION AU DELTA DE LA DRANSE

L'aquifère du delta de la Dranse a été décrit à l'aide d'un maillage monocouche de 345 éléments. Deux tailles différentes ont été choisies afin de décrire plus finement le tracé des rives du lac Léman et le cours de la Dranse. Les petites mailles ont un côté de 100 mètres, le côté des grandes mailles est de 200 mètres (figure A2-2).

Les mailles composant les bordures Est-Nord et Ouest du delta ont été affectées d'un potentiel imposé. La Dranse a été simulée à l'aide d'un potentiel imposé avec un débit limite variable. Les prélèvements les plus importants ont été figurés par des débits imposés, pompés, égaux aux débits moyens annuels de chaque ouvrage. Les mailles formant les limites Sud du domaine (versants) sont à flux nul.

L'aquifère du delta de la Dranse a été simulé comme un aquifère captif. Cette approximation permettant un gain important de temps de calcul est justifiée par des variations de potentiel généralement très faibles par rapport à la profondeur mouillée de l'aquifère : l'épaisseur de l'aquifère étant de l'ordre de 80 mètres, et les variations piézométriques généralement inférieures à 2 m, la transmissivité ne varie que d'un facteur $2,5 \cdot 10^{-2}$.

ANNEXE 3

- Valeurs des rabattements des essais de pompage au puits de l'Abbaye et du Mottay
- Paramètres des essais de pompage

Puits de l'Abbaye

Descente des niveaux d'eau observée au puits et au piézomètre, pour un débit de 220 m³, puis 250 m³ après 10 minutes.

Temps de pompage en seconde	Rabattements en mètre		Temps de pompage en seconde	Rabattements en mètre	
	Puits	Piézomètre de l'Abbaye		Puits	Piézomètre de l'Abbaye
0	0	0	54 000	0,60	0,38
30	0,155	0,01	57 600	0,61	0,38
60	0,16	0,02	61 200	0,61	0,38
90	0,17	0,03	64 800	0,62	0,39
120	0,17	0,03	68 400	0,625	0,40
180	0,175	0,04	72 000	0,63	0,41
240	0,185	0,45	75 600	0,64	0,42
300	0,19	0,05	79 200	0,645	0,42
360	0,195	0,055	82 800	0,65	0,44
420	0,20	0,06	86 400	0,64	0,43
480	0,20	0,06	90 000	0,645	0,43
540	0,21	0,06	93 600	0,65	0,44
600	0,21	0,065	97 200	0,65	0,43
660	0,21	0,065	1,01 10 ⁵	0,66	0,45
720	0,215	0,07	1,04 10 ⁵	0,66	0,45
780	0,22	0,07	1,08 10 ⁵	0,665	0,455
840	0,225	0,075	1,12 10 ⁵	0,67	0,46
900	0,225	0,075	1,15 10 ⁵	0,67	0,455
960	0,245	0,09	1,19 10 ⁵	0,68	0,47
1 020	0,26	0,105	1,22 10 ⁵	0,68	0,475
1 080	0,335	0,12	1,26 10 ⁵	0,69	0,475
3 600	0,36	0,14	1,30 10 ⁵	0,72	0,49
4 500	0,375	0,16	1,33 10 ⁵	0,72	0,495
5 400	0,39	0,175	1,37 10 ⁵	0,72	0,495
6 300	0,40	0,185	1,40 10 ⁵	0,72	0,50
7 200	0,415	0,195	1,44 10 ⁵	0,725	0,50
8 100	0,42		1,48 10 ⁵	0,73	0,555
9 000	0,43	0,21	1,51 10 ⁵	0,735	0,50
10 800	0,445	0,23	1,55 10 ⁵	0,735	0,505
12 600	0,46	0,24	1,58 10 ⁵	0,74	0,51
14 400	0,47	0,25	1,62 10 ⁵	0,74	0,52
16 200	0,48	0,26	1,66 10 ⁵	0,74	0,52
18 000	0,485	0,27	1,69 10 ⁵	0,745	0,53
19 800	0,49	0,28	1,73 10 ⁵	0,73	0,52
21 600	0,50	0,28	1,76 10 ⁵	0,73	0,52
23 400	0,51	0,29	1,80 10 ⁵	0,735	0,525
25 200	0,51	0,30	1,84 10 ⁵	0,74	0,53
27 000	0,52	0,305	1,87 10 ⁵	0,74	0,53
28 800	0,525	0,31	1,91 10 ⁵	0,745	0,53
30 600	0,53	0,315	1,94 10 ⁵	0,745	0,54
32 400	0,53	0,32	1,98 10 ⁵	0,745	0,545
34 200		0,32	2,02 10 ⁵		
36 000	0,54	0,33	2,05 10 ⁵	0,745	0,545
36 800	0,55	0,33	2,09 10 ⁵	0,75	0,545
39 600	0,55	0,34	2,12 10 ⁵	0,75	0,545
41 400	0,555	0,34			
43 200	0,58	0,35			
46 800	0,58	0,35			
50 400	0,6	0,37			

