

50376
1981
193

N° 917

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE
U. E. R. DES SCIENCES DE LA TERRE

50376
1981
193

THESE

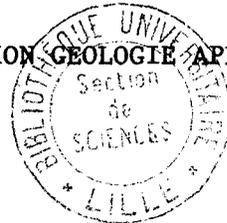
PRESENTEE EN VUE DE L'OBTENTION DU

DOCTORAT DE TROISIEME CYCLE

EN

SCIENCES NATURELLES

MENTION GEOLOGIE APPLIQUEE



GESTION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE
DES EAUX SOUTERRAINES EN ZONE AGRICOLE

Application à la nappe de la craie de l'Artois
et du Cambrésis



030 017101 4

par
Philippe ARNOULT

30 SEPTEMBRE 1981

Commission d'examen :

MM. P. CELET	Président
J. MANIA	Rapporteur
N. CRAMPON	Examineur
B. BLAVOUX	Invité
J.L. PELLETIER	Invité

AVANT-PROPOS

Je ne saurais commencer ce mémoire et en exposer les résultats sans remercier les membres du Jury qui m'ont fait l'honneur de siéger à cette soutenance.

Monsieur le Professeur P. CELET que je remercie vivement d'avoir accepté la Présidence du Jury.

Monsieur J. MANIA, Maître-Assistant, Docteur ès Sciences, à qui je dois d'avoir entrepris ce travail. Ses connaissances en hydrogéologie et en informatique m'ont permis de résoudre les nombreux problèmes qui se sont posés tout au long de ces deux années ; sa patience, son dévouement et son amitié m'ont incités à ne jamais me décourager.

Monsieur le Professeur N. CRAMPON, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et dont les connaissances en matière de traçage m'ont été fort utiles, je le remercie en outre d'avoir accepté de juger cette thèse.

Monsieur le Professeur B. BLAVOUX, du Centre Universitaire d'Avignon dont les écrits m'ont été très utiles pour comprendre et utiliser l'outil isotopique. Je le remercie aujourd'hui de bien vouloir assister à cette thèse

Monsieur J.L.PELLETIER, Ingénieur Hydrogéologue au Service Régional d'Aménagement des Eaux du Nord-Pas-de-Calais, qui m'a soutenu matériellement. Les discussions que nous avons échangées m'ont aidé à approfondir certains sujets et à porter un oeil critique sur mon travail.

J'assurerai également de ma gratitude Monsieur le Professeur J. PAQUET pour la confiance qu'il m'a faite en m'ouvrant les portes de son Laboratoire et à qui je dois de m'être orienté vers l'hydrogéologie.

L'acquisition de données climatologiques, hydrologiques, piézométriques et chimiques présentées dans cette thèse a été permise grâce aux organismes consultés : le Service Hydrologique Centralisation de Lambersart, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières de Lezennes, le Service Météorologique de Lille-Lesquin, la Direction Départementale de l'Agriculture du Nord et du Pas-de-Calais, la Direction Départementale de l'Action Sanitaire et Sociale du Nord et du Pas-de-Calais, la Chambre Départementale d'Agriculture du Nord. Je remercie vivement tous les responsables de leur gentillesse et de leur compréhension.

Je ne peux ici oublier Monsieur le garde-champêtre de Doignies et Monsieur le garde-champêtre d'Avesnes-le-Sec qui m'ont permis, par le travail que je leur ai demandé, de réduire mes déplacements sur le terrain. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance.

Je voudrais enfin exprimer mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail, je ne peux les citer tous, ils se reconnaîtront, et en particulier à Madame T. FLORENT pour l'excellente frappe de ce mémoire et à Madame A. BREBION pour le tirage.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	
PREMIERE PARTIE : Géologie et Hydrogéologie.....	
1.1.- Limites géographiques.....	
1.2.- Hydrographie.....	
1.3.- Géologie.....	
1.3.1.- Structures géologiques.....	
1.3.2.- Stratigraphie.....	
1.4.- Hydrogéologie.....	
1.4.1.- Piézométrie.....	
A. Examen des cartes piézométriques.....	
B. Surveillances piézométriques localisées.....	
C. Analyse de diagrammes caractéristiques.....	
1.4.2.- Carte de l'épaisseur de craie mouillée.....	
1.4.3.- Caractéristiques hydrauliques.....	
A. Analyse de quelques pompages d'essai.....	
B. Analyse des pertes de charge.....	
1.5.- Conclusions.....	
DEUXIEME PARTIE : Climatologie et Hydrologie.....	
2.1.- Rappels de quelques notions hydrogéologiques.....	
2.1.1.- Notion de système aquifère.....	
2.1.2.- Alimentation.....	
2.1.3.- Infiltration.....	
2.1.4.- Evapotranspiration.....	

2.2.-	Simulation hydrométéorologique.....	
2.2.1.-	Principe.....	
2.2.2.-	Description du modèle.....	
2.2.3.-	Paramètres hydrologiques et hydrométéorologiques à introduire lors de l'exécution....	
2.3.-	Application du modèle MMØ1 à trois sous-bassins de l'Escaut.....	
2.3.1.-	Généralités.....	
2.3.2.-	Calage du modèle.....	
2.3.3.-	Estimation graphique des ressources en eau.	
2.3.4.-	Evaluation des réserves en eaux souterraines.....	
	A. Rappel.....	
	B. Phase de calcul.....	
2.3.5.-	Conclusions.....	

TROISIEME PARTIE : Gestion des ressources en eau.....

3.1.-	Introduction.....	
3.2.-	Rappels théoriques.....	
3.3.-	Modélisation de l'aquifère crayeux de l'Artois et du Cambrésis.....	
3.3.1.-	Conditions aux limites.....	
3.3.2.-	Maillage.....	
3.3.3.-	Acquisition des données.....	
	A. Géologie.....	
	B. Piézométrie.....	
	C. Caractéristiques hydrauliques.....	
3.3.4.-	Précipitations.....	
3.3.5.-	Débits de pompage.....	
3.4.-	Calage du modèle.....	
3.4.1.-	Calage proprement dit.....	
3.4.2.-	Répartition des transmissivités.....	
3.4.3.-	Restitution de la piézométrie.....	
3.4.4.-	Bilan hydrologique.....	

- 3.5.- Exploitation du modèle.....
- 3.5.1.- Mode de sélection des sites.....
- 3.5.2.- Evolution de la consommation.....
- 3.5.3.- Les différentes phases de la gestion.....
 - A. Première phase.....
 - B. Deuxième phase.....
 - C. Troisième phase.....
 - D. Quatrième phase.....
- 3.5.4.- Conclusions.....

QUATRIEME PARTIE : Etude du chimisme de la craie et de son évolution.....

- 4.1.- De l'utilisation des engrais.....
 - 4.1.1.- Migrations des nitrates vers la nappe.....
 - 4.1.2.- Utilisation des engrais sur les cultures...
 - 4.1.3.- Utilisation des fertilisants par la plante.
- 4.2.- Analyse des données chimiques.....
 - 4.2.1.- Examen des cartes d'isoteneurs.....
 - A. Les nitrates.....
 - B. Les sulfates.....
 - C. Synthèse.....
 - 4.2.2.- Evolution des nitrates et des sulfates.....
 - 4.2.3.- Corrélations piézométrie-teneur en nitrates
 - 4.2.4.- Conclusions relatives à l'évolution du chimisme de l'eau.....
 - 4.2.5.- Analyses isotopiques.....
 - A. Le tritium.....
 - B. L'azote.....
 - C. Le soufre.....
 - D. Résultats et commentaires.....
 - a) Analyse des teneurs en tritium.....
 - b) Analyse des teneurs en soufre 34.....
 - c) Analyse des teneurs en azote 15.....
 - E. Conclusion.....

- 4.3.- Applications des traçages artificiels en vue de la mise en évidence d'une pollution.....
- 4.3.1.- Rappels théoriques des mécanismes physiques de déplacement d'un traceur.....
- 4.3.2.- Expériences de traçage à la fluorescéine à Doignies et Avesnes-le-Sec.....
 - A. Traçage n° 1.....
 - B. Traçage n° 2.....
 - C. Conclusions des deux expériences de traçage.

CINQUIEME PARTIE : Prévion de la qualité des eaux.....

- 5.1.- Généralités.....
- 5.2.- Les diverses étapes du calcul.....
- 5.3.- Données à introduire.....
- 5.4.- Estimation quantitative des rejets de substances polluantes.....
- 5.5.- Exploitation du modèle.....
 - 5.5.1.- Description du problème et paramètres d'entrées.....
 - 5.5.2.- Résultats.....
 - 5.5.3.- Conclusion.....

SIXIEME PARTIE : Les facteurs socio-économiques.....

- 6.1.- Variations de population et du nombre d'exploitations agricoles.....
 - 6.1.1.- Etude de la variation de population.....
 - 6.1.2.- Evolution du nombre total d'exploitations de 1955 à 1970 pour les régions agricoles du Hainaut, du Cambrésis et de l'Artois....
 - 6.1.3.- Conclusions.....
- 6.2.- Activité agricole. Evolution du cheptel et consommation d'engrais.....
 - 6.2.1.- Cheptel.....
 - 6.2.2.- Consommation d'engrais.....

6.3.- Activité industrielle.....
6.3.1.- Démographie, économie et politique indus-
trielle régionale.....
6.3.2.- Développement futur.....
6.4.- Estimations des besoins en eau.....

CONCLUSION.....

BIBLIOGRAPHIE.....

LISTE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE :

- Fig. 1.1.- Situation géographique.....
- Fig. 1.2.- Carte du toit du Turonien moyen.....
- Fig. 1.3.- Carte géologique simplifiée.....
- Fig. 1.4.- Coupe géologique de Bailleul-Sire-Berthoult à
Le Cateau.....
- Fig. 1.5.- Carte piézométrique de la nappe de la craie en
période de basses eaux.....
- Fig. 1.6.- Carte piézométrique de la nappe de la craie en
période de hautes eaux.....
- Fig. 1.7.- Evolution piézométrique de différents captages
- Fig. 1.8.- Diagramme pluviométrique de Troisvilles.....
- Fig. 1.9.- Evolution piézométrique du captage de Barastre
- Fig. 1.10.- Corrélation piézométrique - pluviométrie pour
le site de Lieu-St-Amand.....
- Fig. 1.11.- Carte de l'épaisseur de la craie mouillée....
- Fig. 1.12.- Implantation des captages de l'Artois.....
- Fig. 1.13.- Courbes caractéristiques obtenues d'après les
pompages d'essais.....

DEUXIEME PARTIE :

- Fig. 2.1.- Eléments statiques.....
- Fig. 2.2.- Eléments dynamiques.....
- Fig. 2.3.- Carte de distribution spatiale des précipita-
tions.....

- Fig. 2.4.- Décomposition de la simulation.....
- Fig. 2.5.- Hydrogrammes représentatifs du Haut-Escaut....
- Fig. 2.6.- Caractères particuliers d'un des hydrogrammes.
- Fig. 2.7.- Détermination graphique des temps de tarissement.....
- Fig. 2.8.- Illustration de la corrélation.....
- Fig. 2.9.- Carte des bassins et sous-bassins étudiés.....
- Fig. 2.10.- Débits totaux des différents sous-bassins de la Selle.....
- Fig. 2.11.- Débits totaux des différents sous-bassins de l'Ecaillon.....
- Fig. 2.12.- Débits totaux des différents sous-bassins de la Rhonelle.....
- Fig. 2.13.- Représentation schématique des différents types de réserves.....

TROISIEME PARTIE :

- Fig. 3.1.- Schéma de la méthode à différences finies.....
- Fig. 3.2.- Maillage et limites du modèle.....
- Fig. 3.3.- Processus schématique du calage.....
- Fig. 3.4.- Restitution de la piézométrie.....
- Fig. 3.5.- Détermination des débits maxima.....
- Fig. 3.6.- Piézométrie obtenue lors de la troisième phase

QUATRIEME PARTIE :

- Fig. 4.1.- Cycle interne de l'azote du sol.....
- Fig. 4.2.- Mouvements d'azote total pour la région NORD-PICARDIE.....
- Fig. 4.3.- Carte des nitrates.....
- Fig. 4.4.- Carte des sulfates.....
- Fig. 4.5.- Exemple d'évolution des nitrates et des sulfates.....

- Fig. 4.6.- Corrélations piézométrie-teneur en nitrates
pour quelques sites particuliers.....
- Fig. 4.7.- Corrélation piézométrie-teneurs en nitrates
pour le captage de rejet de Beaulieu.....
- Fig. 4.8.- Relation profondeur-teneur en tritium.....
- Fig. 4.9.- Détermination de différents types d'eau.....
- Fig. 4.10.- Relation tritium-épaisseur d'aquifère.....
- Fig. 4.11.- Relation perméabilité-teneur en tritium
(avril 1979).....
- Fig. 4.12.- Relation perméabilité-teneur en tritium
(septembre 1979).....
- Fig. 4.13.- Relation 15N-teneur en tritium.....
- Fig. 4.14.- Relation 15N-teneur en nitrate.....
- Fig. 4.15.- Graphique 34S- 15N.....
- Fig. 4.16.- Géographie du site de Doignies.....
- Fig. 4.17.- Dispositif de rejet des eaux usées de Doignies
- Fig. 4.18.- Courbe de concentration en fluorescéine obtenue
au captage de Doignies.....
- Fig. 4.19.- Géographie du site d'Avesnes-le-Sec.....
- Fig. 4.20.- Courbe de concentration en fluorescéine obtenue
au captage d'Avesnes-le-Sec.....
- Fig. 4.21.- Spectre obtenu sur les eaux de Doignies et
d'Avesnes-le-Sec.....

CINQUIEME PARTIE :

- Fig. 5.1.- Schéma du processus de calcul.....
- Fig. 5.2.- Maillage et conditions aux limites de la zone
étudiée.....
- Fig. 5.3.- Détermination des vitesses résultantes.....
- Fig. 5.4.- Concentrations calculées au temps $t = 5$ ans
- Fig. 5.5.- Concentrations calculées au temps $t = 11$ ans
- Fig. 5.6.- Concentrations calculées au temps $t = 20$ ans

SIXIEME PARTIE :

Fig. 6.1.- Evolution du nombre total d'exploitations....

LISTE DES TABLEAUX

PREMIERE PARTIE :

- Tableau 1.1.- Evolution de la consommation en eau pour
la période 1975-1977 sur trois secteurs
caractéristiques.....
- Tableau 1.2.- Forage de Boiry-Saint-Martin - Nappe de la
craie.....
- Tableau 1.3.- Valeurs de transmissivités obtenues par
pompage d'essai.....

DEUXIEME PARTIE :

- Tableau 2.1.- Caractéristiques générales des différents
bassins.....
- Tableau 2.2.- Valeurs en pourcentage du débit de base an-
nuel par rapport au débit total.....
- Tableau 2.3.- Valeurs calculées des coefficients de temps
de tarissement des bassins étudiés.....
- Tableau 2.4.- Superficies des différents bassins et sous-
bassins.....
- Tableau 2.5.- Débits et modules d'écoulements souterrains
des différents bassins.....
- Tableau 2.6.- Débits d'étiage des différents sous-bassins

TROISIEME PARTIE :

- Tableau 3.1.- Lames d'eau mensuelles mesurées sur 4 stations pilotes.....
- Tableau 3.2.- Bilan hydrologique de la nappe de la craie dans la région ARTOIS-CAMBRESIS.....
- Tableau 3.3.- Exemples d'évolution des débits distribués et prélevés entre 1974 et 1977.....
- Tableau 3.4.- Résultats partiels de la phase n° 1.....
- Tableau 3.5.- Correspondance coordonnées-communes.....
- Tableau 3.6.- Rabattements obtenus pour $Q = Q_0 \times 2$
- Tableau 3.7.- Débits maxima pour un rabattement $r = \frac{\text{épaisseur}}{4}$
- Tableau 3.8.- Résultats de la phase n° 2.....
- Tableau 3.9.- Résultats de la phase n° 4.....

QUATRIEME PARTIE :

- Tableau 4.1.- Tendances de l'évolution des teneurs en nitrates.....
- Tableau 4.2.- Tendances de l'évolution des teneurs en sulfates.....
- Tableau 4.3.- Résultats d'analyse et contexte des sites étudiés.....
- Tableau 4.4.- Résultats des deux séries d'analyses effectuées.....
- Tableau 4.5.- Concentrations cumulées en fluorescéine pour les sites de Doignies et Avesnes-le-Sec dans l'éluat issu des échantillons de charbon actif traités.....
- Tableau 4.6.- Paramètres hydrodispersifs de la nappe calculés à Doignies et Avesnes-le-Sec.....

CINQUIEME PARTIE :

- Tableau 5.1.- Caractéristiques techniques de quelques stations d'épuration du Cambrésis.....
- Tableau 5.2.- Flux d'azote entrant pour plusieurs stations d'épurations du département du NORD.....
- Tableau 5.3.- Paramètres d'utilisation.....
- Tableau 5.4.- Vitesses d'écoulement des eaux souterraines suivant la direction X.....
- Tableau 5.5.- Vitesses d'écoulement des eaux souterraines suivant la direction Y.....
- Tableau 5.6.- Localisation des puits de pompage et d'injection

SIXIEME PARTIE :

- Tableau 6.1.- Consommation d'engrais dans le Cambrésis - Chiffres ESSOR.....
- Tableau 6.2.- Consommation d'engrais dans le Cambrésis - Chiffres CAFNOR.....
- Tableau 6.3.- Structures industrielles en Cambrésis.....
- Tableau 6.4.- Besoins en eau respectifs des principales industries du NORD-PAS-DE-CALAIS.....
- Tableau 6.5.- Demande d'eau en France en m³ par personne et par an.....

INTRODUCTION

CONTENTS

L'accroissement des besoins en eau et la pollution de plus en plus importante des réserves souterraines et superficielles amènent aujourd'hui un nombre toujours plus grand de chercheurs à travailler sur ce problème.

Dès 1886, J. GOSSELET établissait les premières règles d'hydrogéologie dans le Nord de la France. Entre 1925 et 1948, L. DOLLE précisait l'importance des problèmes de l'eau dans la région du Nord. Depuis les études ne font que se multiplier grâce à l'initiative de nombreux organismes tels que les Agences de Bassin.

Le présent mémoire s'intéresse plus particulièrement à une vaste région agricole constituée par l'Artois et le Cambrésis, où les problèmes n'ont pas l'ampleur de ceux rencontrés dans les zones industrielles et minières, mais commencent à préoccuper les responsables du fait de teneurs en nitrate anormalement élevées.

Différents outils nous ont été proposés afin de mener à bien cette étude. Dans un premier chapitre nous avons établi le cadre géologique et hydrogéologique de notre région d'étude. Le deuxième chapitre concerne l'utilisation d'un modèle de simulation hydrométéorologique à pas journaliers appliqué à trois sous-bassins. L'analyse mathématique et informatique nous a permis dans le troisième chapitre d'élaborer des systèmes hydrogéologiques et de simuler les écoulements souterrains et donc de proposer une gestion des ressources en eaux souterraines en vue de besoins toujours accrus.

Dans le quatrième chapitre, nous avons utilisé les données chimiques existantes, établies depuis 1970, complétées par des analyses isotopiques et deux traçages à la fluorescéine. Les résultats obtenus permettront d'établir quelques hypothèses concernant le mode de minéralisation de l'eau et son évolution chimique.

Dans le cinquième chapitre, nous avons fait appel à un programme original de simulation de la qualité des eaux. Ce programme permet, outre la connaissance des écoulements souterrains, de visualiser l'évolution des fronts de pollution constatés sur plusieurs années et d'offrir une représentation des zones susceptibles d'être menacées.

Le sixième chapitre correspond à l'étude des facteurs socio-économiques dont l'intérêt est de proposer des prévisions utiles au gestionnaire de la ressource et de la qualité des eaux souterraines.

PREMIERE PARTIE

GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

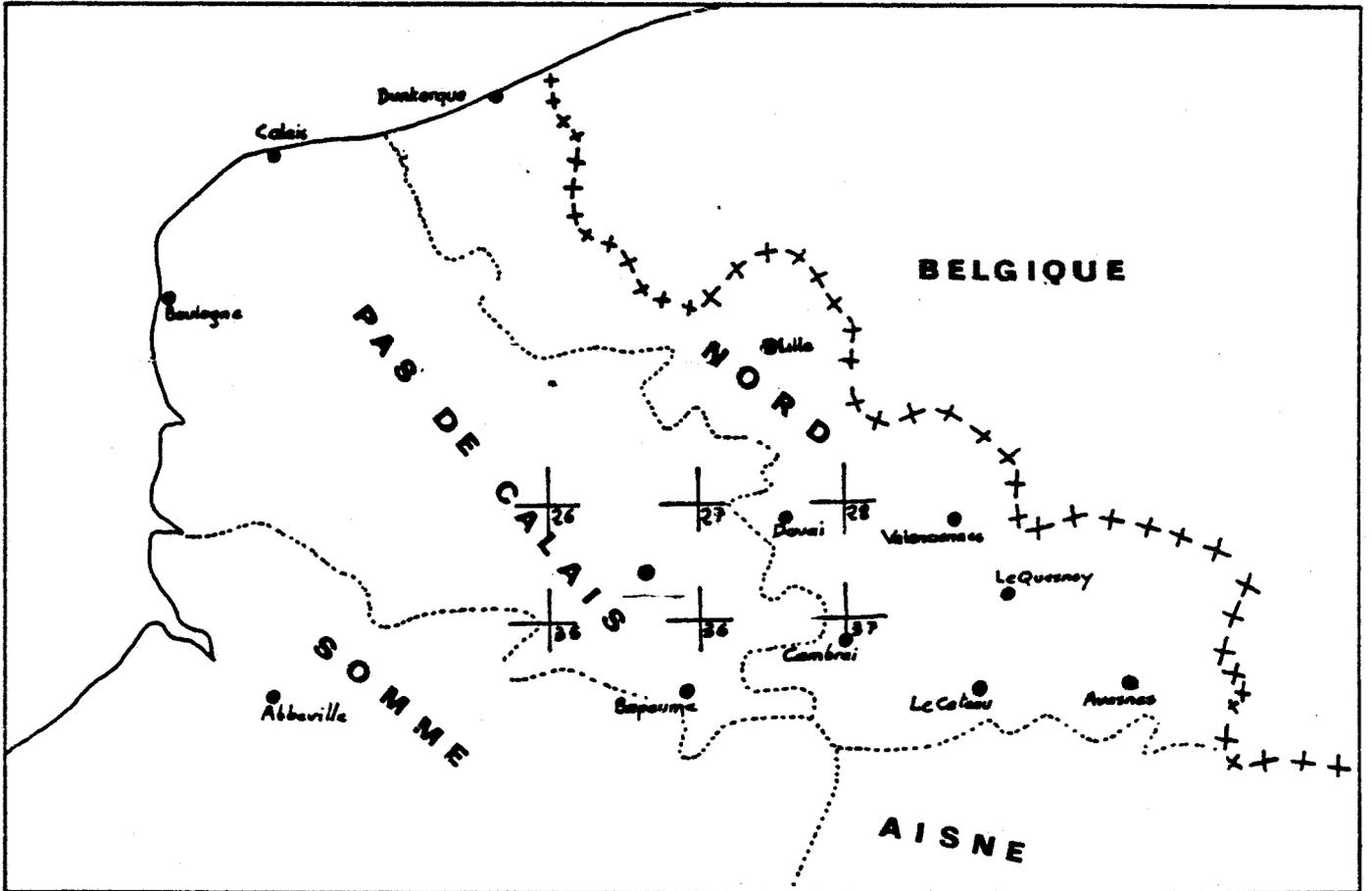


Fig 1.1 : Situation géographique



1.1.- Limites géographiques.

La région étudiée correspond en fait aux zones administratives de l'Artois et du Cambrésis et à la partie occidentale du Hainaut. Cette région constitue dans son ensemble le bassin versant du Haut-Escaut, de la Sensée et de la Scarpe (fig. 1-1).

La limite Ouest et Sud est définie par un haut plateau crayeux pouvant atteindre 150 mètres d'altitude et qui constitue la ligne de partage des eaux entre les bassins de la Canche, l'Authie, la Somme et le bassin de l'Escaut. La limite Nord est constituée par les vallées de la Scarpe, de la Scarpe canalisée, de la Sensée et du canal de l'Escaut, la dernière limite se trouvant être la Rhonelle, affluent de l'Escaut.

Cette région ainsi définie, est traversée du Sud vers le Nord par le canal de Saint-Quentin et le canal du Nord.

1.2.- Hydrographie.

Plusieurs sous-bassins recouvrent la zone étudiée :

- le bassin du Haut-Escaut,
- le bassin de la Rhonelle,
- le bassin de la Selle,
- le bassin de l'Ecaillon,
- le bassin de la Sensée,
- le bassin de la Scarpe (canalisée d'Arras à Douai).

1.3.- Géologie.

1.3.1.- Structures géologiques.

Dans la plus grande partie de la région, les formations mésozoïques qui affleurent n'offrent que des ondulations de faible amplitude qui suivent, dans leur ensemble, la direction des plis hercyniens. Les deux traits majeurs sont représentés par le bombement anticlinal de l'Artois et la faille de Marqueffles. Le bombement anticlinal de l'Ar-

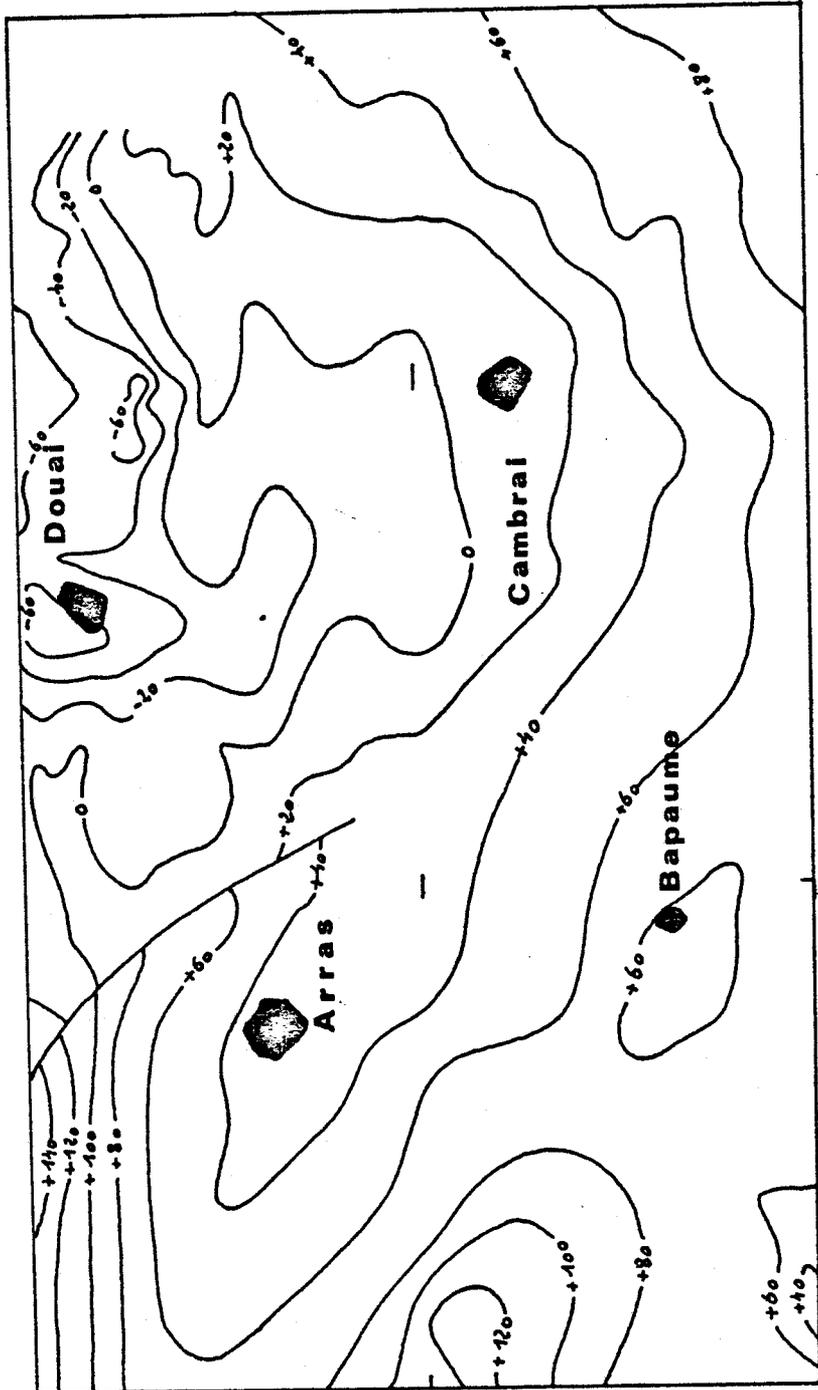


Fig. 1.2.- CARTE DU TOIT DU TURONIEN MOYEN



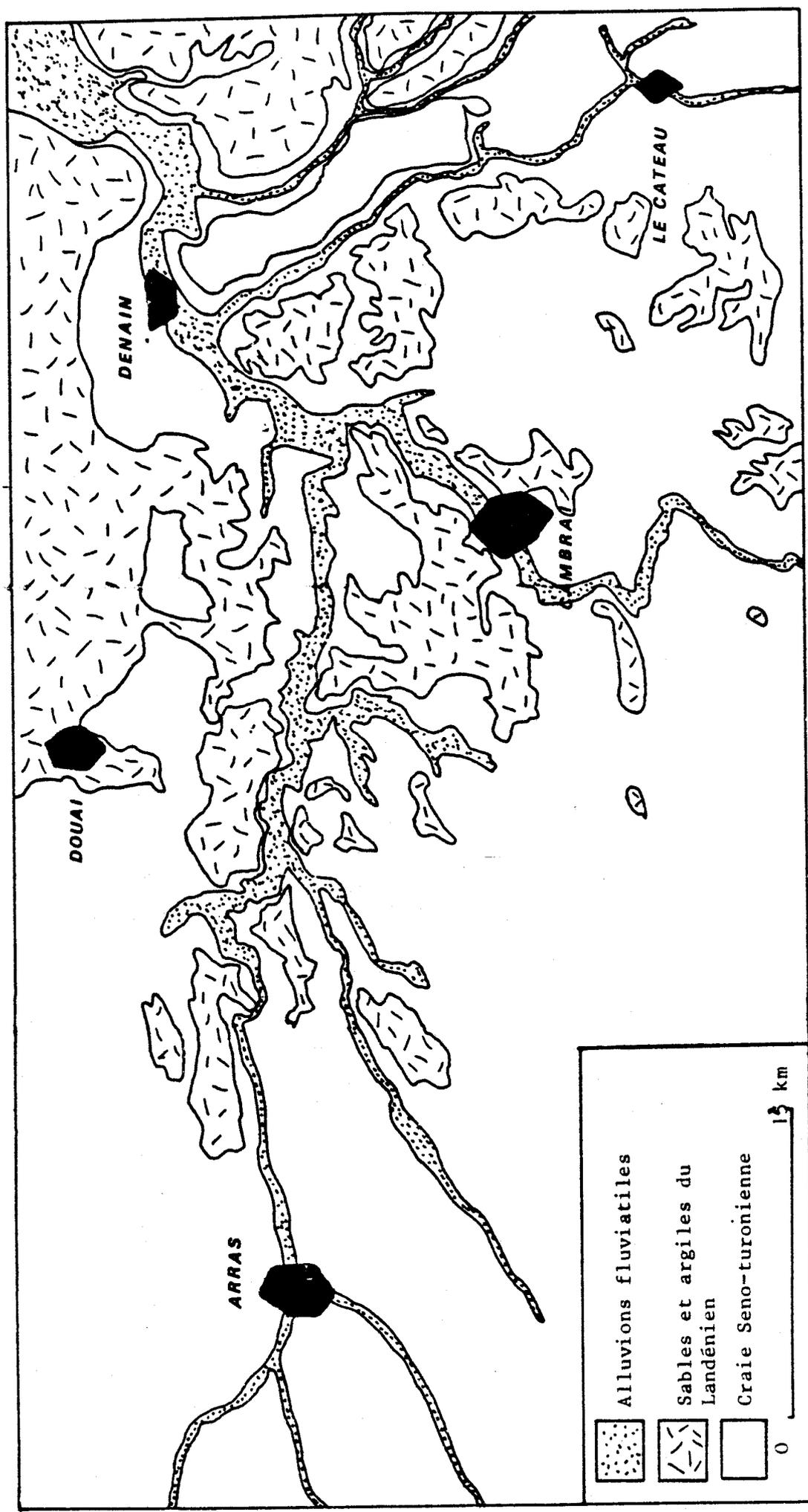


Fig 1.3 : Carte géologique simplifiée



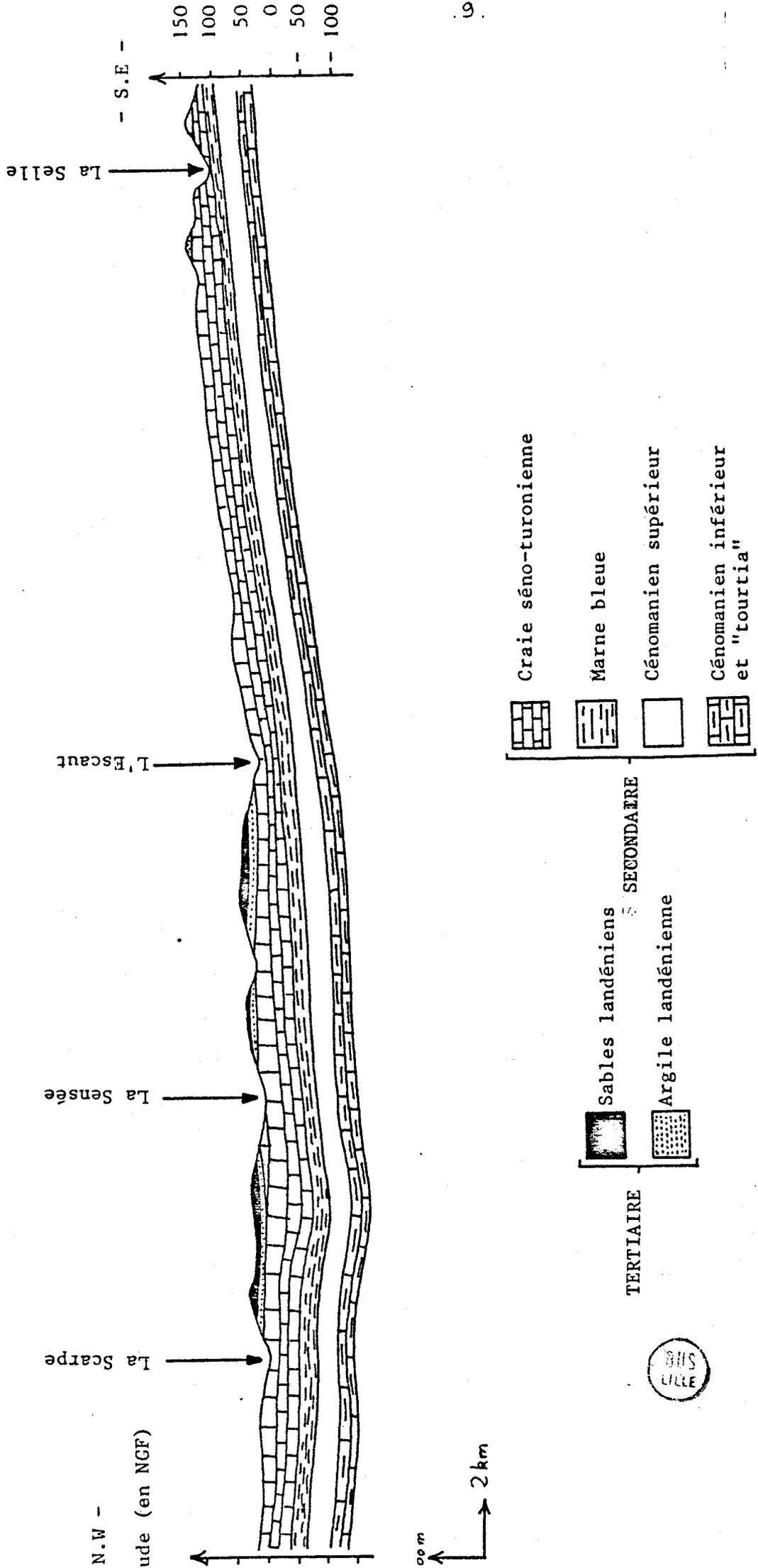


Fig. 1.4.- COUPE GEOLOGIQUE DE BAILLEUL-SIRE-BERTHOULT A LE CATEAU

tois, correspondant à la limite topographique d'orientation N120, est à l'origine de la distribution géographique de l'hydrographie actuelle. A partir de cet anticlinal affectant à la fois les formations géologiques du Primaire, du Secondaire et du Tertiaire, les pendages des couches géologiques sont soit orientés vers le NE, soit vers le SW. En ce qui concerne la faille de Marqueffles, située au NE d'Arras, décalant les formations géologiques, le rejet épicrotacé dans la région de Vimy est d'une centaine de mètres.

La carte du toit du Turonien moyen (fig. 1-2) permet de visualiser les structures énoncées ci-dessus. On y remarque en particulier la disposition des couches en arc de cercle dont la concavité s'ouvre vers le Nord.

La structure géologique du sous-sol influence la circulation des eaux souterraines dans les terrains crayeux particulièrement bien développés et affleurant dans la majeure partie de l'Artois. Dans le Cambrésis et plus particulièrement dans le Sud du Valenciennois, les formations crayeuses sont recouvertes sur les plateaux des sables et argiles du Tertiaire, la nappe restant cependant libre. Les sables et argiles peuvent également subsister sur les sommets topographiques comme dans la région de Bapaume et dans les zones interfluves de la Scarpe, de la Sensée, du Cojeul et du ruisseau de l'Agache (fig. 1.3).

La coupe géologique effectuée de Bailleul-Sire-Berthoult à Le Cateau (fig. 1.4) présente la superposition des couches rencontrées et indique leur relèvement vers le Sud-Est ainsi que l'épaississement de la craie seno-turonienne au niveau des vallées de la Scarpe et de la Sensée.

1.3.2.- Stratigraphie.

Les terrains crayeux qui nous intéressent plus particulièrement dans le cadre de cette étude, sur le plan des ressources en eaux souterraines, ont été précisément étudiés à l'occasion des sondages houillers et pétroliers (1, 2, 3)*. Les formations secondaires de la craie d'âge crétacé sont constituées classiquement, de bas en haut, par :

* Voir Bibliographie.

. Le Cénomaniens qui débute par des dépôts argilo-sableux glauconieux et conglomératiques désignés par le terme "tourtia" (1 à 3 m). Viennent ensuite des marnes crayeuses (30 à 50 m) dont la moitié supérieure peut être constituée par des craies blanches comme c'est le cas dans la région comprise entre Arras-St-Pol et Doullens.

. Le Turonien inférieur, constitué de marnes plastiques et verdâtres appelées "Dieves vertes" dont l'épaisseur varie de 20 à 40 m.

. Le Turonien moyen composé de marnes crayeuses lourdes dont la puissance est de l'ordre de 40 m. L'ensemble du Turonien moyen est constitué par une alternance de bancs marneux et de bancs crayeux assez durs. Ces terrains affleurent le long de la faille de Marqueffles au niveau de Vimy, ainsi qu'au fond de la vallée de la Selle où, en raison de leur imperméabilité, ils déterminent de nombreuses sources et où leur épaisseur maximale ne dépasse pas quinze mètres.

. Le Turonien supérieur caractérisé par une craie grisâtre, glauconieuse d'aspect grenu dont l'épaisseur varie de 5 à 15 m. On peut trouver dans ce niveau des nodules de craie durcie recouverts d'une patine phosphatée ou glauconieuse et cimentés par une craie indurée.

On rencontre également des nodules semblables dont les pores ont été remplis de calcite recristallisée et que l'on désigne sous le nom de "meule". Il existe en outre dans la craie turonienne de nombreux niveaux de silex.

. Le Sénonien composé dans sa plus grande partie de craie blanche à silex d'une épaisseur d'environ 50 m. et dont les faciès varient peu géographiquement et en profondeur. Ces terrains affleurent largement dans toute la zone d'étude au niveau des vallées.

Les terrains tertiaires sont souvent localisés sur les buttes témoins ou les zones interfluves. Ils affleurent surtout dans le Valenciennois et la zone de Cambrai, ailleurs ils ne constituent que les som-

ments topographiques. Le Landénien inférieur marin est constitué de sable, tuffeau et argile sableuse. Dans la zone de Cambrai, on distingue de bas en haut : le tuffeau d'Honnechy, l'argile de Clary, le tuffeau de Prémont. Cet ensemble correspond au tuffeau de Valenciennes.

Nous trouvons au-dessus de ces terrains les sables du Quesnoy constituant le Landénien continental. Dans la région de Bohain, on note la superposition : tuffeaux et argile de Clary, sables de Grandglise, sables du Quesnoy. L'ensemble des formations landéniennes varie en épaisseur de 15 à 20 m.

On notera en outre la présence, à Bourlon (Ouest de Cambrai) et Blainville (Sud d'Arras), d'argile gris-vert correspondant à l'Yprésien inférieur.

Tous ces terrains sont enfin recouverts dans leur majorité de limons à silex et cailloutis, et de limons pleistocènes argilo-sableux dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres.

Les alluvions modernes et limons de lavage sont en général argileux ou sableux avec des niveaux de cailloutis et de silex, et précisent l'emplacement des vallées.

1.4.- Hydrogéologie.

Le sous-sol de la région étudiée comprend en fait plusieurs niveaux aquifères de différentes importances :

- . la nappe des limons, quand il existe à la base un niveau imperméable ; on la rencontre dans la région d'Arras et au Sud de Valenciennes.

- . la nappe des sables tertiaires souvent retenue par les niveaux argileux de la base du Landénien (argile de Louvil, argile de Clary).

- . la nappe de la craie qui intéresse les niveaux crayeux du Sénonien et du Turonien supérieur. Cet aquifère est le plus important et le plus utilisé du fait de ses débits souvent très importants et de la qualité de ses eaux, encore relativement bonnes.

- . les bancs crayeux, intercalés dans les marnes du Turonien moyen, peuvent recéler une nappe aquifère dont le débit est toutefois très faible.

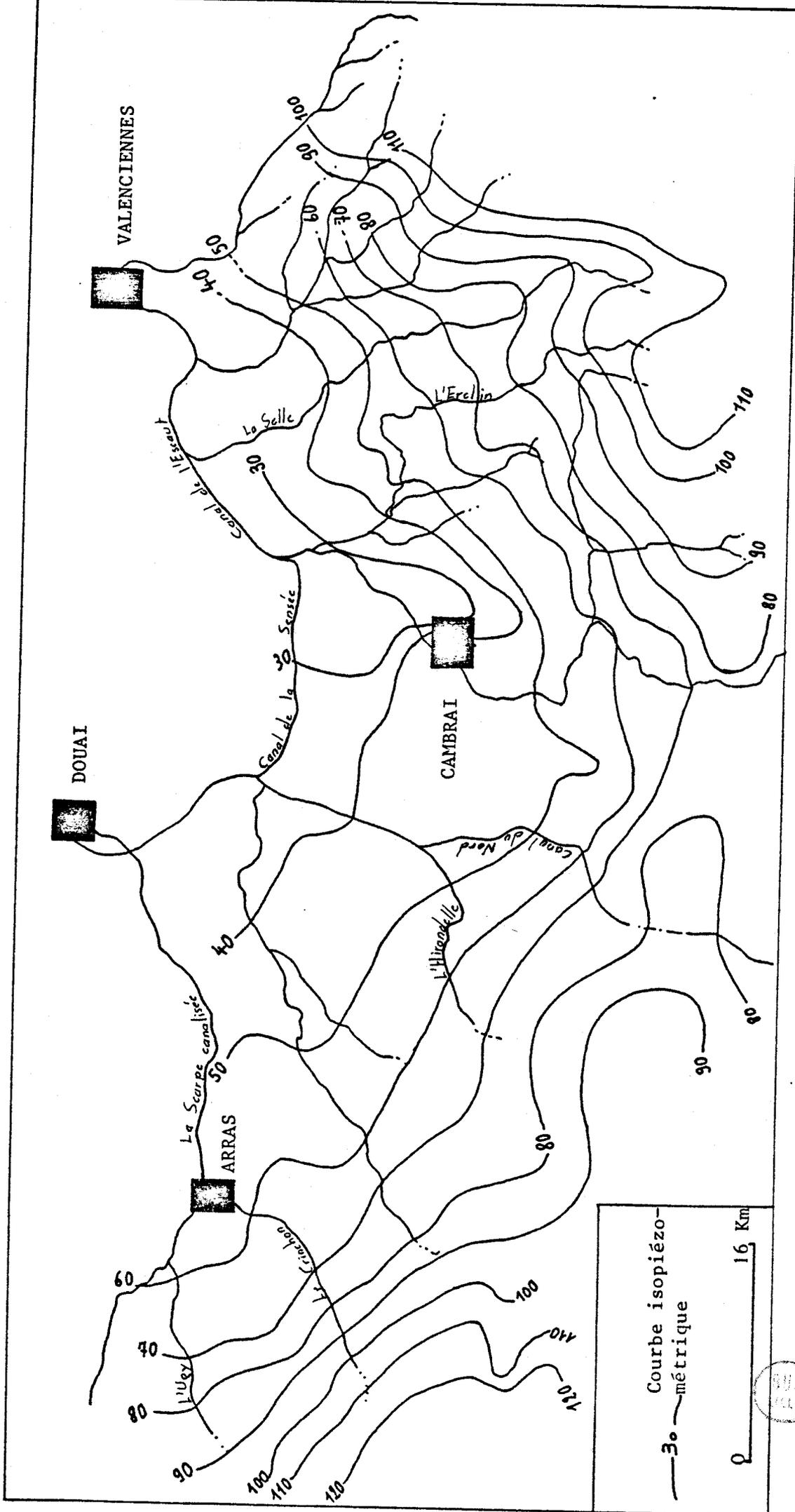


Fig. 1.5.- CARTE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DE LA CRAIE EN PERIODE DE BASSES EAUX

. citons enfin la nappe du Cénomanién que quelques rares forages profonds ont atteinte. La moitié supérieure constituée de craie blanche, comme par exemple entre Arras-St-Pol et Doullens, où la résistivité de ce faciès est forte (plus de 150 ohm-mètres) peut fournir de bonnes quantités d'eau, mais en fait, ces eaux ne sont que rarement exploitées à cause de leur forte minéralisation.

Nous nous sommes intéressés tout au long de cette étude à la "nappe de la craie" correspondant au Sénonien et au Turonien supérieur, niveaux les plus exploitables et les plus exploités en Artois et en Cambrésis.

1.4.1.- Piézométrie.

Deux séries de mesures piézométriques de la nappe de la craie ont été réalisées, l'une du 2 au 10 novembre 1978, correspondant à la période d'étiage, l'autre du 15 au 25 avril 1979, correspondant à la période de hautes eaux. Des données piézométriques issues de la C.G.E.* , du S.G.R. B.R.G.M.** et du SIDEN*** ont été intégrées de manière synchrone aux valeurs mesurées.

A) Examen des cartes piézométriques.

Le traçage des isopièzes et des lignes de courant nous a permis de dégager plusieurs points essentiels.

La carte des basses eaux (fig. 1-5) montre que, de manière générale, les lignes isopiézométriques s'orientent parallèlement aux limites des grands bassins de l'Escaut et de la Somme et des bassins de la Scarpe et de la Canche. On observe en effet trois directions principales d'écoulement : en Artois l'écoulement se fait vers le NE, au Sud de Cambrai vers le Nord et dans le reste du Cambrésis et de la partie occidentale de l'Avesnois vers le NW.

L'étude de cette carte permet par ailleurs de distinguer deux zones :

* Compagnie Générale des Eaux.

** Société Géologique Régionale du Bureau de Recherche Géologique et Minier.

*** Syndicat Intercommunal de distribution des Eaux du Nord.

- la première correspond aux altitudes élevées de la nappe rencontrées au SW d'Arras, au Sud de Cambrai et à l'Est et au SE de Cambrai, constituant les bordures du bassin versant du Haut Escaut et de la Scarpe.

- les grandes plaines du canal de l'Escaut, du canal du Nord et de la zone interfluve Scarpe-Sensée constituent la deuxième zone où l'on relève des côtes piézométriques faibles, marquées parfois par des exutoires tels que marais, étangs, remarquables par exemple au niveau de la Sensée. La surface piézométrique n'est donc pas régulière et la profondeur de la nappe, forte au niveau des plateaux de la première zone, chemine vers le Nord.

La forme de ces courbes isopièzes est évidemment fortement liée à l'allure du toit du Turonien moyen et à la topographie régionale. Toutefois, ces courbes peuvent localement s'incurver dans un sens ou dans un autre à la faveur d'une rivière ou d'une vallée sèche. On observe ainsi un drainage des eaux souterraines par la Scarpe, le ruisseau du Cojeul, le Crinchon, la Sensée, le canal de St-Quentin et la Selle. Il y a d'autre part, alimentation de la nappe de la Scarpe au niveau de Biache-St-Vaast à la suite des travaux d'aménagement du canal, également par l'Erclin au niveau de Rieux et d'Avesnes-les-Aubert. Cette alimentation se répercute sur la forme des lignes isopiézométriques dont la convexité est alors dirigée vers le Nord.

L'examen de la surface piézométrique permet d'autre part de calculer les gradients hydrauliques à partir de la formule :

$$i = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (\text{d'après CASTANY, 1967}).$$

avec $H_1 - H_2$ = différence piézométrique entre deux points

L = distance entre ces deux points.

Ce gradient est :

- fort (1/175) au SW de la ligne Wanquetin-Beaumont-les-Loges-Achiet le-Grand ainsi que dans le secteur de Cattenières et Séranvillers,

- moyen (1/250) au Sud d'une ligne allant de Ficheux à Marcoing et dans le reste du Cambrésis,

- faible (1/700) au NE d'une ligne allant d'Arras à Marcoing et à l'Ouest de Cambrai (Bourlon, Marquion, Inchy).

La première zone définie plus haut est donc le siège d'une nappe libre à filets convergents où la pente du profil de dépression est importante, ce qui indique un fort débit d'écoulement et une faible perméabilité.

La deuxième zone, où les gradients hydrauliques sont moyens ou faibles, sera caractérisée par une bonne perméabilité d'ensemble de l'aquifère et en particulier dans la partie basse des vallées. Les circulations en eaux souterraines seront lentes et les captages fourniront de grosses quantités d'eaux.

La carte des hautes-eaux établie en avril 1979 (fig. 1-6) est tout à fait comparable à la précédente ; les isopièzes conservent la même allure générale et s'orientent de manière identique. Plusieurs analyses locales sont donc nécessaires. La comparaison des côtes piézométriques (voir annexe I) indique une remontée générale de la nappe due vraisemblablement aux fortes précipitations de janvier à mars 1979, et aux importantes chutes de neige. Cette remontée n'est cependant sensible (plus d'un mètre) que dans le secteur de Le Cateau, St-Benin, Clary, Villers-Outreaux et du secteur Ouest d'Arras délimité par Gouy, Sombrin, Saulzy et Bavincourt. Il s'agit donc de régions situées sur -ou non loin de- la ligne de partage des eaux où les captages sont installés sur les hauteurs. Ceux-ci posséderont un coefficient d'emménagement faible et de mauvaises caractéristiques hydrauliques (CASTANY, 1967).

Dans le reste de la zone étudiée et plus particulièrement les vallées de la Scarpe, de la Sensée et de l'Escaut, les variations piézométriques sont faibles et le coefficient d'emménagement sera convenable.

Quelques puits enfin voient leur niveau baisser parfois de manière notable. On peut alors émettre l'hypothèse que la nappe ne s'est pas encore rechargée depuis l'hiver (profondeur de la surface piézométrique importante) ou que la zone d'implantation du captage est sujette au ruissellement, les précipitations n'alimentant que faiblement l'aquifère.

Des mesures mensuelles effectuées entre novembre 78 et avril 79 auraient permis d'affirmer ces hypothèses ou de conclure encore à une recharge antérieure suivie d'une décharge pendant la période de mesures (avril 1979).

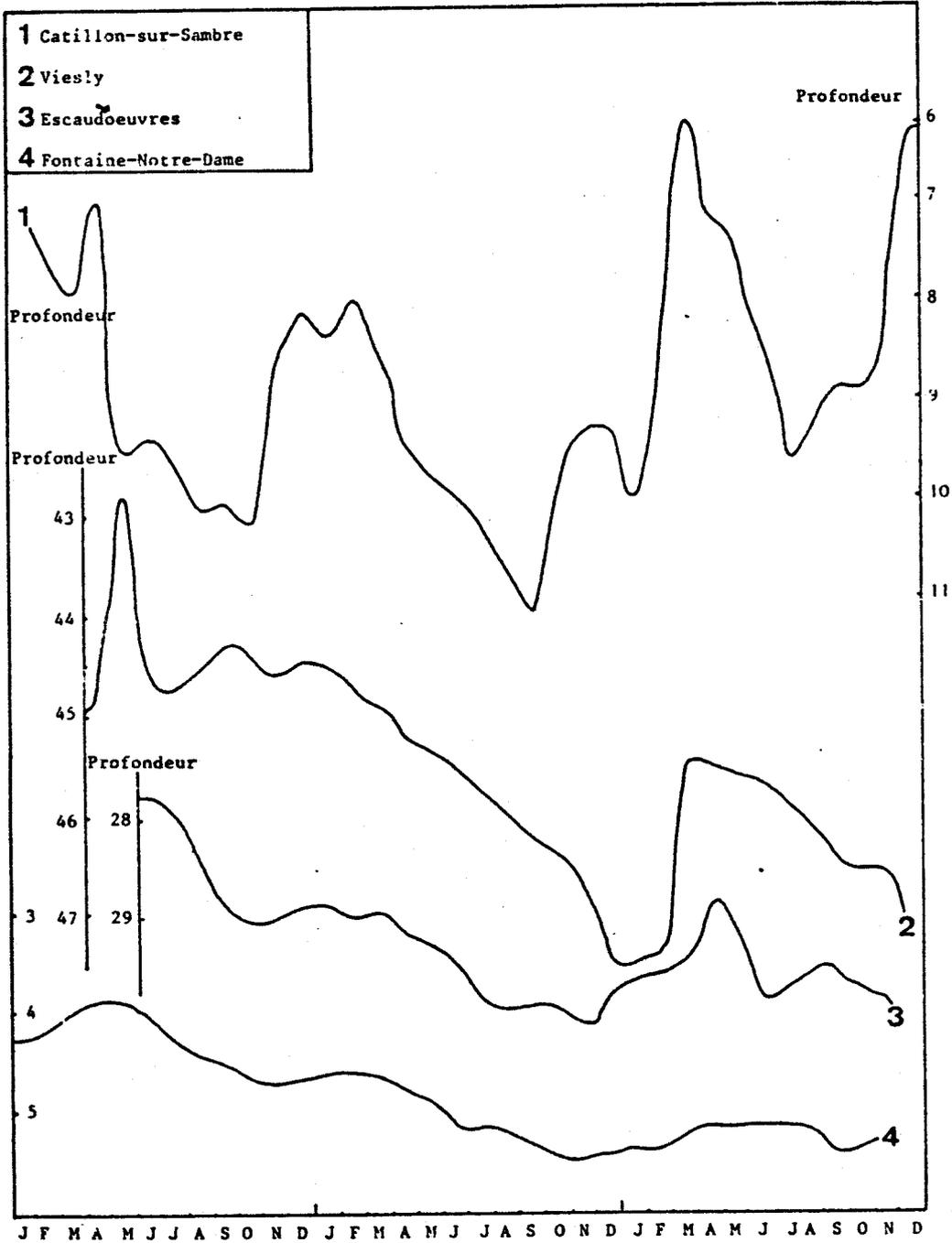


Fig. 1.7.- DIAGRAMME DE SURVEILLANCE PIEZOMETRIQUE



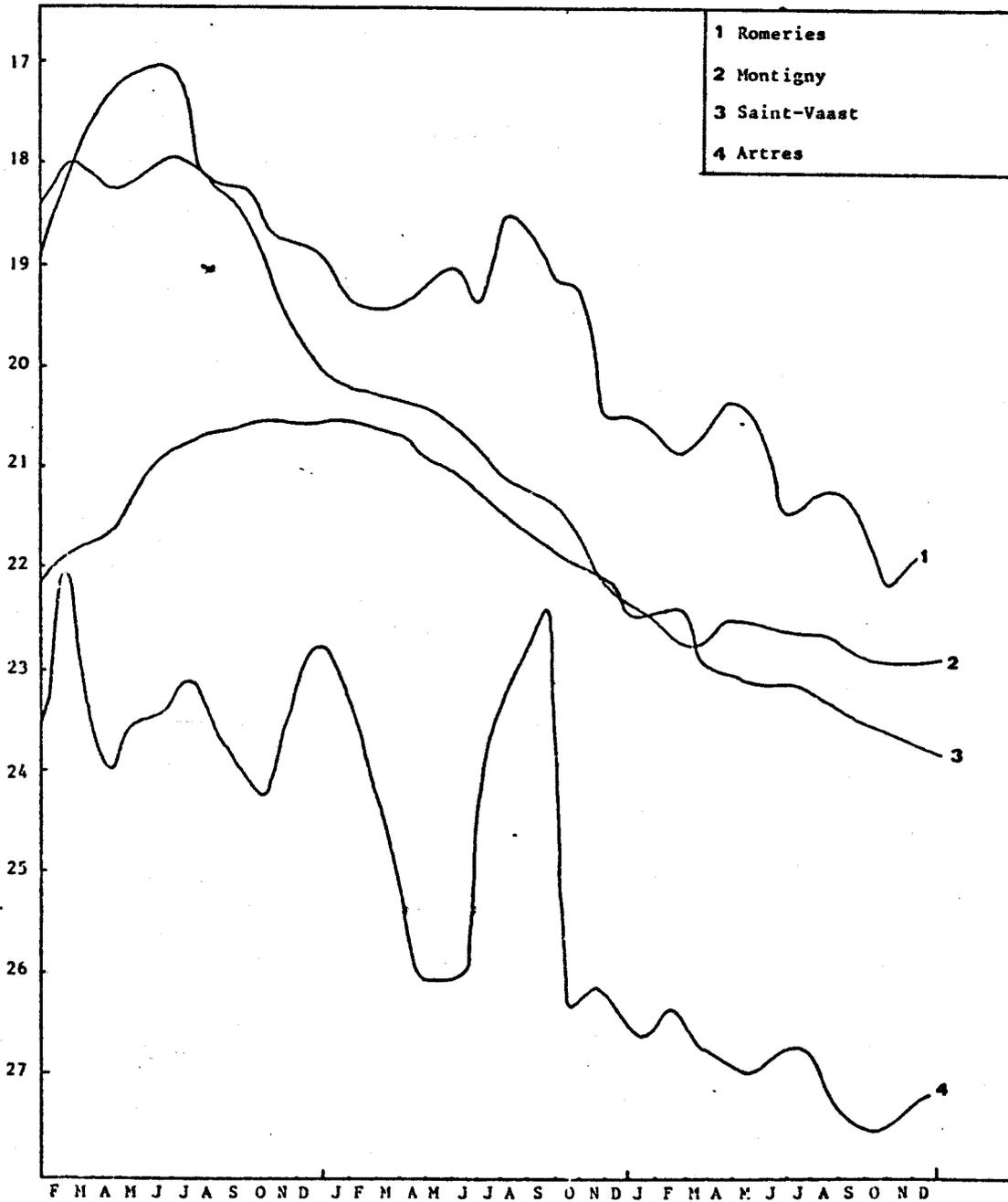


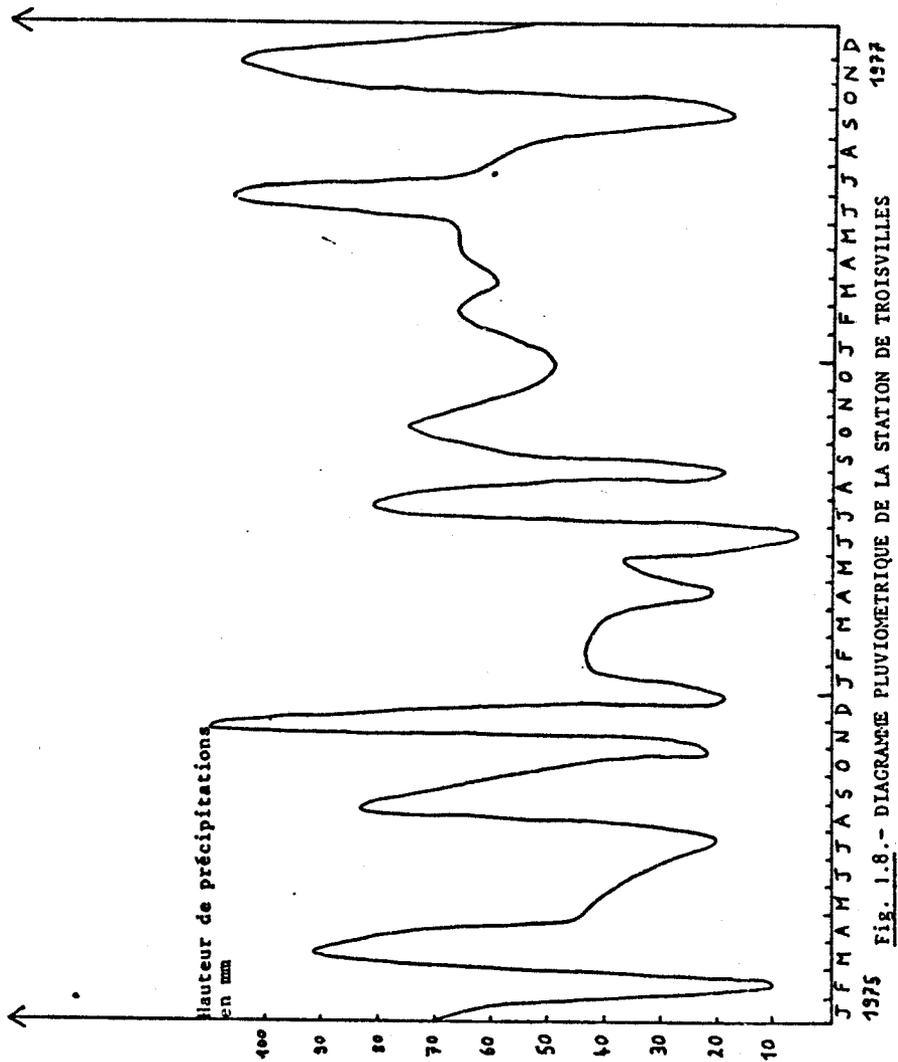
Fig. 1.7bis : DIAGRAMME DE SURVEILLANDE PIEZOMETRIQUE.



Commune	Débits distribués (m ³)		
	1975	1976	1977
Maretz	212.841	227.424	248.861
Montigny	29.253	34.204	33.504
Viesly	196.722	163.105	157.028

Tableau 1.1 : Evolution des consommations en eau





1975 1977
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D
Fig. 1.8.- DIAGRAMME PLUVIOMETRIQUE DE LA STATION DE TROISVILLES



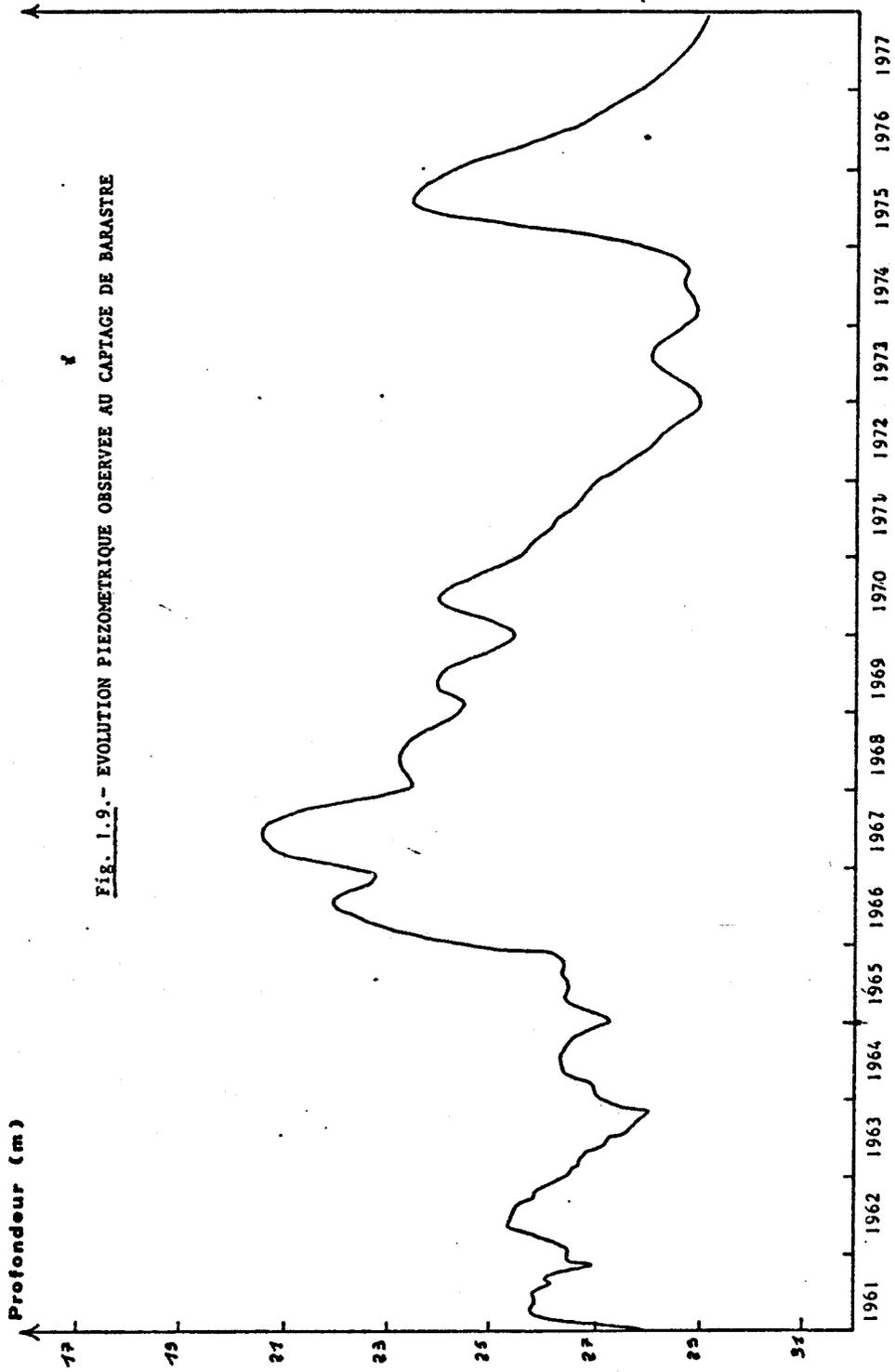
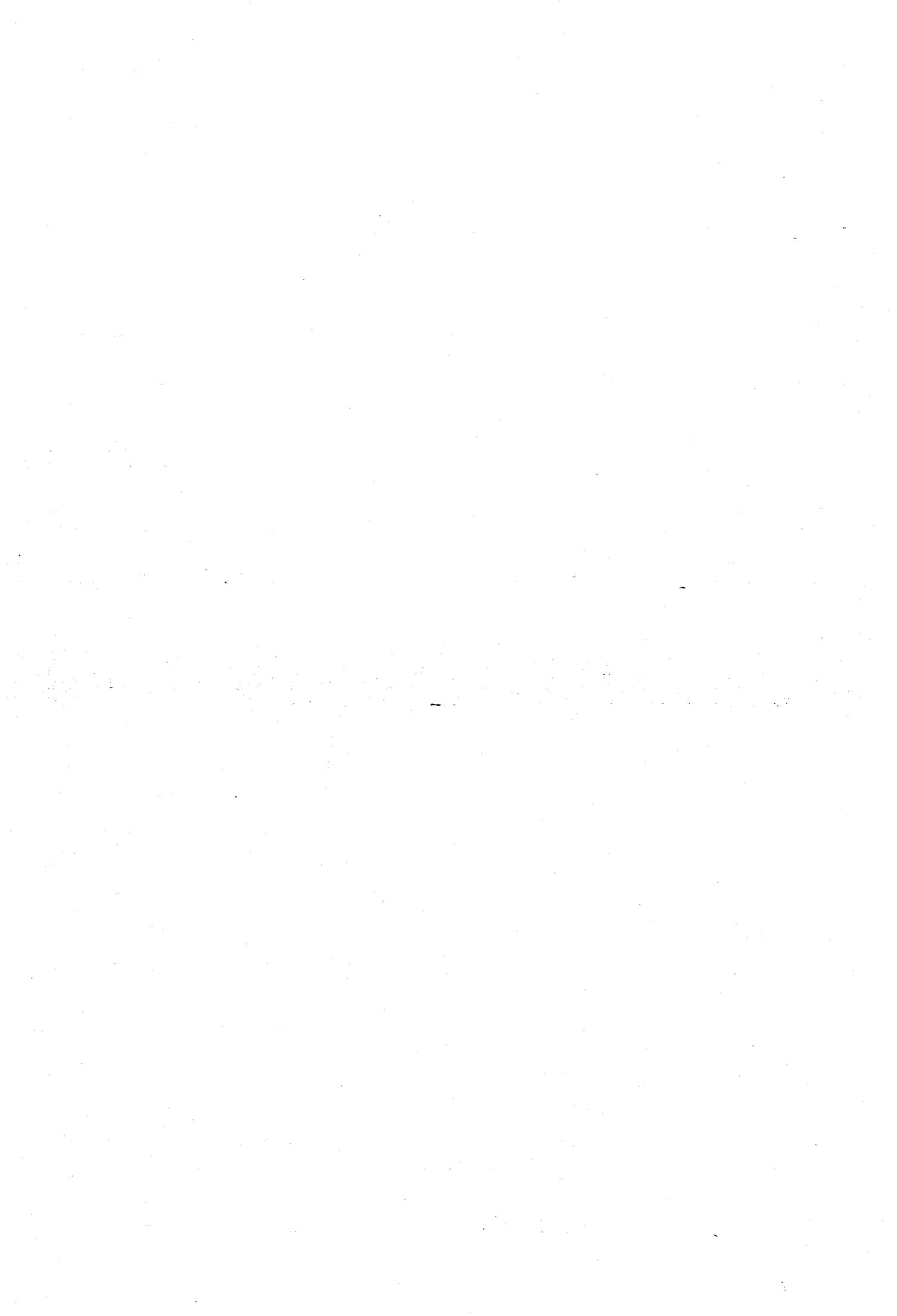


Fig. 1.9.- EVOLUTION PIEZOMETRIQUE OBSERVEE AU CAPTAGE DE BARASTRE





B) Surveillances piézométriques localisées.
.....

Plusieurs surveillances piézométriques fournies par le S.G.R. B.R.G.M. nous permettent de tirer certaines conclusions quant à la décharge et à la recharge de la nappe. Ces puits de surveillance sont répartis dans la zone agricole du Cambrésis et de l'Artois.

Les diagrammes piézométriques présentés (fig. 1-7) montre une baisse générale des niveaux d'eaux (à l'exception de Catillon-sur-Sambre). Cette baisse peut être plus ou moins accentuée, mais se manifeste dans la plupart des cas de façon spectaculaire au niveau de l'hiver 1976-77. On peut y retenir deux causes principales : soit un déficit d'alimentation par les pluies, soit une augmentation importante de la consommation en eau. Ces deux phénomènes peuvent évidemment se compléter.

Le diagramme pluviométrique de la station de Troisvilles (fig. 1-8) laisse apparaître une faiblesse des précipitations de décembre 1975 à juin 1976, qui se traduit sur la piézométrie par une baisse importante des niveaux, sauf pour les communes d'Artres et de Romeries où le pic pluviométrique de juillet 1976 (voir fig. 1-7) est la conséquence d'une légère remontée des niveaux.

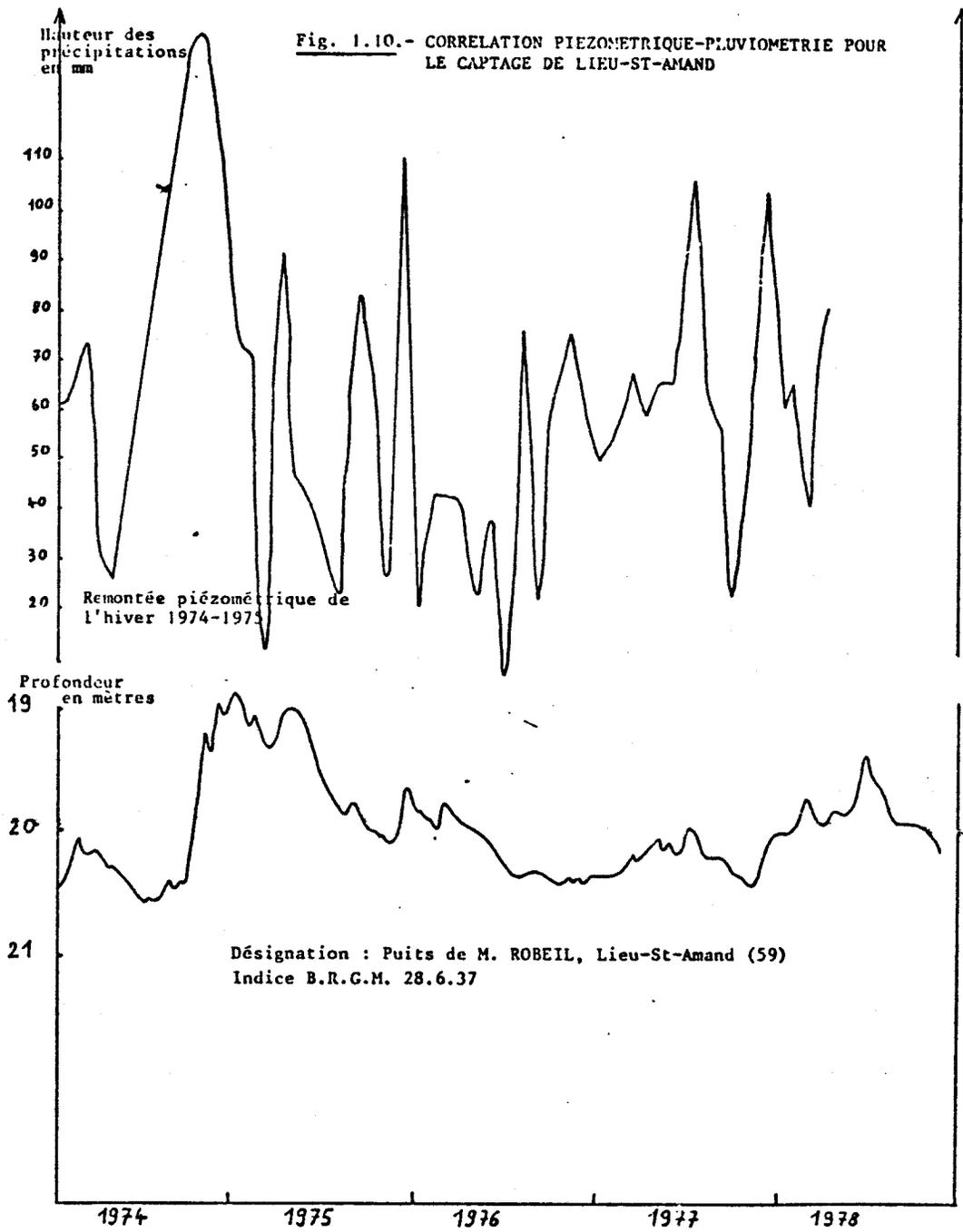
L'évolution de la consommation en eau pour la période 1975-1977 sur trois secteurs caractéristiques (tableau n° 1-1) confirme le fait que la diminution de consommation à Viesly a pu permettre la recharge de la nappe enregistrée dès mars 1977 ; au contraire pour les deux autres communes, l'augmentation des prélèvements a contrarié cette recharge. La faible largeur du pic piézométrique de juin 1977 à Maretz correspond à un épisode pluvieux important.

C) Analyse de diagrammes caractéristiques.
.....

Le site de Barastre, situé à l'Est de Bapaume, offre un bon exemple de variations piézométriques saisonnières (fig. 1-9). On distingue en effet trois zones importantes :

- de 1961 à 1965, une période de relative sécheresse est enregistrée par des profondeurs importantes (26 à 28 mètres),

- de 1966 à 1970, une période d'alimentation importante conditionne la remontée de la nappe,



- la sécheresse qui a sévi de 1971 à 1974 s'est manifestée par une baisse des niveaux piézométriques de plus de 5 mètres.

De manière plus précise, on constate une sensibilité de la nappe vis-à-vis des variations pluviométriques. L'automne et l'hiver sont toujours des périodes de décharge de la nappe et les pluies tombées pendant cette période ne sont enregistrées par une remontée qu'au printemps et même parfois au début de l'été.

La corrélation précipitations-piézométrie sur une période donnée par un captage donné, permet d'approfondir ces éléments. La fig. 1-10 montre l'évolution piézométrique par rapport aux précipitations d'un puits situé à Lieu-St-Amand, les prélèvements étant très faibles (puits particulier). On constate que pour l'hiver 1974-1975 (très pluvieux après une longue période de sécheresse), la piézométrie coïncide relativement bien avec les hauteurs de pluie si l'on excepte un léger retard qui doit correspondre au temps d'infiltration de la pluie, ce retard à l'infiltration étant le plus souvent dû à la perméabilité de la zone non saturée plus qu'à son épaisseur.

La faible influence des pluies de l'été 1977 montre l'importance de l'action de la végétation et de la température lors de l'infiltration.

1.4.2.- Carte de l'épaisseur de craie mouillée (fig. 1-11).

Celle-ci est déduite de la carte piézométrique levée en novembre 1978 et de la carte des isobathes du toit du Turonien moyen, que nous considérons comme la base de l'aquifère Turonien supérieur-Sénonien.

- En Artois : les valeurs d'épaisseur d'aquifère utile sont très élevées au Sud de Douai (plus de 50 mètres), fortes (30 mètres) dans la partie Ouest de l'Artois, au niveau de la vallée du Gy, au Sud d'Arras dans la vallée du Cojeul et dans le secteur situé au WNW de Cambrai. Ces zones sont donc favorables à l'implantation de captages. Des valeurs faibles (10 mètres) sont décelées à l'Ouest de Bapaume et au NE d'Arras où parfois affleurent les marnes du Turonien moyen. Il faut enfin noter l'influence de la faille majeure de l'Artois qui provoque un relèvement des terrains crétacés au NE d'Arras et explique la faible épaisseur d'aquifère utile.

- En Cambrésis : les valeurs d'épaisseur de craie mouillée sont fortes dans la région même de Cambrai en augmentant régulièrement au fur et à mesure que l'on monte vers le Nord, et faibles au Sud de Valenciennes et dans la région de Le Cateau où parfois des valeurs nulles apparaissent ; celles-ci déduites directement de la différence entre piézométrie et substratum sont sujettes à des erreurs cartographiques, une zone aquifère de faible épaisseur (moins de 5 mètres) peut cependant exister.

1.4.3. Caractéristiques hydrauliques.

L'élaboration d'un modèle mathématique en vue de la prévision à court ou long terme de l'évolution piézométrique d'une nappe nécessite une bonne connaissance des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère telles que la transmissivité et le coefficient d'emménagement. Ces données nous sont apportées par différentes méthodes : pompages d'essai, essai Lefranc, essai Lugeon, micromoulinet.

De nombreuses interprétations de pompages d'essai nous sont fournies par l'étude de CAULIER (1974), sur des puits existant dans le Nord de la France. Toutefois, la modélisation mathématique faisant appel à la discrétisation, il nous est nécessaire de connaître en chaque point une valeur de transmissivité et de coefficient d'emménagement. Dans ce cas, une approche théorique de ces caractéristiques peut se réaliser en considérant plusieurs hypothèses :

- les valeurs de transmissivité varient en fonction de l'épaisseur de craie mouillée : plus cette épaisseur augmente, plus la perméabilité diminue (CAULIER, 1974). Les valeurs de perméabilité diminuent également quand la distance au drainage augmente en nappe libre,

- les observations faites sur enregistrement au micromoulinet montrent que seule la partie supérieure de la nappe de la craie est perméable (environ une vingtaine de mètres), et dans le cas où l'on applique la formule $K = \frac{T}{h}$ la perméabilité est sous évaluée.

K = perméabilité,

T = transmissivité,

h = épaisseur d'aquifère,

- enfin, la perméabilité en nappe libre, même sous recouvrement tertiaire est environ 100 fois plus forte dans les vallées où la craie est généralement plus fissurée que dans les zones de plateaux.

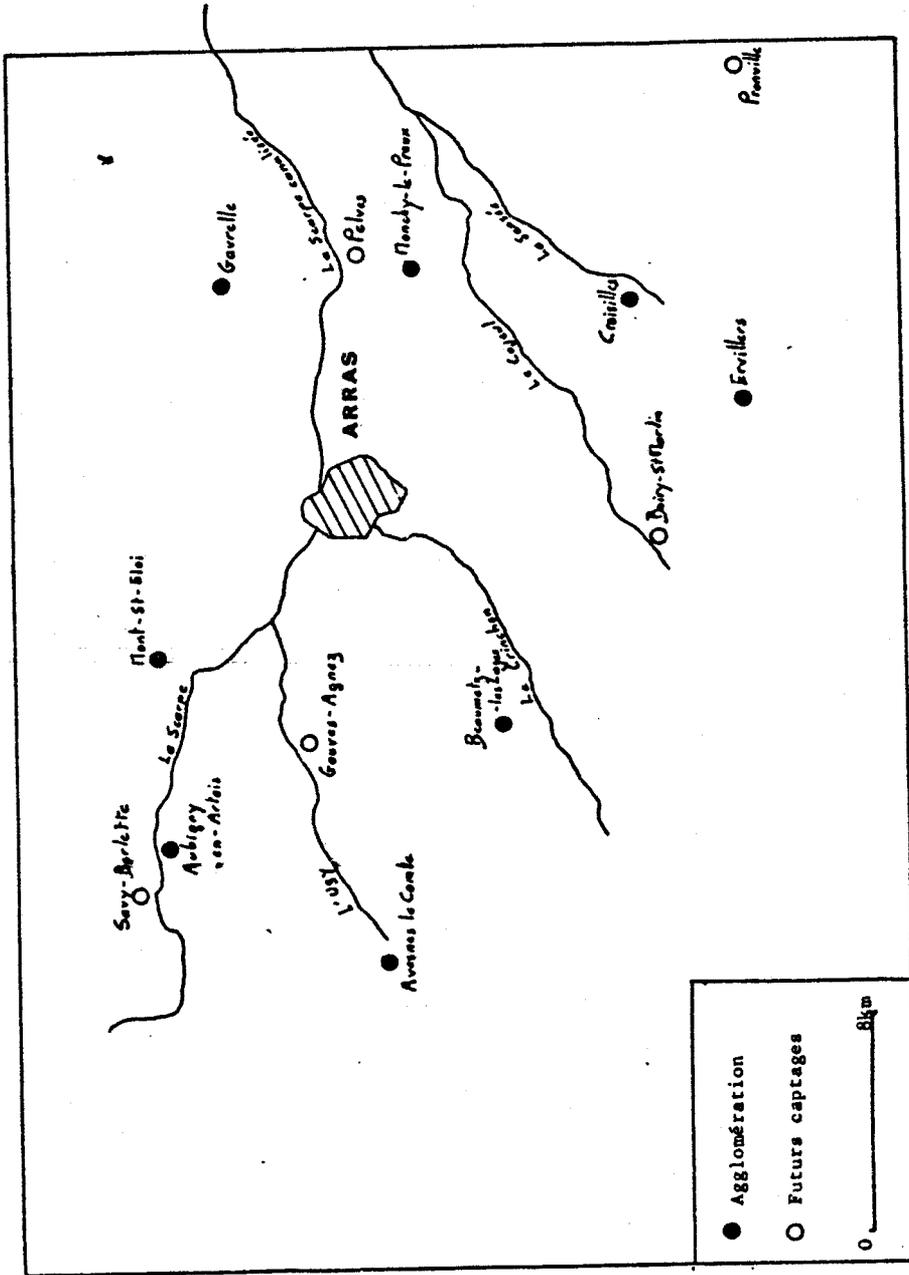


Fig 1.12 : Implantation des captages de l'Artois



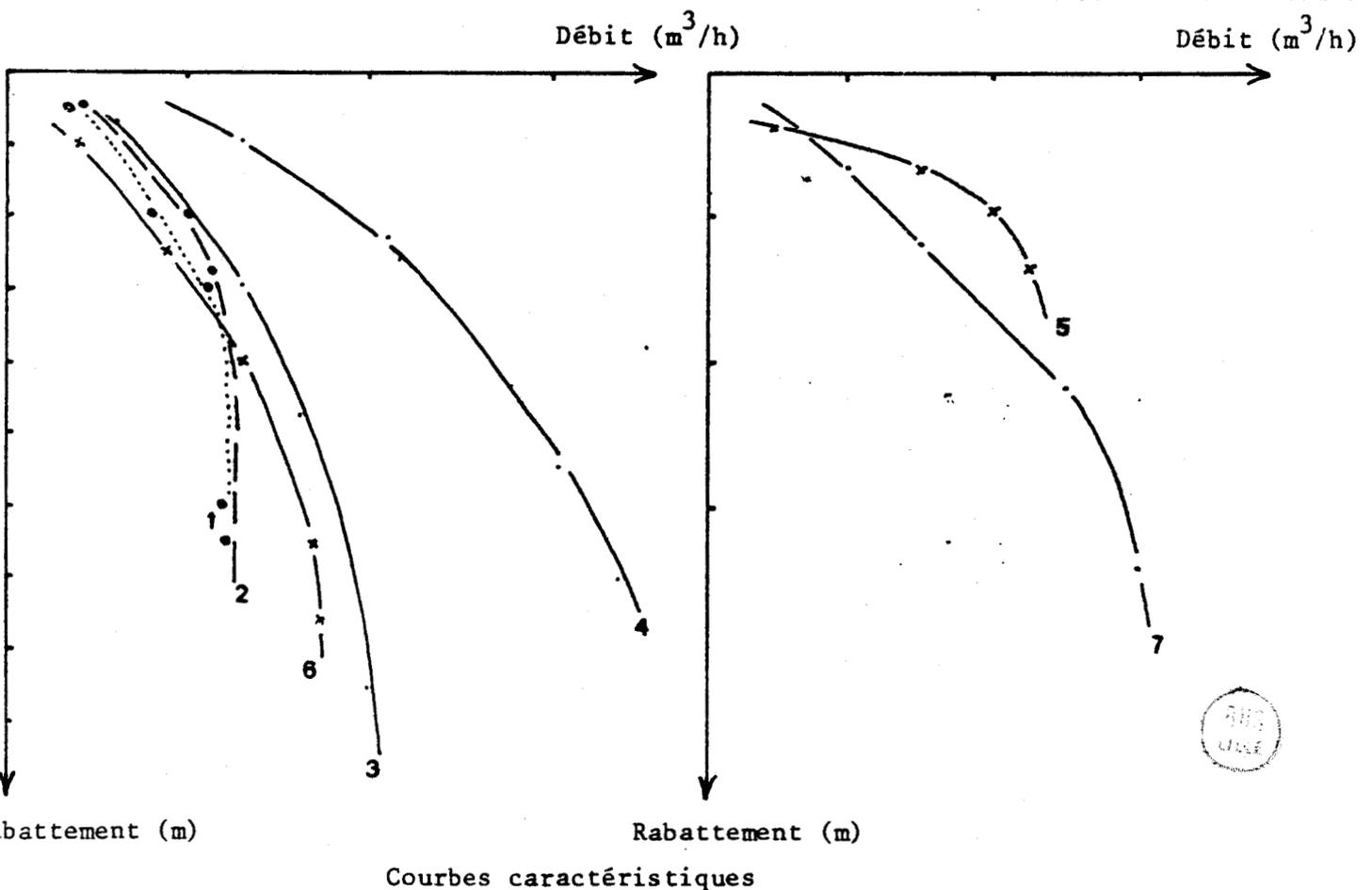
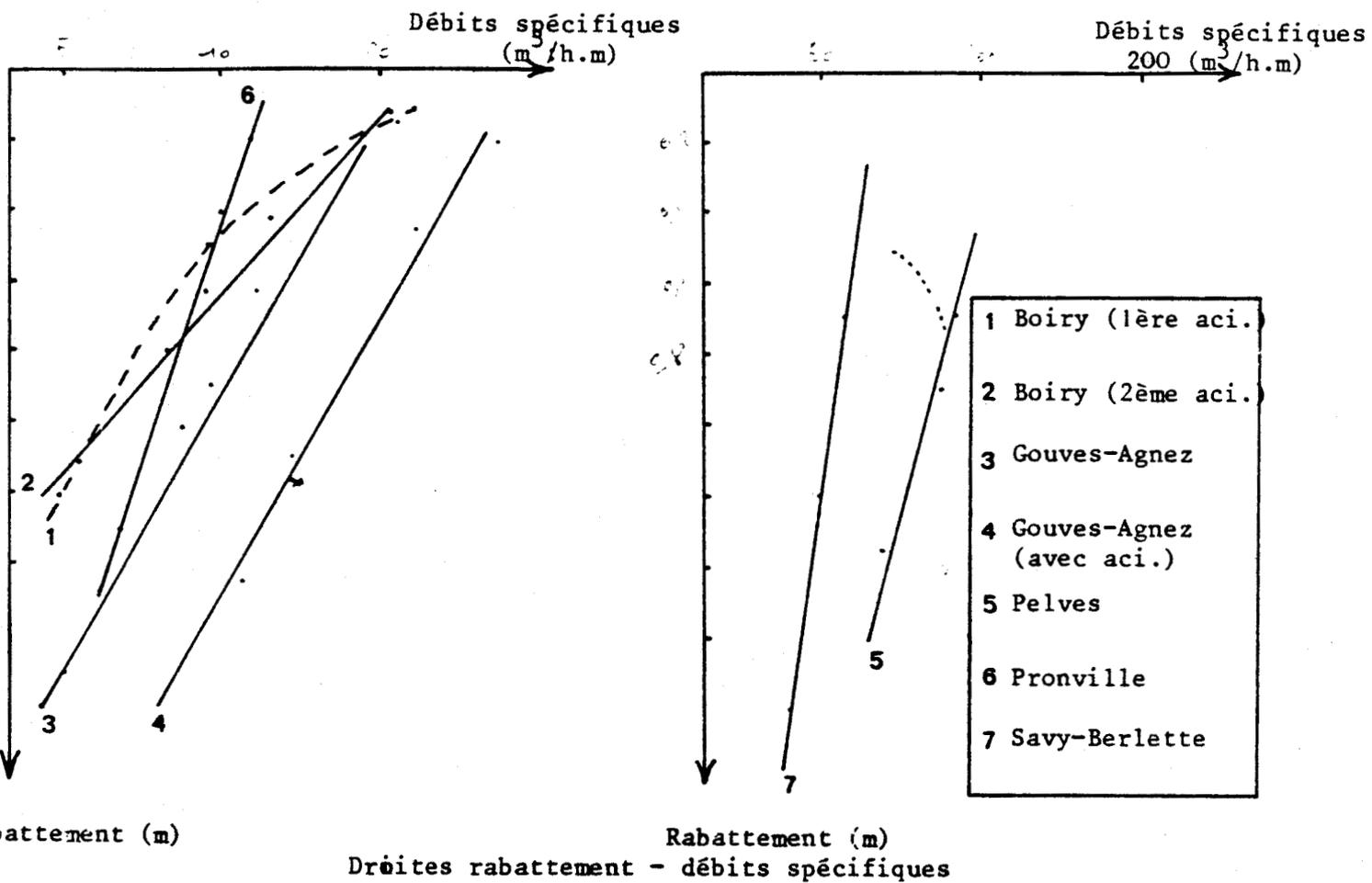


Fig 1.13 : Courbes caractéristiques obtenues d'après les pompages d'essai

A) Analyse de quelques pompages d'essai.

Dans le cadre de la restructuration des besoins en eau potable en Artois, dix nouveaux forages ont été programmés. Les caractéristiques techniques et les données de pompage de cinq d'entre eux nous sont parvenus à ce jour.

L'interprétation de telles données ne peut se faire que lorsque la géométrie du réservoir, ses paramètres physiques intrinsèques, les relations éventuelles avec d'autres nappes et encore les limites à potentiel imposé sont bien définies (MANIA, 1978).

L'implantation de ces captages est indiquée sur la fig. 1-12

Dans un premier temps ont été réalisées des pompages d'essai par paliers successifs dans le but de déterminer le débit maximal d'exploitation et d'apprécier de façon globale le comportement de la nappe soumise à un pompage.

Les courbes caractéristiques obtenues (fig. 1-13), ainsi que les courbes de remontée et les droites rabattements-débites spécifiques, montrent le bon comportement de la nappe sur la plupart des sites étudiés sauf à Boiry où les deux acidifications n'ont donné aucune amélioration sensible. L'acidification réalisée à Gouves a permis, par contre, d'obtenir un débit de 180 m³/h soit un accroissement de productivité de 100%.

Plusieurs méthodes d'interprétation ont été utilisées selon la qualité des données recueillies (débit non constant, croissant ou décroissant, pompage de trop faible durée.....).

Les valeurs de transmissivité sont reportées dans le tableau. Plusieurs remarques sont à formuler :

- le pompage d'essai réalisé à Boiry-St-Martin sur le forage principal et sur un piézomètre distant de 10 m donne pour les deux interprétations (forage et piézomètre) des résultats nettement différents. Le rabattement obtenu au piézomètre ne dépasse pas 0,5 mètre pour un débit de 60 m³/h, alors qu'il est maximal dans le forage. Il est donc raisonnable de conclure à un colmatage du puits principal et à un mauvais développement du puits.

L'utilisation du programme Theis (MANIA, 1976), programme d'analyse automatique des données, nous a permis de confronter les résultats

acquis par méthode graphique et les résultats théoriques calculés (tableau 1.2).

	Caractéristiques hydrauliques	Méthode graphique	Méthode automatique	Différence en pourcentage
Piézo	$T \text{ m}^2/\text{s}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	21
Piézo	S	$0,32 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	268

Tableau 1.2: Forage de Boiry-Saint-Martin - Nappe de la craie

On remarque donc une forte divergence entre les deux méthodes qui correspond au manque de données pour l'application de la méthode automatique.

- Les transmissivités calculées pour les autres sites indiquent une bonne correspondance des méthodes utilisées,
- l'acidification réalisée sur le site de Gouves-Agnez a permis d'améliorer de manière sensible la transmissivité,
- aucune valeur de coefficient d'emménagement ne peut être donnée du fait de l'absence de piézomètre, celui qui peut être calculé à Boiry n'est pas significatif.

B) Analyse des pertes de charge.

L'exploitation d'un ouvrage de captage entraîne des pertes de charge se traduisant, lorsque le débit est important, par des rabattements élevés.

Les pertes de charge comprennent le rabattement au puits dû au passage de l'eau à travers le milieu poreux, plus "l'effet du puits" se reproduisant le long du tubage, au niveau de la crépine et des accessoires du puits, au niveau du massif de gravier filtrant et dans la zone contaminée par la boue éventuellement.

Le rabattement total s , dans un forage, est donné par la relation :

$$s = AQ + BQ^n \quad (\text{CASTANY, 1968})$$

AQ représente les pertes de charge dans la formation aquifère.

BQ^n correspond aux pertes de charge dues à l'équipement du puits. On considère généralement que la constante n, variable suivant les sondages est voisine de 2.

D'où :

$$s = AQ + BQ^2$$

Un essai de pompage à plusieurs paliers de débits successifs permet de calculer les coefficients A et B si l'on admet que :

$$s/Q = A + BQ$$

A représente le rabattement spécifique net du puits, indépendant du débit, par opposition au rabattement brut $A + BQ$ fonction du débit, et soumis aux pertes de charge quadratiques (BESBES, 1974).

Le tableau 1.3 récapitule les valeurs de coefficients A et B obtenus de manière graphique. On y constate la faible influence de la 2ème acidification réalisée sur le site de Boiry-Saint-Martin ainsi que les fortes valeurs du coefficient B pour ce captage.

L'implantation de captages dans les vallées ou vallons secs est incontestablement plus rentable et donne de bons résultats, les caractéristiques hydrauliques sont bonnes et les pertes de charge moins importantes. L'étude du captage de Boiry-Saint-Martin permet de mettre en évidence la difficulté de réaliser un puits correct dans une zone où les caractéristiques hydrauliques sont supposées défavorables (zone de plateaux, profondeur de la nappe trop importante, épaisseur d'aquifère faible).

Communes	Boiry-St-Martin	Pelves	Pronville	Savy-Berlette	Gouves-Agnez
Méthode de Jacob au forage	$1,5 \cdot 10^{-3}$ (2° acidification)	$1,8 \cdot 10^{-2}$			
Méthode de Jacob au piézomètre	$2,5 \cdot 10^{-2}$ (1° acidification)				
Méthode de Jacob avec débits spécifiques		$6,3 \cdot 10^{-3}$		$0,65 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$ (sans acidification)
Méthode de la remontée de Theis	$5,2 \cdot 10^{-4}$ (1° acidification) $3,7 \cdot 10^{-4}$ (2° acidification)	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$ (sans acidification) $1,3 \cdot 10^{-3}$ (avec acidification)
Méthode de Cooper Jacob			$3,3 \cdot 10^{-3}$		$1,5 \cdot 10^{-3}$ (sans acidification) $3,7 \cdot 10^{-3}$ (avec acidification)

Tableau 1.3 : Valeurs des transmissivités obtenues par pompage d'essai (en m²/s)

DEUXIEME PARTIE

HYDROLOGIE ET CLIMATOLOGIE

Dans le cadre d'une gestion des ressources en eau, il est important et nécessaire d'évaluer les réserves souterraines et de permettre la connaissance, le plus précisément possible, des facteurs conditionnant les débits d'écoulement souterrain, tels que les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement. Les débits des rivières et canaux rendent compte du stade de vidange du réservoir et de l'ampleur du ruissellement qui se surimpose aux débits des nappes (MANIA, 1978).