Arrêt du pompage le 5 Mai 1982 à 19 h 15

Remontée observée au puits

Temps après fin du pompage en secondes = t_r	$1 + \frac{t_p}{t_r}$	$H(t_r) - H(o)$ $H(o) = 10m12$
0		0
30	7 081	0,21
60	3 541	0,22
90	2 361	0,23
120	1 771	0,225
180	1 181	0,235
240	886	0,24
300	709	0,255
360	591	0,265
420	507	0,27
480	443	0,27
540	394	0,275
600	355	0,28
900	237	0,30
1 200	178	0,31
1 500	143	0,32
1 800	119	0,33
2 100	102	0,34
2 400	89,5	0,35
2 700	79,7	0,355
3 600	60,0	0,375
4 500	48,2	0,385
5 400	40,3	0,39
6 300	34,7	0,405
7 200	30,5	0,41
8 100	27,2	0,42
9 000	24,6	0,43
9 900	22,5	0,435
11 700	19,2	0,445
13 500	16,7	0,445
17 100	13,4	0,475
20 700	11,3	0,49
24 300	9,7	0,505
27 800	8,6	0,52
31 500	7,7	0,535
35 100	7,1	0,545
38 700	6,5	0,55
42 300	6,0	0,57
45 900	5,6	0,57

Descente

Durée du pompage		rabattement (m)	
jours	secondes	piézomètre	puits
$6,94 \cdot 10^{-4}$	60	0,01	0,43
$1,39 \cdot 10^{-3}$	120	0,02	0,55
2,1	180	0,04	0,77
2,8	240	0,06	0,87
3,5	300	0,06	0,95
4,2	360	0,07	0,99
4,9	420	0,08	1,03
5,6	480	0,08	1,06
6,2	540	0,09	1,08
6,9	600	0,09	1,1
7,6	660	0,10	1,11
8,3	720	0,10	1,12
9	780	0,11	1,13
9,7	840	0,11	1,14
1	10^{-2} 900	0,11	1,14
1,4	" 1200	0,12	1,16
1,7	" 1500	0,13	1,17
2,1	" 1800	0,14	1,19
3,1	" 2700	0,17	1,22
4,2	" 3600	0,20	1,24
5,2	" 4500	0,21	1,25
8,0	" 6900	0,23	1,29
2,2	10^{-1} 18660	0,31	1,35
8,0	" 69000	0,37	1,41
1,1	" 95000	0,38	1,43
1,8	153780	0,40	1,43
1,9	166400	0,40	1,44
2,8	240120	0,41	1,45
3,2	278040	0,415	1,46
3,9	337500	0,43	1,47
4,2	359900	0,43	1,48
4,9	430200	0,45	1,49
5,1	441900	0,46	1,495
5,9	510600	0,47	1,50
6,3	542700	0,48	1,52
7,1	613080	0,50	1,54
7,8	672480	0,51	1,55
8,1	703680	0,52	1,56
8,8	758580	0,515	1,555
13,8	1195200	0,57	1,62
14,8	1278000	0,58	1,62
15,9	1378800	0,59	1,63
16,9	1465200	0,60	1,64

Début du pompage le 15 juin 1981 à 15 h 02'

Remontée

 $(t_p = \text{temps de pompage} = 1465200'')$

Temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (seconde) = t_R	$1 + \frac{t_p}{t_R}$	Rabattement	
		puits	piézomètre
60	$2,44 \cdot 10^4$	0,46	0,02
120	1,22. "	0,73	0,03
180	$8,14 \cdot 10^3$	0,90	0,04
240	6,11. "	1,00	0,05
300	4,89. "	1,03	0,06
360	4,07. "	1,06	0,06
420	3,49. "	1,08	0,07
480	3,05. "	1,09	0,08
540	2,71. "	1,10	0,08
600	2,44. "	1,10	0,09
660	2,22. "	1,11	0,09
720	2,04. "	1,12	0,10
780	1,88. "	1,12	0,10
840	1,75. "	1,13	0,11
900	1,63. "	1,13	0,11
1200	1,22. "	1,15	0,13
1500	$9,78 \cdot 10^2$	1,17	0,14
1800	8,15. "	1,19	0,16
2100	6,99. "	1,20	0,17
2400	6,12. "	1,20	0,17
2700	5,44. "	1,21	0,18
3000	4,89. "	1,22	0,19
3300	4,45. "	1,22	0,20
3600	4,08. "	1,23	0,20
4500	3,27. "	1,24	0,22
5400	2,72. "	1,26	0,23
6300	2,34. "	1,27	0,24
7200	2,05. "	1,29	0,25

ANNEXE 4

Les pompes à chaleur

- Généralités
- Les pompes à chaleur sur nappe

I. GENERALITES

Une pompe à chaleur comporte un fluide frigorigène interne qui décrit un cycle thermodynamique entre deux sources de chaleur, prélevant une quantité de chaleur Q_1 à une température T_1 à la source chaude pour céder Q_2 à T_2 à la source froide.