La réalisation de cette étude a pu être menée en recourant au modèle de simulation MMØ1 qui utilise diverses possibilités de stockage avec une suite de fonctions mathématiques rationnelles en tenant compte des mouvements de l'humidité et des stockages jusqu'à ce que la vidange du système se fasse. Il y a donc un phénomène continu, simulé et calculé de manière synchrone : l'évapotranspiration, la vidange du système et les phénomènes d'écoulements qu'ils soient de surface, hypodermiques ou intervenant dans la zone saturée.

2.1.- Rappels de quelques notions hydrogéologiques.

2.1.1.- Notion de système aquifère.

La simulation hydrométéorologique est une phase essentielle de la gestion des systèmes aquifères et elle nécessite la connaissance préalable :

- des éléments statiques (fig. 2-1) dont la géométrie du réservoir, l'extension des affleurements et les recouvrements, la morphologie du bassin et la nature des porosités,

- des éléments dynamiques (fig. 2-2) comprenant les entrées et les sorties d'eau : débits de pompages, émergences, écoulements souterrains et débits d'alimentation,

et permet d'aboutir à un bilan hydrologique prenant en compte diverses unités de stockage hydrogéologique (craie, sables, marnes altérées, etc....) qui contribuent à l'élaboration des principales composantes de l'écoulement de surface selon des processus réglés par des paramètres physiques ou d'ajustement.

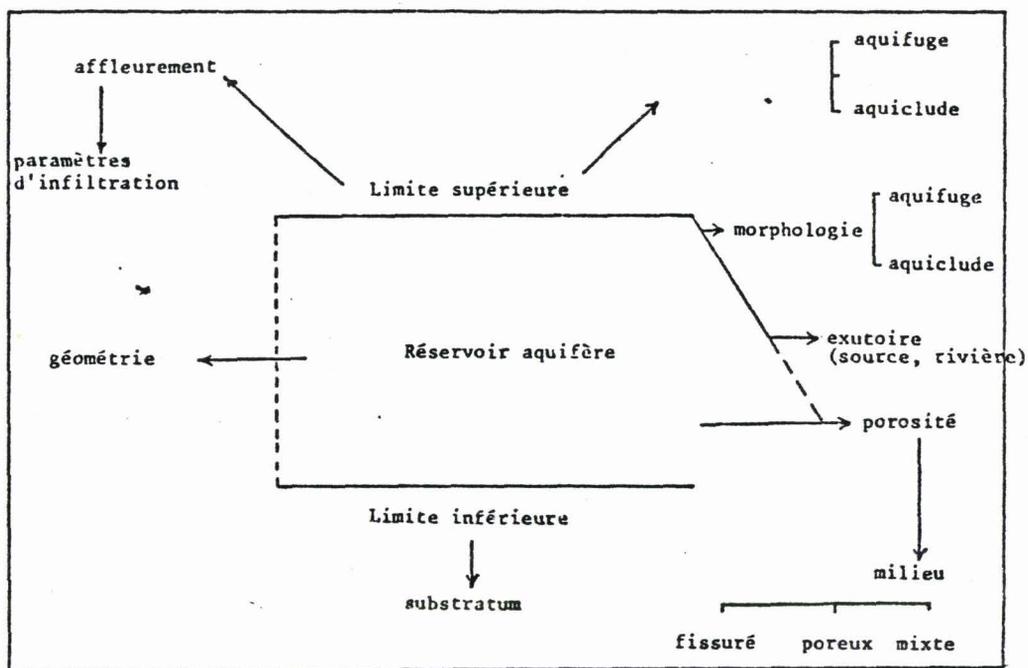


Fig. 2.1.- ELEMENTS STATIQUES

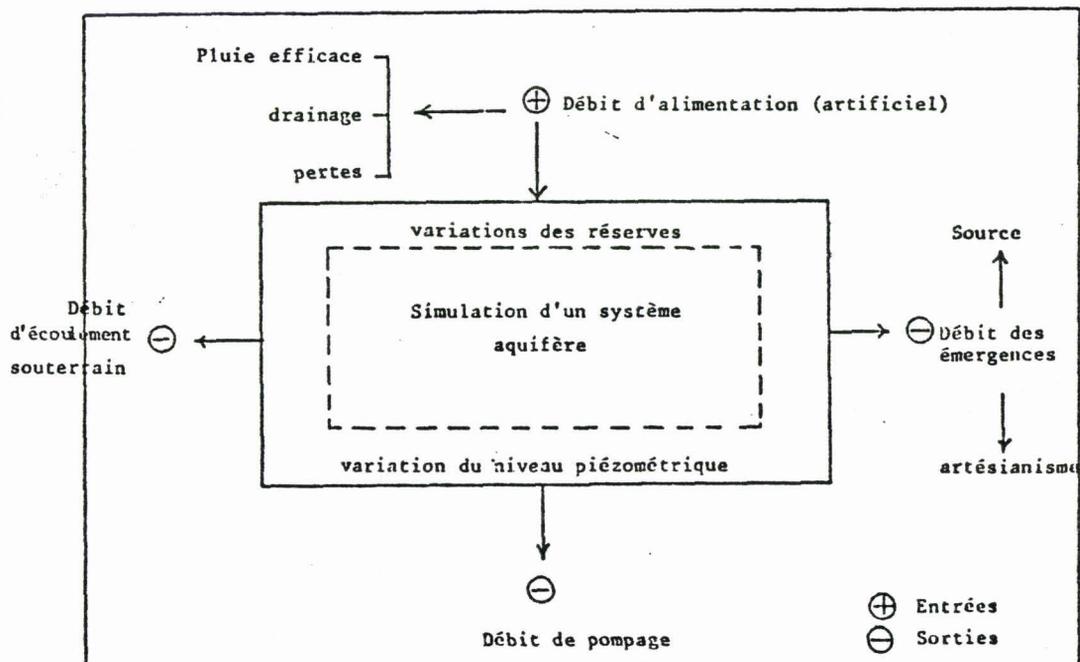


Fig. 2.2.- ELEMENTS DYNAMIQUES



2.1.2.- Alimentation.

Il s'agit essentiellement, dans la région étudiée, des précipitations sur un bassin versant ou une région donnée. Ce terme de précipitations comprend toutes les eaux météoriques atteignant le sol (neige, grêle, pluie). Les données pluviométriques sont évaluées par plusieurs pluviomètres répartis sur l'ensemble des sous-bassins étudiés.

Il est important, compte-tenu de l'importance de certains sous-bassins de visualiser la pluviométrie par une carte de distribution spatiale des précipitations (fig. 2-3), ce qui permet d'introduire ou une valeur moyenne ou deux valeurs pluviométriques correspondant, l'une à l'amont du bassin, l'autre à l'aval.

On constate en effet une pluviométrie plus importante (750 à 800 mm) en amont des bassins versants de la Selle, de la Rhonelle et de l'Ecaillon, qu'en aval (600 à 650 mm), la pluviosité annuelle augmentant globalement dans le même sens que l'altitude.

Dans le cas d'une simulation hydrogéologique le bilan hydrologique, base de calcul des apports et des pertes d'eau s'écrit :

$$P = R + E + J \text{ (CASTANY, 1967),}$$

avec

- P = hauteur de précipitations en mm,
- R = ruissellement de surface en mm,
- E = évapotranspiration réelle en mm,
- I = infiltration en mm.

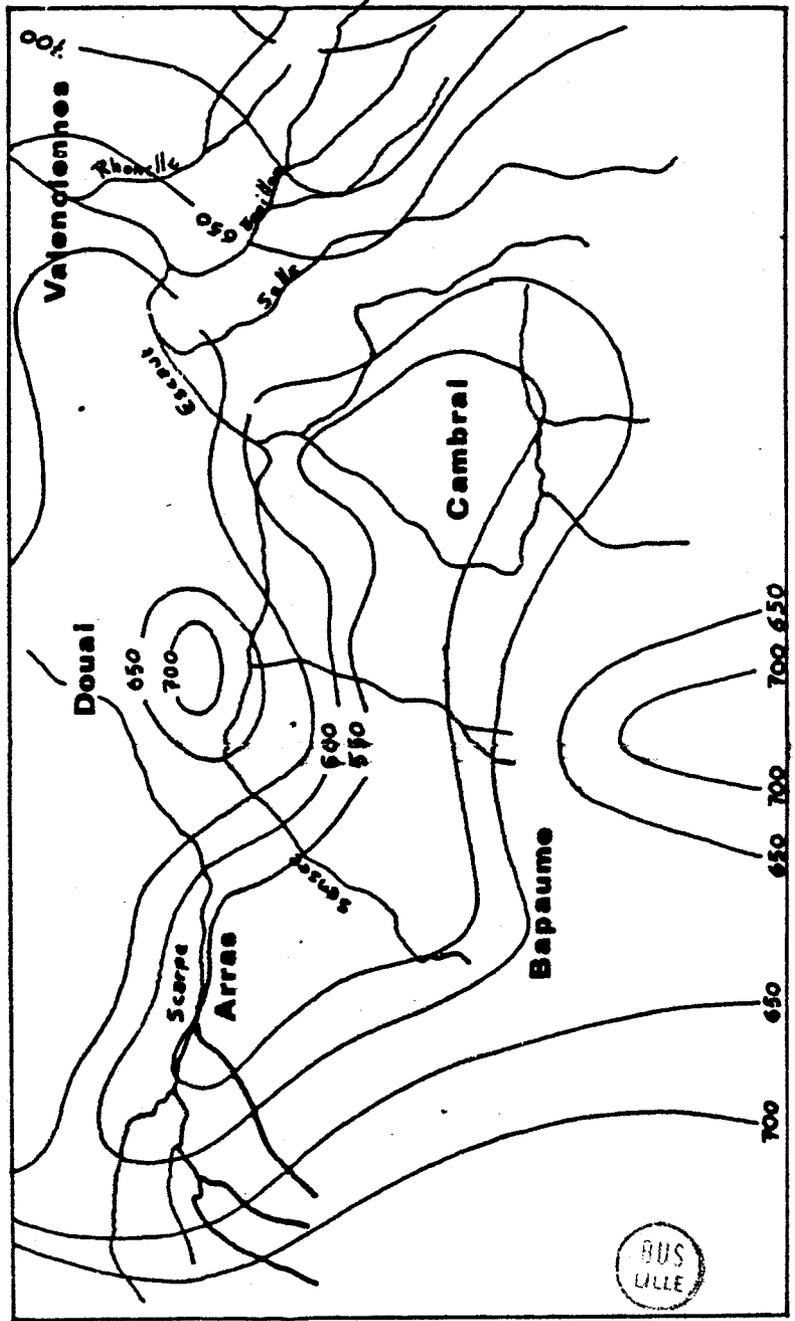
2.1.3.- Infiltration.

Une fraction I_1 de l'infiltration circule dans le sol et le sous-sol et réapparaît après un trajet souterrain plus ou moins long pour alimenter le réseau hydrographique (écoulement souterrain). Une fraction I_2 , destinée au renouvellement de la quantité d'eau continue dans le sol et le sous-sol, circule également, il s'agit de l'écoulement hypodermique.

L'infiltration efficace qui alimente la nappe est soumise à plusieurs facteurs :

- la perméabilité et le taux d'humidité à l'instant de la précipitation,
- la pluviométrie (durée et nature de la précipitation),
- la morphologie du sol et sa couverture végétale.

Fig. 2.3 : Carte de distribution spatiale des précipitations (mm). Année 1970



De même la présence d'un sol imperméable favorisera le ruissellement plutôt que l'infiltration.

2.1.4.- Evapotranspiration.

Elle correspond à la somme de l'évaporation dans l'atmosphère et de la transpiration des plantes. Les facteurs intervenant dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle sont principalement la température et la latitude du lieu. Diverses formules de calcul de l'évapotranspiration ont été proposées et nous retiendrons ici celle de THORNTHWAITE :

$$E_p = 1,6 \left(10 \frac{T}{I}\right)$$

où E_p est l'évapotranspiration mensuelle en millimètres, avec

$$= 0,49239 + 1792 \cdot 10^{-5} I - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 675 \cdot 10^{-9} I^3$$

T = température moyenne du mois considéré

I = somme des indices (i) mensuels de l'année avec :

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$$

Les valeurs de E_p , calculées pour chaque mois, sont corrigées au moyen d'un coefficient K qui tient compte du nombre de jours et du nombre réel d'heures d'ensoleillement.

Dans le cas où ETP (évapotranspiration) = P (précipitation), la réserve facilement utilisable par les plantes (RFU) est maximale,

. si $ETP > P$, RFU diminue.

Dans ce cas, il n'y a pas d'infiltration.

. si $ETP < P$, RFU augmente et si elle est reconstituée à son taux maximal de 100 mm, il y aura infiltration.

Ces hypothèses de travail sont toutefois susceptibles d'être modifiées selon les sites aux régions étudiées (zones de plateaux, etc...).

Il peut apparaître en effet qu'en période estivale (DUERMAEL, MORFAUX, 1978) le taux de saturation de la craie, à 1,50 mètre de profondeur, ne descendait jamais au-dessous de 55% et que, par ailleurs, le point de flétrissement des plantes n'était jamais atteint, ce qui indique un renouvellement de l'eau perdue par évapotranspiration.

2.2.- Simulation hydrométéorologique.

2.2.1.- Principe.

On distingue dans des conditions naturelles non perturbées, trois

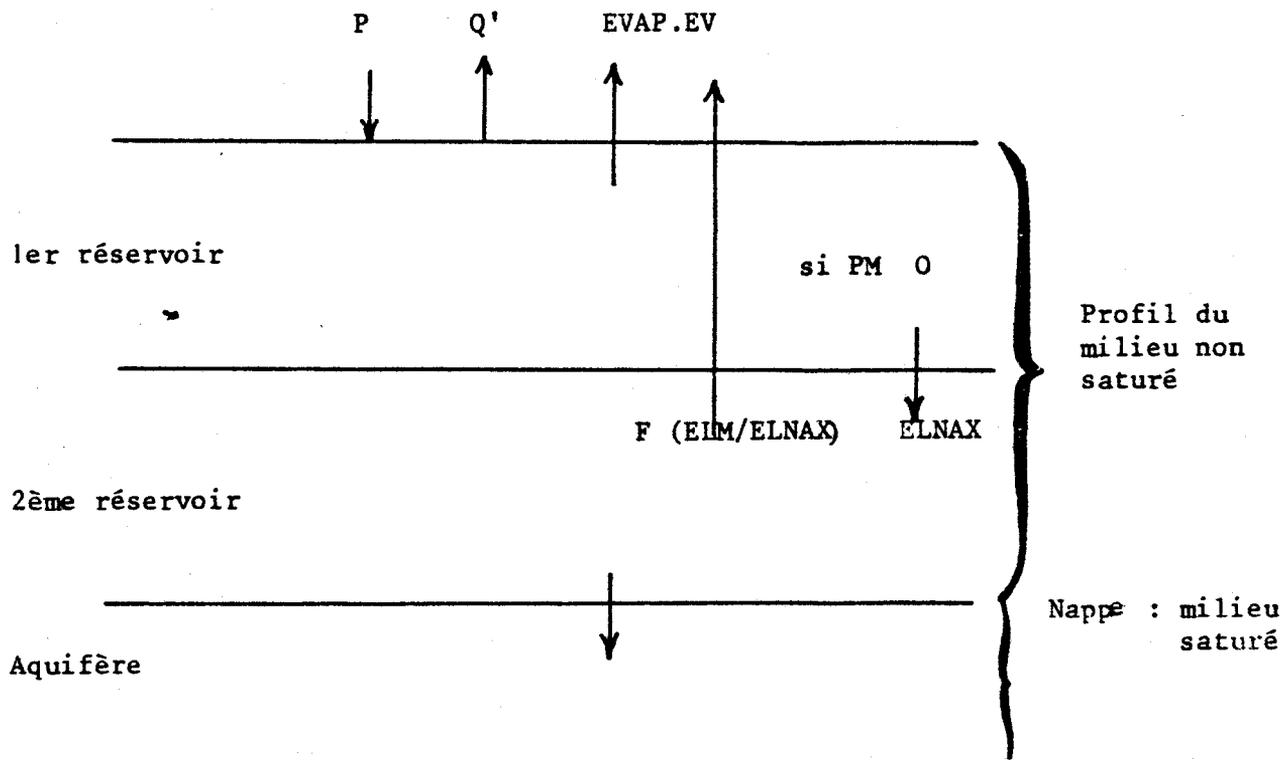


Fig. 2.4 : Décomposition de la simulation



principaux facteurs régulateurs de l'eau de surface et de l'eau du sol :

- le milieu : il s'agit des caractéristiques géologiques, morphologiques qui jouent un rôle dans le stockage, la rétention et la régulation du flux,

- les entrées : précipitation, évaporation ou évapotranspiration,

- le résultat est le flux de l'eau de surface ou de l'eau de profondeur gouverné par des conditions hydrauliques.

Le modèle MMØ1 (MERO F., 1978) est un modèle digital représentant le système hydrologique sur ordinateur, et qui simule les événements hydrologiques sur un seul bassin ou sous-bassin. Il calcule donc les débits journaliers d'un cours d'eau à partir des données de précipitations, évapotranspiration et degré d'humidité du sol.

Le schéma général de la simulation fait intervenir dans la zone non saturée l'existence de deux réservoirs (fig. 2-4) et se décompose en quatre étapes principales :

- calcul du déficit dans le 1er réservoir UM.

Soit UM, la quantité d'eau présente dans ce réservoir et UMAX, la quantité d'eau maximale qu'il peut contenir, posons : $DLU = UMAX - UM$

Dans le cas où la pluie P est supérieure à DLU, la différence $PM = P - DLU$ est appelée pluie nette positive.

Si PM est supérieure à 0, l'évapotranspiration (EVAP) agit sur PM, puis sur UM si PM est insuffisant.

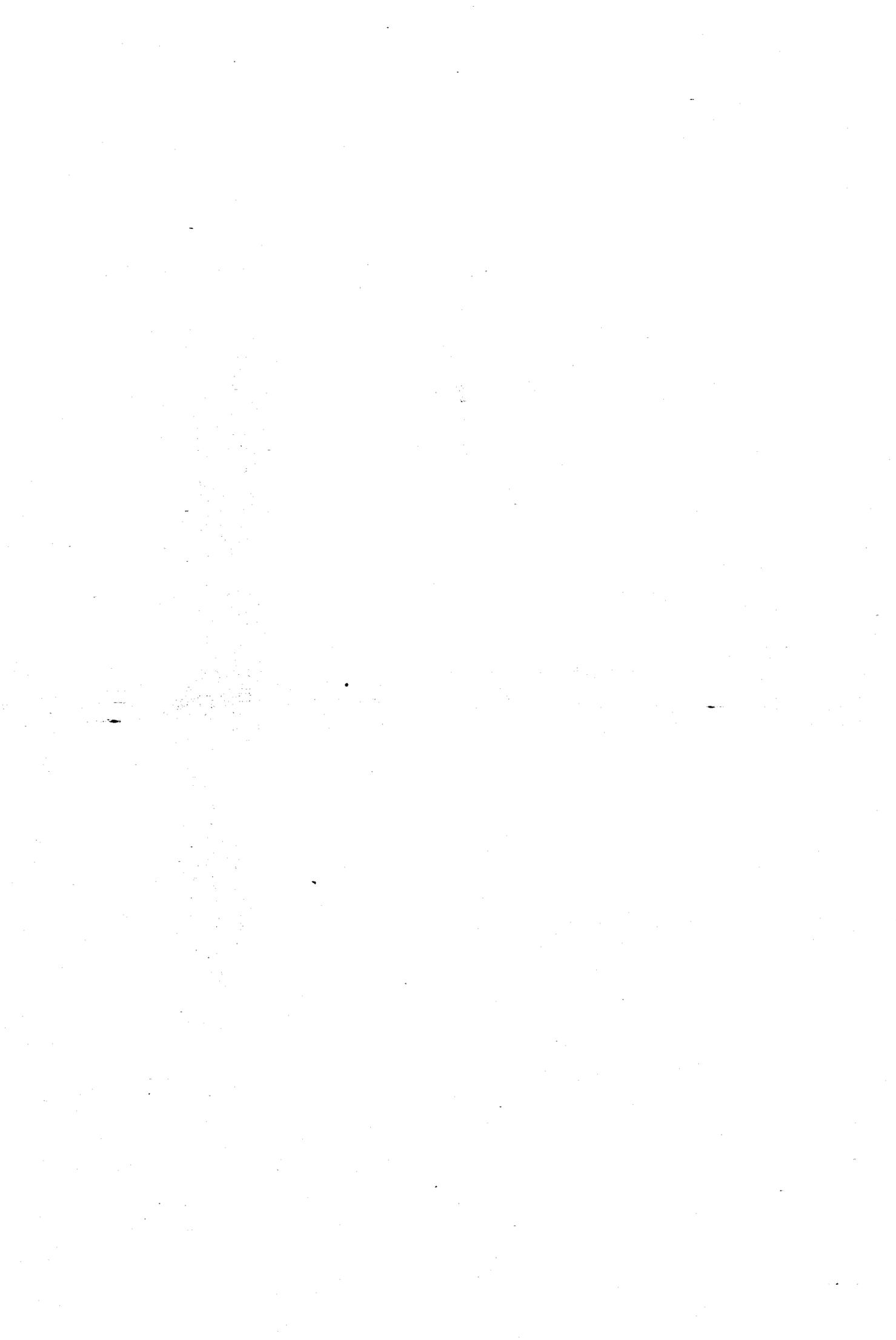
Si PM est suffisant (supérieur à EVAP), il y aura infiltration plus profonde et ruissellement de type hypodermique.

Si UM s'annule, l'évapotranspiration agit dans ce cas sur le 2ème réservoir ELM et dans ce cas EVAP est fonction de ELM/ELMAX (ELMAX = quantité d'eau maximale que peut contenir le réservoir ELM).

Si ELM s'annule, le prélèvement a lieu dans la nappe si celle-ci est proche du sol.

Après le prélèvement par évapotranspiration dans le 1er réservoir et même dans le 2ème réservoir, on peut encore soustraire un ruissellement. L'excédent d'eau restant s'écoule vers la nappe et est appelé GW.

Quand la saturation du 1er réservoir a lieu, il apparaît un ruissellement de surface.



2.2.2.- Description du modèle.

Le calcul mathématique effectué par le programme est basé sur le cycle journalier de l'eau. Sept phases sont distinguées :

1ère phase :
.....

Interception de la pluie efficace et départ dû à l'évapotranspiration.

2ème phase :
.....

Stockage de surface et de formation pour le cumul journalier pour les surfaces les plus perméables. Dans cette phase, suivant la limite d'infiltration de surface sur les zones perméables, un ruissellement pourra être généré et l'excédent s'infiltrera dans le magasin d'humidité du sol.

3ème phase :
.....

Sur la surface A_3 (surface du semi-perméable), l'écoulement hypodermique se créera en se basant sur l'hypothèse que les sols les moins perméables ont une possibilité de redistribution d'humidité plus basse que dans le cas de surfaces perméables (A_2 et A_1).

4ème phase :
.....

Dans cette phase, l'humidité totale du sol est calculée.

5ème phase :
.....

Une redistribution de l'humidité du sol est ici repérée pour ajuster les changements intervenus pendant le jour (i).

6ème phase :
.....

Suivant que les réservoirs supérieurs de la zone non saturée sont alimentés, le remplissage de l'eau souterraine peut prendre place.

7ème phase :
.....

La lame d'infiltration reste intacte si l'humidité du sol dans

le 1er réservoir est supérieure à la valeur limite de l'humidité du 2ème réservoir et cela avant que la recharge de l'infiltration profonde ne débute.

2.2.3.- Paramètres hydrologiques et hydrométéorologiques à introduire lors de l'exécution.

Ces paramètres sont caractéristiques d'un bassin hydrologique donné.

Carte H :

- A₄ = surface totale du bassin,
- A₁ = surface du sous-bassin principal,
- A₂ = surface du sous-bassin secondaire,
- A₃ = surface du semi-perméable,
- T01 = temps de tarissement du bassin principal A₁,
- T02 = temps de tarissement du bassin secondaire A₂,
- T03 = temps de tarissement des surfaces semi-perméables,
- T04 = temps de tarissement du ruissellement pur.

Carte I :

- UST = hauteur de pluie interceptée,
- CUST = pourcentage de la variation saisonnière en pleine échelle de UST,
- LFC = équivalent de la capacité au champ (ou limite de rétention capillaire),
- CLFC = pourcentage de la variation saisonnière en pleine échelle de LFC,
- LSAT = équivalent en mm, pour le maximum d'humidité de saturation du sol nu, de rétention capillaire,
- L1 (INI) = valeur initiale de l'humidité du sol en mm dérivée au départ du calcul.
- S1 (INI) = débit de base initial attribué à la décharge de l'aquifère principal.
- S1 (INI) = débit de base initial attribué à la décharge du second aquifère.

Carte J :
.....

- DM = paramètre de retard de recharge par les eaux souterraines
(analyse de l'hydrogramme),
- CL2 = paramètre de régulation de recharge par les eaux souterraines,
- EXP = exposant des fonctions régulant l'évapotranspiration de l'humidité du sol,
- PO = principale valeur limite de l'infiltration de surface sur les zones perméables,
- cPo = échelle de variation saisonnière de Po et Qo,
- Qo = principale valeur limite du débit de surface
- CT = facteur de proportionnalité agissant sur l'infiltration et fonction de régulation du ruissellement,
- RPE (ou CEUP) = valeur limite de la hauteur de pluie journalière quand la réduction de l'évapotranspiration est réalisée,
- SNO = facteur de routine, de surface et hypodermique, analogue au temps de concentration en demi-unité jour.

Les cartes suivantes correspondent aux données pluviométriques journalières et aux débits journaliers du cours d'eau choisi.

2.3.- Application du modèle MMØ1 à trois sous-bassins de l'Escaut.

2.3.1.- Généralités.

Notre étude a porté sur trois sous-bassins de l'Escaut : le bassin de la Rhonelle, de l'Ecaillon et de la Selle.

Les caractéristiques de ces trois sous-bassins sont regroupées dans le tableau 2.1. Les valeurs de débits moyens interannuels ont été calculées sur la période allant de 1961 à 1967 (TONNERRE et TESSON, 1970).

La Selle et l'Ecaillon possèdent un débit relativement régulier. La Rhonelle montre un débit très irrégulier en raison de la réduction de l'épaisseur de l'aquifère crayeux, donc de son volume et de ses réserves régulatrices.

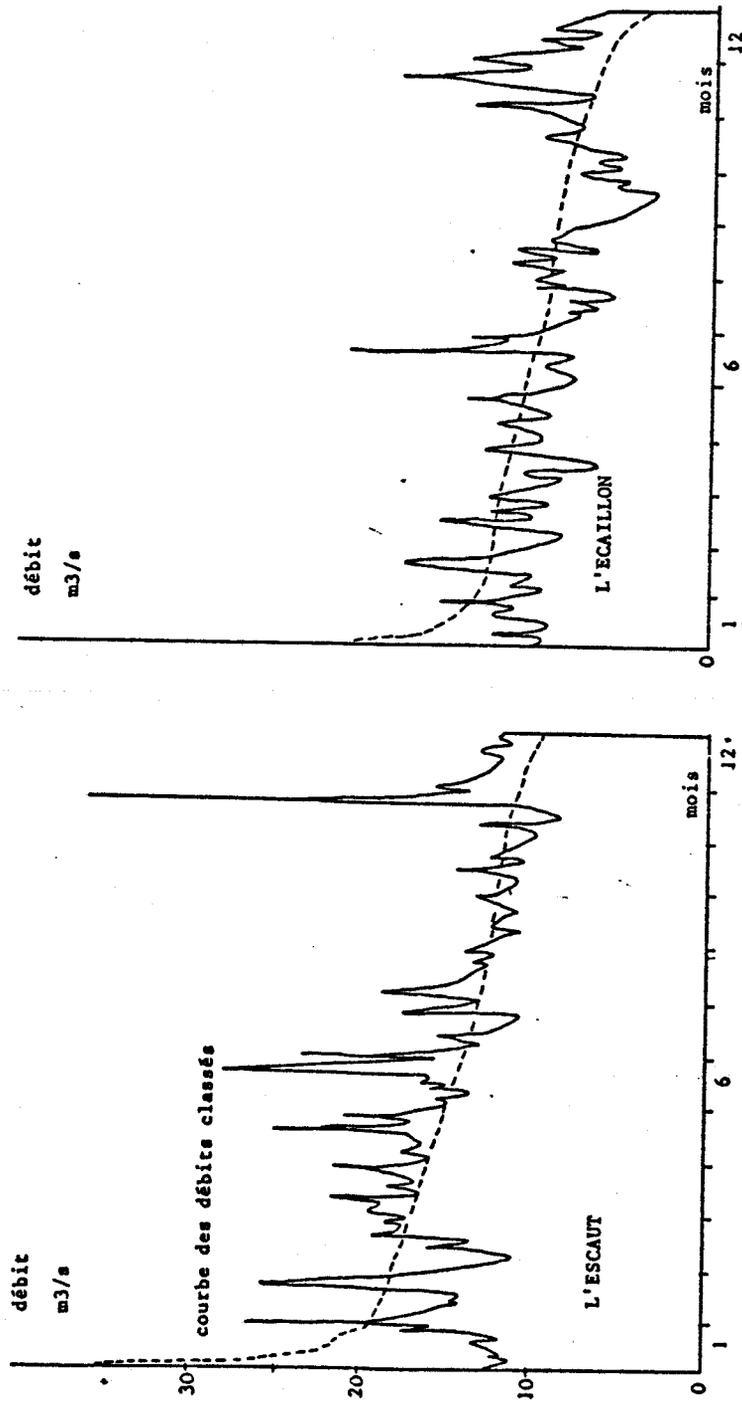


Fig. 2.5.- DEBITS MOYENS JOURNALIERS DE L'ESCAUT ET DE L'ECAILLON POUR L'ANNEE 1971



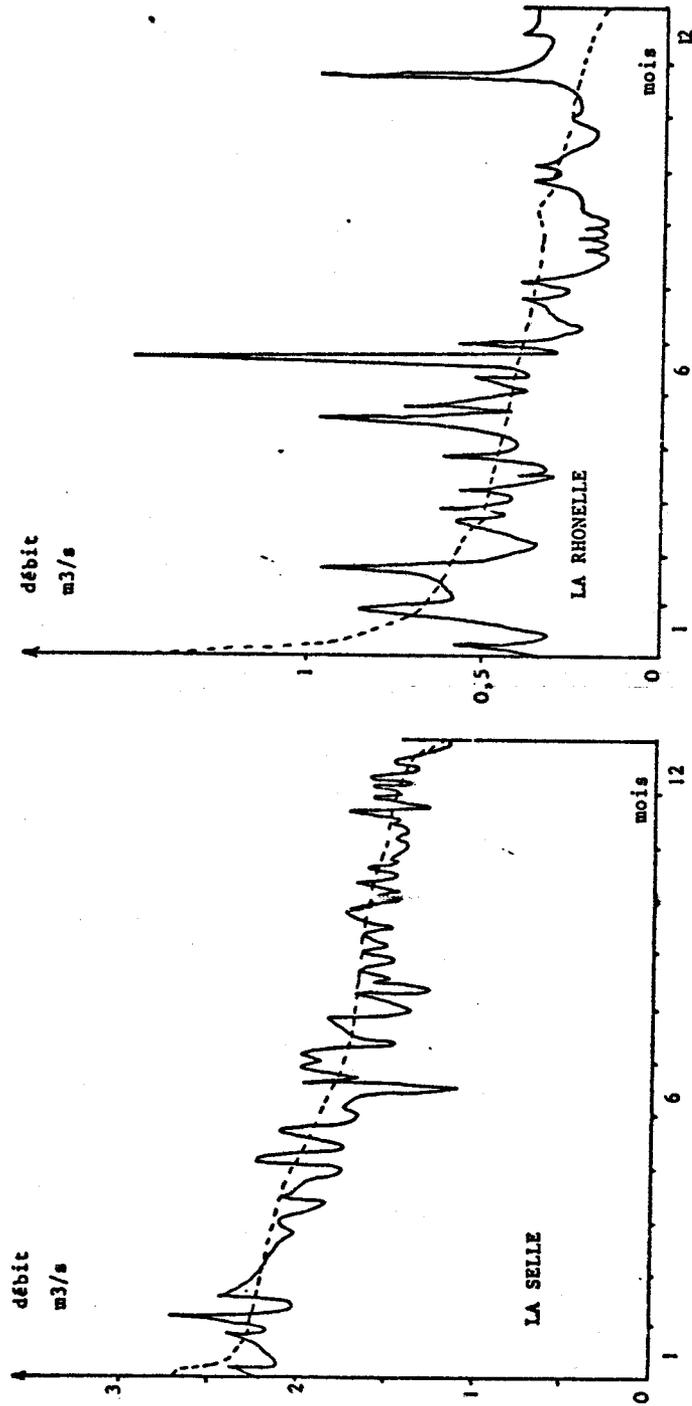


Fig. 2.5bis.- DEBITS MOYENS JOURNALIERS DE LA RHONELLE ET DE LA SELLE POUR L'ANNEE 1971



Bassin	Station de jaugeage	Superficie en Km ²	Débit moyen interannuel en m ³ /s	Observations
La Rhonelle	Aulnoy-les Valenciennes	90	0,71	Variations importantes du débit
L'Ecaillon	Thiant	175	1,65	Débit régulier
La Selle	Noyelles-sur Selle	250	2,29	Débit régulier

Tableau 2.1: Caractéristiques générales des différents bassins.

L'aquifère du bassin de l'Escaut et de ses affluents est recouvert en majeure partie, sauf le bassin de la Selle, par des terrains tertiaires argilo-sableux qui sont la cause d'un ruissellement notable se traduisant sur les hydrogrammes par une multitude de pics, masquant la période d'étiage (fig.2-5).

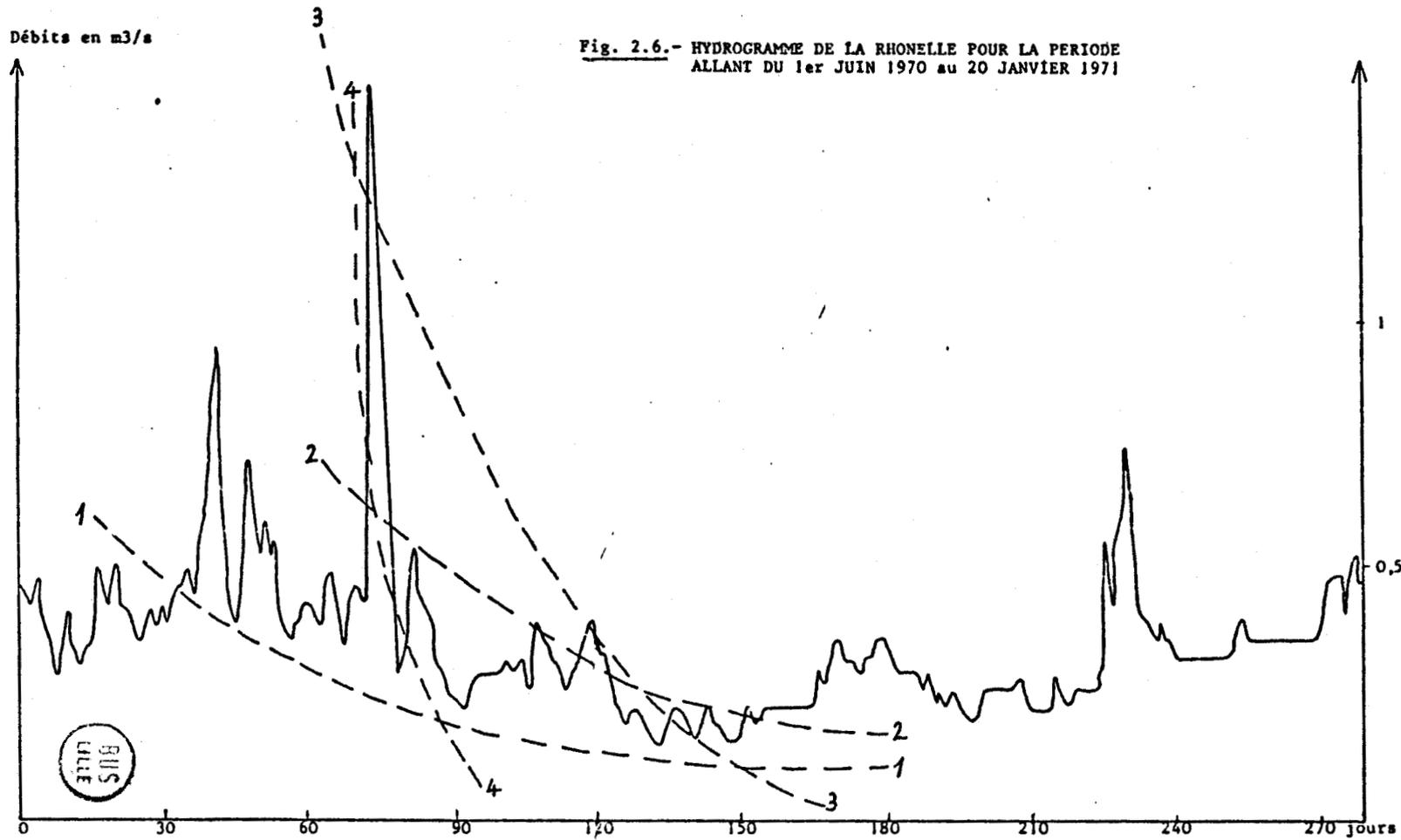
Les valeurs moyennes annuelles du rapport du débit de base au débit total (tableau 2.2), issues de l'analyse des hydrogrammes journaliers, amènent quelques remarques :

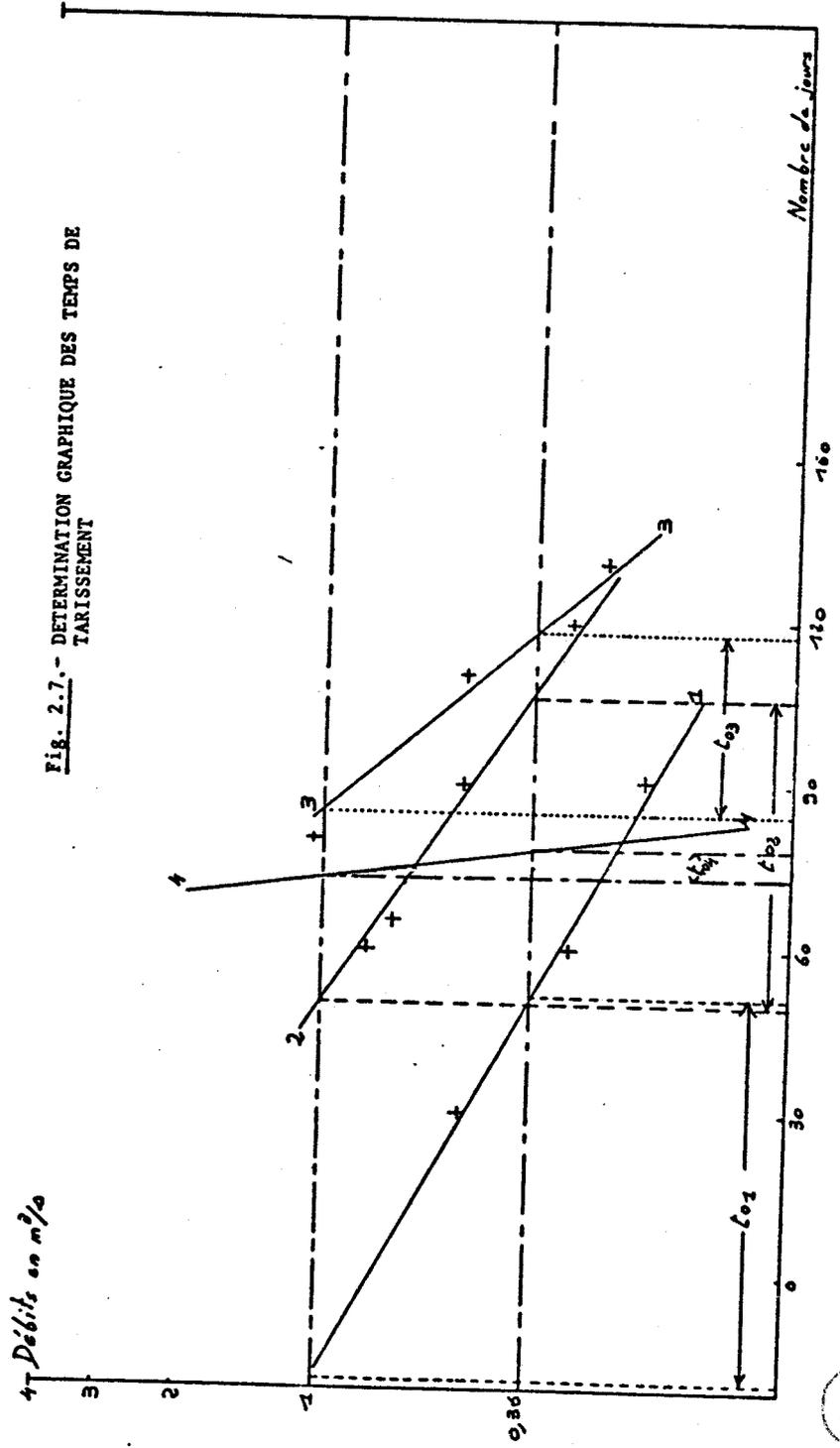
- les bassins de l'Ecaillon et de la Rhonelle se caractérisent par un débit de base d'environ 70%,
- le bassin de la Selle apparaît logiquement comme celui qui offre les réserves les plus importantes avec un débit de base de 77,9%,
- l'importante variation du rapport pour le bassin de la Rhonelle confirme l'irrégularité du débit total.

Les valeurs moyennes du débit de base ont été utilisées au départ de la simulation.

Les surfaces des sous-bassins principaux et secondaires ont été calculées par planimétrie.

Les temps de tarissements (t_{01} , t_{02} , t_{03} , t_{04}) ont été déterminés à partir des hydrogrammes des trois rivières sur les années 1970, 1971, 1972 par la méthode semi-logarithmique. Une partie caractéristique d'un





Rivière Années	Ecaillon	Selle	Rhonelle
1962	72,3	-	-
1963	74,5	78,7	58,7
1964	76,9	70	68,1
1965	70,4	74,8	65,9
1966	61,9	74	43,5
1967	87,9	87,3	80,8
1968	68,1	77,4	66,1
1969	77,1	86,1	68,7
1970	74,1	85,3	65,1
1971	59	71	61
1972	66	75	60
Moyenne	71,6	77,9	70,8

Tableau 2.2: Valeurs en pourcentage du débit de base annuel par rapport au débit total (d'après MANIA, 1978).

de ces hydrogrammes est reportée fig. 2-6. Dans un premier temps, quatre tangentes courbes correspondant aux quatre temps de tarissement sont dessinées. Les coordonnées de plusieurs points de ces courbes, reportées sur papier semi-logarithmique permettent de tracer ainsi quatre droites. On considère alors que le temps de tarissement est donné par la différence des abscisses des points dont les coordonnées sont 1 et 0,36 (fig. 2-7). Les valeurs obtenues sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Les temps de tarissement t_{04} sont relativement difficiles à déterminer et il est apparu, au cours de la simulation, que des valeurs plus faibles (2 ou 3 jours) conduisaient à un meilleur calage (tableau 2.3)

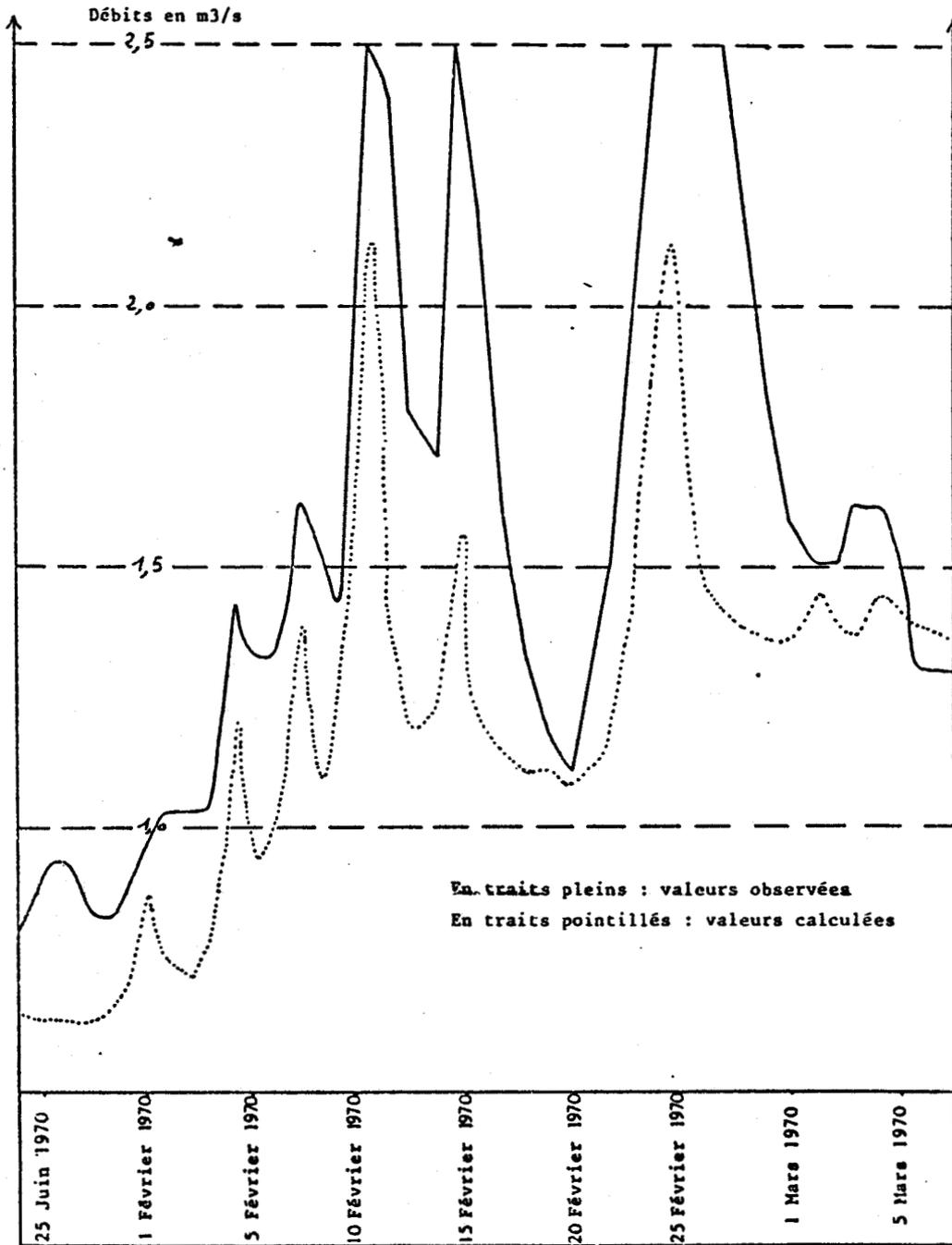


Fig. 2.8.- ILLUSTRATION DE LA CORRELATION ENTRE LES DEBITS OBSERVES ET CALCULES



	to1	to2	to3	to4
La Rhonelle	70	56	33	5
La Selle	500	64	21	4
L'Ecaillon	364	38	25	4

Tableau 2.3: Valeurs calculées des coefficients de temps de tarissement des bassins étudiés (en jours).

2.3.2.- Calage du modèle.

Le modèle MMØ1 présente journalièrement sous forme de tableau les valeurs du débit total calculé qui est la somme du débit des pluies d'orage, du débit des terrains semi-perméables, de la craie de la vallée et de la craie de plateau. D'autre part, les valeurs de pluie, d'infiltration et des débits observés, sont également imprimés.

La deuxième partie du travail consiste en une représentation graphique des débits totaux calculés et observés.

Lorsqu'une bonne coïncidence des deux courbes est obtenue, le modèle est calé. Nous avons utilisé ce modèle sur une période de 11 ans allant du 1er septembre 1963 au 31 août 1974. Cinq passages ont été nécessaires pour obtenir de bons coefficients de corrélation (de 0,60 à 0,90 selon le bassin étudié) entre les deux types de débits. Une illustration de cette corrélation est donnée fig. 2-8.

L'égalité des valeurs n'est pas complètement réalisée, mais la coïncidence des pics est obtenue et montre la bonne réaction du modèle vis-à-vis de la pluviométrie. Des difficultés sont cependant apparues lors des calages des bassins de la Selle et de l'Ecaillon, consécutives au peu de fiabilité des mesures pluviométriques. Il nous a été alors né-

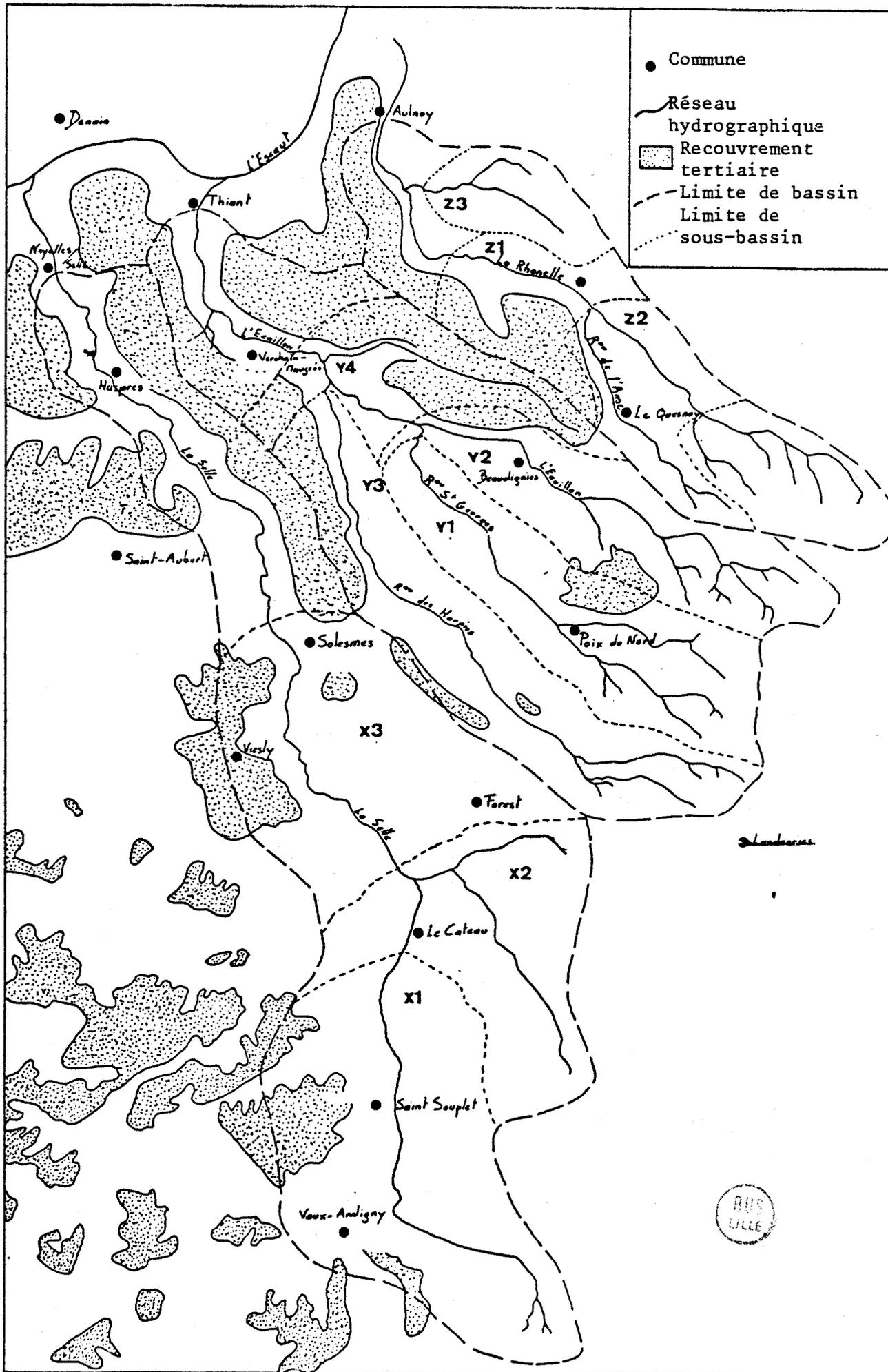


Fig. 2.9 : Carte des bassins et sous-bassins étudiés

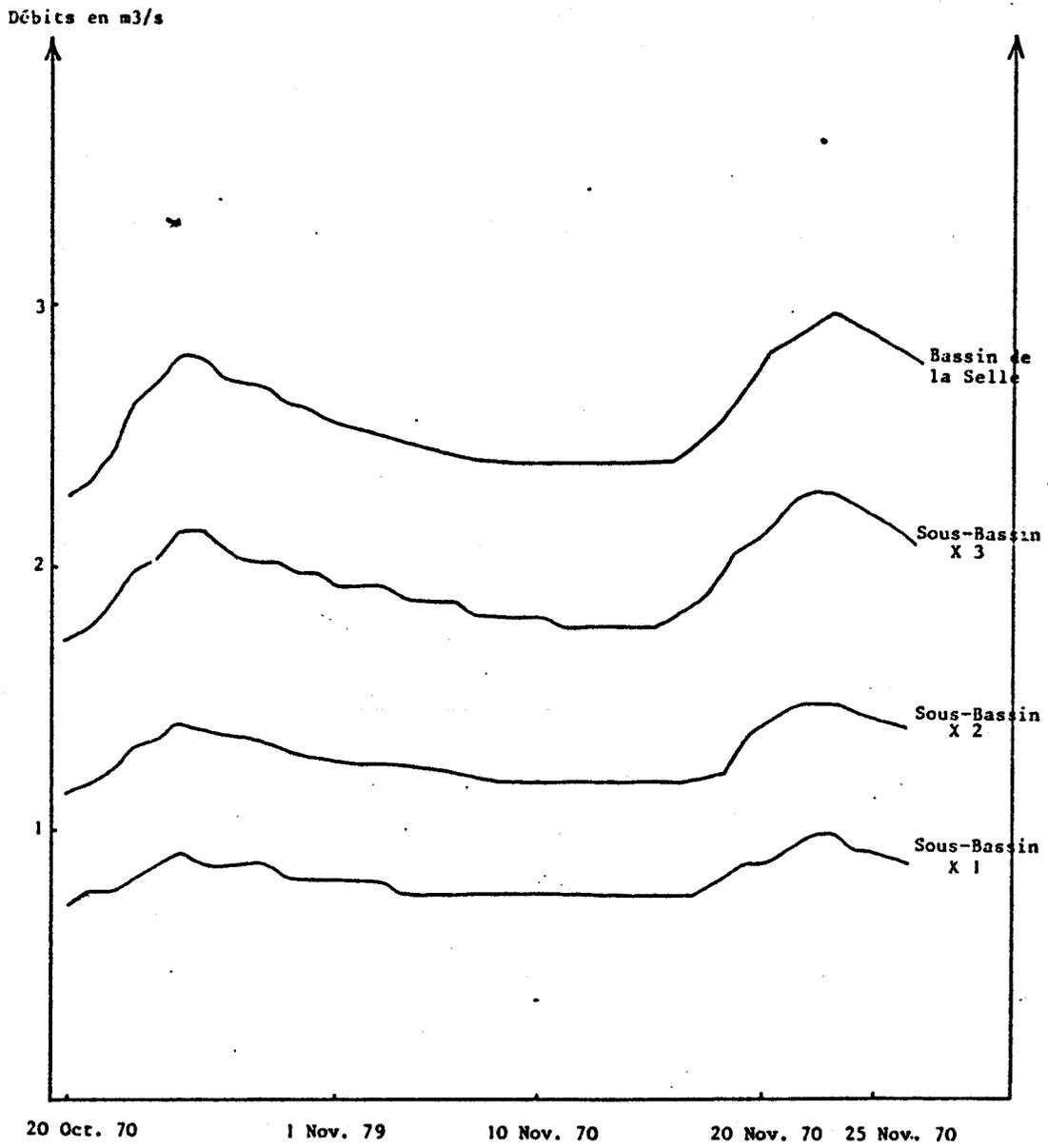
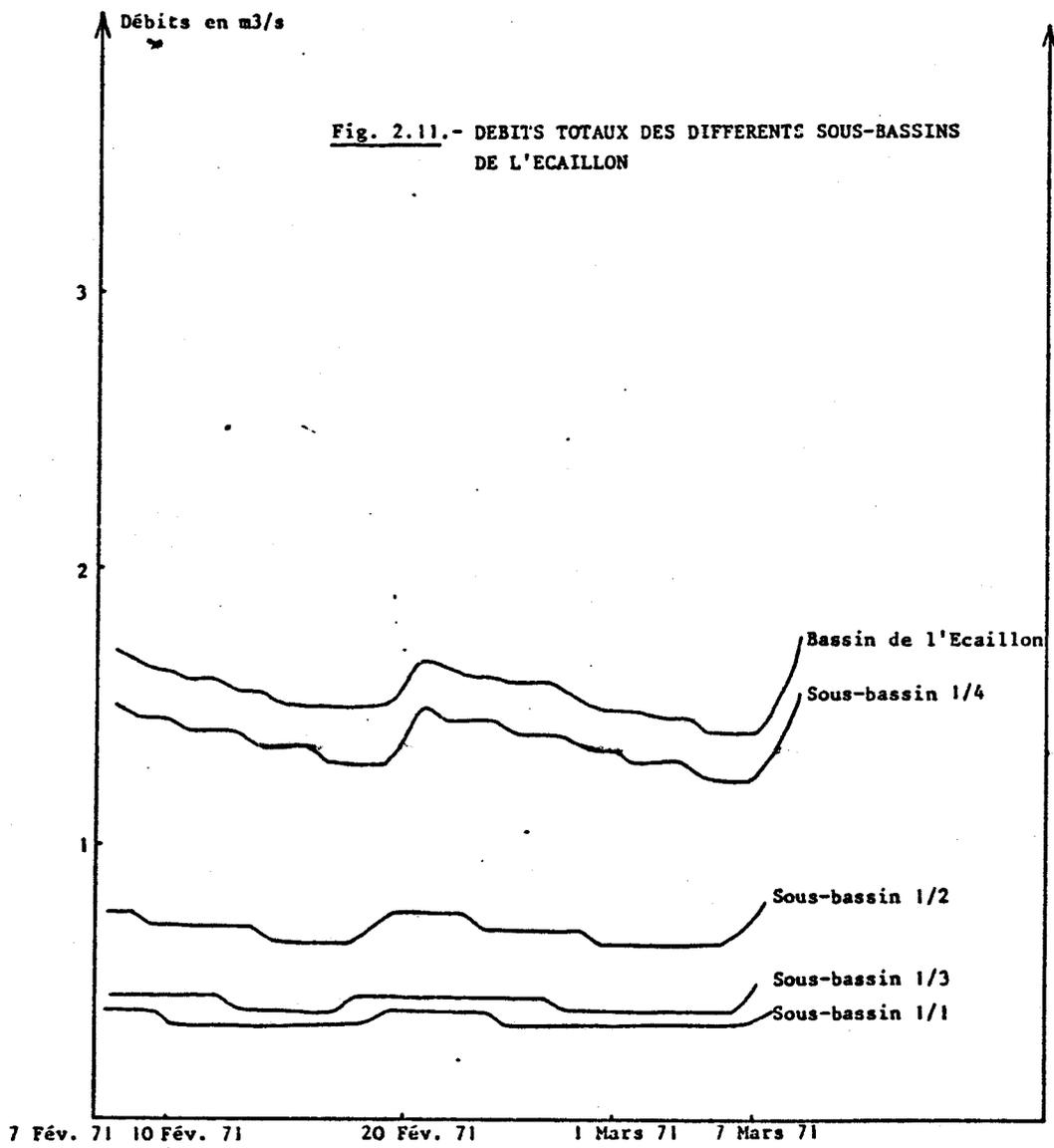


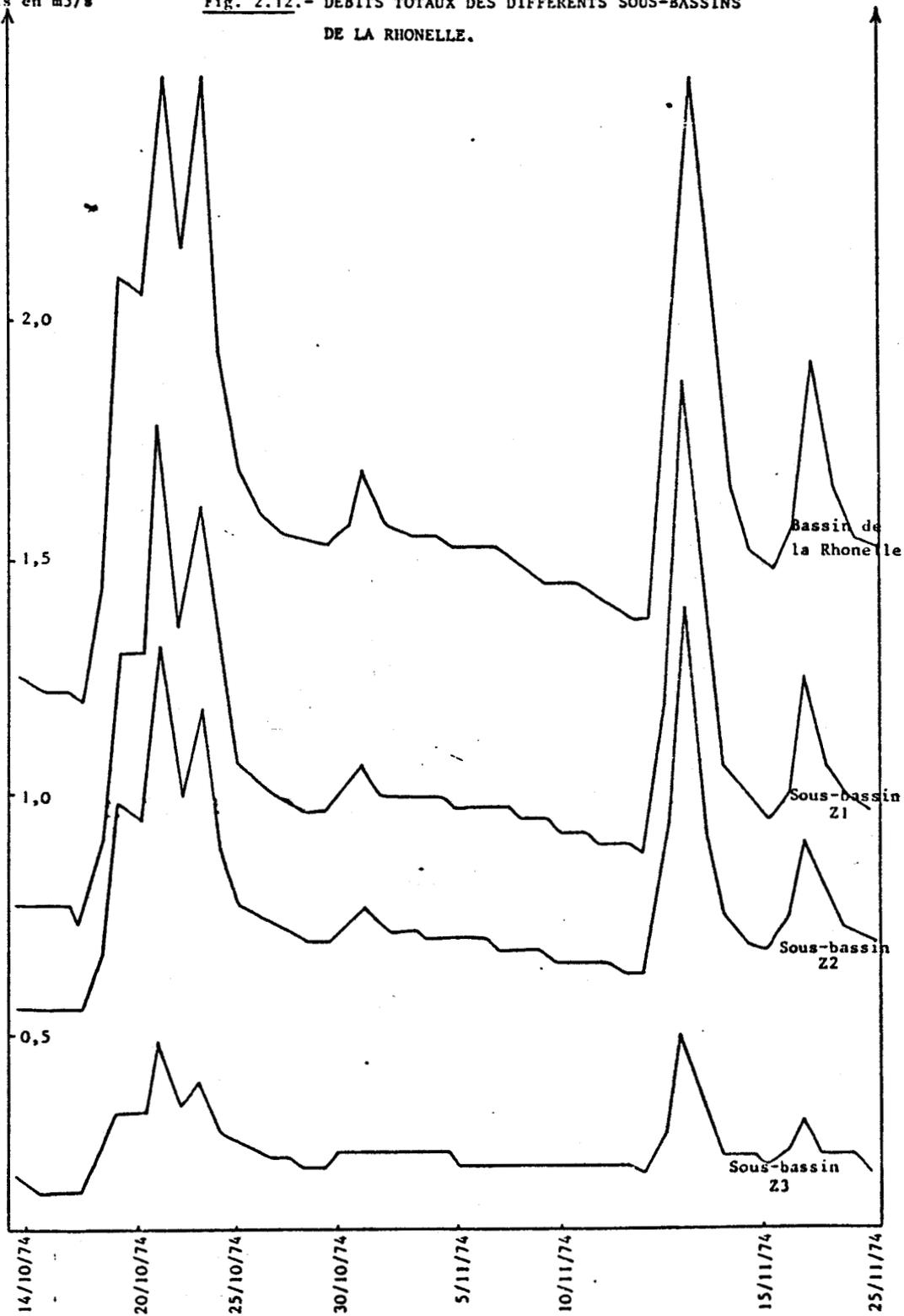
Fig. 2.10. - DEBITS TOTAUX DES DIFFERENTS SOUS-BASSINS DE LA SELLE





Débits en m³/s

Fig. 2.12.- DEBITS TOTAUX DES DIFFERENTS SOUS-BASSINS DE LA RHONELLE.



cessaire de corriger ces valeurs en les comparant avec celles de plusieurs stations météorologiques. Nous signalerons enfin la nécessité d'utiliser deux stations pour les bassins à grande surface, une pour la partie amont, l'autre pour la zone aval, la moyenne des deux valeurs est alors retenue.

D'autre part, des erreurs sur les débits observés des rivières ont été relevées (troncature, chutes brutales de 500%, etc....).

Les débits totaux et les débits de base, calculés par le programme MMØ1 ont donc été utilisés pour l'évaluation des ressources en eau.

2.3.3.- Estimation graphique des ressources en eau.

Les bassins de la Rhonelle, de la Selle et de l'Ecaillon ont été divisés en plusieurs sous-bassins de manière à visualiser géographiquement les réserves en eau.

Dans une première étape, la carte des différents bassins et sous-bassins a été réalisée et leur surface respective déterminée (fig. 2-9 et tableau 2.4). L'utilisation du programme MMØ1 a permis ensuite de comparer les écoulements totaux et de visualiser ainsi les potentialités de réserve si l'on admet que les cours d'eau des bassins crayeux sont alimentés à 90% par la nappe de la craie (CAOUS, COMON, MERCIER, 1978).

Il faut noter que les différents sous-bassins mentionnés ne correspondent pas obligatoirement au bassin versant d'une rivière ou d'un ruisseau mais ont été délimités dans un but pratique, les terminaisons situées en aval des sous-bassins étant proches de communes importantes.

Les figures 2-10, 11, 12 correspondant à des périodes de précipitations intenses, permettent une visualisation des possibilités de réserves. On constate notamment qu'il existe une relation directe entre la superficie du sous-bassin et l'écoulement total des rivières. Les réactions aux précipitations s'effectuent de manière synchrone pour les différents bassins avec une importance de plus en plus grande au fur et à mesure que la surface augmente.

2.3.4.- Evaluation des réserves en eaux souterraines.

A) Rappel.

On distingue généralement quatre types de réserves en eaux sou-

Symbolisation	Dénomination	Surface en Km2
Bassin de la Rhonelle	La Rhonelle	92
Z1	Bassin de Mormal	62
Z2	Bassin de Villereau-Orsinval	45
Z3	Bassin d'Artres	15
Bassin de l'Ecaillon	L'Ecaillon	173
Y1	Bassin du ruisseau St-Georges	42
Y2	Bassin de Beaudignies	78
Y3	Bassin du ruisseau des Harpies	49
Y4	Bassin de Vendegies sur Ecaillon	153
Bassin de la Selle	La Selle	252
X1	Bassin de St-Souplet-Vaux Andigny	79
X2	Bassin du Cateau	126
X3	*Bassin de Solesmes	190

Tableau 2.4: Superficies des différents bassins et sous-bassins.



	Surface en Km ²	Débit total moyen inter- annuel en 10 ⁶ m ³ /an	Débit total moyen inter- annuel en m ³ /s	Débit total moyen inter- annuel de l'écoulement souterrain en l/s.Km ²	Débit de base moyen inter- annuel en 10 m ³ /an	Débit de base moyen inter- annuel en m ³ /s	Débit de base moyen inter- annuel de l'écoulement souterrain en l/s.Km ²
La Rhonelle	92	22,7	0,71	7,8	15,8	0,50	5,4
Bassin de Normal	62	15,2	0,48	7,7	10,6	0,34	5,4
Bassin de Villereau- Orsinval	45	10,8	0,34	7,6	7,56	0,23	5,3
Bassin d'Artres	15	3,6	0,11	7,6	2,52	0,07	5,3
L'Ecaillon	173	35,6	1,12	6,4	25,2	0,79	4,5
Bassin du Ruisseau St-Georges	42	8,5	0,26	6,1	6,0	0,19	4,5
Bassin de Beaudignies	78	16,0	0,50	6,4	11,3	0,35	4,5
Bassin du Ruisseau des Harpies	49	9,9	0,31	6,3	7,0	0,22	4,4
Bassin de Vendegies sur-Ecaillon	153	31,3	0,99	6,4	22,2	0,70	4,5
La Selle	252	61,8	1,95	7,7	48,1	1,52	6,0
Bassin de St-Souplet Vaux-Andigny	79	19,15	0,60	7,6	14,9	0,47	6,0
Bassin de Le Cateau	126	30,9	0,97	7,6	24,05	0,76	6,0
Bassin de Solesmes	190	46,35	1,46	7,5	36,06	1,14	5,9

Tableau 2.5: Débits et modules d'écoulements souterrains des différents bassins.



terraines (CASTANY, 1967) déterminées essentiellement par le rythme des précipitations (fig. 2-13).

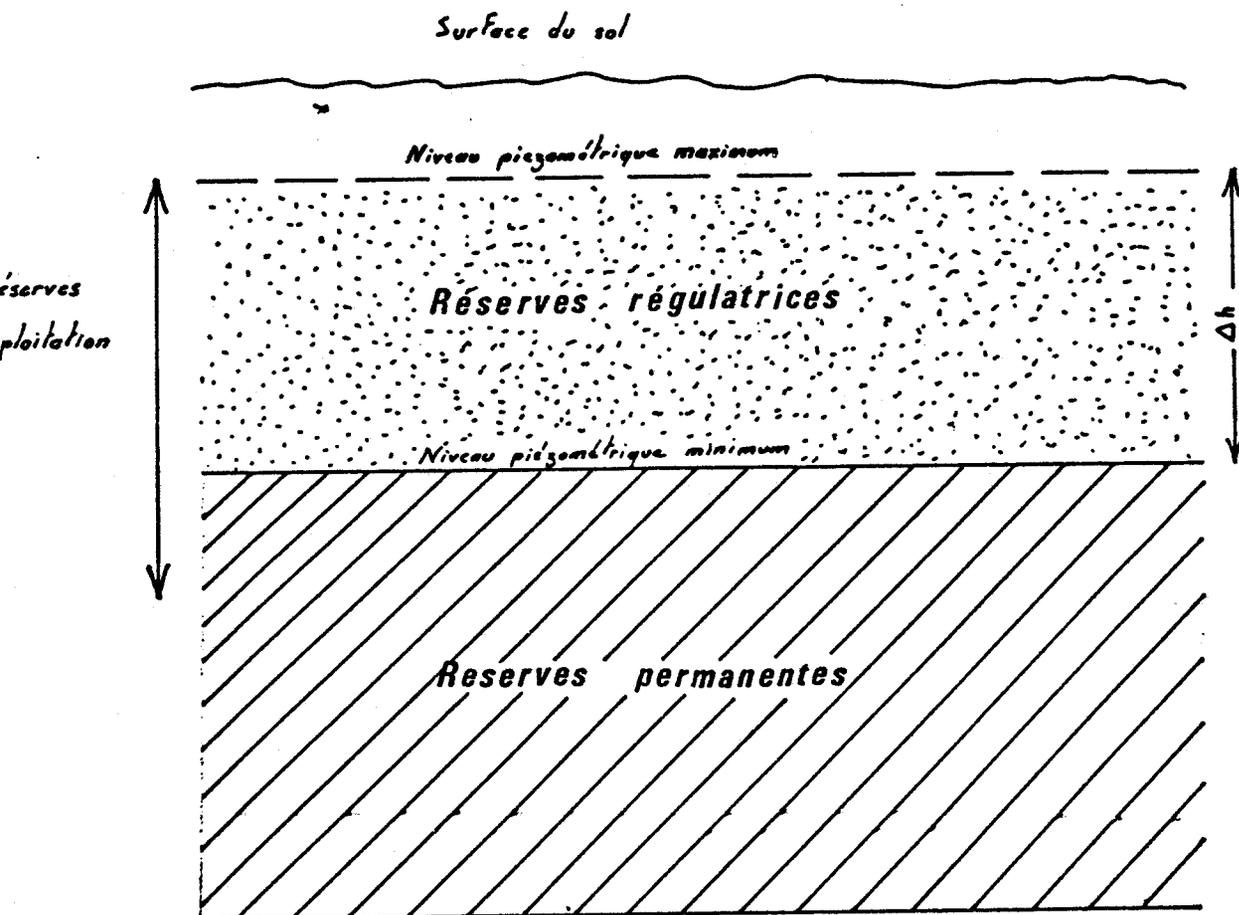


Fig. 2.13. - REPRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES DE RESERVES

Les réserves régulatrices subissent l'effet du rythme saisonnier ou interannuel des précipitations. Ces réserves régulatrices correspondent en hydrogéologie de surface au débit de base des cours d'eau ou écoulement souterrain.

Il est donc nécessaire de connaître ce débit représentant les variations piézométriques, donc une ressource potentielle en eaux souterraines.

BUS
LILLE

Bassins	Rhonele	Z1	Z2	Z3	Ecaillon	Y1	Y2	Y3	Y4	Selle	X1	X2	X3
Débit d'étiage en m3/an	15,3	10,2	7,3	2,4	21,2	5	9,5	5,9	18,6	29,2	9	14,6	21,9
Débit d'étiage en m3/s	0,48	0,32	0,23	0,07	0,67	0,15	0,30	0,18	0,58	0,92	0,28	0,46	0,69

Tableau 2.6: Débit d'étiage des différents sous-bassins



B) Phase de calcul.
.....

Nous avons calculé en premier lieu les débits naturels globaux moyens interannuels de l'écoulement total pour chaque sous-bassin précédemment cité, en utilisant des valeurs mensuelles par le programme MMØ1 et en évaluant par une moyenne arithmétique un débit annuel moyen.

Les débits naturels globaux moyens interannuels de l'écoulement souterrain (QW) ont été déterminés de la même manière en utilisant les résultats bruts du programme. Toutes ces valeurs de débits sont consignées dans le tableau 2.5, où en outre, sont représentées les valeurs des modules d'écoulement total et d'écoulement souterrain en l/s.Km².

A partir de ce débit QW, qui représente une ressource en eau souterraine potentielle, on peut déduire normalement une ressource en eau souterraine exploitable correspondant aux débits d'étiage du bassin minimum moyen mensuel d'année sèche. Ces valeurs (tableau 2.6) ont été calculées à partir des chiffres mensuels de l'année la plus sèche des onze années de la période d'étude.

Il aurait été intéressant de comparer ces ressources exploitables aux prélèvements et aux consommations dans les différents bassins, mais la majorité des captages existants ne sont pas recensés par l'Agence de Bassin Artois-Picardie, ceux-ci ayant un débit inférieur au seuil de redevance, les chiffres que nous pourrions mentionner ne seraient donc pas significatifs.

2.3.5.- Conclusions.

L'évaluation des réserves en eaux souterraines à partir d'une simulation hydrométéorologique a donc conduit à définir, sous-bassin par sous-bassin, les ressources exploitables. Ces ressources correspondent donc au débit d'étiage tel qu'il a été défini et calculé dans le paragraphe précédent. Il est évident que notre découpage des bassins versants réels en sous-bassins est arbitraire et fondé sur les éventuels besoins de telle ou telle commune. Les limites peuvent donc être changées suivant de nouvelles demandes, la méthodologie restera inchangée.

TROISIEME PARTIE

GESTION DES RESSOURCES EN EAU

3.1.- Introduction.

La restructuration des ressources en eaux souterraines nécessite une maîtrise des modalités de l'écoulement, compte-tenu de l'hétérogénéité du réservoir aquifère et du bilan hydrologique. L'outil mathématique permet d'atteindre cet objectif par l'intermédiaire d'une modélisation. Dans le cadre de cette étude, nous avons fait appel au programme "SIBITRA", qui permet de représenter un modèle à différences finies et de simuler les écoulements dans un système bidimensionnel, en tenant compte des contraintes hydrologiques.

Diverses options peuvent être choisies afin de recréer n'importe quelle configuration, qu'elle soit d'ordre hydrologique, géologique, pluviométrique ou économique.

L'intérêt de la modélisation mathématique est de permettre après restitution de la piézométrie et par calage des différents paramètres hydrauliques, la définition des bilans hydrologiques quantitatifs. En faisant appel à l'historique des prélèvements et à l'optimisation des besoins en eau, il est possible de réaliser une gestion optimale des ressources afin d'améliorer l'exploitation des eaux souterraines (MANIA J., 1978).

On peut en effet envisager une maximisation des prélèvements et donc de leurs influences sur l'état de la nappe ou encore la suppression de certains captages et l'implantation de nouveaux ouvrages plus récents et à débits plus importants. A chaque contrainte imposée correspondra donc un état unique du système aquifère.

Dans le cadre de la restructuration des eaux souterraines de la nappe de la craie en Cambrésis, nous avons utilisé la prévision des rabattements dans le cas d'une surexploitation des captages, ainsi que la simulation de nouveaux sites d'exploitation.

Il faut en effet rappeler que les puits ou forages actuellement en exploitation sont d'âge ancien (antérieurs à 1940) et leurs débits sont souvent faibles. L'aménagement et l'équipement de ces ouvrages se montrent vétustes et leur protection mal assurée. Signalons de plus le

fragile équilibre de ces puits qui est facilement rompu en période de sécheresse. Un renouvellement des réseaux de distribution s'impose donc, basé sur la création de quelques nouveaux sites possédant de bonnes caractéristiques hydrauliques et hydrochimiques.

3.2.- Rappels théoriques.

Dans le cas d'un aquifère homogène et isotrope, on peut appliquer l'équation fondamentale de l'hydrodynamique des écoulements :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W(x, y, t)$$

avec :

T_{xx} , T_{yy} = composantes de la matrice des perméabilités,

h = charge hydraulique,

S = coefficient d'emmagasinement,

W = flux volumique de réalimentation artificielle ou de soutirage par unité de surface de l'aquifère.

Il s'agit d'une équation à dérivées partielles du flux dans une nappe captive. Dans le cas d'une nappe libre, la transmissivité est fonction de la charge et l'on peut écrire :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} b \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} b \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} + W(x, y, t)$$

avec :

K_{xx} , K_{yy} = composantes de la matrice de perméabilités,

S_g = coefficient d'emmagasinement spécifique,

b = épaisseur de la zone saturée de l'aquifère.

La résolution de cette équation se fait dans le cas du modèle "SIBITRA" par la méthode des différences finies et la zone d'étude est divisée en mailles rectangulaires ou carrées dans lesquelles les propriétés de l'aquifère sont considérées uniformes. On obtient ainsi "n" équations à "n" inconnues ou "n" représente le nombre de mailles (fig. 3-1). Le système de calcul repose sur les méthodes de GAUSS-SEIDEL.

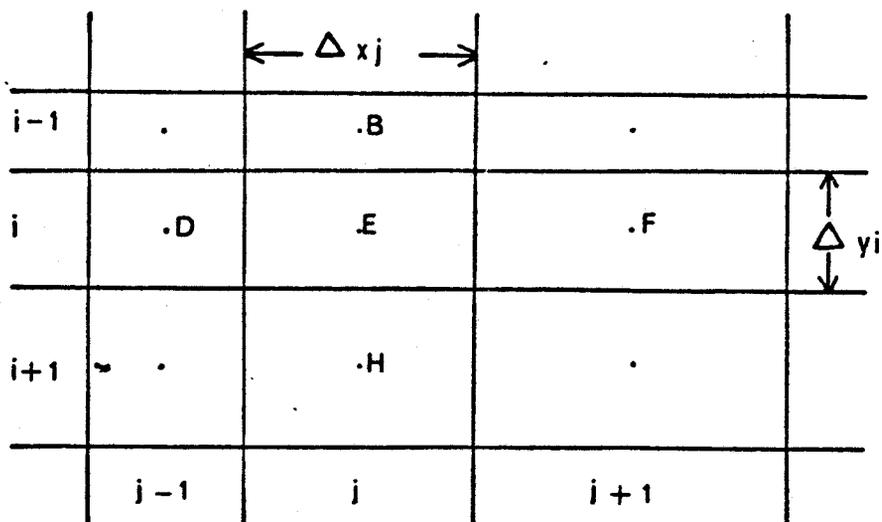


Fig. 3.1.- SCHEMA DE LA METHODE A DIFFERENCES FINIES

L'équation devient donc :

$$\frac{1}{\Delta x_j} \left[\left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{i,j+\frac{1}{2}} - \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{i,j-\frac{1}{2}} \right] + \frac{1}{\Delta y_i} \left[\left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i+\frac{1}{2},j} - \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i-\frac{1}{2},j} \right] = \frac{S_{i,j}}{\Delta t} (h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1}) + W_{i,j,k}$$

avec :

Δx_j = accroissement d'espace dans la direction x pour la colonne j,

Δy_i = accroissement d'espace dans la direction y pour la rangée i,

Δt = accroissement de temps,

i = index de la direction y,

j = index de la direction x,

k = index de temps.

3.3.- Modélisation de l'aquifère crayeux de l'Artois et du Cambrésis.

3.3.1.- Conditions aux limites.

Le modèle réalisé a été dessiné de telle façon que les limites naturelles de l'aquifère y soient incluses.

Les limites du modèle sont repérées par le programme, par des valeurs nulles dans les mailles extérieures à ces limites. Ce type de configuration ne permet pas d'échanges entre le modèle et les zones externes.

Géographiquement, ces limites correspondent au Nord. au canal de la Scarpe et de l'Escaut, à l'Est à la Rhonelle, la délimitation Sud et Ouest coïncide avec la ligne de partage des eaux telle qu'elle a été définie précédemment (fig.3-2).

3.3.2.- Maillage.

Nous avons adopté ici un maillage rectangulaire à mailles variables dont la surface varie entre 1 et 9 Km². Le découpage du modèle a été imposé par rapport aux nombres de forages où la transmissivité est connue et par la précision requise pour définir la zone du canal du Nord et de Saint-Quentin.

La dimension des mailles suivant la direction X devait d'autre part respecter la relation :

$$\frac{\Delta X_j}{\Delta X_{j-1}} \leq 1,5 \quad (\text{TRESCOTT, PINDER et LARSON, 1976})$$

avec :

X_j = dimension d'une maille donnée suivant X,

X_{j-1} = dimension de la maille précédente suivant X;

On obtient ainsi pour l'ensemble du modèle un total de 1995 mailles dont 1154 se trouvent à l'intérieur des limites.

3.3.3.- Acquisition des données.

A) Géologie.

L'Artois et le Cambrésis constituent une vaste région agricole qui voit l'affleurement des formations crayeuses du Turonien supérieur et du Sénonien, recouvertes assez largement sur les plateaux, dans le Sud du Valenciennois, et plus localement sur les sommets topographiques de l'Artois par les sables et argiles du Tertiaire. La nappe reste libre sur l'ensemble de cette zone.

Le modèle nécessite une connaissance précise des valeurs de la cote du substratum de l'aquifère, aussi avons-nous utilisé les cartes structurales des formations du Crétacé établies par CAULIER (1974). Il a par ailleurs été nécessaire d'introduire les épaisseurs des terrains tertiaires imperméables quand ils existaient.

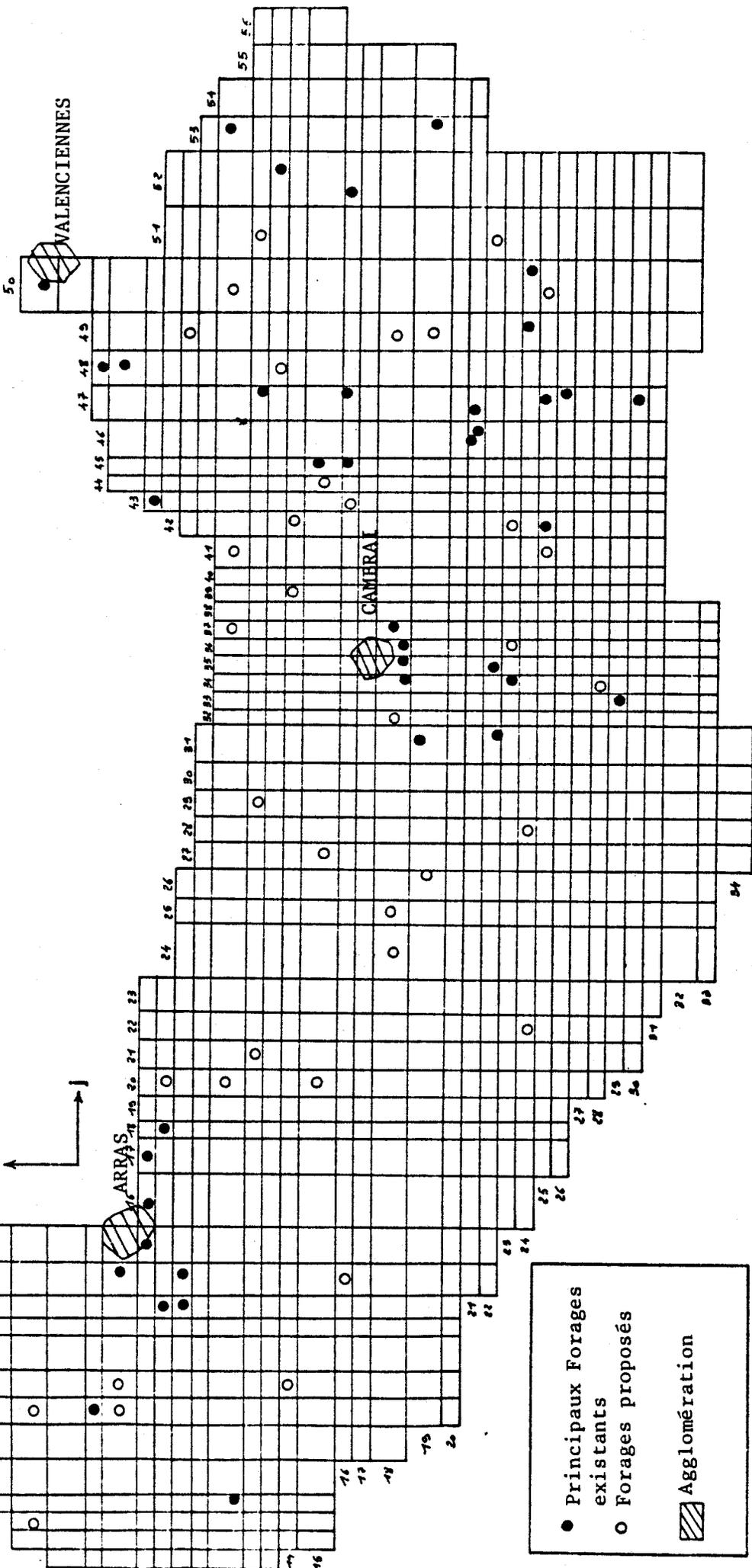


Fig. 3.2 : Maillage et limites du modèle



	SOLESMES	CURGIES	CARNIERES	YTRES
1962	49	44	45	57
1963	88	91	103	125
1964	69	70	52	78
1965	85	88	71	106
1966	91	98	81	100
1967	54	62	48	69
1968	27	30	38	39
1969	79	75	77	108
1970	56	54	41	50
1971	91	102	79	106
1972	109	105	93	-
1973	38	39	27	-
1974	96	89	-	122
1975	111	109	111	108
1976	59	56	38	67
1977	106	122	92	-
TOTAL	1210	1234	996	1136
Moyenne mensuelle	75,6 (calcul sur 16 ans)	77,1 (calcul sur 16 ans)	66,4 (calcul sur 15 ans)	87,3 (calcul sur 13 ans)
Moyenne générale : 76,6 mm par an soit $0,3 \cdot 10^{-7}$ m/s.				



Tableau 3.1 : Lames d'eau mensuelles mesurées sur 4 stations pilotes (en mm).

B) Piézométrie.
.....

Les valeurs de la cote du sommet de l'aquifère ont été obtenues à partir de la carte piézométrique levée en novembre 1978. Dans le cas d'une utilisation du modèle en régime transitoire, celui-ci nécessite l'établissement d'une matrice des pressions de départ correspondant à la piézométrie observée avant pompage.

C) Caractéristiques hydrauliques.
.....

La modélisation d'une nappe libre requiert l'introduction des valeurs de perméabilités. Celles-ci ont été obtenues à partir des transmissivités recensées sur un grand nombre de sites, ainsi que celles calculées à partir des pompages d'essai.

La distribution de T n'est pas assurée géographiquement et il est nécessaire d'effectuer une extrapolation dans toutes les mailles à partir des valeurs connues.

Une démarche identique a été appliquée aux valeurs de coefficient d'emménagement qui se distribuent en l'absence de toutes données de la manière suivante :

S = 5% sur les plateaux,

S = 10% en vallées.

Les modifications s'effectuent au cours du calage du modèle.

3.3.4.- Précipitations.

Les valeurs de pluviosité sont relevées dans plusieurs stations de l'arrondissement d'Arras et de Cambrai. Pour chaque période de pompage, on fixe une valeur unique de la pluviométrie établie par le calcul d'une moyenne sur l'ensemble des stations (tableau 3.1).

Les valeurs de pluie efficace s'infiltrant directement vers la nappe sont calculées par le programme en fonction de l'épaisseur de la zone non saturée et du recouvrement tertiaire, lorsqu'il existe. Lors du calage du modèle sur une période de 6 mois (novembre 1978 à avril 1979), le même type de calcul de la moyenne arithmétique a été effectué.

3.3.5.- Débits de pompage.

Les valeurs de débit des ouvrages ont été fixées d'une part à partir des fichiers de l'Agence de Bassin Artois-Picardie qui recense

les forages dont le débit dépasse un certain seuil de redevabilité et d'autre part à la suite d'une enquête systématique auprès des communes.

3.4.- Calage du modèle.

Le but du calage est de restituer la carte piézométrique levée en novembre 1978 par l'ajustement de paramètres hydrauliques introduits lors de la modélisation (transmissivités, coefficients d'emmagasinements, pression hydraulique). Il est atteint lorsque les deux cartes piézométriques calculées et observées sont très proches l'une de l'autre et lorsque toute légère modification n'apporte plus d'amélioration notable.

3.4.1.- Calage proprement dit.

Il a été, dans un premier temps, réalisé sur une période de pompage d'un mois, la carte piézométrique dessinée en novembre 1978 servant de référence.

Nous avons successivement opéré les modifications suivantes du schéma de départ :

- réajustement des valeurs de perméabilité et de coefficient de perméabilité,
- amélioration des valeurs du potentiel hydraulique sur quelques mailles représentatives des canaux,
- introduction sur les limites Ouest et Est (lignes de partage des eaux) de mailles à potentiel imposé.

Lorsque l'allure générale des courbes piézométriques calculées a été reconstituée, des modifications locales ont été effectuées de manière à infléchir les courbes dans un sens ou dans l'autre en vue d'une meilleure corrélation avec la piézométrie réelle.

La figure 3-3 permet de suivre le processus schématique du calage du modèle. En fait, un plus grand nombre de modifications ont été nécessaires, mais il serait fastidieux et sans intérêt de les décrire toutes.

Les difficultés rencontrées lors du calage ont été d'apprécier avec suffisamment d'exactitude les caractéristiques hydrauliques au niveau des limites Nord du modèle (représentées par la Scarpe, la Scarpe canalisée et l'Escaut), ainsi que le long des canaux de St-Quentin et du

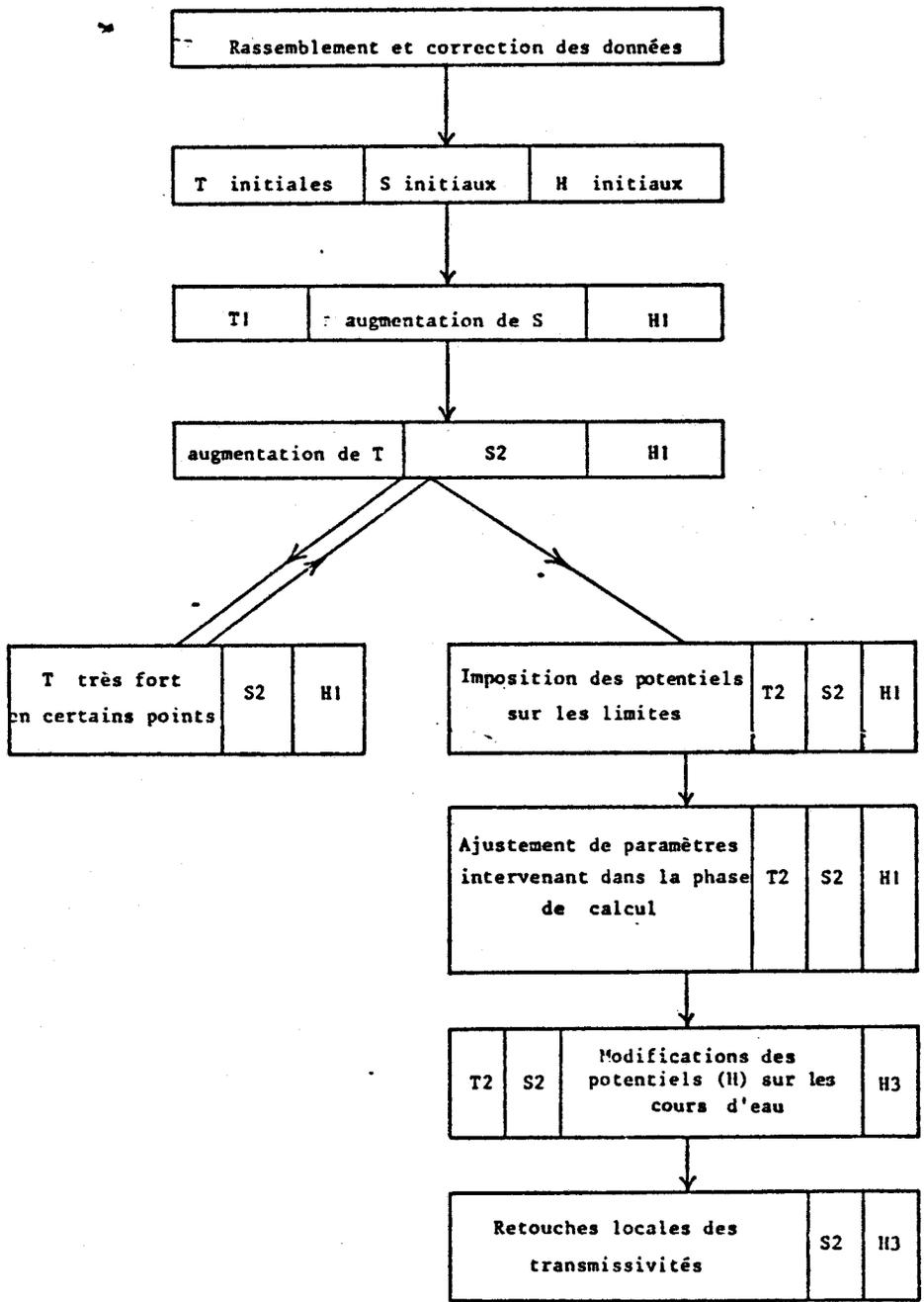


Fig. 3.3.- PROCESSUS SCHEMATIQUE DU CALAGE

Eléments du bilan	Transfert en m ³ pour la période considérée	Débit en m ³
<u>Sources</u>		
Emmagasinement	= - 953.833.472,00	0,953.10 ⁹
Recharge	= 3.081.287.680,00	3,081.10 ⁹
Flux constant	= 0,00	0,00
Pression constante	= 17.304.489.984,00	17,304.10 ⁹
Total	= 19.431.944.192,00	19,431.10 ⁹
<u>Décharges</u>		
Pression constante	= 19.426.070.528,00	19,486.10 ⁹
Quantité pompée	= 5.820.572,00	5,820.10 ⁶
Total	= 19.431.890.944,00	19,431.10 ⁹

Tableau 3.2 : Bilan hydrologique de la nappe de la craie
dans la région ARTOIS-CAMBRESIS



Nord, l'influence de ces cours d'eau n'étant pas toujours nette. Il faut enfin opérer certaines modifications de manière à caler le bilan hydrologique calculé avec les débits de l'Escaut jaugé à Condé-sur-Escaut.

3.4.2.- Répartition des transmissivités.

L'ajustement des transmissivités en vue de la restitution de la piézométrie amène quelques remarques.

Les valeurs initiales de perméabilité ont été majorées de manière générale d'un facteur 10. Il est vraisemblable que des pertes de charge importantes existent au niveau d'ouvrages vétustes n'ayant subi aucune acidification, et dont les rabattements spécifiques sont généralement élevés, ce qui explique le pessimisme des valeurs de départ.

Ainsi, après calage, la fourchette des valeurs de transmissivité oscille entre $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.4.3.- Restitution de la piézométrie.

La comparaison des courbes piézométriques, calculées et observées, représentées sur la figure 3-4 (correspondant au 30ème passage) montre que les courbes calculées sont dans l'ensemble légèrement décalées dans le sens d'une augmentation des cotes piézométriques, notamment dans la région de Cambrai et de Bapaume. D'autre part, de légers écarts apparaissent au niveau des petites convexités des courbes. Néanmoins, les résultats sont satisfaisants et les imperfections constatées ne peuvent pas gêner l'exploitation du modèle.

Nous avons, en second lieu, procédé à un calage sur une période de 6 mois (de novembre 1978 à avril 1979). Ce calage n'a posé aucune difficulté, si ce n'est un calcul rigoureux de la recharge par les précipitations, cette période correspondant à la fois à des mois très pluvieux, et à des mois secs ; la carte de référence était celle levée en avril 79 (ARNOULT, 1979). La restitution de la piézométrie calculée ne laisse apparaître que de rares différences entre les deux types de cartes, les cartes piézométriques observées étant relativement proches. Nous pouvons donc ici affirmer la bonne fiabilité du modèle.

3.4.4.- Bilan hydrologique.