En théorie, cet appareil peut être considéré comme un système constitué d'une quantité fixe de matière, échangeant avec le milieu extérieur (nappe, réseau de chauffage, moteur électrique) de la chaleur Q et du travail W . Selon le second principe de la thermodynamique :

$$\sum_i \left(\frac{Q_i}{T_i} \right) \leq 0$$

avec Q_i = quantité de chaleur échangée avec l'extérieur à un niveau de température T_i

On peut écrire pour une pompe à chaleur :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$$

$$\text{d'où } -Q_1 \geq Q_2 \frac{T_1}{T_2}$$

Or, suivant le premier principe :

$$\sum_i Q_i + \sum_j W_j = 0$$

avec W_j = quantité de travail échangée avec l'extérieur

$$\text{Donc : } -Q_2 \leq \frac{T_2}{T_2 - T_1} W$$

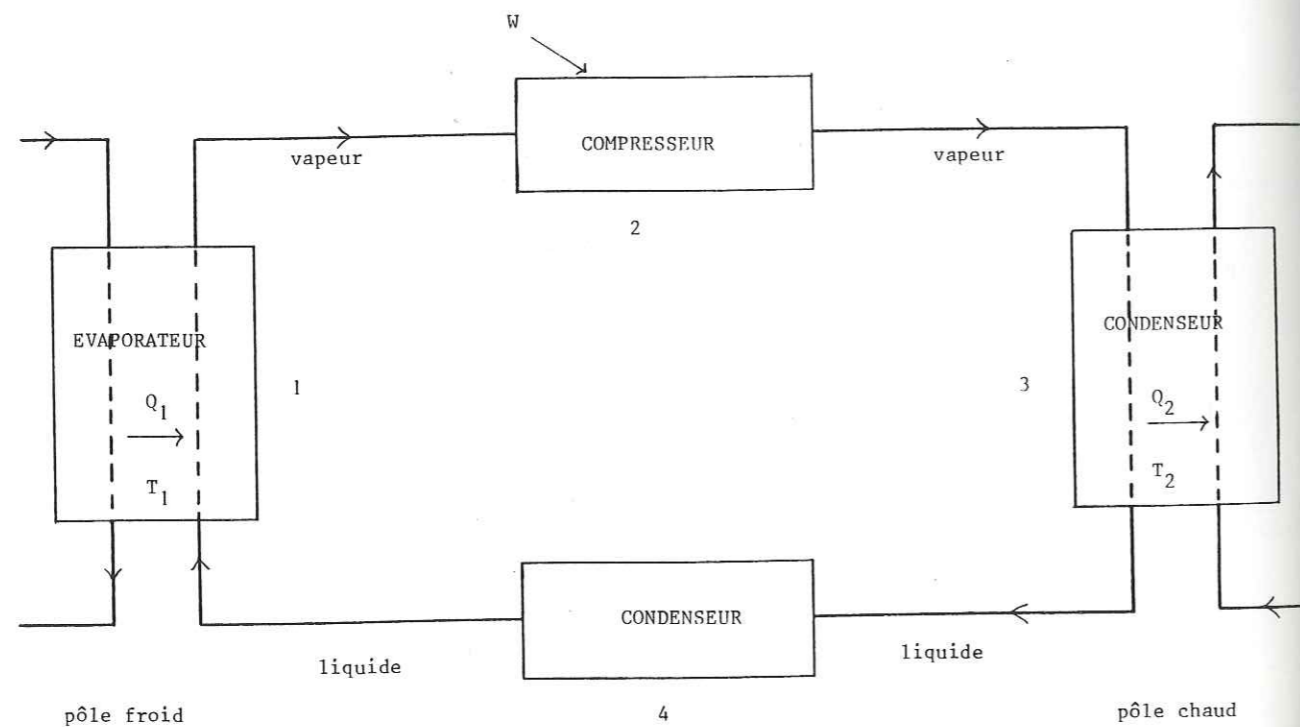
Remarque : Par convention le signe - est affecté à Q et W si l'échange a lieu du système vers l'extérieur. Q_2 étant la quantité de chaleur fournie à la source chaude, son signe est donc négatif.