Le bilan hydrologique de la nappe de la craie (tableau 3.2) permet d'établir les conclusions suivantes :

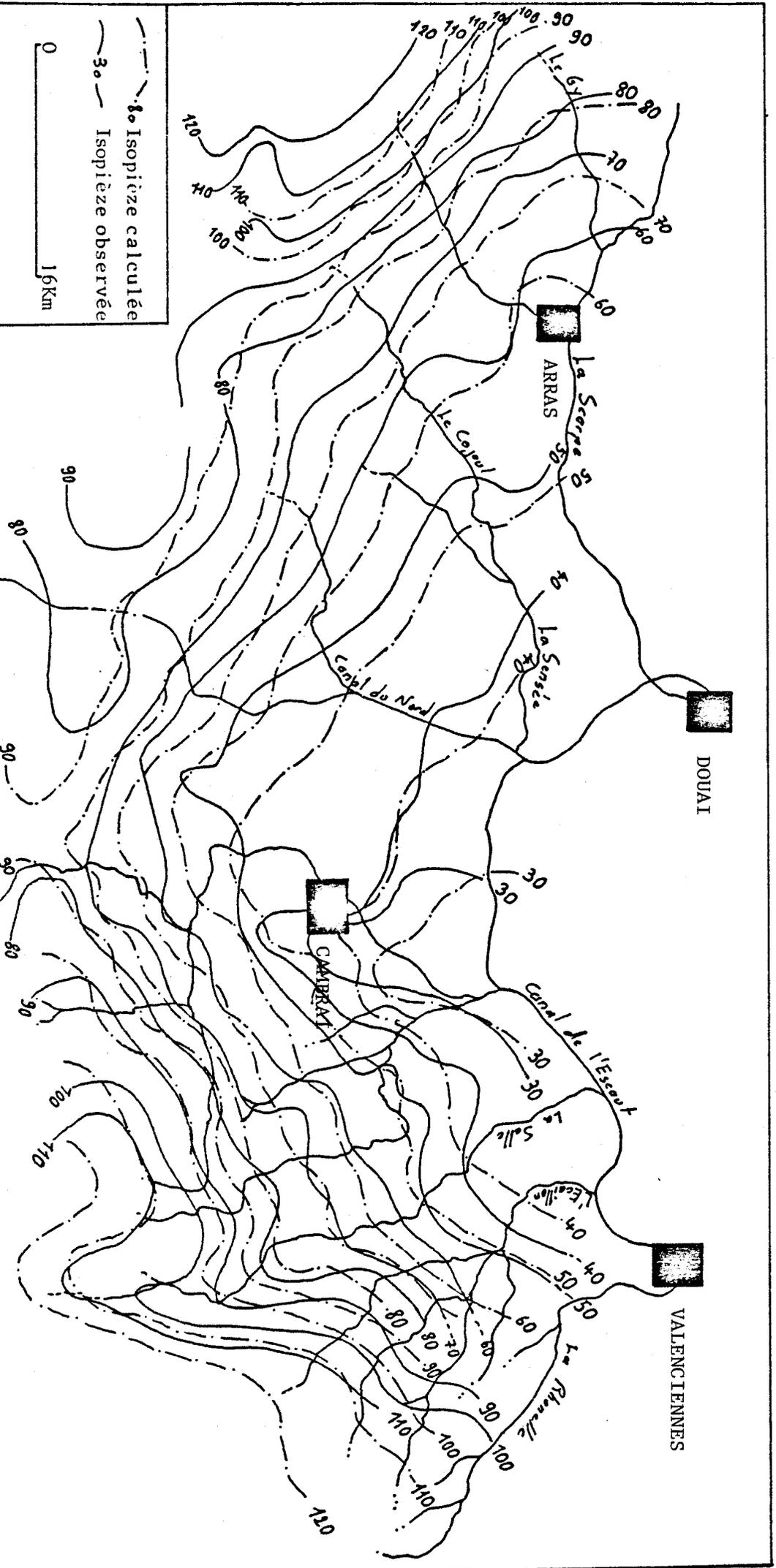


Fig. 3.4. — RESTITUTION DE LA PIEZOMETRIE



- La totalité des prélèvements ne représente qu'une fraction minime de la recharge par les précipitations. On remarque en effet la faiblesse des débits dans toute la région agricole Artois-Cambrésis, les forages les plus importants se situent le long du canal de l'Escaut et utilisés pour des besoins industriels, ainsi qu'au niveau des agglomérations les plus importantes (Valenciennes, Cambrai, Arras).

- On constate d'autre part l'importance des entrées et des sorties constituées par les mailles à pression constante. En fait, après calcul, il s'avère que 0,1% des entrées provient des mailles bordières dont le potentiel a été imposé afin d'éviter le dénoyage de ces mailles fragiles, ce qui perturberait profondément le calcul final réalisé par le modèle.

- Nous noterons également l'importance des pertes des rivières chiffrées à 99,9% du bilan total. Nous n'avons pas tenu compte ici d'une drainance possible de la nappe superficielle qui se confond au phénomène de perte.

- Les débits de sortie indiquent une drainance importante des canaux ou rivières vers la nappe de la craie confirmée par l'examen de la carte piézométrique. Il s'agit en particulier des canaux du Nord, de St-Quentin, de l'Escaut, ainsi que de la Selle et de l'Ecaillon.

- On peut supposer enfin, vu le faible rapport entre la quantité stockée et les débits sortants, une intense circulation latérale des eaux souterraines, ce qui peut, en partie, expliquer l'apport d'eaux anciennes dans des forages de faible profondeur.

3.5.- Exploitation du modèle.

Le modèle de simulation étant maintenant testé, nous pouvons simuler plusieurs scénarios de gestion des ressources en nous appuyant sur l'évolution des besoins en eau et sur les études prévisionnelles. De nouveaux sites d'exploitation sont ainsi proposés et expérimentés sur des périodes à pluviométrie normale et sur des périodes sèches.

En effet, dans le cadre de la restructuration des besoins en eau potable, il est nécessaire de proposer la création de nouveaux forages d'alimentation.

Dans une étude précédente (ARNOULT, 1980) vingt forages, répartis sur l'ensemble du Cambrésis, ont été proposés en vue d'assurer à eux seuls les besoins de cette région. L'implantation de ces ouvrages a été commandée d'une part, en fonction des critères hydrogéologiques, d'autre part, en fonction des débits demandés.

3.5.1.- Mode de sélection des sites.

L'implantation de nouveaux forages d'alimentation en eau été résolue en considérant les trois aspects suivants :

A) Un captage implanté à l'aval d'un bassin hydrologique ne récupère qu'une faible proportion de l'écoulement souterrain total. Dans la région étudiée, les modules d'écoulement souterrain (MS) varient de 5 à 7,5 l/s Km² ; à l'Est de Cambrai, dans les secteurs de Le Cateau, Englefontaine, les valeurs de MS définies par le programme MMØ1 (voir deuxième partie) sont de 5 l/s Km² ; ailleurs ces valeurs sont légèrement supérieures (7,5 l/s Km²) (MANIA, 1978).

Connaissant la surface du bassin hydrologique (s) on peut définir le débit global disponible par une relation empirique établie pour des sous-bassins de superficie inférieure à 100 Km².

$$Q = \frac{MS \times s}{20}$$

On admet généralement qu'un vingtième des ressources disponibles est capté effectivement par un captage situé en aval d'un bassin versant donné.

Nous avons fixé le module d'écoulement souterrain à la valeur de 7,5 l/s Km² soit 648 m³/jour/Km², sauf dans les secteurs précédemment définis où cette valeur tombe de 5 l/s/Km² soit 432 m³/jour/Km².

B) Le déficit d'un ouvrage dépend des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère et du rabattement qui sera obtenu, selon la formule classique de JACOB :

$$s = \frac{0,183 Q}{T} \log \left(\frac{2,25 Tt}{1^2} \right)$$

avec S = coefficient d'emmagasinement,
 T = transmissivité,
 t = temps,
 r = rayon de l'ouvrage,
 Q = débit de l'ouvrage,
 s = rabattement de la nappe au niveau de l'ouvrage.

Il est donc possible, en partant de valeurs issues du calage du modèle mathématique, de réaliser les opérations suivantes :

- on choisit un rabattement maximum équivalent au 1/4 de l'épaisseur d'aquifère utile,
- on fixe les paramètres à partir du modèle calé, ainsi que le rayon utile de l'ouvrage (généralement 0,20 m),
- on suppose un pompage continu de plusieurs mois,
- on calcule le débit moyen de l'ouvrage proposé.

C) Les études économiques effectuées précédemment (documents internes de la D.D.A. du Nord et du Pas-de-Calais) montrent qu'en zone agricole les besoins en eau potable doivent être estimés à 0,6 m³/jour/agriculteur. Les débits des forages à implanter doivent donc satisfaire cette demande.

3.5.2.- Evolution de la consommation.

Nous différencierons dans cette étude la consommation agricole et la consommation industrielle. Cette dernière subit une évolution difficilement palpable du fait des fluctuations économiques et de la difficulté de maintien des entreprises. Néanmoins, nous avons misé sur une relative stabilité de la demande en eau industrielle.

En ce qui concerne la consommation agricole, le passage d'une agriculture traditionnelle à une agriculture intensive se traduit par une nette augmentation des besoins. Le tableau 3.3 ainsi que des études récentes (DELPORTE, 1979) ont permis d'établir des pourcentages d'augmentation en eau potable.

Les besoins en eau en l'an 2000 pourraient être de 10 à 20% supérieurs à ceux de 1977 si l'on se base sur l'évolution de la consommation entre 1974 et 1977. Ils seraient par contre supérieurs de 70% par rapport à 1977 si l'on se réfère à la période 1962-1974.

	DEBITS DISTRIBUES			DEBITS PRELEVES
	% d'augmentation 74/73	% d'augmentation 75/74	% d'augmentation 76/75	% d'augmentation 77/75
Anneux	-	+ 19,4	+ 87,2	+ 31
Avesnes-les-Aubert	+ 14,9	+ 25,03	- 24,4	- 2,7
Banteux	+ 3,1	+ 4,5	-	+ 44
Beauvois	+ 5,9	+ 5,2	+ 5,2	- 16,4
Carnières	+ 44,5	+ 21,2	+ 11,7	- 9
Escaudoevres	+ 9,3	- 3,8	+ 27,9	+ 14,9
Esnes	+ 21,4	+ 1,8	+ 4,5	+ 4,5
Fontaine-Notre-Dame	+ 0,2	+ 1,8	+ 13,5	+ 1,4
Marcoing	+ 7,1	+ 16,3	- 7,5	- 15,2
Le Cateau	+ 5,1	- 19,5	+ 32,6	- 1,7

Tableau 3.3 : Exemples d'évolution des débits distribués et prélevés entre 1974 et 1977



Du fait de l'établissement d'une prévision à long terme, nous avons opté pour une évolution de 50% de la demande en eau potable pour l'horizon 2000. Ce chiffre ne constitue pas une évaluation précise, mais sera surtout utilisé en tant que contrainte lors de l'exploitation du modèle.

3.5.3.- Les différentes phases de la gestion.

A) Première phase.

Le modèle mathématique calé a été testé sur une période de 6 mois (de novembre 1978 à avril 1979). Dans un deuxième temps, les débits ont été majorés de 50% et ont fait l'objet d'une nouvelle simulation durant le même laps de temps.

On constate que les rabattements au niveau des puits sont modifiés dans des proportions relativement faibles (tableau 3.4).

Coordonnées des puits		Rabattements avant majoration (m)	Rabattements après majoration (m)	Abaissement des niveaux (m)
X	Y			
14	41	- 5,11	- 4,88	0,25
15	9	- 0,31	- 0,19	0,12
17	11	- 3,27	- 3,17	0,10
17	46	- 1,21	- 1,11	0,10
18	15	- 2,64	- 2,53	0,11

Tableau 3.4: Résultats partiels de la phase n° 1.

Les signes négatifs du rabattement indiquent que la cote piézométrique calculée au niveau du puits considéré est supérieure en raison de la recharge de la nappe à la cote piézométrique de départ (matrice des pressions de départ).

I	J	COMMUNES	I	J	COMMUNES
9	43	Lieu-St-Amand	20	42	Cattenières
10	50	Vendegies-sur-Ecaillon	21	40	Seranvillers
11	46	Avesnes-le-Sec	21	41	Wambaix
12	47	Saulzoir	21	46	Beauvois-en-Cambrésis
14	37	Cuvillers	21	47	Caudry
14	41	Thun-St-Martin	22	51	Fontay
14	50	Haussey	24	46	Ligny-en-Cambrésis
15	31	Haynecourt	24	49	Troisvilles
15	33	Sailly	24	50	Le Cateau
15	34	Sancourt	25	39	Lesdain
15	43	Rieux	25	42	Esnes
15	45	Avesnes-les-Aubert	25	47	Montigny-en-Cambrésis
15	47	Saint-Aubert	26	47	Bertry
15	50	Saint-Python	27	43	Walincourt-Selvigny
17	46	Saint-Hilaire	27	46	Clary
17	50	Solesmes	27	50	Saint-Benin
18	27	Moeuvres	28	50	Saint-Souplet
18	47	Quiévy	29	42	Malincourt
18	51	Ovillers	30	30	Gouzeaucourt
19	39	Niergnies	30	45	Elincourt
19	42	Estournel	32	31	Villers-Guislain
19	46	Bevillers			
19	48	Viesly			
19	50	Neuvilly			



Tableau 3.5 : Correspondance coordonnées-communes

Ces 5 exemples nous montrent une diminution des valeurs de rabattement soit un abaissement de niveaux qui, sur l'ensemble des puits introduits dans le modèle, ne dépasse pas un mètre.

La faible différence des niveaux s'explique par la proportion minime des prélèvements par captages par rapport aux différents modes de recharge. Les deux modélisations ont en effet été effectuées avec les mêmes valeurs de précipitations.

La faiblesse des rabattements constatés lors de cette première phase ne permet pas d'estimer les limites d'exploitation des puits ou forages actuellement en service. Il est donc nécessaire de simuler une période de pompage correspondant à une exploitation intensive de manière à connaître les débits maximum des captages de notre région d'étude.

Cette simulation s'est effectuée sur une quarantaine de puits représentatifs de la région, dont les débits ont été volontairement doublés. Il n'a pas été tenu compte ici des forages industriels, ni de ceux des villes importantes. Quelques uns des puits gérés par le S.I.D.E.N. ont fait par contre l'objet de cette simulation. Le tableau 3.5 permet de faire la correspondance entre les coordonnées de la maille (I, J) et le forage communal qu'elle contient.

Le modèle SIBITRA est d'un emploi peu pratique pour la détermination des contraintes maximales au niveau d'un nombre élevé de puits. Après plusieurs essais, il s'avère qu'une simulation d'une durée de 6 mois où les débits sont multipliés par deux permet d'approcher les conditions maximales d'exploitation des captages.

Un premier passage a montré que le forage de St-Python s'est complètement asséché, vraisemblablement à cause de la faible épaisseur de l'aquifère existant dans cette région. Ce puits étant retiré de la simulation (pour permettre la poursuite du calcul), nous avons pu constater la fragilité de 8 puits dont les rabattements égalaient ou dépassaient le quart de l'épaisseur d'aquifère (valeur théorique au-delà de laquelle l'exploitation d'un puits devient hasardeuse) (tableau 3.6).

On ne peut donc pour ces 8 puits que conclure à un débit maximal voisin de $Q = Q_0 + \frac{Q_0}{2}$, débit déjà utilisé précédemment et où l'on ne constate que de faibles rabattements.

I	J	Q ₀ = débit initial (m ³ /s)	Q = Q ₀ x 2 (m ³ /s)	Epaisseur (en m)	Rabattement (en m)	Rapport Rabattement / Epaisseur
14	50	3.10 ⁻³	6.10 ⁻³	12	5,2	0,43
17	50	1,6.10 ⁻²	3,2.10 ⁻²	21	12	0,57
18	51	3.10 ⁻³	6.10 ⁻³	22	6,6	0,33
19	48	7,5.10 ⁻³	15.10 ⁻³	25	14,4	0,58
24	49	1,1.10 ⁻³	2,2.10 ⁻³	20	5,4	0,27
27	43	1.10 ⁻²	2.10 ⁻²	29	7	0,25
29	31	1,2.10 ⁻³	2,4.10 ⁻³	27	12,4	0,46
30	30	6.10 ⁻³	12.10 ⁻³	30	16,2	0,54

Tableau 3.6: Rabattements obtenus avec Q = Q₀ x 2

Dans le cas des autres captages, les valeurs limites des rabattements n'ont pas été atteintes, et il est nécessaire de déterminer graphiquement les débits maximum correspondant à un rabattement égal au quart de l'épaisseur d'aquifère (fig. 3.5).

Cette méthode appliquée à chaque puits a permis d'établir le tableau 3.7 relatif à 22 communes.

En ce qui concerne les autres forages ayant fait l'objet de cette simulation, il n'a pas été possible de déterminer une limite d'exploitation les rabattements s'avérant très faibles du fait même de bonnes caractéristiques hydrauliques par rapport aux faibles débits introduits.

Plusieurs remarques sont cependant à faire à la vue de ces différents résultats :

- le modèle SIBITRA ne permet pas de prendre en compte les pertes de charge inhérentes aux caractéristiques techniques du puits ; les résultats enregistrés sont donc relativement optimistes puisque obtenus sur des puits "parfaits".

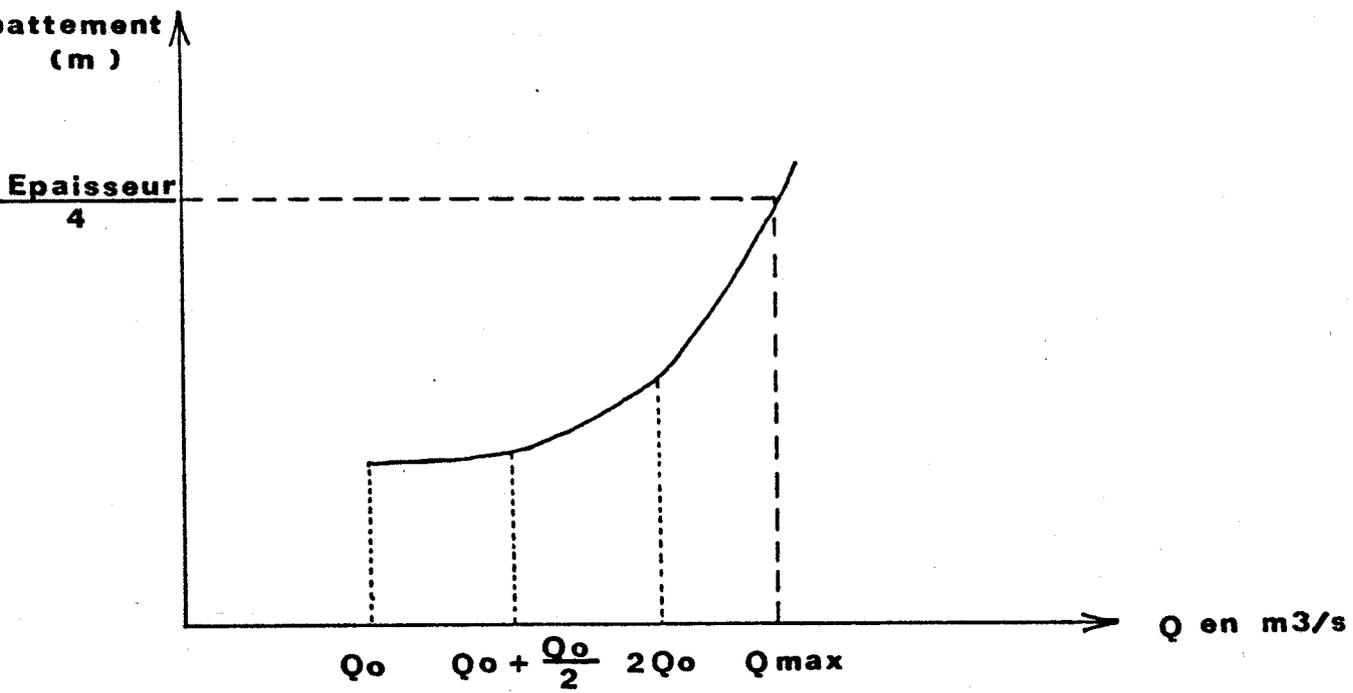


Fig. 3.5.- DETERMINATION DES DEBITS MAXIMA



I	J	Epaisseur d'aquifère (m)	Rabattement maximal (m)	Débit maximal (m3/s)
9	43	30	7	$16 \cdot 10^{-3}$
11	46	16	4	$13 \cdot 10^{-3}$
12	47	16,4	4,1	$10 \cdot 10^{-3}$
14	41	28,1	7	$10 \cdot 10^{-2}$
17	46	26,5	6,5	$9,5 \cdot 10^{-3}$
19	39	35	9	$14 \cdot 10^{-3}$
19	42	35	9	$8,3 \cdot 10^{-3}$
19	46	27	7	$8 \cdot 10^{-3}$
20	42	30	8	$8 \cdot 10^{-3}$
21	40	31,5	8	$4 \cdot 10^{-3}$
21	41	32	8	$2,7 \cdot 10^{-3}$
24	46	36	9	$14 \cdot 10^{-3}$
24	50	18	4	$8 \cdot 10^{-2}$
25	39	20	5	$6 \cdot 10^{-3}$
25	42	30	7	$6,4 \cdot 10^{-3}$
25	47	35	9	$4 \cdot 10^{-3}$
26	47	32	8	$10,3 \cdot 10^{-3}$
27	46	32	8	$8,5 \cdot 10^{-3}$
27	50	7	2	$7,6 \cdot 10^{-3}$
29	42	21	5	$6,5 \cdot 10^{-3}$
30	45	16	4	$6,2 \cdot 10^{-3}$
32	31	28	7	$5,5 \cdot 10^{-3}$



Tableau 3.7 : Débits maximum pour un rabattement $r = \frac{\text{épaisseur}}{4}$

- La période de simulation ne comprend pas d'alternance de pluie et de sécheresse la recharge restant identique à tout moment.

- Les débits utilisés lors de cette simulation ($Q_0 \times 2$) restent dans tous les cas très faibles et nettement inférieurs aux débits des forages proposés dans le cadre d'une restructuration des besoins en eau potable (ARNOULT, 1980).

B) Deuxième phase.

Au cours de cette phase nous avons imposé au modèle une période de sécheresse de deux mois ; la pression de départ étant la même que celle définie pour le mois de novembre, c'est-à-dire au moment de l'étiage, la simulation correspond en fait à quatre ou cinq mois de pluviométrie nulle (les prélèvements sont toujours majorés de 50%).

Lors de cette phase, nous avons constaté un abaissement général de la nappe, ainsi que l'assèchement de nombreux puits. Les nouveaux rabattements des puits considérés plus haut sont reportés dans le tableau ci-dessous.

Coordonnées des puits		Rabattement après majoration et avec recharge (m)	Rabattement après majoration sans recharge (m)	Abaissement des niveaux
X	Y			
14	9	11,21	15,50	4,29
15	9	- 0,19	3,10	2,91
17	11	- 3,17	-0,70	2,47
18	15	- 2,53	-0,10	2,43

Tableau 3.8 : Résultats de la phase n° 2.

On observe donc au niveau des puits un abaissement général de 3 mètres en moyenne et des valeurs beaucoup plus fortes sur les zones de plateau, ce qui provoque l'assèchement de la maille ou du puits correspondant. Nous pouvons donc conclure à la fragilité de certains puits actuels qui ne peuvent répondre à la demande lors d'une période critique de sécheresse.

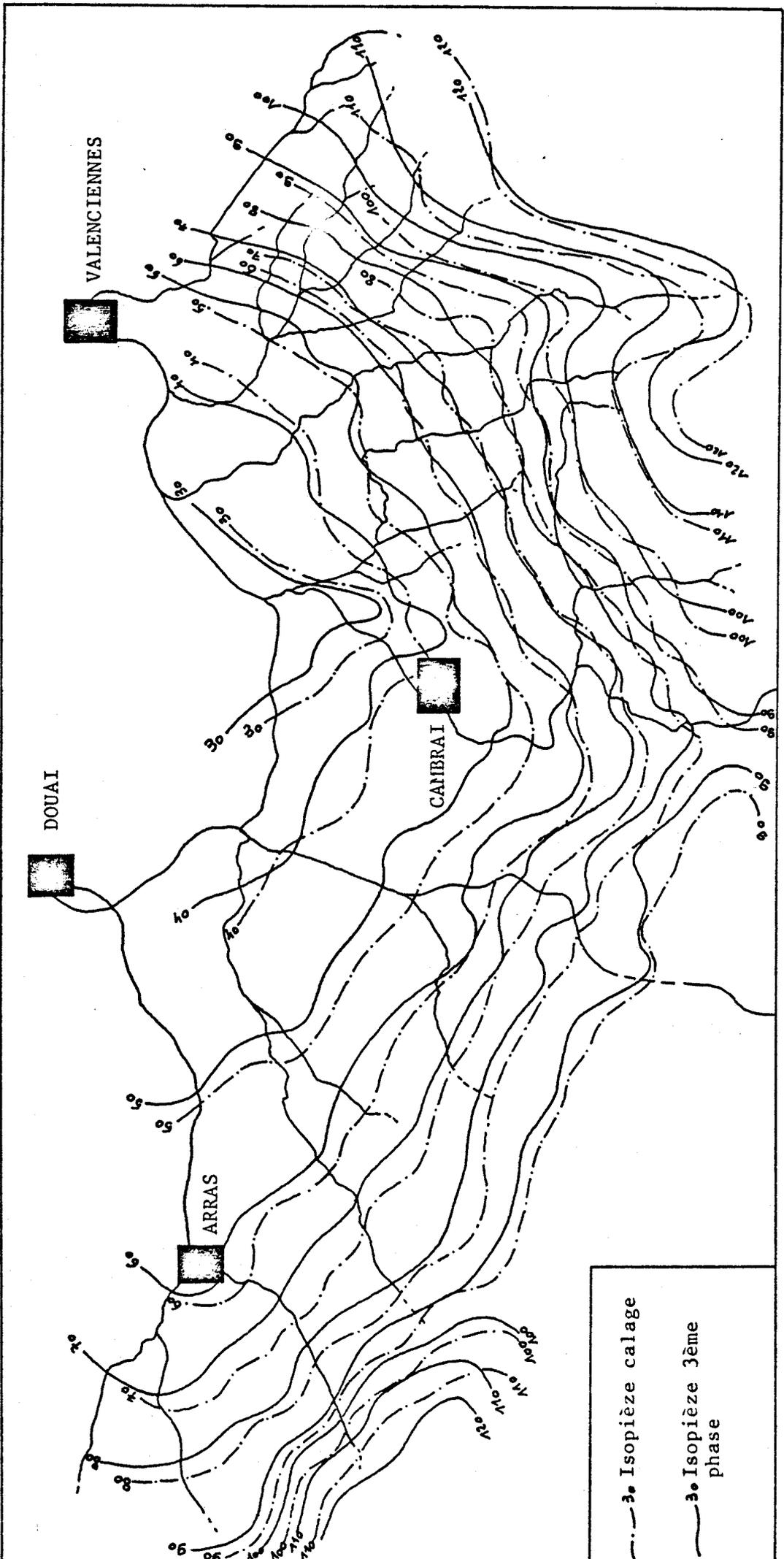


Fig. 3.6.- COMPARAISON DE LA PIEZOMETRIE CALCULEE LORS DU CALAGE DU MODELE ET DE CELLE CALCULEE LORS DE LA 3ème PHASE



C) 3ème phase.
.....

L'objectif est ici de comparer la piézométrie actuelle avec celle calculée dans le cas de la restructuration des ressources : les anciens puits communaux étant remplacés par un nombre plus restreint de nouveaux captages (les forages industriels et ceux gérés par le S.I.D.E.N. sont conservés). La figure 3-6 permet de constater que l'allure générale des courbes piézométriques est modifiée avec un décalage des isopièges vers le Nord par rapport à l'état actuel. Ce décalage correspond à un relèvement des cotes piézométriques malgré des prélèvements plus importants. Au Sud et au Sud-Est de Valenciennes on remarque au contraire un nivellement de l'écart entre les deux types de courbes avec parfois un abaissement des niveaux piézométriques dû :

- à la faible épaisseur d'aquifère dans ces secteurs,
- à la concentration des débits sur un site unique.

D) 4ème phase.
.....

De la même façon que pour les puits actuels, nous avons soumis les puits proposés à une période de sécheresse de même durée. Quelques exemples de rabattements calculés sont exprimés dans le tableau 3.9.

On constate cette fois que l'abaissement des cotes piézométriques dû à l'absence de précipitations est faible et ne dépasse pas 0,50 m, ce qui est nettement inférieur à celui enregistré lors de la 2ème phase. Nous pouvons donc conclure à de bonnes caractéristiques hydrauliques au niveau des captages à créer, ainsi qu'à une bonne implantation.

3.5.4.- Conclusions.

Après les différents cas de simulation nous pouvons, dans un premier temps, affirmer qu'une augmentation importante des prélèvements en zone agricole n'altère que très faiblement les ressources potentielles de la nappe en raison de la faiblesse des débits actuels (même majorés de 50%). Cependant, les mauvaises caractéristiques hydrauliques de ces puits dues le plus souvent à leur implantation aux points les plus élevés des territoires communaux ne permettent pas d'assurer la demande en eau potable en période de sécheresse, période où les besoins sont souvent multipliés par deux.

Coordonnées des puits		Rabattelements après majoration avec recharge (m)	Rabattelements après majoration sans recharge (m)	Abaissement des niveaux (m)	
X	Y				
	12	21	0,39	0,50	0,11
	12	29	- 1,48	- 1,45	0,03
	12	47	2,91	3,38	0,47
*-----	12	51	- 4,76	- 4,71	0,05
*-----	12	48	0,0	0,0	0,0
*-----	14	39	0,0	0,0	0,0
*-----	15	44	0,01	0,01	0,0
	16	45	1,05	1,71	0,0
*-----	16	43	0,0	0,0	0,0
	16	52	2,76	3,84	1,08
*-----	18	49	0,0	0,0	0,0
*-----	19	26	- 6,75	- 6,43	0,32
*-----	19	49	1,19	3,03	1,84
*-----	22	51	0,06	0,06	0,0
*-----	23	42	0,01	0,56	0,56
*-----	19	34	0,0	0,0	0,0
*-----	11	37	0,01	0,01	0,0
*-----	11	41	0,0	0,0	0,0
*-----	25	50	0,01	0,01	0,0
*-----	11	50	0,0	0,0	0,0
*-----	9	49	- 2,02	- 1,63	0,39

Tableau 3.9 : Résultats de la phase n° 4.



N.B.- Les forages figurant avec une astérisque sont des captages proposés.
Les autres correspondent aux forages industriels et à ceux gérés par le S.I.D.E.N.

Il apparaît donc important de modifier les conditions de prélèvements en créant une vingtaine de nouveaux captages dont les débits couvriraient largement les besoins de la zone agricole du Cambrésis. Les différents tests effectués sur ces forages nous ont permis de vérifier leur bonne implantation et leur bon comportement.

QUATRIEME PARTIE

ETUDE DU CHIMISME DE LA

CRAIE ET DE SON EVOLUTION

Le bassin versant du Haut-Escaut, comprenant dans son ensemble les régions de l'Artois, du Cambrésis et de la partie occidentale du Hainaut, correspond à une vaste région d'activité agricole où les rares industries implantées sont, soit localisées dans les grandes villes (textile, métallurgie à Arras et Cambrai), soit dispersées sur l'ensemble de la région (sucrieries, laiteries, industries agro-alimentaires).

Différents auteurs et organismes ont constaté, malgré l'absence d'industries lourdes, une détérioration notable de la qualité des eaux souterraines, notamment au niveau des nitrates, qui, présents dans l'eau d'alimentation, sont dangereux pour les nourissons.

Le but de cette étude a été double dans la mesure où les pollutions constatées dans les eaux captées peuvent être causées soit par des apports organiques relatifs à l'activité humaine, soit par les engrais artificiels. Il convient donc d'utiliser les différents moyens disponibles : connaissance des données agronomiques (apports sur les cultures, exportations par les récoltes) et des modes de rejet d'eaux usées, analyses chimiques et isotopiques, traçages et simulation hydrochimique.

4.1.- De l'utilisation des engrais.

4.1.1.- Migrations des nitrates vers la nappe.

Les différents mouvements et transformations qui constituent le cycle interne de l'azote du sol sont résumés (fig. 4.1.). J.C. REMY dans une étude sur des limons profonds dans le bassin de Paris (II) a constaté que sur une parcelle cultivée avec apport massif d'engrais, l'azote minéral est rapidement concentré dans la partie superficielle puis tend à disparaître rapidement en raison de l'absorption de la plante. Le minimum d'azote minéral correspond à la fin de la croissance de la plante, ensuite la concentration augmente en raison de la minéralisation de la matière organique. En profondeur, la phase de drainage d'octobre à mars provoque une augmentation de la teneur en azote minéral.

Si la parcelle est nue, le drainage s'opère de manière spectaculaire, aucune plante ne venant absorber cet azote. Il faut, d'autre part,

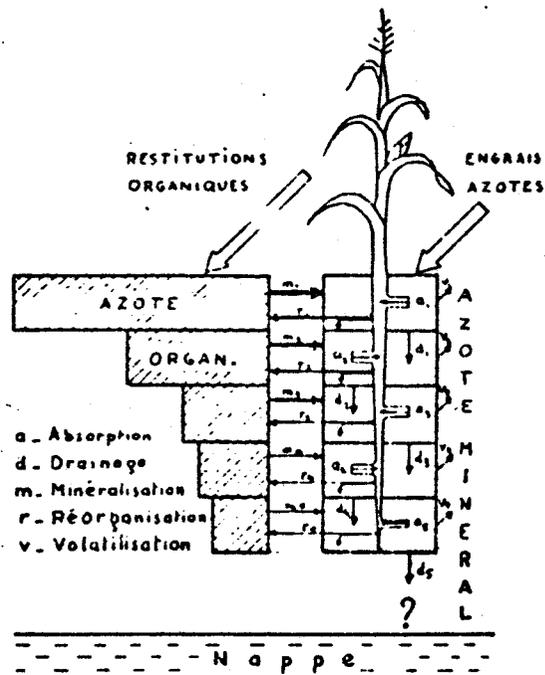


Fig. N° 4.1: CYCLE INTERNE DE L'AZOTE DU SOL

(d'après J.C. REMY)



remarquer que les effets sont faibles à court terme, mais que les effets cumulatifs existent et expliquent des teneurs beaucoup plus fortes que la partie provenant de l'apport d'engrais.

4.1.2.- Utilisation des engrais sur les cultures.

Il est important, si l'on considère qu'une variation saisonnière du chimisme de l'eau a lieu, de connaître l'évolution périodique de la consommation en engrais. Nous avons retranscrit en particulier les mouvements d'azote total sur les deux régions Nord et Picardie au long d'une année. L'essentiel de l'épandage se situe de mars à mai, le complément étant utilisé en septembre (fig. 4.2).

De manière plus détaillée, les engrais azotés simples sont utilisés à deux époques de l'année :

- 12% de mai à septembre,
- 82 à 85% de mars à avril.

L'utilisation des engrais azotés est concentrée sur les deux mois mars et avril :

- 87 à 93% du total en mars-avril,
- 4 à 6% en février,
- 1 à 3% en septembre.

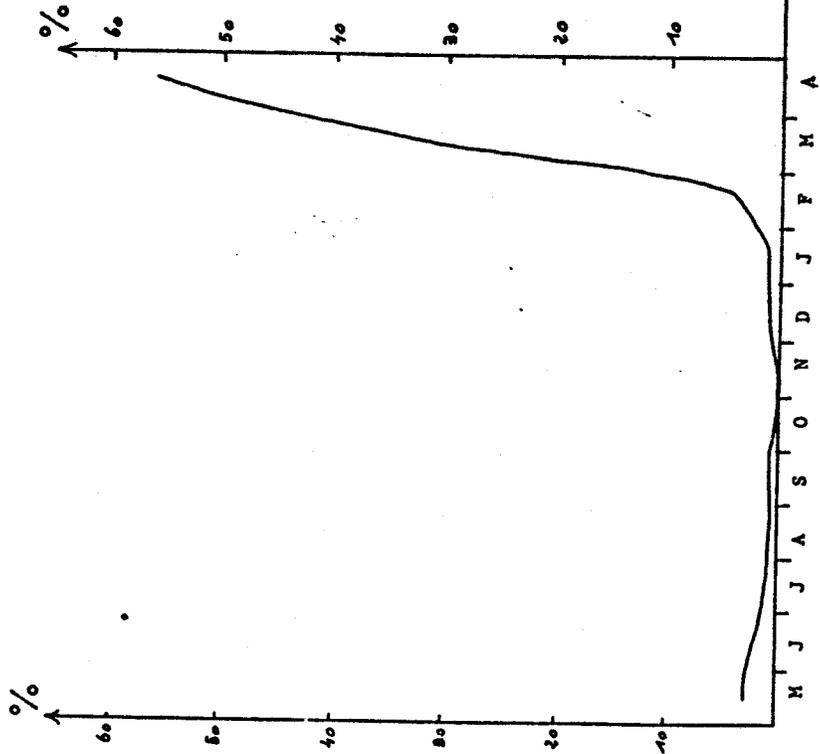
On constate donc que la presque totalité du tonnage d'engrais est répandue sur le sol avant même la période de croissance de la plante.

4.1.3.- Utilisation des fertilisants par la plante.

Une étude faite par le B.R.G.M. d'Aquitaine (ALBINET, CHAMAYOU, SAMSON, 1974) montre que l'absorption des éléments nutritifs par le maïs se fait avec une intensité très prononcée pendant la période de croissance de la plante correspondant à la 2ème quinzaine de juin. La plante a alors consommé la totalité de l'azote et de la potasse au stade de début de formation des grains (début août).

Lors de la récolte du grain, les tiges et les feuilles restent sur place et restituent au cours de la biodégradation une petite quantité de ces éléments que l'on retrouve en partie après lessivage dans la nappe.

Mouvements d'azote total en X : région NORD
de Mai 1969 à Avril 1970



Mouvements d'azote total en X : région PICARDIE
de Mai 1969 à Avril 1970

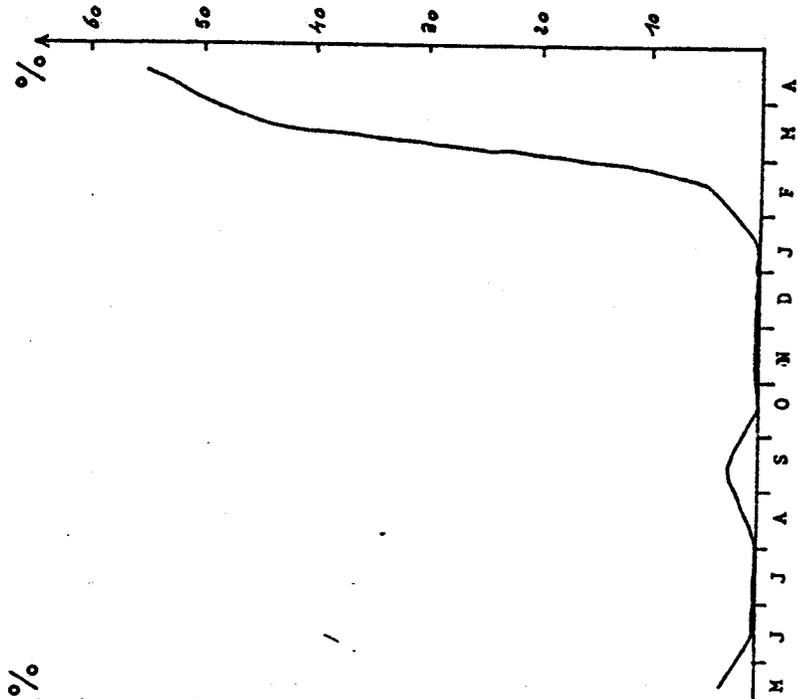


Fig. 4.2.- MOUVEMENTS D'AZOTE TOTAL EN POURCENTAGE DANS LA REGION NORD-PICARDIE



On peut donc relier cette utilisation des engrais par la plante avec les variations de concentrations saisonnières dans le sol. L'application d'engrais avec les semailles (méthode actuellement appliquée dans le Cambrésis et l'Artois) provoque une hausse brutale des concentrations. Une partie importante peut donc s'infiltrer vers la nappe par drainage, la croissance de la plante diminuera ensuite au fur et à mesure des concentrations dans le sol. Enfin, la restitution au cours de la biodégradation des tiges et feuilles augmentera une nouvelle fois les teneurs ainsi que le lessivage rapide qui a lieu en automne sur un sol devenu nu. Il s'agit donc bien d'un cycle saisonnier, dont les effets cumulatifs au fil du temps sont amplifiés par l'appauvrissement du sol.

A la fin de chaque saison de croissance des plantes, les nitrates contenus dans la partie supérieure percolent vers l'aquifère pendant la période d'alimentation des nappes.

En conclusion de ces trois paragraphes, nous pouvons dire que toute activité agricole ou d'élevage amène une pollution de l'eau, bien que les teneurs en nitrates diminuent avec la profondeur ; dans le cas de déchets solides, toutes les zones sont polluées parallèlement (ADRIANO, PRATT, BISCHOP, 1971).

4.2.- Analyse des données chimiques.

4.2.1.- Examen des cartes d'isoteneurs.

A) Les nitrates.

Des analyses physico-chimiques réalisées en automne 1978, donc en période d'étiage, par la D.D.A.S.S. du Nord et du Pas-de-Calais et également par la C.G.E. nous ont permis de dresser une carte de l'évolution spatiale des nitrates (fig. 4-3). L'étude de cette carte permet de dégager les éléments suivants :

- Les taux de nitrates dans les eaux souterraines du réservoir crayeux sont supérieurs à la valeur de 20 mg/l dans 91% des cas considérés et supérieurs à la valeur de 40 mg/l dans 20% des cas.

- Il existe dans toute la zone Cambrésis-Artois un fond de pollution de l'ordre de 20 à 25 mg/l sur lequel se développent des secteurs à teneurs beaucoup plus fortes (supérieures à 50 mg/l). Ce sont princi-

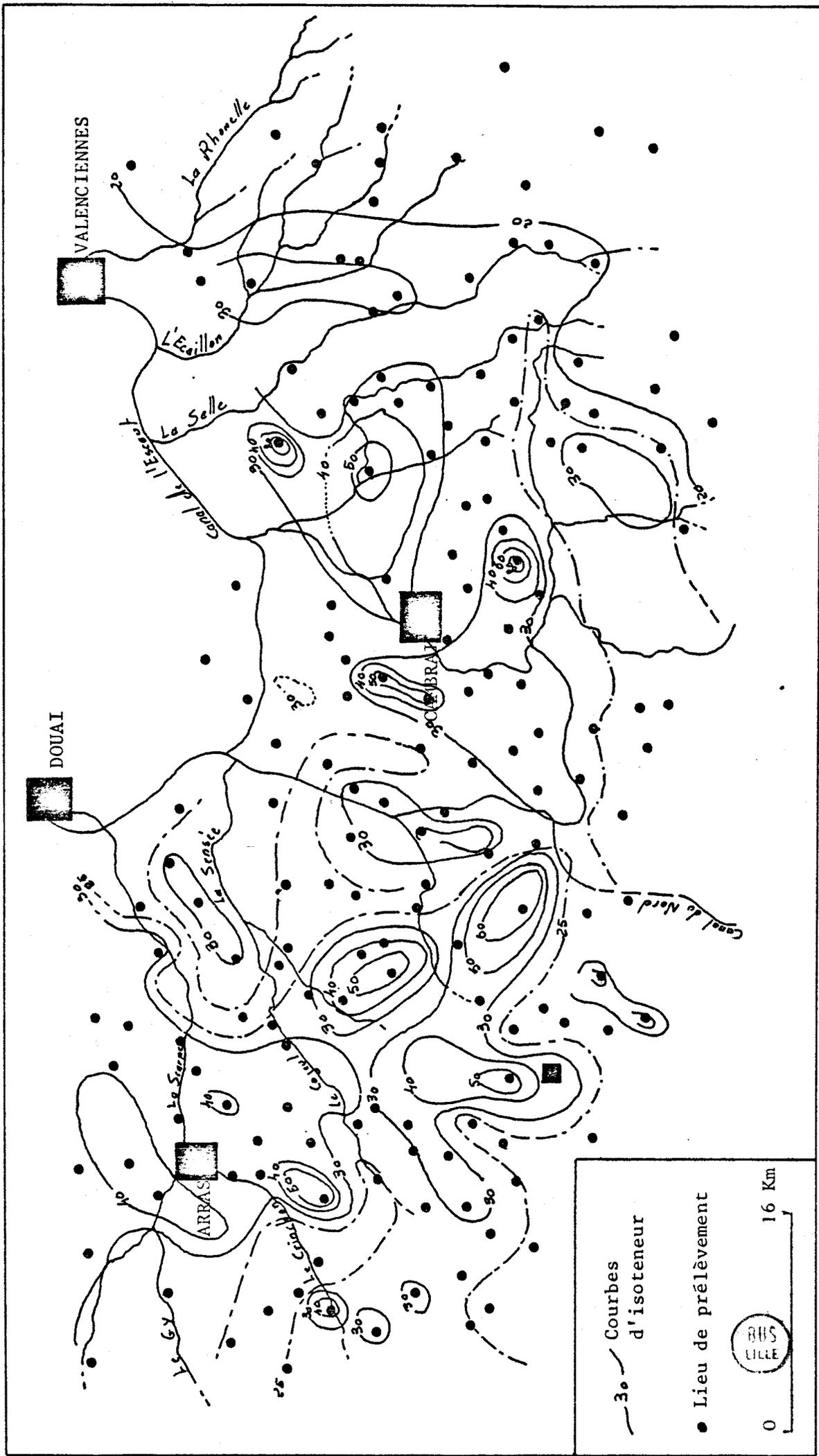


Fig. 4.3.- CARTE DES TENEURS EN NITRATES (UNITES EN mg/l) DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DE LA CRAIE (OCTOBRE 1978)

palement le secteur NNW de Bapaume (Sapigny, Mory, Ablainzevelle), la zone interfluve entre la Sensée et le ruisseau de l'Hirondelle, le secteur de Séravillers au Sud de Cambrai et la zone NE de Cambrai (Avesnes-le-Sec, Avesnes-les-Aubert).

- On constate d'autre part des teneurs faibles là où la nappe est protégée par des terrains imperméables tertiaires (Sud du Valenciennois) et lorsque la protection est assurée par la forêt (forêt de Mormal).

- La nappe, vulnérable dans son ensemble, est soumise à la fois à une pollution de type agricole qui correspond à un taux actuel de 25 à 30 mg/l de nitrates et à une pollution de type urbain, consécutive à l'activité humaine qui fait doubler ces chiffres.

- Cette carte permet en outre, connaissant le sens d'écoulement des eaux souterraines, de condamner toute implantation de captages situés en aval de la source de pollution.

Certaines remarques et critiques sont toutefois à dégager de cette carte :

- . les teneurs en éléments chimiques (nitrates ou autres) correspondant à des analyses effectuées au captage d'alimentation de la commune,
- . les courbes d'isoteneurs dessinées représentent donc une cartographie régionale, non représentative des diverses sources de pollution et qui ne sert pour l'instant qu'à visualiser certaines anomalies de teneurs.

B) Les sulfates. (fig. 4-4).

Cette carte a été dressée d'après les mêmes analyses que précédemment et à la même époque. Les sulfates, présents dans l'eau souterraine, sont des marqueurs de pollution qui complètent les indications fournies par les nitrates, ils existent en effet en concentrations élevées dans les eaux usées urbaines et industrielles et les fortes teneurs décelées correspondent à celles de la carte des isoteneurs en nitrates.

On constate d'autre part que les valeurs augmentent au fur et à mesure que l'on monte vers le Nord, c'est-à-dire vers les zones industrielles de Douai et Valenciennes. Un autre phénomène apparaît le long du canal de la Scarpe entre Arras et Douai : celui de l'oxydation des sulfures de fer. Ces derniers, (pyrite, marcassite) présents dans la craie, sont dissociés par l'activité bactérienne élevée dans les eaux riches en

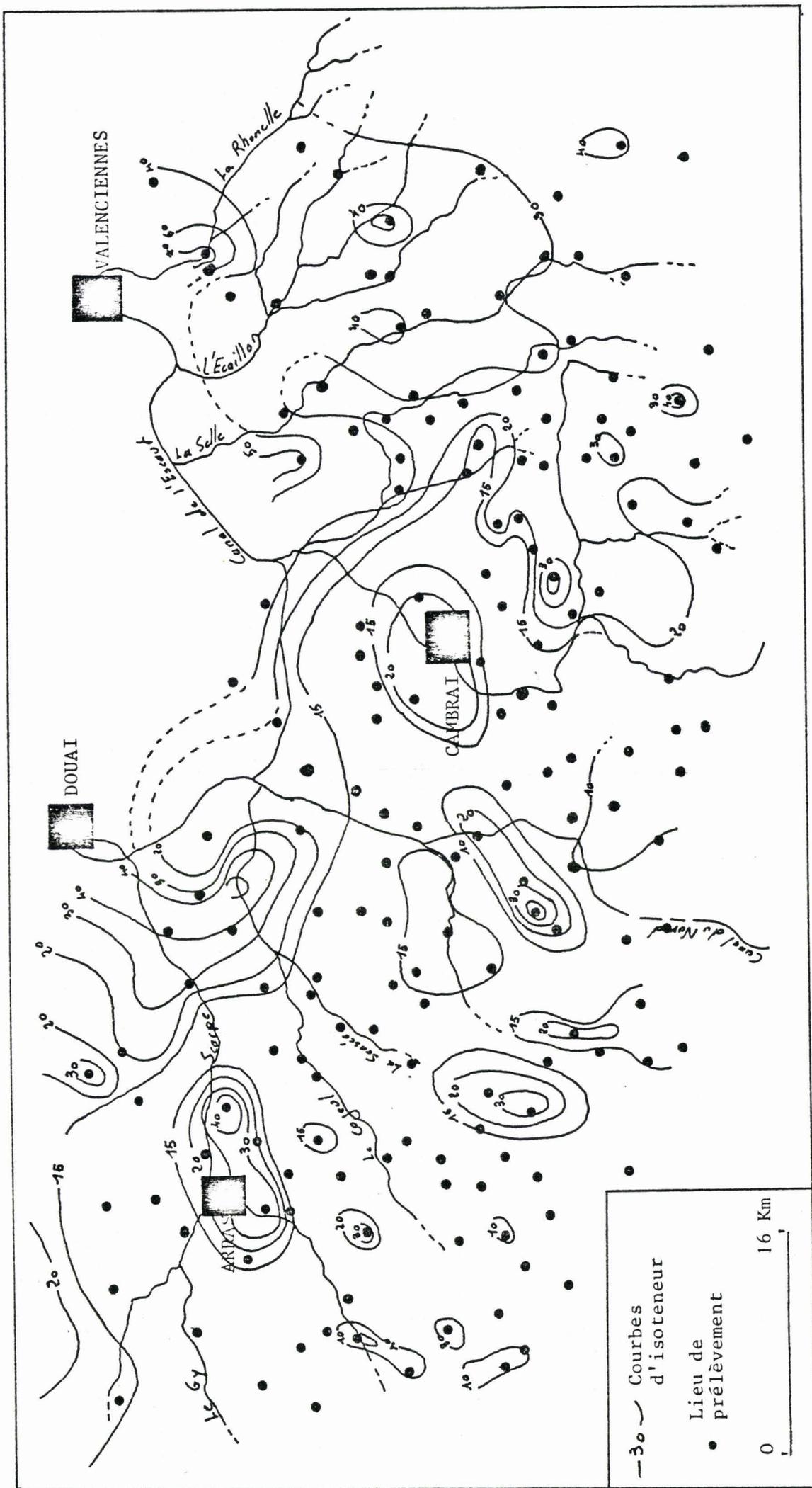


Fig. 4.4.- CARTE DES TENEURS EN SULFATES (UNITES : mg/l) DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DE LA CRAIE (OCTOBRE 1978)



matières organiques. Nous noterons enfin que l'activité agricole n'engendre que des apports relativement modestes en sulfates ; aucune valeur supérieure à la norme admise (250 mg/l) n'a été enregistrée.

C) Synthèse.

Le fait de rencontrer au niveau de certaines communes des teneurs importantes en nitrates, correspondant souvent aux anomalies de la carte des sulfates, permet de proposer plusieurs origines pour les nitrates présents dans l'eau :

- Ils sont souvent issus des eaux usées non traitées (activité humaine, élevage de bovins et porcins) qui sont soit dirigées vers d'anciens puits, soit collectées et envoyées vers des vallons secs en cas d'absence de réseau hydrographique.

- Ils sont souvent apportés par l'homme (activité agricole) par fertilisation d'engrais azotés artificiels ou d'origine animale. Sur un sol nu ou en l'absence de croissance des plantes, les nitrates sont lessivés et directement entraînés vers la nappe par les eaux d'infiltration.

- Enfin, une très faible quantité provient de l'activité bactérienne (du sol végétal) qui transforme l'azote de l'air atmosphérique en nitrate assimilable par les plantes. Lors de la mort de ces dernières, les nitrates sont entraînés dans le sous-sol.

4.2.2.- Evolution des nitrates et des sulfates.

Une série de diagrammes relatifs aux captages de plusieurs communes du Cambrésis (fig. 4-5 et annexe II) permet de représenter l'évolution des teneurs en éléments chimiques. Les mesures sont effectuées le plus souvent deux fois par an, toutefois certains captages bénéficient de quatre, voire six analyses annuelles.

On peut immédiatement constater une augmentation sensible des valeurs de l'ordre de 1 à 2 mg/l et par an dans certains secteurs ; dans d'autres cas des variations importantes des teneurs masquent l'évolution générale, mais l'accroissement est net entre les années 1970 et 1980.

On observe en outre pour la majorité des captages une forte augmentation des teneurs en nitrates entre 1979 et 1980 (ex. : Gouzeaucourt, Fontaine-Notre-Dame, Bertry).

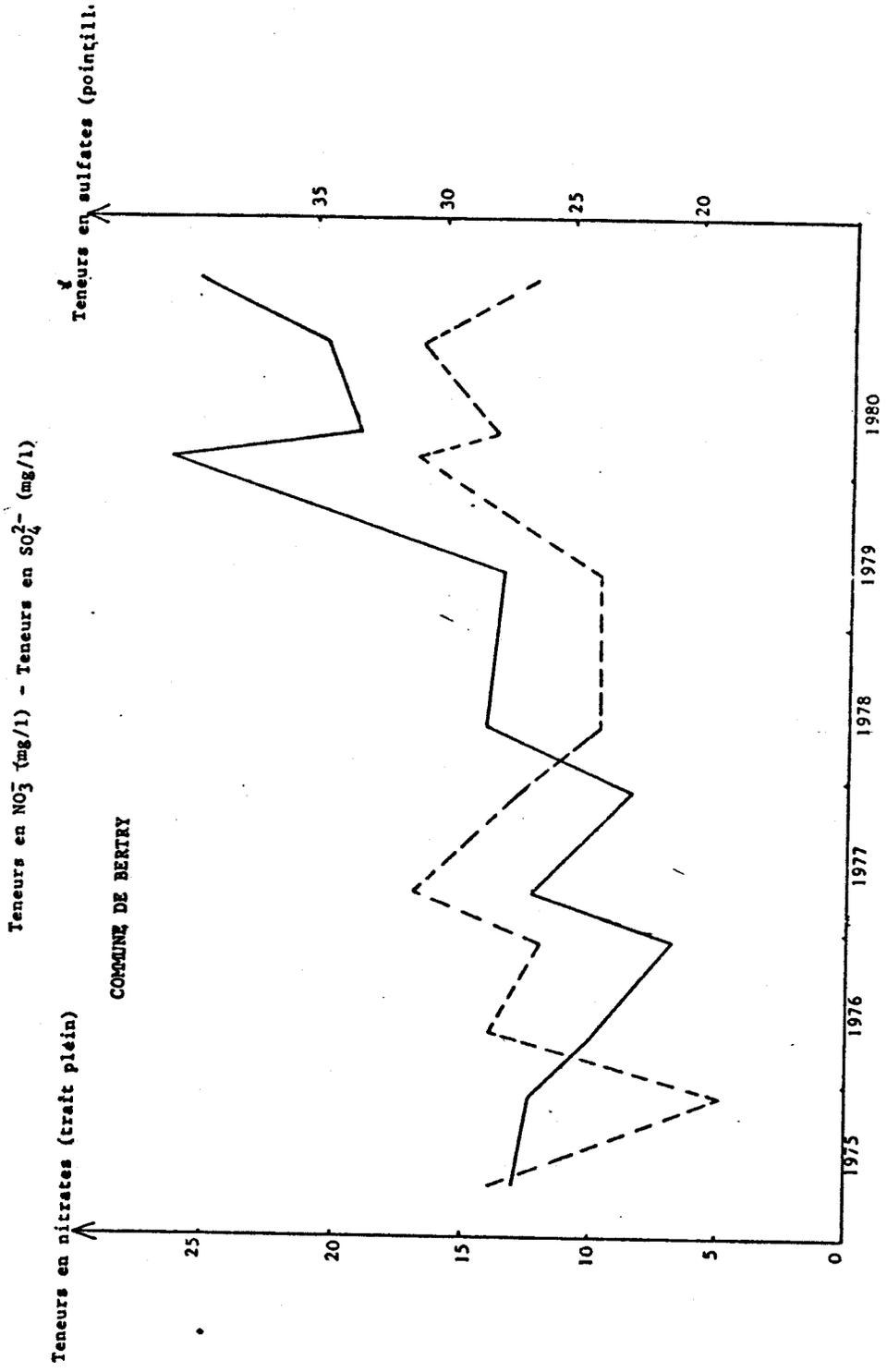


FIG. 4.5.- EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES ET EN SULFATES



La superposition des courbes nitrates et sulfates permet de conclure à des modes de transfert et d'absorption différents pour ces éléments, les courbes possédant des évolutions souvent paradoxales. Dans certains cas, comme par exemple à Avesnes-le-Sec et Avesnes-les-Aubert, de nombreux pics correspondent, ce qui prouverait que la pollution azotée constatée sur ces deux communes provient du rejet anarchique ou mal réalisé des eaux usées.

Les captages d'un même secteur possédant une profondeur de nappe voisine, présentent une évolution de leurs teneurs en nitrates semblable et moins fréquemment de leur teneur en sulfates.

La fréquence des variations et leurs amplitudes sont en relation avec la profondeur de la nappe. De manière générale, ces variations sont plus fortes et plus fréquentes lorsque la nappe est plus proche du sol et inversement, sauf quelques exceptions comme par exemple Bertry où l'on notera une forte évolution de 37 à 52 mg/l de décembre 1979 à mars 1981. Cependant, l'importance des variations est aussi liée, dans de nombreux cas à la forte concentration moyenne. Plus cette concentration est élevée, plus les variations seront grandes.

L'étude des diagrammes de concentrations en nitrates et en sulfates a été complétée par une analyse de tendances pour ces deux éléments. Les résultats de cette analyse figurent dans les tableaux 4.1 et 4.2.

Nous noterons dans un premier temps la difficulté d'obtenir dans certains cas des coefficients de corrélation proche de 1 (notamment pour les sulfates) ou au moins supérieurs à 0,5. Toutefois, les chiffres et équations rapportés dans ce tableau s'avèrent dans leur ensemble cohérents.

Les faibles teneurs en sulfates actuelles ainsi que le peu d'amplitude de leurs variations expliquent que la norme de 250 mg/l sera franchie dans un avenir très lointain. Par contre, nous constatons que celle correspondant aux nitrates l'est dans 80%, ce qui sous-entend, bien qu'il ne s'agisse que d'un calcul théorique, une prise en charge immédiate de tous les moyens de lutte contre la pollution. Les valeurs calculées ne sont évidemment pas représentatives des phénomènes naturels où interviennent pluviométrie, nature du terrain, quantité d'engrais, etc...,

Tableau 4.1: Analyse de tendance - Teneurs en nitrates

Commune	Période d'observation	Teneur en NO ₃ ⁻ à l'horizon 2000 (mg/l)	Date de dépassement de la norme (44 mg/l)	Equation de la droite d'évolution	Coefficient de corrélation	Teneurs actuelles (début 1981) en mg/l
Saint-Python Saint-Python	1970-1980 1975-1980	37,6 76	Année 2011 Année 1984	$y = 0,04 x + 21$ $y = 0,19 x + 19$	0,53 0,84	30,5
Marcoing Marcoing	1970-1980 1975-1980	68,6 61,9	Année 2026 (pour 100 mg/l) Année 2029 (pour 100 mg/l)	$y = 0,05 x + 33$ $y = 0,09 x + 34$	0,29 0,44	43
Gouzeaucourt	1974-1980	63	Année 1989	$y = 0,14 x + 18$	0,62	26
Proville Proville	1970-1980 1975-1980	46,9 41,8	Année 1996 Année 2006	$y = 0,06 x + 25$ $y = 0,03 x + 30$	0,59 0,21	35
Fontaine-Notre-Dame Fontaine-Notre-Dame	1970-1980 1975-1980	90,5 111	Année 1993 (pour 80 mg/l) Année 1990 (pour 80 mg/l)	$y = 0,14 x + 39$ $y = 0,18 x + 46$	0,89 0,85	51,5
Rumilly Rumilly	1973-1980 1975-1980	49,7 56,5	Année 1993 Année 1991	$y = 0,06 x + 28$ $y = 0,07 x + 29$	0,80 0,79	32
Avesnes-le-Sec	1975-1980	103	Année 2008 (pour 110 mg/l)	$y = 0,06 x + 83$	0,15	98
Busigny Busigny (si on néglige la dernière mesure : très forte)	1974-1980 1974-1980	44,9 22,9	Année 1997 Année 2032	$y = 0,12 x + 3,4$ $y = 0,05 x + 5$	0,55 0,59	10,4
Doignies	1974-1980	85	Année 1996 (pour 80 mg/l)	$y = 0,09 x + 54$	0,51	
Cattenières	1973-1980	42,5	Année 2006	$y = 0,02 x + 35$	0,01	30,4
Lesdain	1974-1980	19,4	-	$y = 0,03 x + 29$	- 0,12	27
Malincourt	1975-1980	48	Année 1993	$y = 0,05 x + 32$	0,43	39
Masnières	1974-1980	56,5	Année 1991	$y = 0,10 x + 23$	0,61	29
Elicourt	1975-1980	51,5	Année 1991	$y = 0,06 x + 30$	0,55	32
Neuvilly Neuvilly	1973-1980 1975-1980	43,3 31,4	Année 2002 ou 2003 Année 2500! (environ)	$y = 0,048 x + 27$ $y = 0,002 x + 31$	0,43 0,01 !!!	34
Boussières-en-Cambrésis	1978-1980	70,3	Année 1990 (pour 50 mg/l)	$y = 0,13 x + 35$	0,34	36
Bertry	1975-1980	62	Année 1991	$y = 0,18 x + 7,4$	0,66	25,4
Avesnes-les-Aubert Avesnes-les-Aubert	1972-1980 1975-1980	79,1 113,8	Année 1986 (pour 60 mg/l) Année 1983 (pour 60 mg/l)	$y = 0,11 x + 39$ $y = 0,26 x + 34$	0,73 0,96	51
Banteux	1978-1980	231	Année 1986 (pour 100 mg/l)	$y = 0,81 x + 17$	0,88	33,5
Connelieu Connelieu	1972-1980 1975-1980	37,4 38,2	Année 2013 Année 2011	$y = 0,03 x + 24$ $y = 0,04 x + 25$	0,56 0,23	27
Caulery	1974-1980	81,7	Année 1988 (pour 60 mg/l)	$y = 0,15 x + 32$	0,76	51,5
Le Cateau	1974-1980	52,1	Année 1991	$y = 0,07 x + 28$	0,52	32
Romerles Romerles	1977-1980 1975-1980	40,9 51,6	Année 2004 Année 1993	$y = 0,053 x + 22$ $y = 0,095 x + 23$	0,49 0,54	32 (mai 1980)
Ligny-en-Cambrésis	1975-1980	47,2	Année 1997	$y = 0,09 x + 18,5$	0,71	25
Fontaine-au-Pire	1975-1980	52,4	Année 1992	$y = 0,08 x + 26$	0,62	32

BUS
LILLE

Tableau 4.2 : Analyse de tendance - Teneurs en sulfates

Commune	Période d'observation	Teneur en SO ₄ ²⁻ à l'horizon 2000	Date de dépassement de la norme (250 mg/l)	Equation de la droite d'évolution	Coefficient de corrélation	Teneur en SO ₄ ²⁻ la plus récente
Saint-Python	1970-1980	62,6	Année 2178	y = -0,087 x + 31	0,32	48
Saint-Python	1975-1980	89	Année 2068	y = 0,19 x + 30	0,54	
Marcoing	1970-1980	9,63	Pas de réponse	y = 0,005 x + 9,8	- 0,01	10,5
Marcoing	1975-1980	4,5	Pas de réponse	y = 0,15 x + 10	- 0,19	
Gouzeaucourt	1974-1980	- 7,75	Pas de réponse	y = 0,64 x + 4	- 0,64	26
Proville	1970-1980	50,9	Année 2167	y = 0,099 x + 15	0,24	19
Proville	1975-1980	32,1	Année 2419	y = 0,04 x + 19	0,28	
Fontaine-Notre-Dame	1970-1980	40,5	Année 2324	y = 0,053 x + 21	0,39	27
Fontaine-Notre-Dame	1975-1980	64,5	Année 2104	y = 0,14 x + 20	0,78	
Rumilly	1973-1980	31,4	Année 2368	y = 0,049 x + 15	0,60	18,5
Rumilly	1975-1980	26,7	Année 2596	y = 0,03 x + 17	0,47	
Avesnes-le-Sec	1975-1980	34	Pas de réponse	y = 0,11 x + 69	- 0,29	70
Busigny	1974-1980	38,2	Année 2304	y = 0,057 x + 20	0,35	22
Busigny	(sauf dernière mesure) toutes mesures	70,8	Année 2088	y = 0,17 x + 18	0,45	
Doignies	1974-1980	60,4	Année 2176	y = 0,089 x + 32	0,25	44,5
Cattenières	1973-1980	28,6	Année 2509	y = 0,036 x + 17	0,28	22
Cattenières	1975-1980	21,5	Année 4285	y = 0,008 x + 19	0,09	
Leadain	1974-1980	19,2	Pas de réponse	y = 0,02 x + 26	- 0,10	26
Malincourt	1975-1980	32,2	Année 2380	y = 0,047 x + 18	0,29	19
Masnières	1974-1980	16,5	Année 3458	y = 0,013 x + 12	0,13	11,5
Elincourt	1975-1980	89,8	Année 2051	y = 0,25 x + 12	0,54	20
Neuvilly	1973-1980	65,3	Année 2117	y = 0,13 x + 23	0,44	31,5
Neuvilly	1975-1980	82,3	Année 2071	y = 0,19 x + 23	0,51	
Boussières-en-Cambrésis	1978-1980	17,05	Année 6077	y = 0,0047 x + 16	0,04	15
Bertry	1975-1980	39,09	Année 2374	y = 0,046 x + 25	0,27	26,5
Avesnes-les-Aubert	1972-1980	24,7	Pas de réponse	y = 0,011 x + 29	- 0,07	35
Avesnes-les-Aubert	1975-1980	42,7	Année 2283	y = 0,06 x + 20,5	0,15	
Banteux	1978-1980	0,82	Pas de réponse	y = 0,055 x + 16	- 0,21	14
Gonnelieu	1972-1980	19,6	Année 2534	y = 0,035 x + 7	0,36	11
Gonnelieu	1975-1980	3,9	Pas de réponse	y = 0,02 x + 11	- 0,21	
Caulley	1974-1980	75,7	Année 2098	y = 0,14 x + 27	0,78	39
Le Cateau	1974-1980	51,7	Année 2179	y = 0,09 x + 21	0,66	29
Romeris	1971-1980	50,7	Année 2305	y = 0,05 x + 31	0,25	39 (mai 1980)
Romeris	1975-1980	139	Année 2024	y = 0,38 x + 18	0,84	
Ligny-en-Cambrésis	1975-1980	3,82	Pas de réponse	y = 0,04 x + 17	- 0,09	13,5
Fontaine-au-Pire	1975-1980	37,8	Année 2442	y = 0,04 x + 25	0,18	29



mais étant donné que le calcul a été le plus souvent effectué sur une période de 10 ans, les renseignements fournis peuvent être considérés comme significatifs.

4.2.3.- Corrélations piézométrie-teneur en nitrates.

Une étude de l'évolution saisonnière du chimisme et de la pollution des eaux souterraines (MANIA, 1973 ; RICOUR, 1974 ; CAULIER, 1976) menée de août 1971 à janvier 1975 indique que, sauf pour des secteurs pollués de manière constante, le cycle du nitrate apparaît lié à la piézométrie. Si la dilution est le facteur principal de cette chute, il faut souligner aussi une activité bactérienne très ralentie en hiver (activité qui ne permet plus la transformation des nitrites en nitrates).

Mais il faut surtout considérer après l'étude de diagrammes caractéristiques relatifs à la période 1975-1977 (fig. 4-6) qu'un lessivage important, se traduisant sur la piézométrie par une remontée du niveau d'eau, entraîne après un certain temps de retard une augmentation des teneurs en nitrates, ceci dans le cas d'une nappe de profondeur moyenne.

On constate, d'autre part, à Artres, que le lessivage très important d'avant mars 1976 a entraîné une augmentation rapide de la teneur en nitrates et que les lessivages ultérieurs (assez proches de cette période) n'entraînent plus d'éléments chimiques vers cette nappe.

Sur la fig. 4-7 relative au site du rejet de Beaulieu, on constate cette fois une coïncidence parfaite des pics piézométriques et des teneurs en nitrates. La nappe à cet endroit précis étant très proche du sol (2 à 3 mètres), le lessivage est, dans ce cas, quasi immédiat.

Ces résultats viennent souvent en contradiction avec les déterminations de l'âge de la nappe par les mesures isotopiques (tritium). Nous venons en effet de constater une évolution saisonnière du chimisme de la nappe de la craie, en avançant l'hypothèse que les teneurs en nitrates correspondent, à 1 ou 2 mois près, à un lessivage important du sol. Il ne s'agit donc pas d'une eau systématiquement vieille qui est captée.

4.2.4.- Conclusions relatives à l'évolution du chimisme de l'eau.

L'analyse de l'évolution chimique de l'eau de la nappe de la craie montre une augmentation parfois lente mais régulière des teneurs, notam-

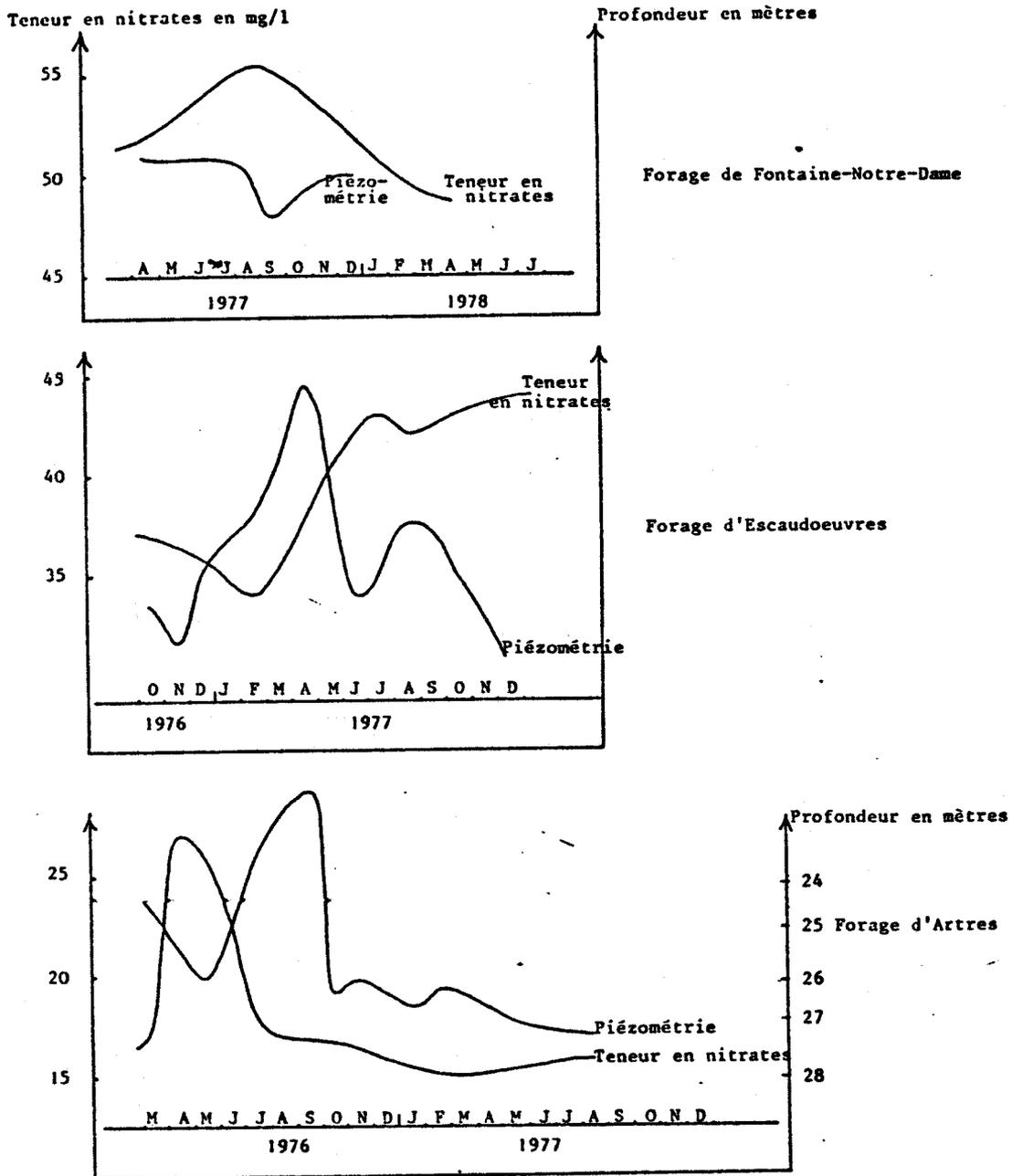


Fig. 4.6.- CORRELATIONS PIEZOMETRIQUES-TENEUR EN NITRATES POUR QUELQUES SITES PARTICULIERS



Captage du réjet de Beaulieu

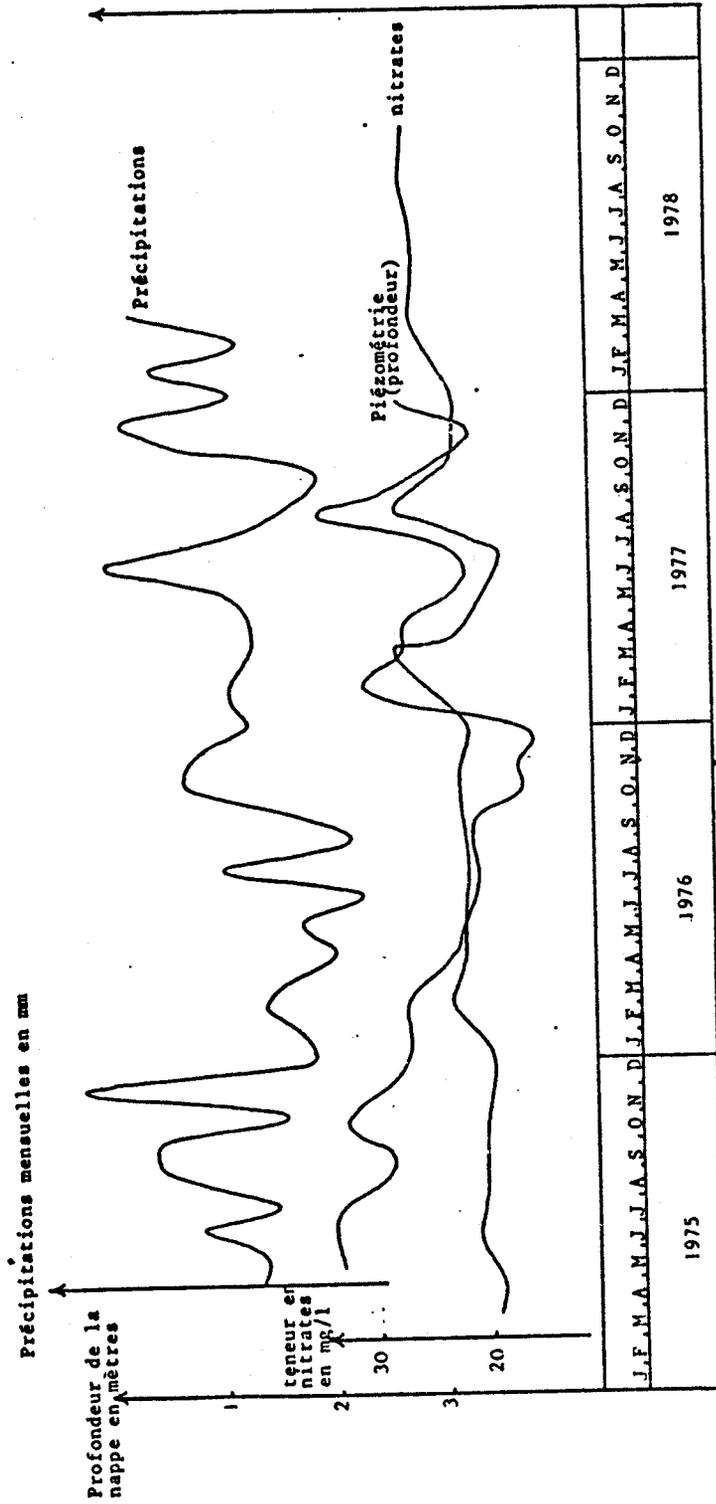


Fig. 4.7.- RELATIONS ENTRE LES TENEURS EN NITRATES ET LA PIEZOMETRIE POUR LE SITE DU REJET DE BEAULIEU



ment en nitrates. Il semble d'autre part que la période d'utilisation intensive des engrais au cours de l'année 1960 se manifeste par un soudain accroissement entre 1979 et 1980, les effets cumulatifs dont nous avons parlé plus haut en étant la cause directe.

Par ailleurs, il semble que, dès à présent, l'explication de variations de concentrations en nitrates soit indissociable de l'existence de deux porosités de la craie, une porosité de matrice et une porosité de fissures, cette dernière ayant un effet plus rapide et plus directe sur l'évolution des teneurs.

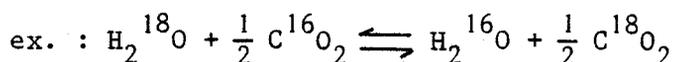
De manière plus synthétique, les différents facteurs agissant sur le chimisme de la nappe de la craie sont :

- les substances chimiques et les rejets polluants,
- l'alimentation des nappes par la pluie efficace,
- la nature et la perméabilité de la couverture qui protège les terrains sous-jacents,
- la présence des forêts,
- la profondeur de la nappe,
- la porosité de la craie et sa perméabilité.

4.2.5.- Analyses isotopiques.

Les analyses chimiques classiques ne peuvent, dans la majorité des cas, répondre à la question de l'origine de tel ou tel type de pollution ou de la provenance de l'eau captée. L'outil isotopique, de conception récente, permet dans certains cas d'apporter des arguments supplémentaires et de proposer une réponse plus affirmative.

Les isotopes du milieu naturel obéissent à des lois de répartitions identiques à celles qui régissent les réactions chimiques : lois d'action de masse appliquées aux activités ou aux fugacités des molécules isotopiques (FONTES, 1976). D'autre part, les réactions isotopiques ne sont généralement qu'un échange très limité des différentes espèces isotopiques :



Pratiquement, on ne mesure que de légères différences de masses dans le cas des isotopes stables, d'où le procédé de mesures relatives par rapport à un échantillon "delta" (δ) :

$$\delta = \left[\frac{R \text{ échantillon}}{R \text{ étalon}} - 1 \right] \times 100$$

avec $R = \frac{\text{concentration de l'espèce isotopique lourde}}{\text{concentration de l'espèce isotopique légère}}$

Nous n'avons au cours de cette étude utilisé que deux isotopes radioactifs stables : le soufre 34 et l'azote 15 et un isotope radioactif instable : le tritium.

A) Le tritium.

Le tritium est un isotope radioactif instable de l'hydrogène. Cet élément se désintègre avec une période de vie de 12,26 ans et a été injecté en grande quantité dans la stratosphère lors des essais thermonucléaires et nucléaires. Ces essais ont débuté en 1953. Les valeurs d'unité tritium (1 unité tritium (U.T.) représente 1 atome de ${}^3_1\text{H}$ pour 10^{18} atomes d'hydrogène) dans les précipitations vont alors passer de 10 U.T. avant 1953 à 300 U.T. en 1954 avec pour les années 1963-1964 un maximum de 6000 U.T. Depuis la fin des essais, on observe une décroissance nette de ces valeurs.

Aussi le tritium est-il un indicateur du temps de transfert de l'eau vers la nappe. Une concentration inférieure à 5 U.T. signifie que l'âge de l'eau souterraine est supérieur à 40 ans. Entre 5 et 40 U.T. l'eau souterraine est le résultat d'un mélange d'eaux récentes et anciennes. L'eau souterraine est d'âge récent pour des concentrations supérieures à 40 U.T.

B) L'azote.

L'azote possède deux isotopes stables : ${}^{14}_7\text{N}$ qui représente 99,64% de l'azote total et ${}^{15}_7\text{N}$ qui représente 0,36 % de l'azote total.

Les mesures de l'azote ${}^{15}_7\text{N}$ se font par rapport à l'air pris comme référence ($\delta^{15}\text{N} = \text{‰}$). Les résultats sont donnés sous la forme d'un "delta" (δ) qui correspond à :

$$\delta = \left[\frac{R \text{ échantillon}}{R \text{ étalon}} - 1 \right] \times 1000$$

L'isotope ${}^{15}_7\text{N}$ de l'azote peut provenir du milieu naturel par assimilation bactérienne de l'azote atmosphérique, par la fermentation des végétaux ou encore par l'apport d'engrais artificiels ou ammoniacaux naturels.

Il faut tenir compte néanmoins de la mobilité de ce traceur qui, par fractionnement isotopique, évolue constamment au sein du cycle naturel de l'azote.

C) Le soufre.
.....

Les isotopes du soufre les plus courants sont le soufre 32 (95%) et le soufre 34 (4,2%). La valeur "delta" obtenue se calcule de la même façon que dans le cas des nitrates.

Les variations de "delta" sont dues au fractionnement isotopique provenant des réactions physico-chimiques et biologiques au moment de la sédimentation et de l'activité bactériologique. La présence de soufre dissous dans les eaux superficielles et souterraines peut donc être naturelle avec des domaines de valeurs définis (RIGHTMIRE et al., 1974), mais aussi due à une pollution de l'eau par des sulfates en solution. Il s'agit alors dans ce cas d'étudier les causes de pollution et de comparer les résultats aux analyses de l'eau supposée polluée (BERNARD D., 1979).

Des analyses isotopiques de référence ont été effectuées par divers auteurs et sont rapportées fig.

D) Résultats et commentaires.
.....

Deux séries d'analyses ont été effectuées sur huit sites de la région précédemment décrite, dont le contexte hydrogéologique et chimique présentait certaines particularités (tableau 4.3).

Deux prélèvements ont été réalisés en avril 1979 et en septembre 1979.

La première série d'analyses a porté sur les teneurs en tritium, en azote 15 et en soufre 34 ; la deuxième sur le tritium et le soufre 34.

Les résultats de ces deux séries d'analyses sont consignées dans le tableau 4.4.

a) Analyse des teneurs en tritium :

En avril 1979, 4 puits ont des teneurs comprises entre 0 et 10 U.T. (Banteux, Séranvillers, Rieux, Doignies) et 4 des teneurs comprises entre 10 et 20 U.T. (Avesnes-le-Sec, Fontaine-au-Pire, Lesdain, Walincourt).

	Situation géographique	Profondeur de la nappe (en m)	Teneur en nitrates (en mg/l)	15N‰ (±1)	Teneur en N15 des nitrates (en %)	34S‰ (±2)	Teneur en tritium (en U.T.)	Activité bactériologique
MALINCOURT-SELVIGNY	Plateau (cote 140)	40	23,6 (juillet 79)	+ 4,9	0,337	+ 3,3	11 [±] 2	Intense
AVESNES-LE-SEC	Plateau (cote 70)	35	94,9 (juin 79)	+ 7,2	0,3367	+ 3,9	19 [±] 3	Faible
RIEUX-EN-CAMBRESIS	Flan de vallée (cote 60)	15	53,9 (août 79)	+ 7,3	0,3394	+ 1,3	3 [±] 1	Nulle
DOIGNIES	Plateau (cote 100)	50	59,5 (juin 79)	+ 6,5	0,3385	+ 3,8	10 [±] 2	Importante
SERANVILLERS	Plateau (cote 105)	40	34,1 (juillet 79)	+ 5,1	0,335	- 2,7	3 [±] 1	Moyenne à faible
FONTAINE-AU-PIRE	Flanc de vallée (cote 120)	46	30,4 (sept. 79)	+ 4,9	0,3367	- 3,2	16 [±] 1	Nulle
BANTEUX	Vallée sèche	5,6	32,2 (juin 79) i	+ 3,7	0,334	-15,1	4 [±] 1	Faible
LESDAIN	Vallée	23	31 (septembre 79)	+ 6,2	0,336	- 9,9	20 [±] 3	Faible

Tableau 4.3 : Résultats d'analyse et contexte des sites étudiés.



Communes	Teneur en Tritium (U.T.)		Teneur en N 15		Teneur en S 34	
	Avril 79	Sept. 79	Avril 79	Sept. 79	Avril 79	Sept. 79
Avesnes-le-Sec	19 ⁺ ₃	17 ⁺ ₃	+7,8 ⁺ _{0,1}	non communiqué	+3,9 ⁺ _{0,2}	+ 0,9
Banteux	4 ⁺ ₁	2 ⁺ ₁	+3,7 ⁺ _{0,1}		-15,1 ⁺ _{0,2}	-13,1
Doignies	10 ⁺ ₂	4 ⁺ ₁	+6,5 ⁺ _{0,1}		+3,8 ⁺ _{0,2}	+ 2,1
Fontaine-au-Pire	16 ⁺ ₃	8 ⁺ ₂	+4,9 ⁺ _{0,1}		-3,2 ⁺ _{0,2}	- 3,7
Lesdain	20 ⁺ ₃	12 ⁺ ₂	+6,2 ⁺ _{0,1}		-9,9 ⁺ _{0,2}	-11,4
Rieux	3 ⁺ ₁	8 ⁺ ₂	+7,3 ⁺ _{0,1}		+1,3 ⁺ _{0,2}	0,0
Seranvillers	3 ⁺ ₁	4 ⁺ ₁	+5,1 ⁺ _{0,1}		-2,7 ⁺ _{0,2}	- 2,7
Walincourt	11 ⁺ ₂	5 ⁺ ₂	+4,9 ⁺ _{0,1}		+3,3 ⁺ _{0,2}	+ 1,3

Tableau 4.4. : Résultats des deux séries d'analyses effectuées.

En ne tenant compte que de la décomposition du tritium qui est de 12,26 ans, on peut conclure pour les 4 premiers captages à des eaux relativement vieilles, du moins antérieures à la période d'activité nucléaire 63-64.

Pour les 4 autres puits et même celui de Doignies, les teneurs enregistrées sembleraient correspondre à un mélange d'eaux anciennes et d'eaux récentes dans des proportions indéterminables. Il faut d'autre part souligner le fait que la teneur en tritium n'est représentative que d'un échantillon moyen de l'épaisseur de l'aquifère.

L'âge obtenu est alors un âge moyen, il peut donc exister des "tranches" d'eaux circulant à des vitesses différentes et ayant des âges différents.

Par ailleurs, il apparaît difficile d'établir une corrélation entre la teneur en tritium et la profondeur de la nappe en ce qui concerne les sites concernés.

Si l'on ne se préoccupe que de l'infiltration verticale, il serait en effet logique d'admettre que les teneurs en tritium diminuent avec la profondeur. Sur la base d'une vitesse d'infiltration de 1 m/an

en milieu non saturé, une eau ne comportant plus de tritium est une eau se situant à 25 m ou plus de profondeur.

On peut donc s'attendre à une relation f (profondeur) = teneur en tritium représentée graphiquement sous la forme d'une droite à pente négative où les teneurs en tritium diminuent régulièrement avec la profondeur.

Or, les graphiques développés à partir de nos résultats et même ceux enregistrés par BERNARD (1979) (fig. 4-8) ne permettent pas ou difficilement d'établir une relation sûre graphiquement et par calcul, il n'existe aucune relation entre les deux séries de données. Il faut alors considérer l'existence d'un ou de plusieurs facteurs supplémentaires (autres que l'infiltration).

Mais globalement, on peut déjà penser au vu des résultats acquis, que, mis à part deux secteurs où les teneurs en tritium sont de 12 U.T. à Lesdain et 17 U.T. à Avesnes-le-Sec (septembre 79), les autres sites présentent des eaux vieilles mélangées en faible part à des eaux récentes. Les deux premiers cas énoncés correspondent plutôt à des apports importants d'eaux récentes issues certainement des précipitations.

Il faut donc considérer qu'il n'y a aucune relation entre la profondeur et la teneur en tritium. Il faut cependant noter que les mesures sont effectuées sur des sites relativement éloignés les uns des autres et donc n'offrant pas les mêmes caractéristiques hydrologiques, hydrogéologiques et géographiques. Les conditions d'infiltration sont différentes en vallée et en plateau, de même les circulations souterraines de l'eau. Différentes zones sont alors à déterminer et à la limite, l'étude de chaque site, un à un, est nécessaire.

On peut ici graphiquement considérer (fig. 4-9) une première zone délimitée en pointillé où il existe nettement une relation linéaire entre la teneur en tritium et la profondeur et où donc les eaux analysées sont directement issues des précipitations, l'infiltration verticale étant le principal facteur. La vitesse d'infiltration calculée est de 1,80 m.

- Au-dessus de cette droite, la relation n'est plus évidente. Ainsi, les sites de Oisy-le-Verger, Beauvois et Walincourt-Selvigny dont les profondeurs oscillent autour de 40 m et les teneurs en tritium aux alentours de 10 U.T. et également Doignies (10 U.T. à 50 m), révèlent un

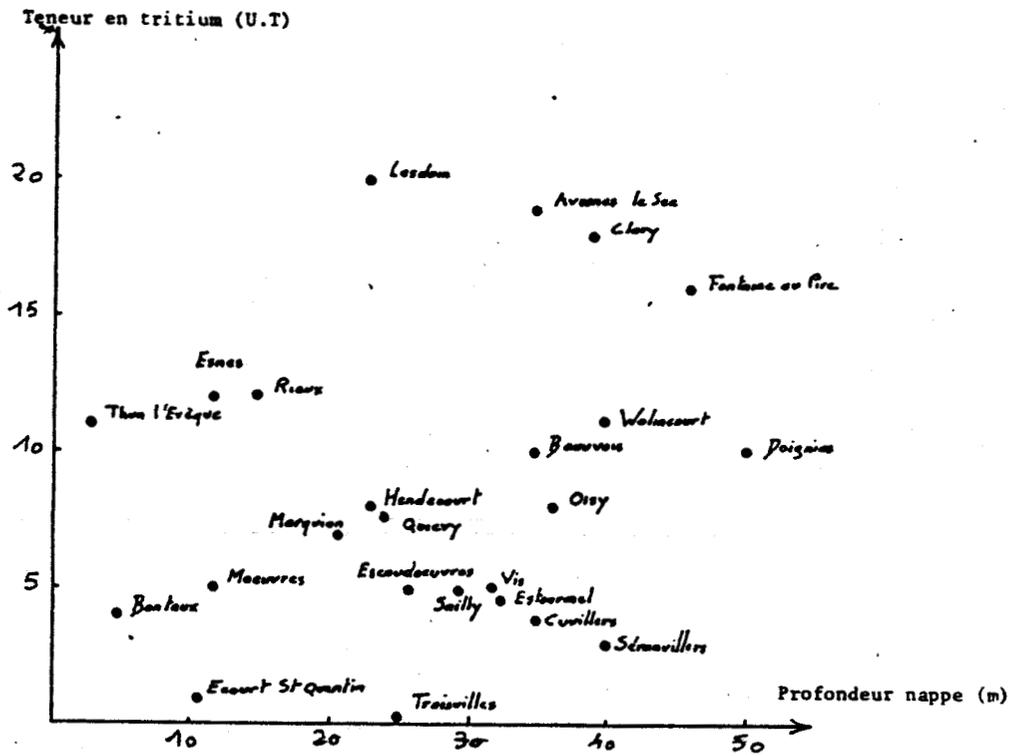


Fig. 4.8 : Relation profondeur-teneur en tritium



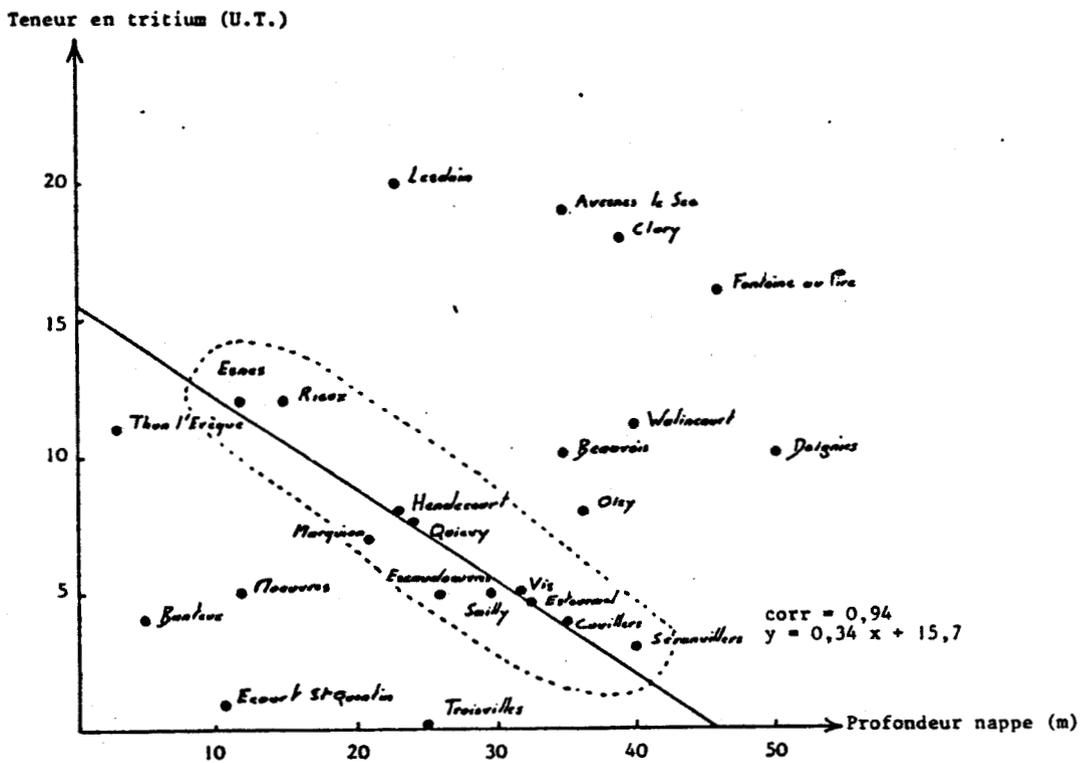


Fig. 4.9 : Détermination des différents types d'eau



écoulement latéral important amenant une eau jeune tritiée, ou une infiltration verticale très rapide se faisant à la faveur d'une grande fissuration.

En fait, les deux phénomènes peuvent être étroitement liés, ainsi, le site d'Oisy-le-Verger est situé dans la vallée de la Sensée, les circulations d'eaux sont donc préférentielles et entraînent ainsi au niveau du captage une arrivée importante d'eaux jeunes, ou un mélange d'eaux captées et d'eaux issues de la rivière.

Le cas de Beauvois n'est pas explicable à partir des données dont on dispose.

En ce qui concerne le site de Walincourt-Selvigny, la relative bonne valeur de transmissivité ($1-10^{-3}$) ne peut expliquer la teneur de 11 U.T.

Mais, il faut remarquer la forte variation de cette teneur de 11 à 5 U.T. entre avril 79 et septembre 79, variation qui peut être saisonnière. Si l'on admet ce fait, il y aurait donc une recharge importante au printemps amenant de l'eau tritiée et par voie de conséquence une fissuration très importante permettant l'infiltration, ce qui est fort peu probable. L'eau tritiée ne peut en fait parvenir que latéralement, les circulations d'eaux étant plus rapides dans les zones de plateaux.

Le cas de Doignies est facilement interprétable par l'existence de galeries captantes, souterraines, situées au-dessus de la nappe et dont la plus longue se trouve dans un vallon recueillant donc toutes les eaux de pluie qui arrivent de ce fait très rapidement au captage.

Les teneurs importantes en tritium des 4 autres captages (Lesdain, Clary, Avesnes-le-Sec, Fontaine-au-Pire), malgré de fortes profondeurs, peuvent s'expliquer par divers facteurs. A Lesdain, influence du canal de l'Escaut et du torrent d'Esnes, d'autant plus que la nappe n'est qu'à 20 m de profondeur. A Avesnes-le-Sec, l'existence de carrières souterraines et de nombreux puits, le plus souvent rebouchés depuis peu, et puits augmentent globalement la perméabilité et donc l'infiltration. Pour Clary, le cas de figure n'est pas simple, il s'agit de la superposition de plusieurs facteurs : bonne transmissivité, existence de carrières souterraines, écoulement latéral important et rapide. Pour Fontaine-au-Pire l'existence de carrières et la proximité d'une petite rivière peuvent expliquer en partie les teneurs enregistrées.

- Au-dessous de cette droite, chaque site est là encore un cas particulier. Le site de Troisvilles est le plus normal, l'eau ne présente plus de tritium à 25 m de profondeur, la vitesse d'infiltration verticale est donc de 1 m/an.