Le rendement de l'appareil est quantifié par un coefficient de performance théorique :

$$\text{COP} = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Cette grandeur est toujours supérieure à 1, ce qui signifie que l'énergie mécanique fournie à la pompe à chaleur est toujours inférieure à l'énergie thermique finalement délivrée au réseau de chauffage.

En pratique, le schéma d'une pompe à chaleur dans sa version la plus simple est le suivant :



- 1- Le fluide frigorigène (en général un fréon, dérivé chloro-fluoré d'hydrocarbure) est vaporisé au contact de la source froide de la pompe à chaleur en prélevant la quantité de chaleur Q_1 correspondant à la chaleur latente de vaporisation du liquide.

- 2- La vapeur est compressée sans perte de chaleur, la pression et la température augmentent en consommant une quantité de travail W .
- 3- Au contact de la source chaude, la vapeur se condense en délivrant une quantité de chaleur Q_2 provenant du changement de phase.
- 4- Le liquide est ensuite détendu pour retourner à l'évaporateur.

Le COP s'exprime alors comme le rapport de l'énergie thermique fournie sur l'énergie mécanique absorbée (et tarifée), il vaut environ 50 % du COP théorique.

II. LES POMPES A CHALEUR SUR NAPPE

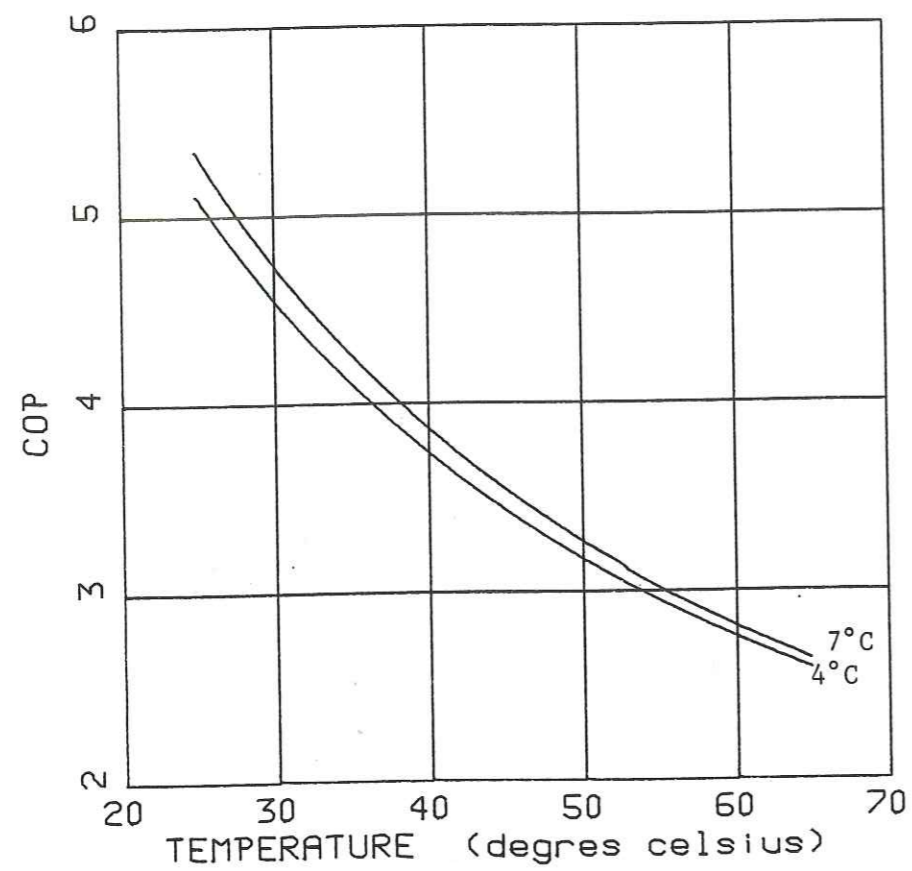
Les aquifères peu profonds constituent une source froide d'excellente qualité :

- température stable conduisant à des performances sensiblement constantes sur la saison de chauffe (même aux heures les plus froides)
- température moyenne comprise entre 9 et 11°C, ce qui permet de prélever entre 4 et 5°C avec un COP élevé.

A titre d'exemple, le schéma suivant représente l'évolution du COP en fonction de la température de la source chaude, pour une température de rejet d'eau de l'évaporateur de 4°C et 7°C et un fluide frigorigène couramment utilisé (fréon R22).

L'appareil dont nous reproduisons les performances a une puissance de 60 KW (Carrier Int. Corp., 1980).

TEMP. CONDENSEUR / COP (donnees CARRIER)



Il apparaît donc que l'utilisation de pompe à chaleur sur nappe est particulièrement adaptée à des besoins de chaleur basse ou moyenne température ($T < 60^{\circ}\text{C}$) et notamment pour alimenter des réseaux de chauffage.

13 MAI 1986

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