Les trois sites (Thun-l'Evêque, Moeuvres et Troisvilles) s'alignent sur une droite relativement parallèle à la première, ce qui souligne un même comportement d'ensemble, c'est-à-dire une infiltration verticale prépondérante aux autres facteurs mais de vitesse moindre (1 m/an).

A noter que l'Escaut n'influence pas les teneurs du site de Moeuvres, ce qui impliquerait le colmatage des berges de l'Escaut (BERNARD, 1979).

Les deux cas de Banteux et d'Ecourt-St-Quentin ne s'expliquent pas aisément.

Les teneurs enregistrées en septembre 1979 paraissent plus normales et permettent pour les sites de Walincourt, Doignies, Fontaine-au-Pire et Lesdain, de conclure à une infiltration verticale prépondérante.

- On peut, d'autre part, considérer comme facteur d'explication : l'épaisseur de l'aquifère. La figure 4-10 montre qu'il existe une relation nette entre les teneurs en tritium et l'épaisseur d'aquifère, plus celle-ci est importante moins l'eau est tritiée. Il semble donc qu'il existe une dilution importante du tritium issu des précipitations dans la nappe contenant en grande partie des eaux anciennes à renouvellement lent.

- Les deux graphes suivants (fig. 4-11, 4-12) montrent la relation perméabilité-teneur en tritium, globalement on peut retenir que les forages à bonne perméabilité sont ceux dont l'eau est tritiée.

En conclusion, nous pouvons dire que le fait le plus marquant de cette analyse réside dans la difficulté d'obtenir une corrélation entre les teneurs en tritium et la profondeur de la nappe.

L'interprétation des anomalies constatées fait appel soit au concept d'un décalage de distribution des eaux tritiées dans les milieux non saturés d'épaisseurs fort différentes (SMITH et RICHARDS, 1974 ; BAILIFF et al., 1978 ; DUERMAEL et al., 1978) soit au concept d'un échange isotopique entre l'eau d'infiltration et l'eau de la matrice crayeuse (FOSTER, 1975). Une autre hypothèse est proposée ici : celle du mixage aléatoire dans l'espace et le temps des apports verticaux d'eaux jeunes

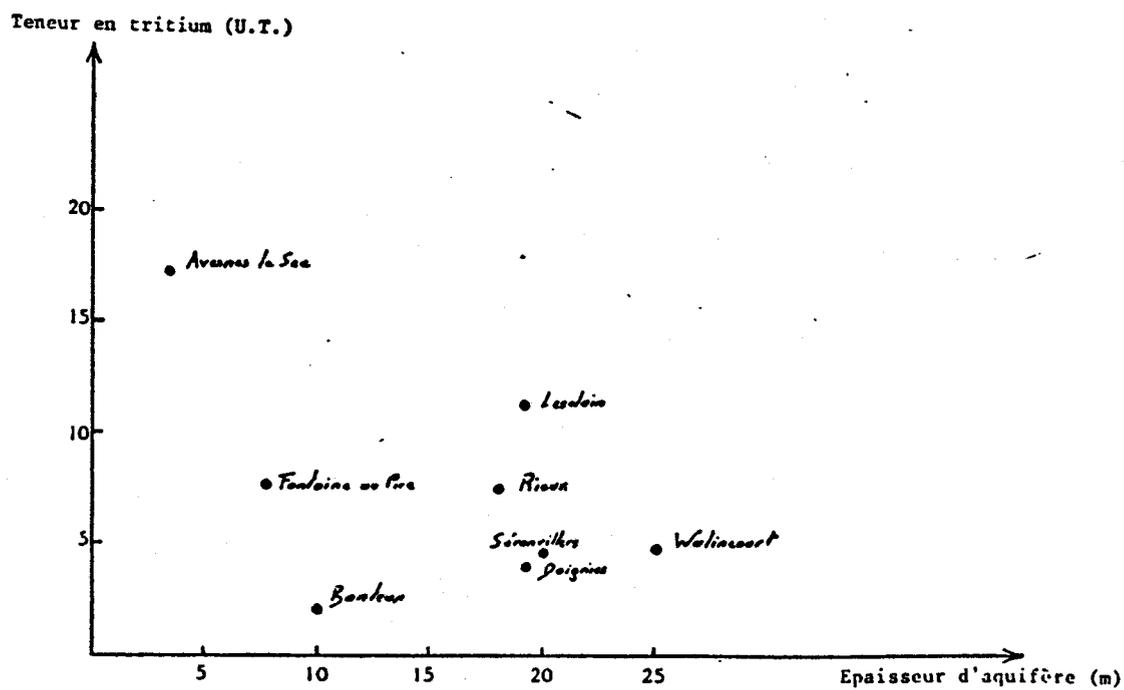


Fig. 4.10.- RELATION TRITIUM-EPAISSEUR D'AQUIFERE (SEPTEMBRE 1979).



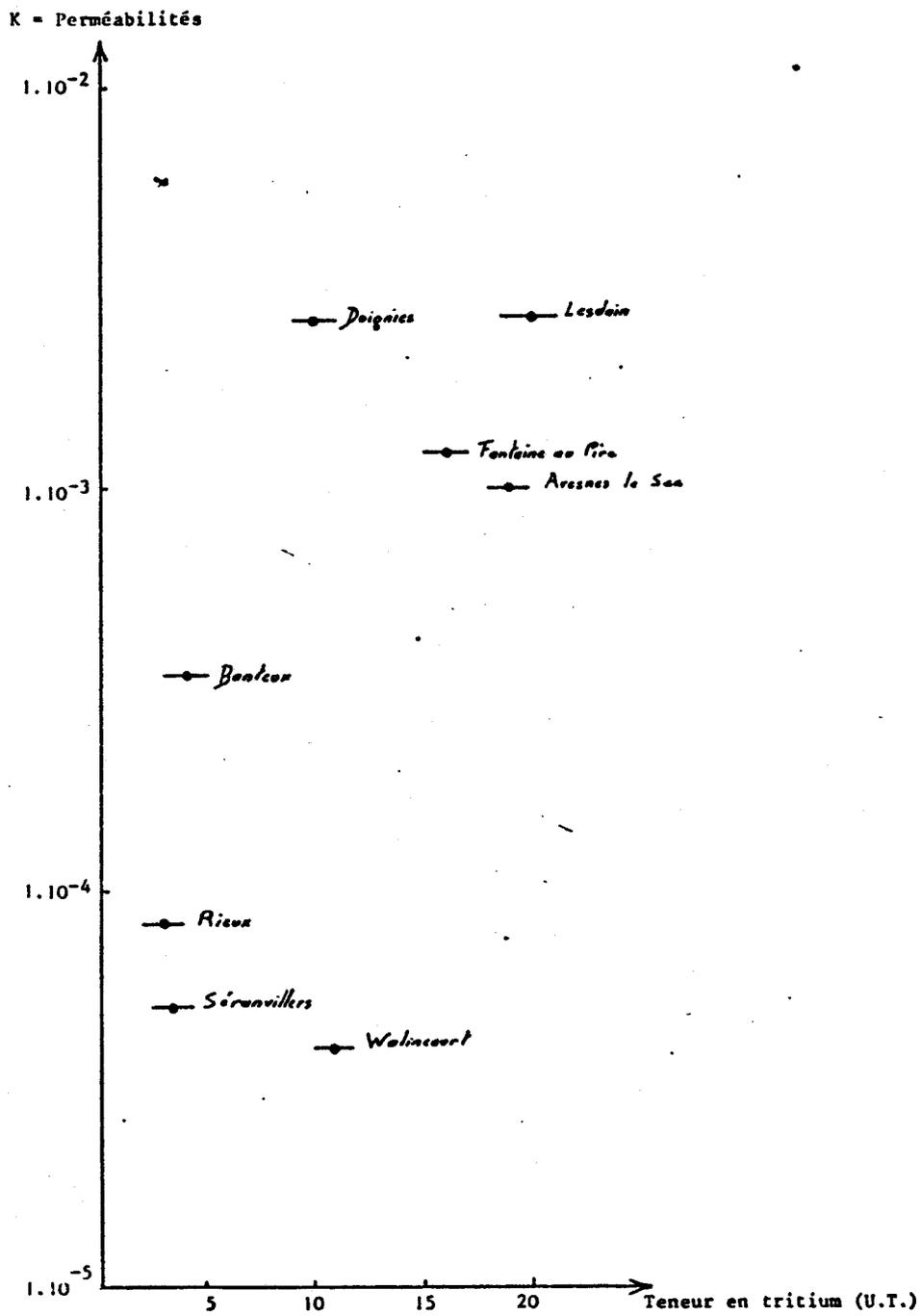


Fig. 4.11.- RELATION PERMEABILITES-TENEUR EN TRITIUM (AVRIL 1979).



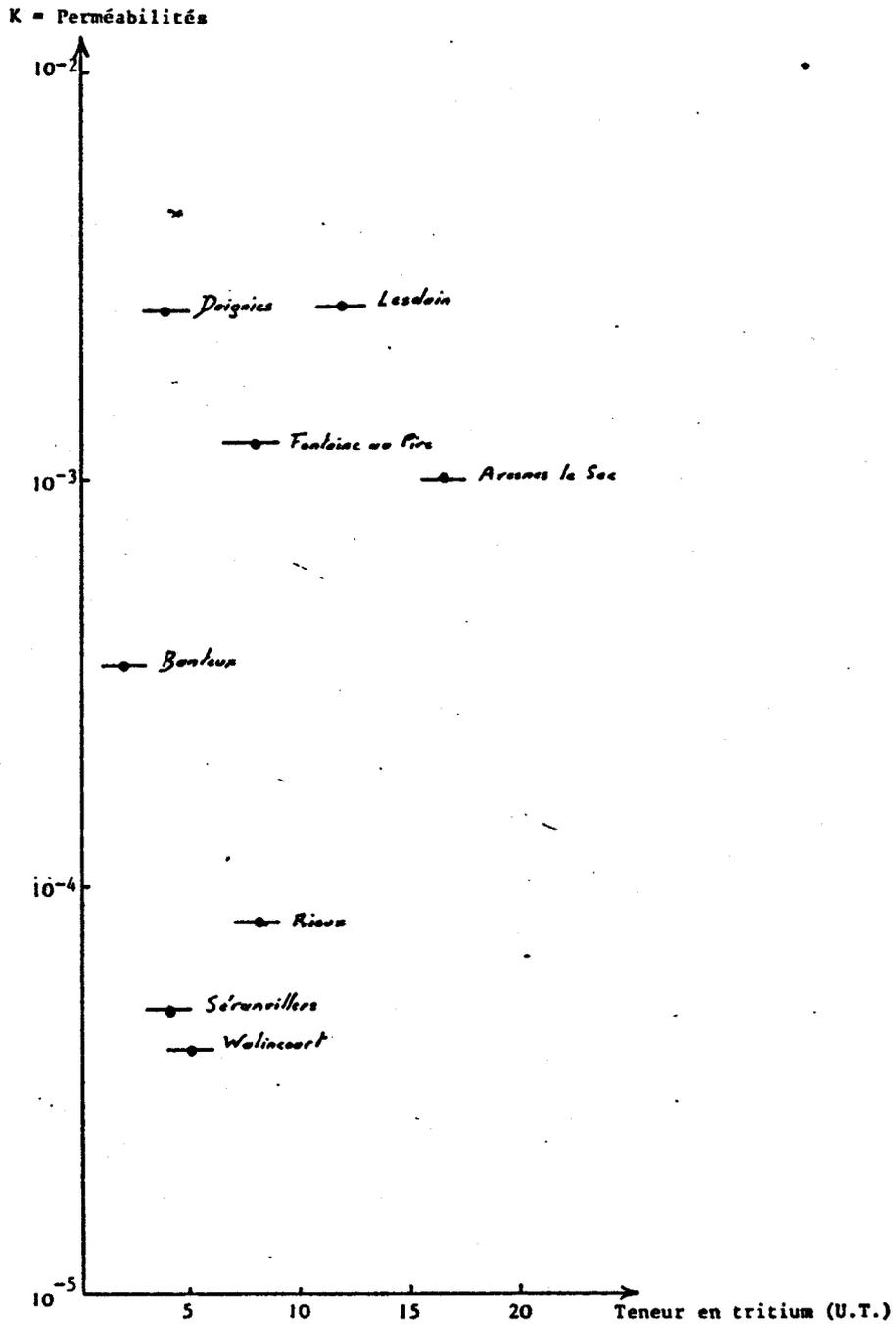


Fig. 4.12.- RELATION PERMEABILITE-TENEUR EN TRITIUM (SEPTEMBRE 1979).



(dont le volume ne représente qu'une infime partie de la réserve totale de l'aquifère) et des apports latéraux d'eaux anciennes sollicitées par le pompage. Une imbrication de ce schéma avec le premier concept aboutit à des cas de figures fort complexes à interpréter à l'échelle d'un bassin hydrogéologique. Toutefois, ces cas de figures devront faire appel à une notion que nous avons déjà mentionnée : l'existence de macrofissures, microfissures et porosité de matrice. Une étude réalisée par DOWNING, SMITH et WARREN (1978) montre que 10% du total de la recharge est transporté rapidement par les macrofissures à travers la zone non saturée.

b) Analyse des teneurs en soufre 34.

L'analyse des concentrations en $\delta^{34}\text{S}$ pris séparément, des sulfates, ne nous paraît pas ici d'un intérêt fondamental, en effet, ceux-ci ne correspondent pas, dans la zone d'étude, à une véritable pollution, mais plutôt à une évolution au sein du cycle géochimique du soufre (oxydation de pyrites, lessivage d'évaporites) (MARCE, 1978).

On peut toutefois proposer une interprétation aux diverses valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ (BERNARD, 1979) en considérant l'existence de plusieurs types d'eau (fig.

. eaux de nappe sans recouvrement tertiaire ou n'ayant pas subi de minéralisation polluante importante : $-6 < \delta^{34}\text{S} < 0$ et $[\text{SO}_4^{--}] < 20 \text{ mg/l}$
ex. : Séranvillers, Fontaine-au-Pire,

. eaux de nappe à renouvellement lent et possédant un recouvrement tertiaire : $\delta^{34}\text{S} < -6$, $[\text{SO}_4^{--}] < 20 \text{ mg/l}$
ex. : Banteux, Lesdain (bien que Lesdain possède une eau tritiée),

. eaux de nappe souffrant d'une pollution organique :
 $\delta^{34}\text{S} > 0$ ou $[\text{SO}_4^{--}] > 60 \text{ mg/l}$
ex. : Walincourt, Rieux, Doignies, Avesnes-le-Sec.

c) Analyse des teneurs en azote 15.

Sur le tableau 4.4 regroupant l'ensemble des résultats, on constate que les valeurs de "delta" de l'azote sont comprises entre 3,7 et 7,5 ce qui suppose une identité des caractéristiques chimiques des eaux captées et du milieu naturel.

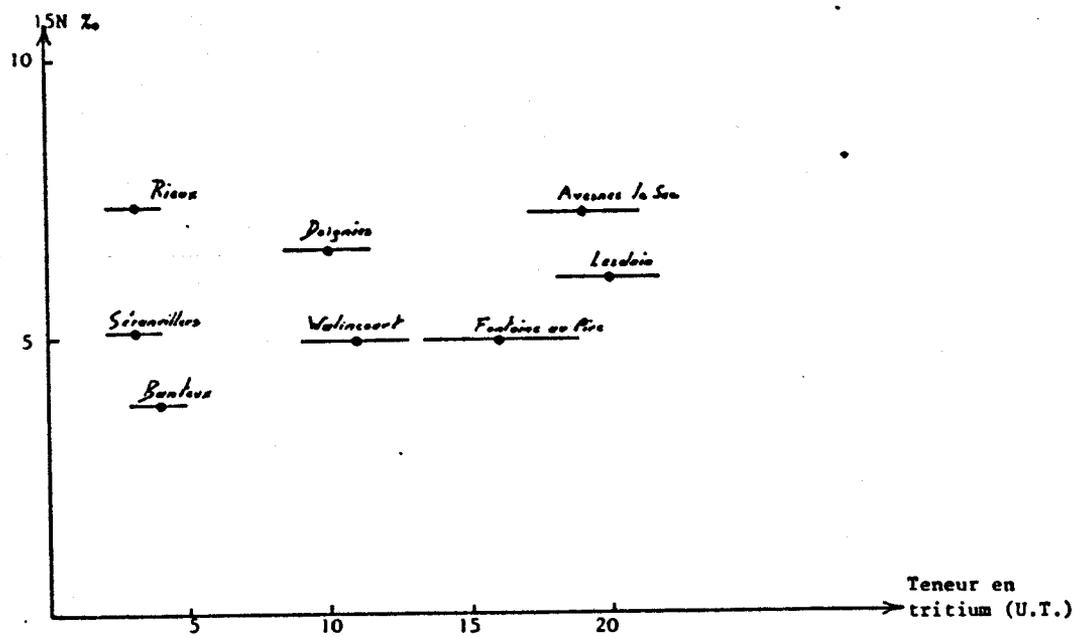


Fig. 4.13.- RELATION δ 15N-TENEUR EN TRITIUM



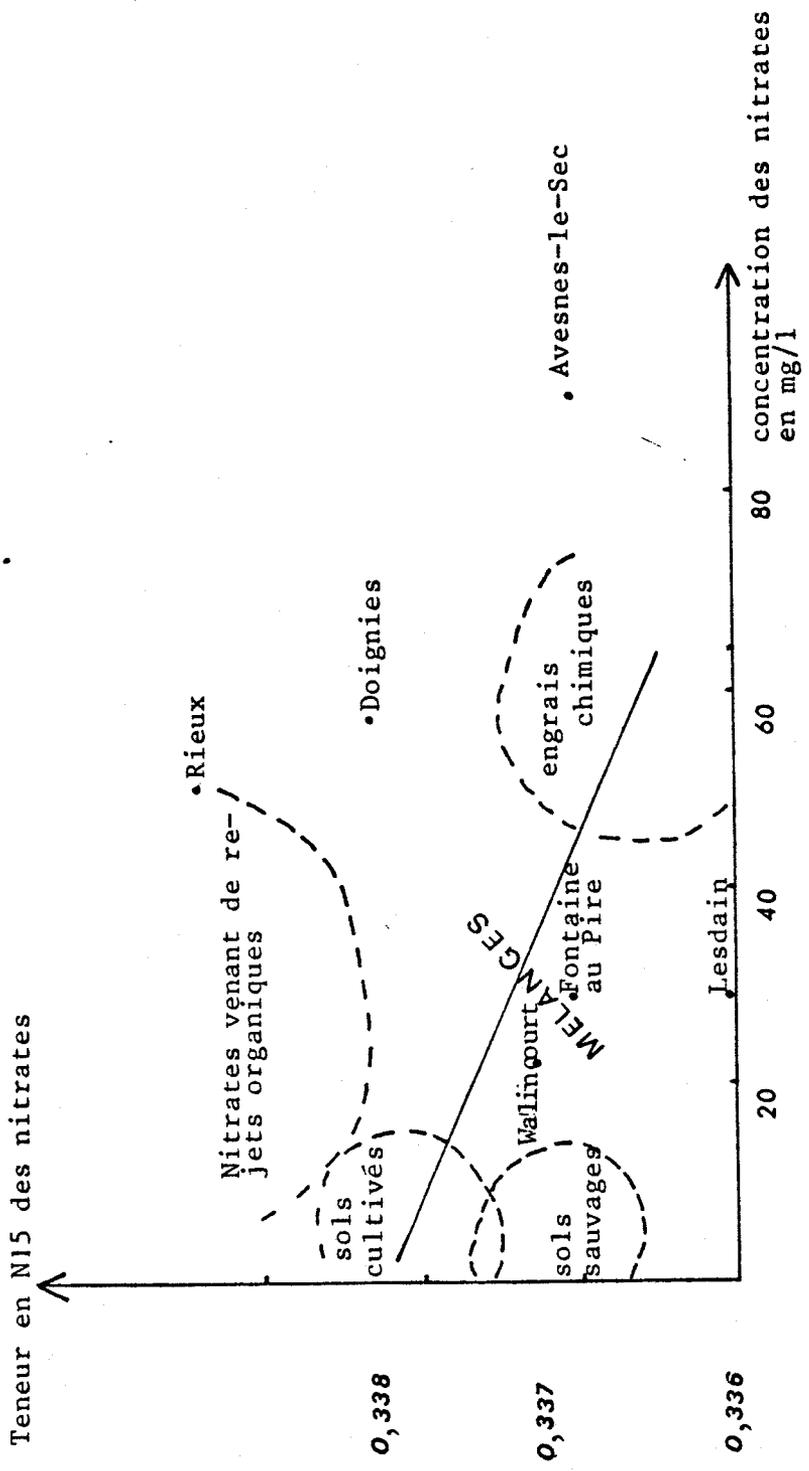


Fig. 4.14.- RELATION δ 15N-TENEUR EN NITRATE



Si l'on se réfère aux analyses isotopiques de référence, nous constatons qu'il est difficile, voire impossible dans certains cas, de rechercher l'origine de l'azote des nitrates. Ainsi, la valeur de $\delta^{15}\text{N}^{\text{‰}}$ relevée pour le captage d'Avesnes-le-Sec nous fait conclure soit à des eaux de drainage -ce qui n'est pas le cas dans la réalité- soit à des apports en nitrates naturels des sols, nitrates qui existent dans tous les cas. La valeur de $\delta^{34}\text{S}^{\text{‰}}$ pour ce même captage peut indiquer que nous nous trouvons en présence de rejets de sucrerie, d'eau de drainage ou d'engrais, ce qui contredit le raisonnement antérieur.

Sur la figure 4-13 sont reportées les compositions isotopiques de l'azote des nitrates, ainsi que les compositions en tritium de ces eaux. Il apparaît nettement que les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ sont indépendantes de la concentration en tritium, ceci peut s'expliquer par le faible écart entre les différentes compositions isotopiques.

Les différents types de nitrates provenant de diverses origines voient leur teneur en azote 15 varier de 0,346% à 0,329% par rapport à l'azote total. La figure 4-14 permet de distinguer, connaissant la concentration totale de nitrates en mg/l et la concentration en azote 15, les différentes origines de pollution (LETOLLE, MARIOTTI, 1977).

Si l'on reporte les résultats d'analyse des sites étudiés, on constate que tous les captages possèdent une eau dont les teneurs en nitrates résulteraient d'un mélange des apports. A Rieux toutefois la pollution constatée proviendrait de rejets organiques.

Il semble en effet que les eaux fortement polluées en nitrates (Walincourt, Avesnes-le-Sec, Rieux) soient celles qui ont les valeurs $\delta^{15}\text{N}$ les plus élevées (entre 6,5 et 7,2) ce qui confirmerait l'existence d'une pollution organique déjà pressentie auparavant. Dans le cas des autres captages où la moyenne des teneurs en nitrates est de l'ordre de 30 mg/l, les eaux peu tritiées de Banteux et de Séravillers possèdent les $\delta^{15}\text{N}$ les plus faibles qui donc pourraient être imputables en partie à un apport d'azote nitrique provenant d'engrais de synthèse.

Le graphique $\delta^{34}\text{S} - \delta^{15}\text{N}$ permet de mettre en évidence une relation entre ces deux isotopes. Globalement, une eau à $\delta^{34}\text{S}$ fort possède un $\delta^{15}\text{N}$ fort, ce qui implique l'existence d'une pollution organique dans ce cas. (fig. 4-15).

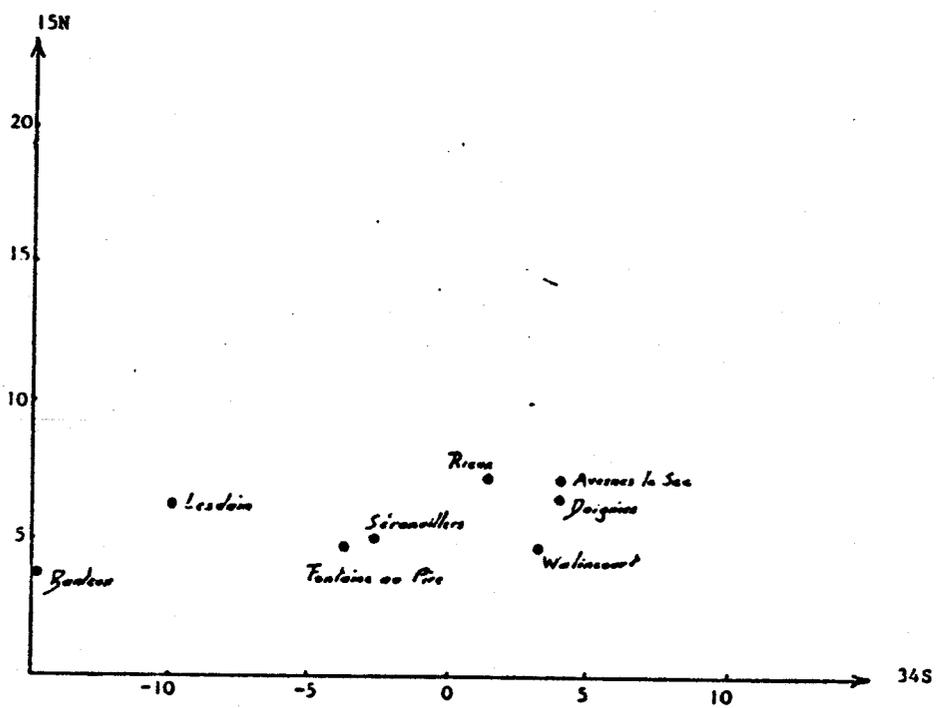


Fig. 4.15.- GRAPHIQUE 6 34S- 15N



E) Conclusion.
.....

L'utilisation des isotopes stables ou radioactifs instables apporte de nouveaux éléments d'appréciation et d'interprétation des diverses causes de pollution. Il apparaît cependant que l'analyse isotopique de l'azote et du soufre ne peut se suffire à elle-même et doit être considérée comme un argument supplémentaire à une étude hydrochimique complète. Nous avons mis en évidence les difficultés d'interprétation des résultats, difficultés qui ne peuvent être surmontées que par une connaissance parfaite du milieu naturel. En effet, le prélèvement analysé ne constitue qu'un maillon de toute une chaîne de réactions chimiques, biologiques et bactériologiques. D'autre part, ces difficultés proviennent du fractionnement isotopique, surtout dans le cas de l'azote qui réagit continuellement dans le cycle naturel.

Il serait souhaitable enfin, dans le cadre d'études ultérieures, d'effectuer des prélèvements à différents niveaux de l'aquifère, une stratification des éléments chimiques, notamment l'isotope 15 de l'azote, étant possible.

4.3.- Application des traçages artificiels en vue de la mise en évidence d'une pollution.

Les informations fournies lors de l'utilisation des traceurs naturels ou artificiels dans le cadre d'une étude hydrogéologique sont nombreuses :

- si les concentrations mesurées en sortie sont suffisantes, la direction de l'écoulement naturel peut-être définie. Des traçages multiples comprenant plusieurs entrées et une sortie permettent la détermination d'un bassin versant réel (MOLINARI J., 1976),

- la courbe de restitution d'un traceur au point de prélèvement permet l'identification de deux paramètres : vitesse effective de l'eau et coefficient de dispersion (SAUTY J.P., 1977). On peut alors évaluer la porosité cinématique par simple quotient de la vitesse de Darcy par la vitesse effective ainsi obtenue,

- l'intérêt le plus pratique des traçages reste la prévision de la migration de polluants dans un sol ou dans une nappe. qu'elle soit qualitative ou quantitative.

- nous citerons enfin d'autres utilisations à des fins spécifiques et locales : interactions de deux nappes, relation entre eaux superficielles et souterraines, recherches d'exutoire, etc..., cette liste n'est évidemment pas exhaustive.

Cependant, quel que soit le but recherché, il sera nécessaire d'avoir un minimum de renseignements et de données concernant le milieu (poreux ou fissuré), la piézométrie régionale, les variations de niveau de la nappe les conditions d'exploitation de la nappe (débit du ou des forages utilisés comme points de prélèvement).

4.3.1.- Rappels théoriques des mécanismes physiques de déplacement d'un traceur.

Le transport de particules chimiques en solution au travers des pores d'une roche est régi par un ensemble de phénomènes complexes mettant en jeu les propriétés microscopiques du fluide et de la matière minérale.

Dans le cas où le milieu saturé se comporte comme un milieu continu et homogène, les corps dissous progressent en moyenne, dans le terrain, avec la vitesse générale du déplacement de l'eau libre. Cette vitesse est influencée par le gradient de charge hydraulique existant dans le fluide et par la structure poreuse du milieu (LEDOUX E., DE MARSILY G., 1976).

A ce phénomène de déplacement moyen du soluté suivant la vitesse moyenne de pore de l'eau, appelé convection, se superpose un phénomène complémentaire dû aux hétérogénéités microscopiques de la vitesse au travers des pores et à l'agitation thermique de molécules. Deux mécanismes interviennent :

a) Dispersion cinématique.

Les vitesses de déplacement des particules varient autour de la vitesse moyenne du fait de la présence des grains du milieu poreux, ou de la rencontre de fissures de directions différentes. Le flux massique de particules par unité de surface peut s'écrire :

$$F = - \frac{D}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (\text{Loi de Fick})$$

avec C = concentration massique (en ML^{-3}),

F = flux massique par unité de surface occupée par de l'eau en mouvement (en $MT^{-1}L^{-2}$),

D = coefficient de dispersion ayant les dimensions d'une transmissivité (en L^2T^{-1}).

b) Diffusion moléculaire.

Ce phénomène est lié à l'existence de l'agitation moléculaire qui, en présence d'un gradient de concentration, envoie des molécules des zones à concentration élevée vers des zones à concentration faible. Cette diffusion entraîne donc une dilution qui tend à réduire le gradient horizontal et à transporter des particules d'un filet à un autre, pour homogénéiser. La diffusion suit, dans un fluide au repos, la loi de Fick :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div} (\text{do grad } C)$$

avec C = concentration (en ML^{-3}),

do = coefficient de diffusion moléculaire (en L^2T^{-1}).

A ces trois mécanismes développés ci-dessous, il convient d'ajouter les échanges (absorption ou désorption) et les multiples réactions physiques et chimiques intervenant entre la phase immobile (matrice et eau tracée) et les éléments transportés.

4.3.2.- Expériences de traçage à la fluoresceine à Doignies et Avesnes-le-Sec.

Dans le cadre de cette étude, nous avons porté notre choix sur Doignies et Avesnes-le-Sec du fait de leurs teneurs excessives en nitrates relevées déjà depuis plusieurs années.

La mise en oeuvre de ces traçages a nécessité une reconnaissance précise du terrain ainsi qu'une enquête auprès des autorités communales dans le but de choisir un point d'injection. De même, pour chaque site, une carte piézométrique précise a été dressée de manière à préciser le sens d'écoulement naturel des eaux souterraines.

Nous avons eu recours, pour la réalisation de ces traçages, à la fluoresceine, ou plutôt à son composé disodique : l'uranine dont la grande solubilité et les très faibles concentrations détectables en font un colorant d'emploi aisé.

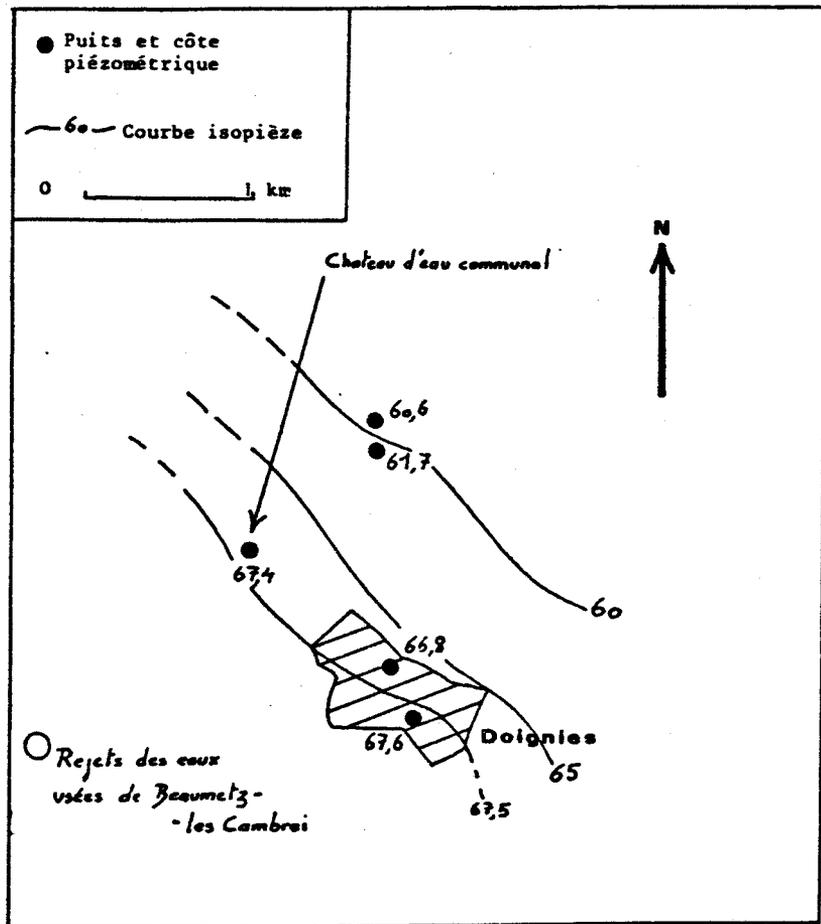


Fig. 4.16 : Géographie du site de Doignies



A) Traçage n° 1.
.....

Il a été effectué sur le site de Doignies. La Figure 4-16 permet de récapituler les données nécessaires à la compréhension et à l'interprétation du traçage.

Une visite sur le terrain a permis de repérer, sur le territoire de la commune de Beaumetz-les-Cambrai, un dispositif de rejet d'eaux usées représenté par le schéma situé ci-dessous.

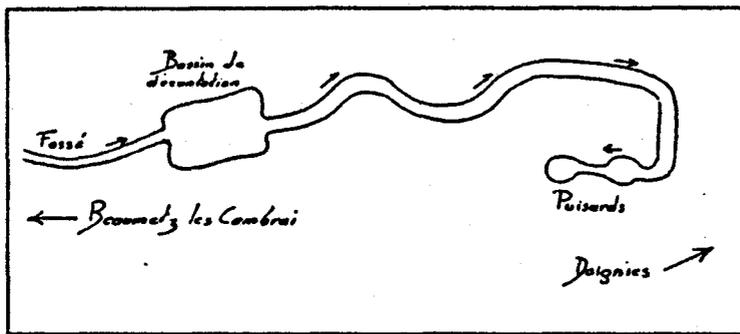


Fig. 4.17.- DISPOSITIF DE REJET DES EAUX USEES DE DOIGNIES

Les eaux aboutissent donc en fin de parcours dans le deuxième puisard dont la construction a été motivée par le colmatage du premier. Une visite en période sèche (automne 1980) a permis de constater que ce dernier contenait une petite quantité d'eau, alors que le second puisard, sec, présentait des traces de ravinement sur ses parois, ce qui attestait d'un écoulement et d'une infiltration récente.

Les courbes piézométriques obtenues montrent un sens d'écoulement naturel des eaux souterraines du SW vers le NE. Il s'agissait donc ici de mettre en évidence une pollution par ces eaux usées du captage de Doignies, qui, constituant notre point d'observation, est situé à 1700 Km de ces deux puisards.

Un kilogramme de fluoresceine dissous dans 30 litres de solution (eau + alcool + ammoniac) a été déversé dans le deuxième puisard déjà rempli d'eau.

↖ c'est fou!

Les fluocapteurs installés au captage de Doignies étaient relevés tous les deux jours.

a) Résultats.

La courbe de concentration en fluoresceine est représentée sur la fig. 4-18. Entre le 1er et le 24ème jour, nous observons donc une série de pics dont les teneurs sont inférieures à 1.10^{-9} kg/l et qui peuvent correspondre à plusieurs entraînements directement liés, sans doute, à des périodes pluvieuses. Il peut également s'agir de fluoresceine injectée et stockée pendant un certain temps, dans le terrain ou sur les parois du puisard. Il faut dans ce cas considérer l'injection comme continue, mais en faisant abstraction du temps d'infiltration du colorant vers la nappe.

Au 25ème jour, une concentration de 1.10^{-9} kg/l était notée, mais sa signification reste aléatoire et peut correspondre à l'entraînement de diverses substances chimiques (détergents, etc...) présentant une fluorescence propre différente de celle de la fluoresceine.

Au bout du 25ème jour, un pic correspondant à une concentration de 3.10^{-9} kg/l était détecté, et qui représente la concentration la plus forte enregistrée au cours de cette expérience. Si l'on considère ce pic comme étant réellement la première apparition du colorant, et si l'on admet que nous sommes déjà au niveau du puisard en zone saturée, la vitesse apparente du traceur est de 69 m/j.

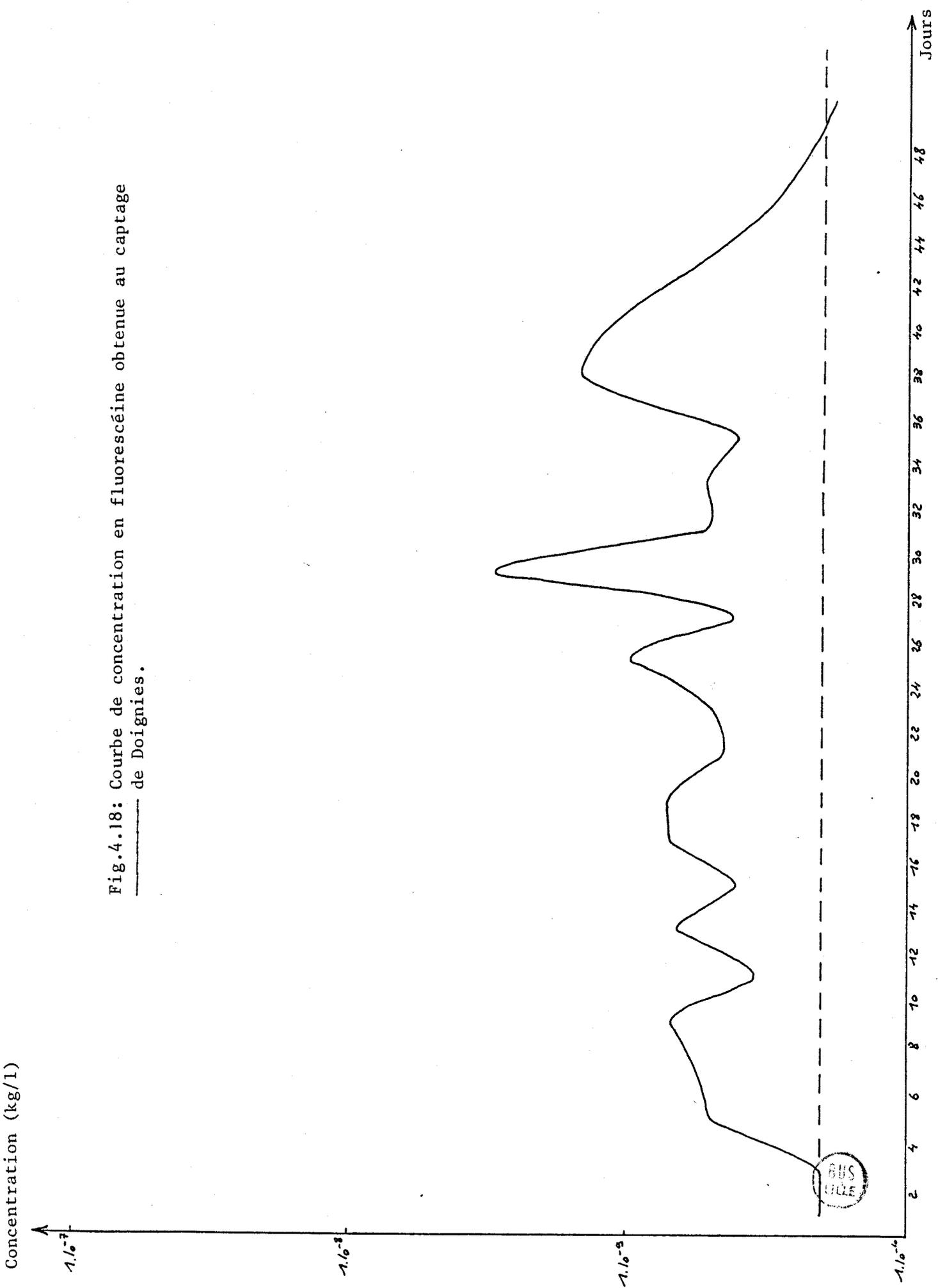
Il s'agit en fait, de la vitesse des particules les plus rapides puisque, au 38ème jour, l'on observe un second pic moins important, mais qui peut correspondre à une seconde "pulsion".

b) Commentaires.

Si nous supposons que toute l'expérience s'est réalisée en milieu saturé, la vitesse moyenne du traceur est donc de 69 m/j.

Cependant, l'existence des trois principaux maxima de concentration peut être interprétée par trois cheminements du traceur ou à trois impulsions dues à des périodes de pluviométrie intense, si le colorant reste piégé. L'influence du pompage est souvent prépondérante, il existe en effet des périodes de pompage importantes destinées à maintenir une quantité d'eau suffisante dans les cuves, ce qui explique la fréquence des pics de faible concentration.

Fig.4.18: Courbe de concentration en fluorescéine obtenue au captage de Doignies.



En fait, l'allure de la courbe obtenue peut s'interpréter dans un premier temps, par un écoulement monodimensionnel divergent, puis, dans un deuxième temps, par un écoulement convergent vers l'ouvrage de captage.

L'étude faite sur le terrain montre qu'il existe une zone de circulation préférentielle, déterminée par le vallon existant entre le point d'injection et le captage, celui-ci se caractérisant par l'existence d'une galerie captante d'une cinquantaine de mètres dont la direction est celle de l'écoulement naturel des eaux souterraines. Ces dernières constatations permettent donc d'expliquer, en partie, la rapidité d'apparition de la fluoresceine.

B) Traçage n° 2.

Celui-ci a été effectué sur le territoire communal d'Avesnes-le-Sec. Le captage de cette commune est installé en aval de l'agglomération, du point de vue de l'écoulement des eaux souterraines, celui-ci s'effectue globalement du Sud vers le Nord.

Le mode de rejet des eaux usées est relativement simple et s'effectue par gravité vers le Sud où les caniveaux rejoignent deux fossés alimentant le Riot Calvigny. Le captage d'Avesnes-le-Sec, protégé par l'existence de terrains tertiaires semi-perméables (fig. 4-19), ne peut donc être atteint que par l'infiltration d'eaux "domestiques" située dans la commune par l'intermédiaire de puits perdus, ou au niveau des fossés véhiculant ces eaux mortes.

L'analyse de la piézométrie nous a permis de définir un point d'injection favorable, situé dans la commune et distant de 700 mètres du captage communal.

L'opération a consisté à injecter 1 kg de fluorescéine dissoute dans 50 litres de solution contenant de l'eau, de l'alcool et de l'ammoniaque, dans un laps de temps de 5 minutes. Les fluocapteurs installés au captage étaient relevés tous les deux jours.

a) Résultats. (fig. 4-20).

Jusqu'au 20ème jour, nous observons de légères variations comprises entre 2 et $6 \cdot 10^{-10}$ kg/l, attribuées aux modifications naturelles de l'eau et pouvant correspondre à une concentration de substances chi-

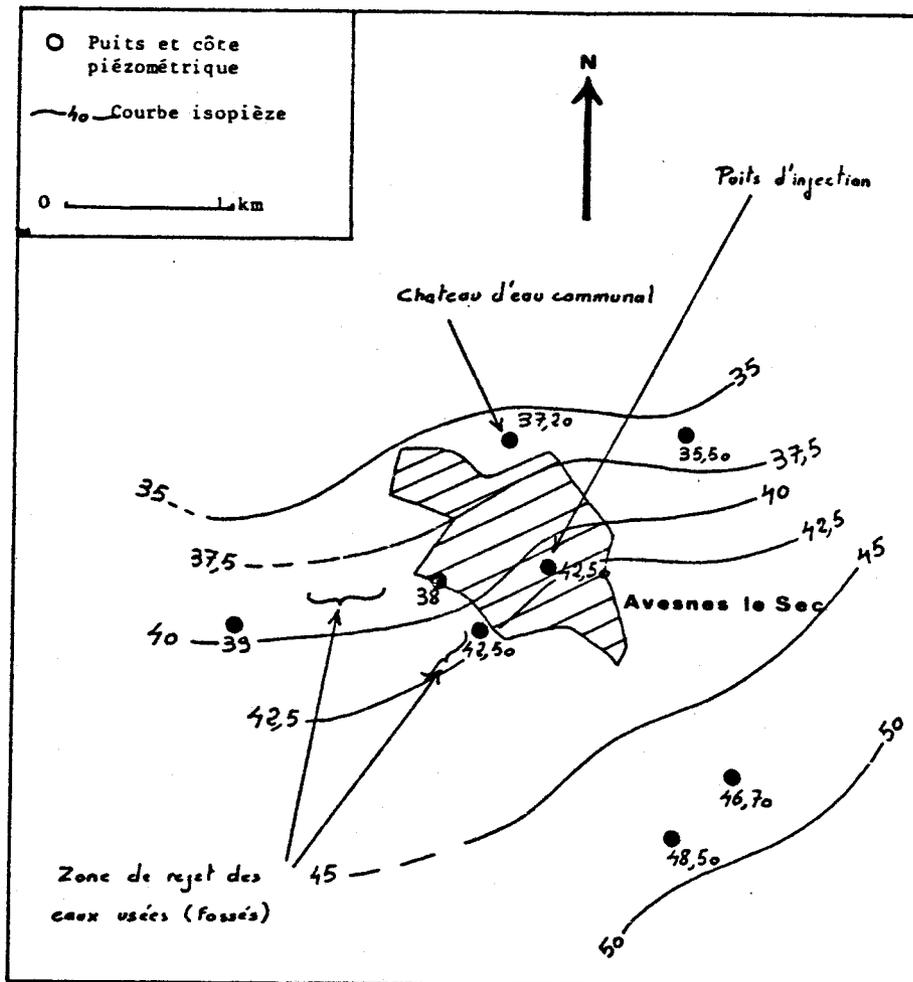


Fig. 4.19 : Géographie du site d'Avesnes le Sec



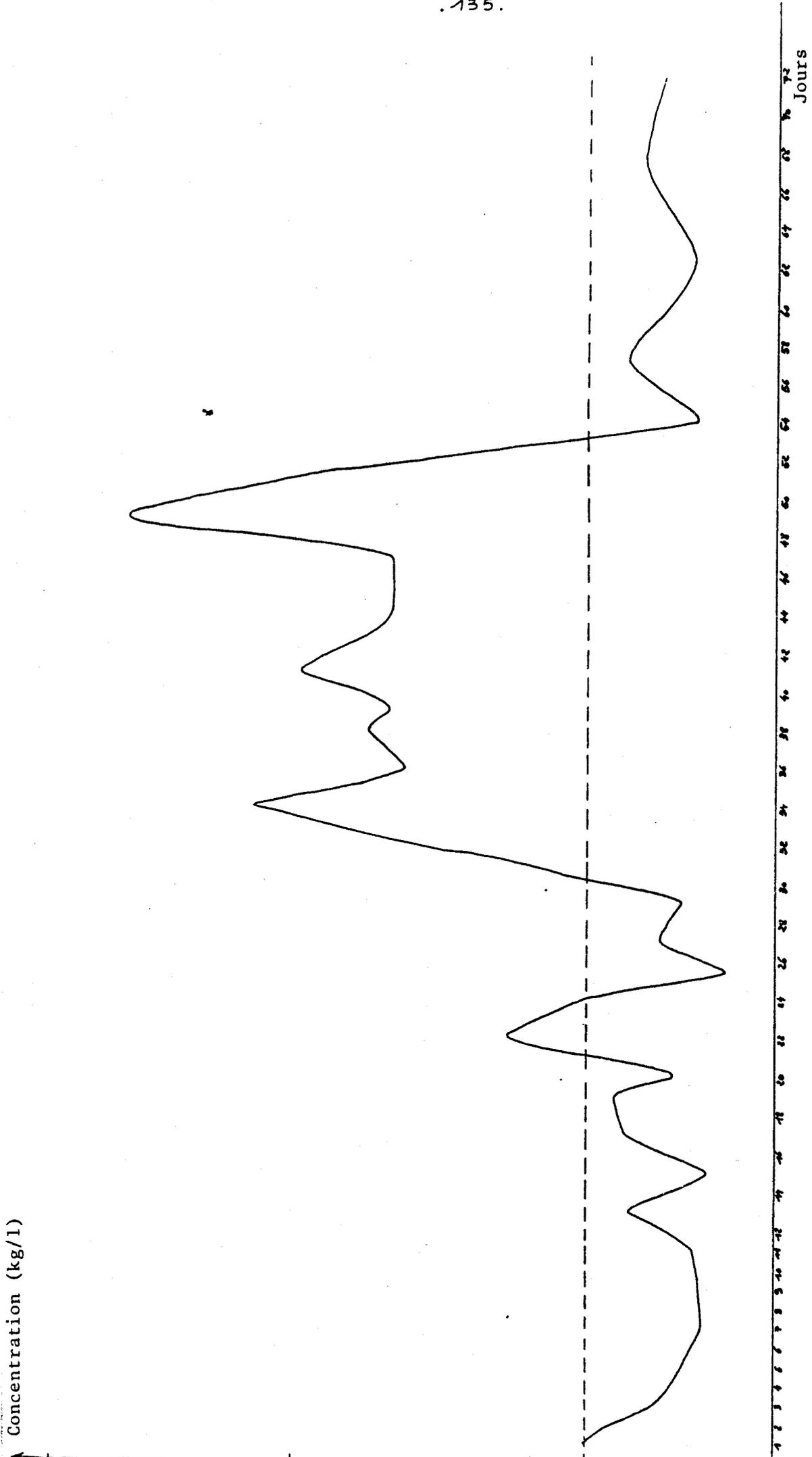


Fig.4.20: Courbe de concentration en fluorescéine obtenue au captage de Avesnes le Sec.



miques particulières telles que les azurants optiques.

Au 22ème jour, un premier pic de faible importance ($1,3 \cdot 10^{-9}$ kg/l) peut représenter l'arrivée de particules les plus rapides de la fluoresceine.

A partir du 34ème jour apparaissent des pics à concentrations relativement fortes (de 1,5 à $5 \cdot 10^{-8}$ kg/l) attestant du passage du colorant en plusieurs secousses.

Si l'on considère le pic du 22ème jour comme étant la première apparition de la fluoresceine, la vitesse moyenne ou apparente de ce traceur est de 31 m/j. La référence au pic du 34ème jour indique, par contre, une vitesse moyenne de l'ordre de 20,6 m/j.

b) Commentaires.

Les différents pics obtenus permettent de dégager plusieurs hypothèses :

- Il peut exister différents cheminements possibles du colorant dus à la présence de plusieurs familles de fissures.

- Une partie de la fluoresceine injectée, malgré une bonne dissolution, s'est trouvée piégée dans le puits ou dans le terrain et a été remise en circulation grâce aux différentes pulsions pluviométriques ou aux fluctuations piézométriques.

- Enfin, après être arrivé dans la zone d'influence du captage, le colorant est soumis aux différentes périodes de pompage. Le débit du captage d'Avesnes-le-Sec est d'environ 100 m3/j, mais la pompe ne se met en marche que pour assurer une quantité d'eau minimale dans le réservoir.

c) Conclusions des deux expériences de traçage.
.....

La vitesse moyenne du traceur dans les deux cas se situe donc entre 15 et 70 m/j, avec cependant une vitesse deux fois plus grande pour Doignies, et dont les meilleures caractéristiques hydrauliques au niveau du puisard (vallon et sens de circulation préférentielle) et également l'existence d'une galerie souterraine captante permettent des circulations plus rapides.

Du fait de la complexité des courbes de restitution de la fluoresceine, il apparaît difficile d'obtenir une évaluation précise des pa-

ramètres hydrodispersifs par la méthode habituelle (abaques,....) aussi avons-nous appliqué une méthodologie basée sur le calcul des concentrations cumulées, dont les résultats sont consignés dans les deux tableaux ci-dessous.

	t (en jours)	$\sum C(t)$	$t_{i-1/2}$	$\frac{C(t)}{t}$
DOIGNIES	46	402,2	15,5	23,05
AVESNES-LE-SEC	72	5696,3	71,5	141,36

Tableau 4.5 : Concentrations cumulées en fluoresceine pour les sites de Doignies et Avesnes-le-Sec dans l'éluat issu des échantillons de charbon actif traités.

	$I_2 = \int_0^t C(t) dt$	$I_3 = \int_0^t \frac{C(t) dt}{t}$	$u \neq x \cdot \frac{I_3}{I_2}$	$D = \frac{x^2 - T_m^2 u^2}{2 T_m}$	$\alpha = \frac{D}{u}$	$\omega = \frac{V_{Darcy}}{u}$
DOIGNIES	402,2	23,05	63,04m/j	non significatif	non significatif	2%
AVESNES-LE-SEC	5696,3	141,36	11,4 m/j	45,8 m ² /j	4,01 m	7%

Tableau 4.6 : Paramètres hydrodispersifs de la nappe calculée à Doignies et Avesnes-le-Sec.

Légende des tableaux :

- C = concentration massique (ML⁻³)
- D = coefficient de dispersion (L²T⁻¹)
- t = temps écoulé depuis l'injection du traceur (T)
- T_m = date du passage du maximum de la courbe de restitution (T)
- u = vitesse moyenne (LT⁻¹)
- V Darcy = vitesse de Darcy
- x = distance au point d'injection (L)
- ω = porosité intrinsèque
- α = coefficient longitudinal intrinsèque de dispersion cinématique.

Nous noterons donc dans un premier temps, la difficulté d'obtenir une estimation significative des paramètres D et C, ceci étant sans doute dû à la trop faible quantité injectée par rapport à la longueur du parcours dans un terrain non karstique. Le site d'Avesnes-le-Sec présente de meilleures conditions d'étude, toutefois, la porosité intrinsèque semble sous-évaluée dans ce secteur.

Par contre, les vitesses moyennes ou vitesses effectives correspondent relativement bien avec celles estimées d'après la courbe. La méthodologie utilisée s'applique ici avec réserve, mais apparaît d'un bon rapport si les quantités injectées de fluoresceine étaient plus grandes.

Malgré une faible proportion de traceur récupéré, due au piégeage du colorant par les formations superficielles et crayeuses, ainsi qu'à la grande distance entre le point d'injection et le point d'observation, les deux traçages effectués nous apportent une réponse positive quant à l'existence d'une pollution d'origine organique (domestique).

Cette hypothèse nous est confirmée par l'étude d'échantillons d'eau au spectrofluorimètre réalisée avant le traçage. Deux sites témoins, exempts de pollution azotée, ont été également testés.

Les figures 4-21 et 4-22 nous montrent l'apparition d'un pic (flèche) plus important à Avesnes-le-Sec et Doignies que pour les deux autres sites et qui correspond à l'émission spectrale d'azurants optiques très employés dans la fabrication des détergents.

Ces deux résultats nous amènent donc à penser que les captages présentant des fortes teneurs en nitrates sont sujets directement à un rejet d'eaux usées important et mal contrôlé, rares sont en effet les communes agricoles reliées à une station d'épuration ou possédant un réseau d'assainissement efficace.

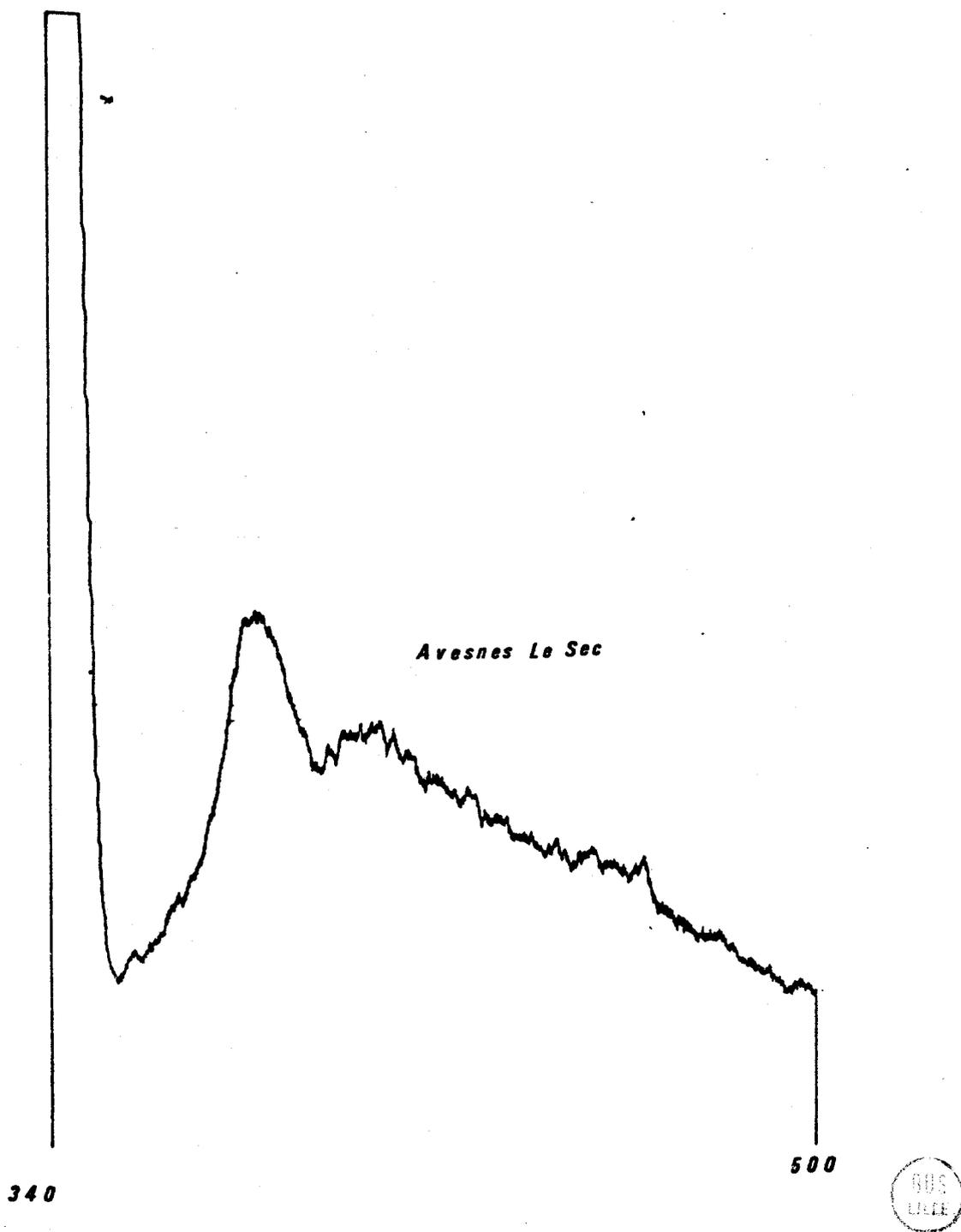


Fig.4.21: Spectre obtenu sur les eaux de Avesnes le Sec.

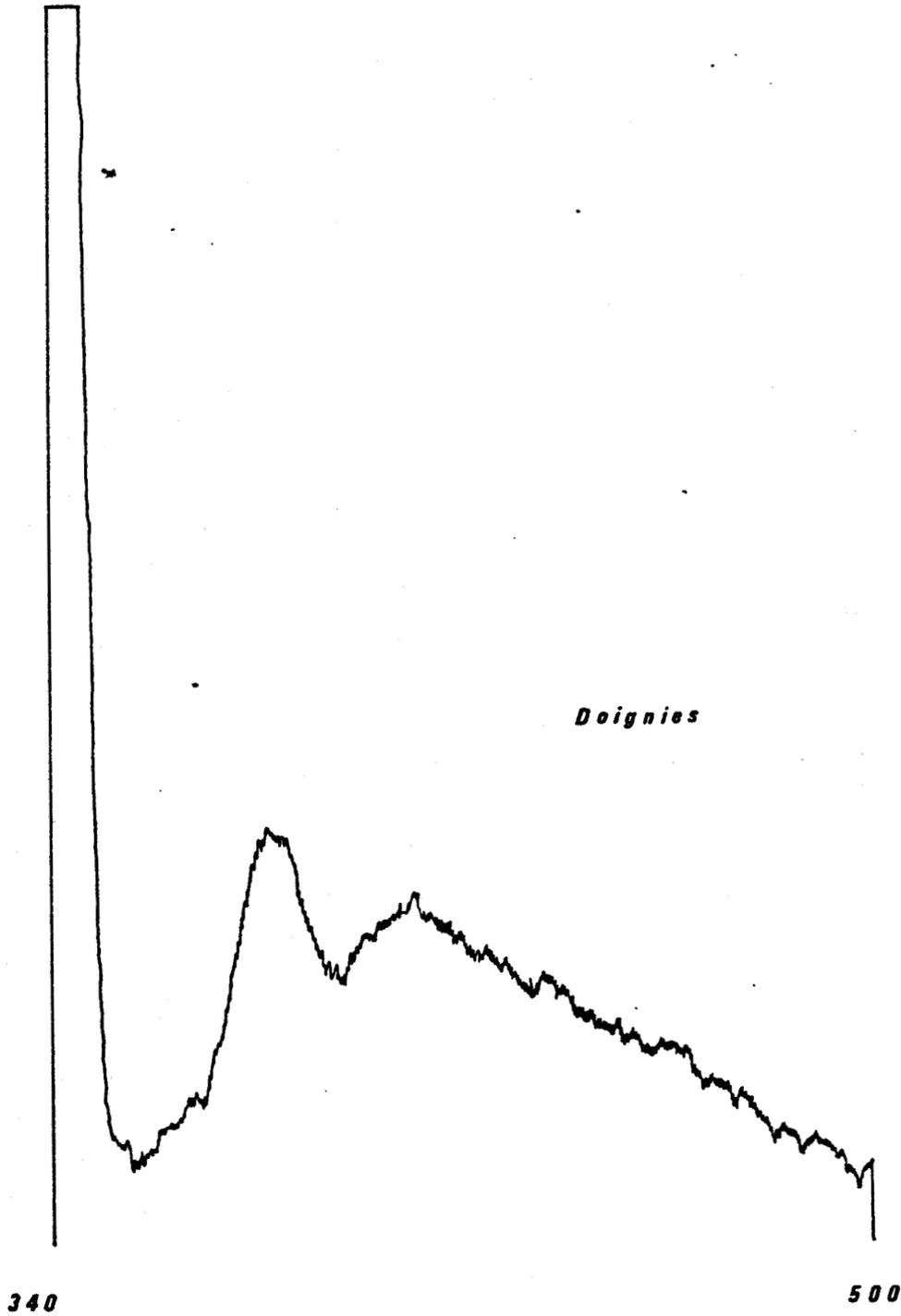


Fig.4.21:(suite) : Spectre obtenu sur les eaux de Doignies



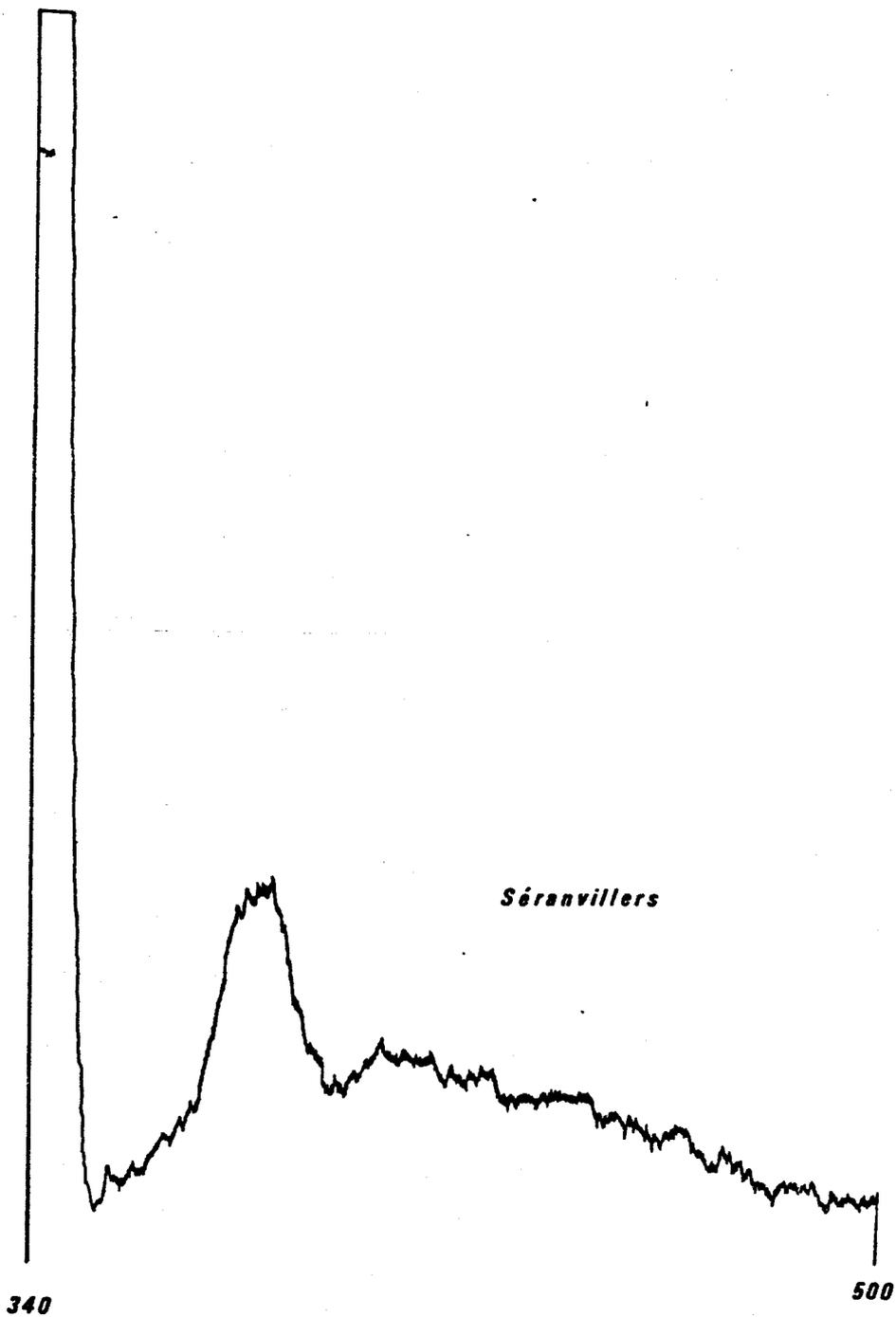


Fig.4.22: Spectre obtenu sur les eaux de sites de référence.

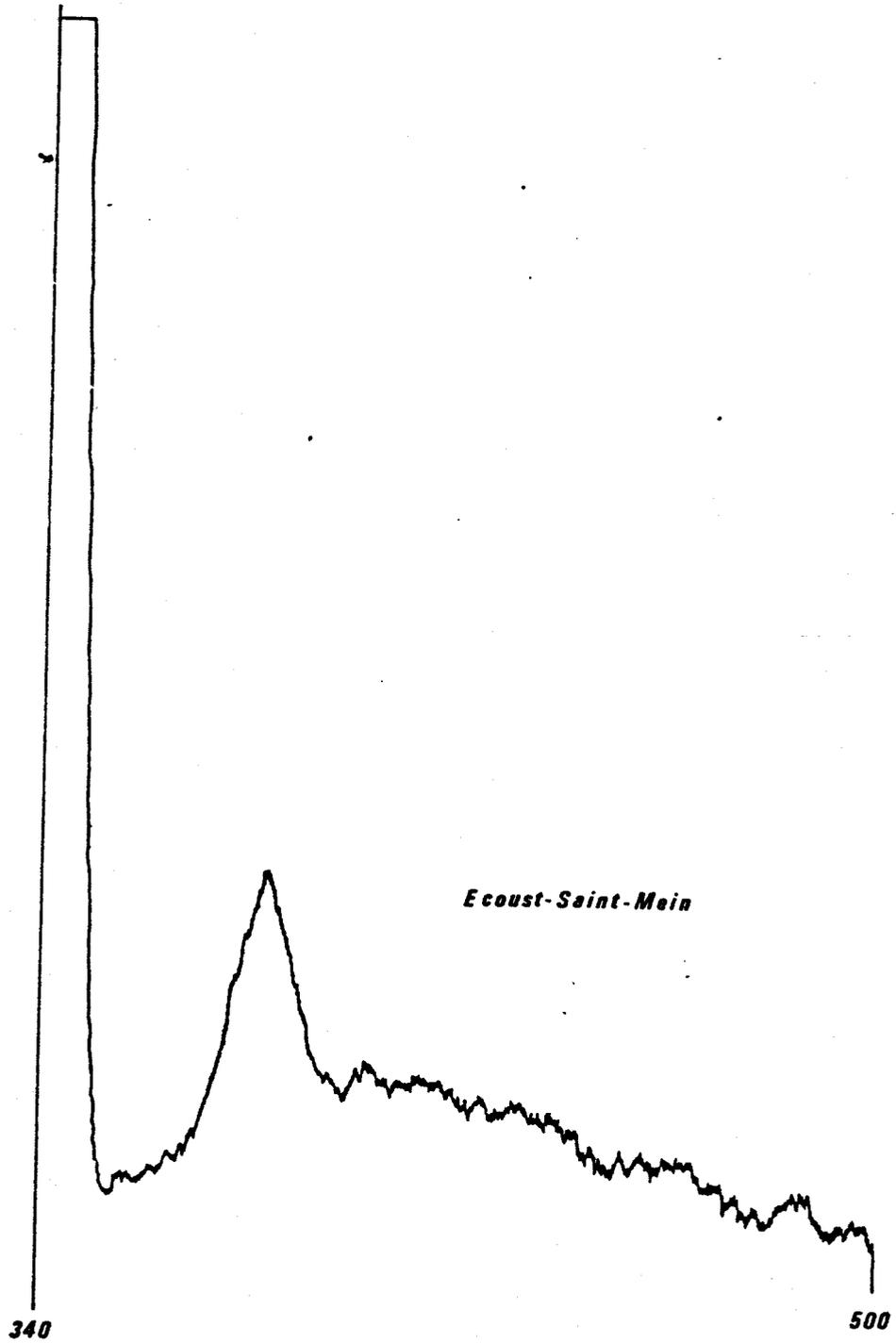


Fig.4.22:(suite)

BUS
LILLE

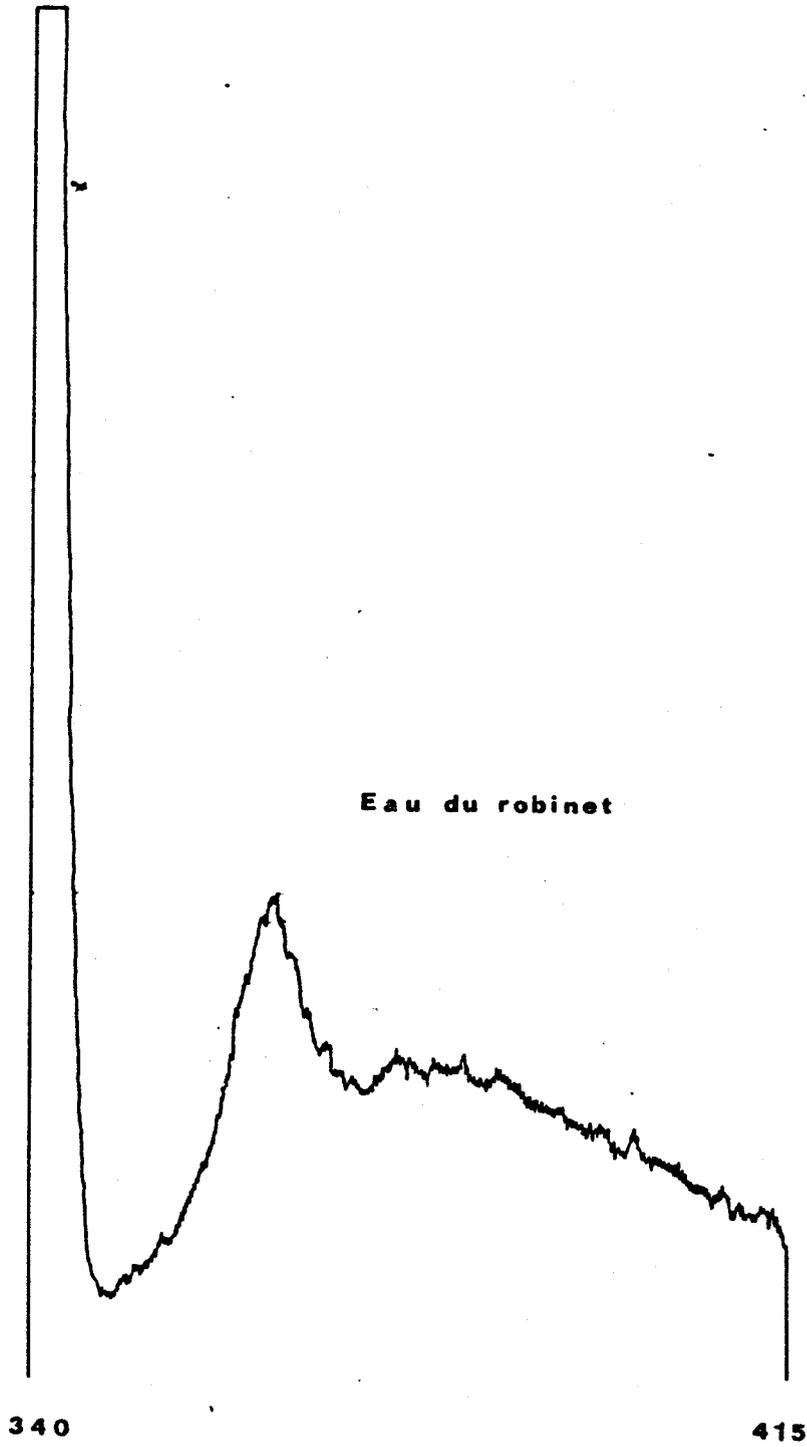


Fig.4.22 (suite).



CINQUIEME PARTIE

PREVISION DE LA QUALITE

DES EAUX

Les modifications de la qualité des eaux souterraines au cours du temps représentent un des aspects non négligeables de la restructuration des ressources en eau.

KONIKOV et BREDEHOEFT (1973) ont développé un modèle de précision des fluctuations de la concentration en sels minéraux des eaux souterraines, compte-tenu des variations dans l'espace et dans le temps des contraintes hydrologiques à l'intérieur d'un système aquifère complexe.

Les buts de l'application d'un tel modèle de simulation de la qualité des eaux souterraines en zone rurale sont :

- d'évaluer l'importance géographique du phénomène de propagation des polluants (eaux usées, engrais, etc....),
- d'apprécier la vulnérabilité des ouvrages de captages d'adduction d'eau potable,
- d'appréhender la vitesse de propagation du point de pollution.

Le modèle hydrodispersif "WATQUA" utilisé pour cette étude nécessite au préalable l'existence d'un modèle hydrodynamique dont les aspects ont été développés précédemment.

5.1.- Généralités.

Le modèle met en oeuvre deux équations à différentielles partielles qui agissent simultanément :

- une équation d'écoulement classique qui décrit la distribution des charges piézométriques de la nappe,
- une équation de transport qui peut être résolue pour décrire les variations de la concentration des sels minéraux du système. On suppose qu'il n'existe pas d'interactions entre la qualité chimique et la nature du sous-sol.

L'équation de base représentative du transport et de la dispersion des sels dissous s'exprime par :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{i,j} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C) - M(x_i, t)$$

avec C = concentration du résidu sec (TDS) dans l'eau,

t = temps.

x_i, x_j = coordonnées cartésiennes spatiales,

$D_{i,j}$ = tenseur de dispersivité,

V_i = vitesse de percolation dans la direction x_i ,

M = flux massique de la source ou du puits.

Dans ce modèle, la résolution de l'expression analytique précédente fait appel à la méthode des caractéristiques (FRIED J., 1975) qui permet de résoudre numériquement une équation à différentielles partielles.

5.2.- Les diverses étapes du calcul.

Les mécanismes de l'évolution des concentrations en sels dissous, ou en polluants, sont concrétisés dans le modèle par des particules ayant une position et une densité définies dans le cadre d'une maille donnée.

La précision du modèle est proportionnelle au nombre de particules dans chaque maille. Le mouvement de ces particules est gouverné par des courbes caractéristiques qui déterminent leur position et leurs concentrations.

Chaque particule est dirigée ensuite, sur une certaine distance, dans une direction calculée à partir des vitesses de filtration et du pas de temps considéré.

Une fois les coefficients de dispersion calculés, une concentration moyenne en sels est évaluée pour une maille donnée à partir de la concentration des particules. La fig. 5-1 montre les différentes étapes du processus de calcul.

Le programme "WATQUA" impose de définir, d'une part des puits "d'injection" où le débit et la concentration du polluant sont connus, et d'autre part, plusieurs mailles d'observation où des analyses chimiques ont été établies.

Après la lecture des données géologiques, hydrologiques et chimiques, une carte piézométrique est calculée et les gradients hydrauliques définis à partir de cette nouvelle piézométrie. La connaissance de ces gradients permet le calcul des vitesses d'écoulement, et les varia-

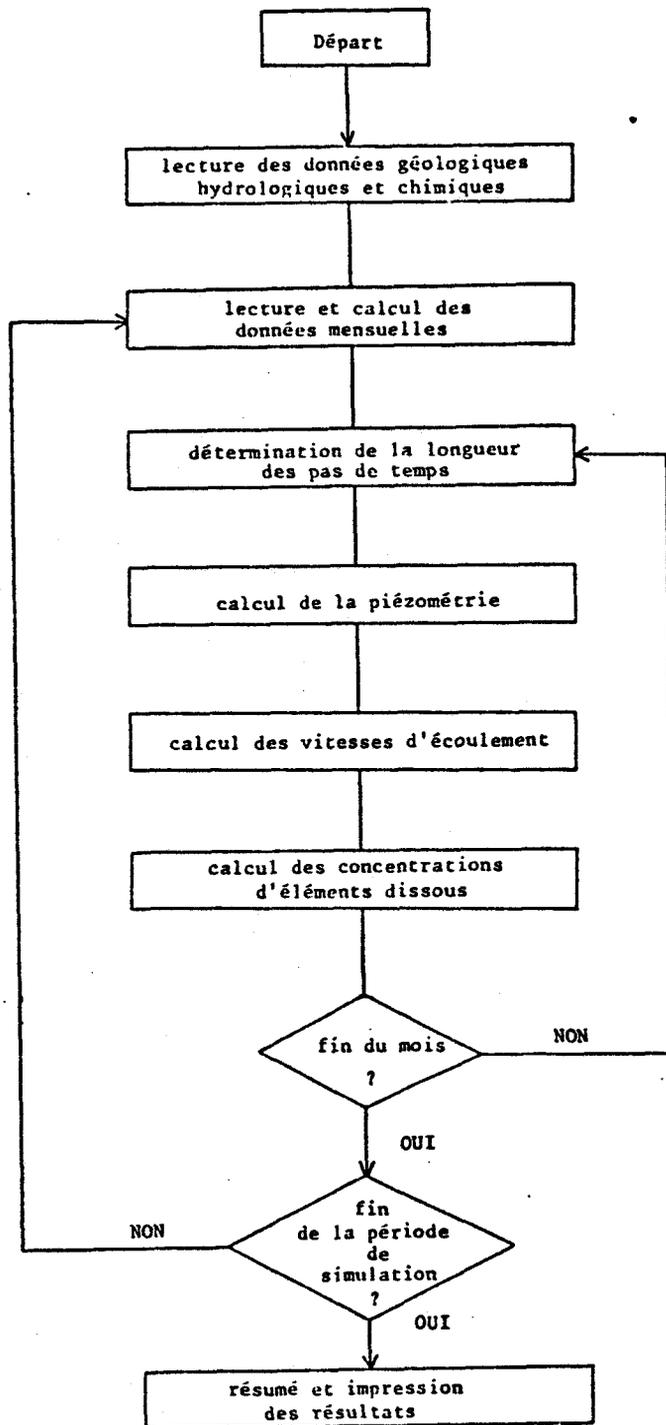


Fig. 5.1.- ORGANIGRAMME SCHEMATIQUE DE LA PROCEDURE DE CALCUL (D'après FLACK J.E. et HOWE C.W.)



tions de concentrations dues au transport et à la dispersion des éléments chimiques peuvent alors être exprimées.

5.3.- Données à introduire.

Les données de base essentielles, nécessaires à la simulation sont les suivantes :

- paramètres hydrauliques et de temps,
- coordonnées des puits d'observation et de pompage,
- nombre minimum de pas de temps,
- nombre de puits d'observation,
- nombre de particules par mailles,
- durée de la période de pompage en année,
- coefficient de dispersion longitudinale,
- rapport de la dispersion transversale à la dispersion longitudinale,
- coefficient d'emménagement,
- transmissivités,
- épaisseurs d'aquifère,
- perméabilités verticales,
- piézométrie,
- résidu sec.

5.4.- Estimation quantitative des rejets de substances polluantes.

L'étude de l'évolution chimique des eaux souterraines nécessite auparavant une connaissance précise de la qualité des rejets et du lieu de leur déversement.

Le modèle hydrodispersif "WATQUA" ne permet la localisation exacte de ces endroits, aussi nous bornerons-nous à utiliser des puits d'injection d'eaux usées dans la maille contenant la commune ou l'industrie polluante.

L'évaluation des rejets de substances polluantes peut être déterminée par l'analyse des bancs de stations d'épuration qui constituent le résidu de matières organiques, chimiques, et en suspension obtenu après les diverses opérations de traitement.

STATIONS	Nombre d'eq/h	Flux d'N théorique rejeté (kg/j)	Flux azote total entrant (méthode Kjeldahl)	Coefficient de charge moyen (débit)	Flux azote entrant corrigé par coeff. de charge	Coefficient charge DBO	Flux N entrant corrigé par coeff. Charge DBO
ARLEUX	5185	37,3	23	57,2	40,2	23,2	99
<u>ELINCOURT</u>	2500 (teinturerie)	342	26	70,7	36,7	40	65
GOUZEAUCOURT	3888	7	6,5	15,5	41,9	10	65
<u>MARCOING</u>	4000	353	2,7	9	30	5,7	42,2
VILLERS- OUTREAU	4100	12,7	8	24	33,3	8,5	94
<u>CAMBRAI</u>	60000	908	697	45,3	1548	47	1482
<u>CAUDRY</u>	15000	500	91	43,7	208	52	175

Tableau 5.1. : Caractéristiques techniques de quelques stations d'épuration du Cambrésis.



Stations	Flux d'azote par h/j (Kjeldahl) sur d'autres stations agricoles	Nombre d'eq/h	Flux entrant d'azote kg/j
AUBIGNY-AU-BAC	45,2	4111	186
AVESNES-AVESNELLES	3,5	15000	53
BOURBOURG	2,9	10000	29
GONDECOURT	16	5000	80
IWUI (sucrierie)	1,2	3000	6
JENTAIN	1,1	3000	3,4
MANIERES	1,6	4900	8
TRELON	1,3	4500	6
QUARAMBLE	74,1	1200	89
FECHAIN	0,3	5400	1,7
PREUX-AU-BOIS	1,8	1600	3
VALENCIENNES I	8,4	25000	210
VALENCIENNES II	7,2	35000	253
MOYENNE TOUTES STATIONS : 21,8 gN/j/h			

Tableau 5.2: Flux d'azote entrant pour plusieurs stations d'épuration du département du Nord.



Le tableau 5.1. relatif au Cambrésis, et le tableau 5.2. correspondant à d'autres stations d'épurations du département du Nord, situées en zones agricoles, nous ont permis d'établir la quantité d'azote rejeté chaque jour par habitant. Le Tableau 5.2. indique une valeur de 21,8 g., les données issues du tableau 5.1. conduisant, après calcul au chiffre de 7,8 g. Une valeur moyenne (15 g.) a donc été utilisée pour simuler les rejets d'eaux usées. Il faut cependant noter que cette quantité d'azote rejeté a été majoré de 50% au niveau des communes possédant d'importantes industries (sucrieries, malteries, etc....).

5.5.- Exploitation du modèle.

Le programme "WATQUA" peut être appliqué à un grand nombre de cas à la condition de respecter les limites et les possibilités de ce modèle.

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pu choisir qu'une zone d'expérience relativement faible du point de vue de sa superficie de manière à permettre une résolution plus aisée et plus rigoureuse du problème considéré. Les contraintes principales sont en effet le nombre et la dimension des mailles qui devaient, dans le cas présent, respecter le maillage établi lors de l'exploitation du modèle "SIBITRA", afin d'établir une correspondance de données. D'autre part, les transmissivités introduites devaient avoir une distribution homogène et éviter d'importants contrastes entre deux mailles voisines, il est en effet difficile d'obtenir une solution avec la procédure de calcul "AOI" utilisée ici, dans le cas de transmissivités hautement anisotropiques. Certaines transformations se sont avérées nécessaires pour appliquer ce modèle à des problèmes particuliers, et surtout à des conditions particulières telles qu'il en existe dans le Cambrésis et l'Artois.

5.5.1.- Description du problème et paramètres d'entrée.

La région étudiée et modélisée comprend la majeure partie du Cambrésis. Elle est délimitée au Sud par la ligne de partage des eaux, au Nord par une ligne Haynecourt-St-Aubert, à l'Ouest par le canal de l'Escaut et à l'Est par une ligne Busigny-Haussy. Ce modèle représente un carré de 20 Km de côté divisé en 400 mailles carrées de 1 Km² de superficie (fig. 5.2.).

 Mailles à potentiel imposé

 Mailles à concentration imposée

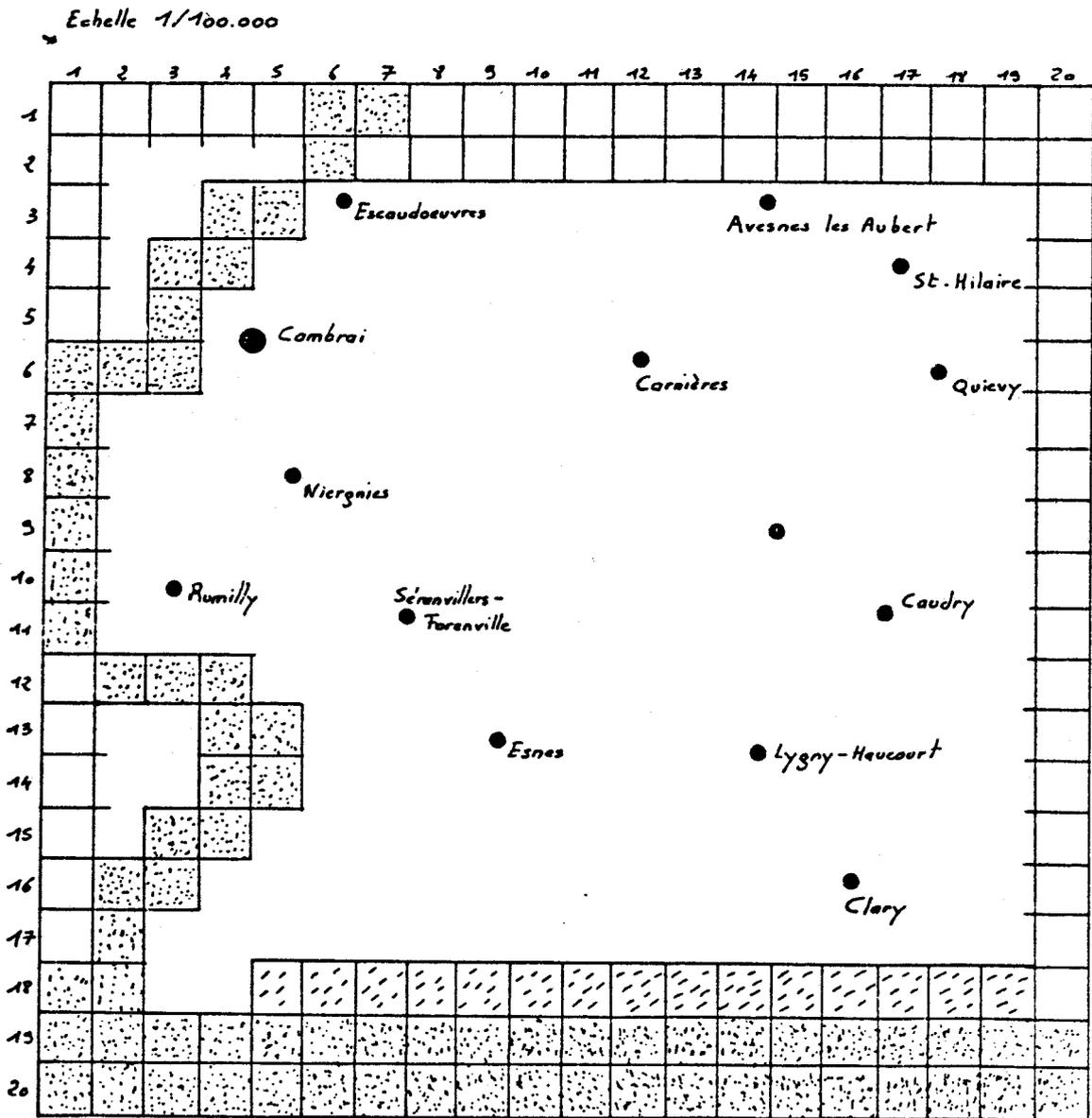
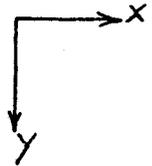


Fig.5.2: Maillage conditions aux limites de la zone étudiée.



Les mailles situées à la périphérie du modèle représentent une limite à flux nul. Deux rangées de mailles au Nord et au Sud, en plus de celles recouvrant le canal de l'Escaut, ont été également définies comme limites à potentiel imposé de manière à assurer le sens d'écoulement des eaux souterraines. De la même façon, mais d'un point de vue purement chimique, nous avons imposé une partie de la 18ème ligne à la valeur de 30 mg/l afin de prendre en compte, sur un secteur relativement petit, une pollution par épandages d'engrais et de maintenir un lien entre le modèle et les régions extérieures (notamment celle située au Sud).

Le tableau ci-dessous récapitule les principaux paramètres utilisés.

Paramètres	Valeur
NX (nombre de colonnes)	20
NY (nombre de rangées)	20
XDEL (longueur d'une maille selon la direction X)	1000 mètres
YDEL (longueur d'une maille selon la direction Y)	1000 mètres
PINT (durée de la période de pompage)	20 ans
S (coefficient d'emmagasinement)	0,0
POROS (porosité effective)	0,3
ANFCTR (rapport des transmissivités selon X et selon Y)	1
TOL (critère de convergence)	0,0001
ITMAX (nombre d'itérations maximum)	200
NPTPND (nombre initial de particules par maille)	9

Tableau 5.3 : Paramètres d'utilisation.

5.5.2.- Résultats.

Le programme "WATQUA" et plus particulièrement le sous-programme "VELO" permet de calculer les vitesses d'écoulement souterrain au centre et aux limites de chaque maille. Ces vitesses qui seront nécessaires ul-

térieurement lors de l'établissement des cartes de concentration, renseignent toutefois quant au sens de propagation d'une eau supposée polluée et à la rapidité de cette propagation.

Les tableaux 5.4 et 5.5 représentent les vitesses d'écoulement souterrain selon les directions X et Y, calculées au centre de chaque maille. Par souci de simplification, nous n'avons pas représenté ici les vitesses calculées aux limites des mailles, celles-ci étant tout à fait comparables aux précédentes. Notons, pour une lecture plus précise de ces tableaux que le signe (-) indique un sens de circulation de l'Est vers l'Ouest. Par ailleurs, les mailles périphériques présentent des vitesses nulles du fait des valeurs de leur transmissivité égales à zéro (limites à flux nul).

On peut constater que les vitesses enregistrées oscillent entre $0,1 \cdot 10^{-4}$ ft/s et $0,9 \cdot 10^{-8}$ ft/s soit environ $0,3 \cdot 10^{-5}$ m/s et $0,3 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Il est possible par ailleurs en chaque point de la zone d'étude de déterminer le sens d'écoulement et la vitesse d'un flux de pollution par la détermination de la résultante entre V_x (vitesse suivant X) et V_y (vitesse suivant Y) comme l'indique la figure 5.3 ci-dessous.

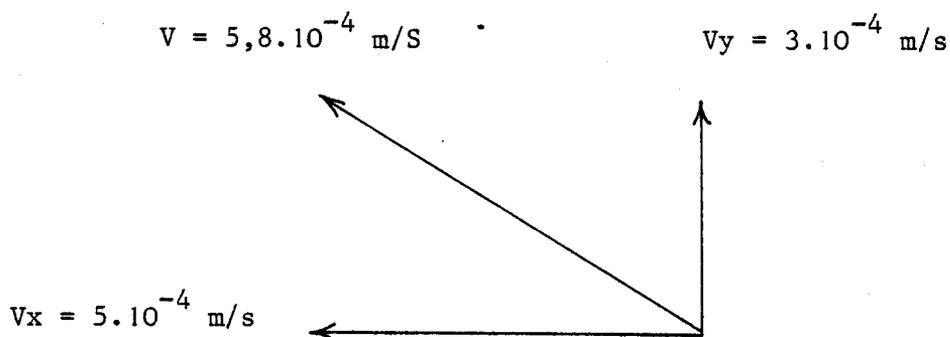


Fig. 5.3 : Détermination des vitesses résultantes.

Les vitesses calculées par le modèle indiquent d'autre part une certaine homogénéité de l'aquifère malgré les différences de côtes piézométriques et d'épaisseurs enregistrées dans cette région. Les caractéristiques hydrauliques semblent donc se distribuer de manière homogène.

Les sous-programmes MOVE et CNCON permettent, à partir de concentrations chimiques expérimentées et de différentes sources de contraintes

1	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000
2	.000 -.204E-04	.218E-05 -.926E-05	.324E-05 -.185E-05	.397E-05 -.192E-05	.136E-05 -.427E-05	-.498E-05 -.145E-04	-.133E-04 -.101E-04	-.119E-04 -.292E-05	-.992E-05 -.617E-05	-.167E-04 .000
3	.000 -.125E-04	.224E-05 -.907E-05	.518E-05 -.543E-05	.682E-05 -.511E-05	-.286E-05 -.538E-05	-.867E-05 -.674E-05	-.762E-05 -.755E-05	-.855E-05 -.414E-05	-.965E-05 -.163E-05	-.117E-04 .000
4	.000 -.863E-05	-.134E-05 -.756E-05	.954E-05 -.607E-05	.891E-05 -.533E-05	-.573E-05 -.484E-05	-.426E-05 -.476E-05	-.407E-05 -.468E-05	-.547E-05 -.367E-05	-.707E-05 -.221E-05	-.838E-05 .000
5	.000 -.694E-05	-.407E-05 -.709E-05	-.858E-05 -.635E-05	.473E-05 -.571E-05	.137E-04 -.498E-05	.286E-05 -.424E-05	-.949E-06 -.333E-05	-.288E-05 -.243E-05	-.515E-05 -.202E-05	-.693E-05 .000
6	.000 -.663E-05	.271E-13 -.828E-05	.670E-06 -.715E-05	.490E-05 -.628E-05	.686E-05 -.566E-05	.307E-05 -.463E-05	.163E-06 -.297E-05	-.193E-05 -.184E-05	-.371E-05 -.124E-05	-.501E-05 .000
7	.000 -.554E-05	.551E-05 -.739E-05	.442E-05 -.627E-05	.441E-04 -.445E-05	.415E-05 -.435E-05	.247E-05 -.407E-05	.557E-06 -.211E-05	-.128E-05 .107E-06	-.276E-05 .409E-06	-.388E-05 .000
8	.000 -.468E-05	.472E-05 -.657E-05	.462E-05 -.652E-05	.408E-05 -.494E-05	.382E-05 -.483E-05	.201E-05 -.375E-05	-.243E-07 -.196E-05	-.864E-06 .935E-06	-.215E-05 .316E-05	-.294E-05 .000
9	.000 -.386E-05	.805E-05 -.559E-05	.618E-05 -.612E-05	.407E-05 -.606E-05	.301E-05 -.625E-05	.193E-05 -.619E-05	.584E-06 -.277E-05	-.482E-06 .895E-06	-.160E-05 .122E-05	-.261E-05 .000
10	.000 -.365E-05	.818E-05 -.533E-05	.601E-05 -.606E-05	.365E-05 -.780E-05	.306E-05 -.755E-05	.217E-05 -.883E-05	.119E-05 -.277E-05	-.186E-06 .507E-05	-.147E-05 .224E-05	-.212E-05 .000
11	.000 -.351E-05	.410E-05 -.451E-05	.178E-05 -.535E-05	.141E-05 -.623E-05	.341E-05 -.600E-05	284E-05 -.405E-05	.131E-05 -.325E-05	.890E-08 -.207E-05	-.111E-05 -.838E-06	-.224E-05 .000
12	.000 -.353E-05	.204E-13 -.422E-05	-.444E-05 -.456E-05	-.836E-06 -.467E-05	.694E-05 -.462E-05	.444E-05 -.426E-05	.190E-05 -.320E-05	.749E-07 -.202E-05	-.127E-05 -.138E-05	-.246E-05 .000
13	.000 -.520E-05	-.358E-05 -.473E-05	-.790E-05 -.505E-05	-.324E-05 -.442E-05	.593E-05 -.464E-05	.547E-05 -.472E-05	.198E-05 -.338E-05	-.232E-06 -.222E-05	-.151E-05 -.171E-05	-.288E-05 .000
14	.000 -.453E-05	-.299E-05 -.549E-05	-.544E-05 -.647E-05	-.245E-05 -.587E-05	.479E-05 -.509E-05	.271E-05 -.480E-05	.263E-05 -.386E-05	-.132E-05 -.274E-05	-.238E-05 -.220E-05	-.347E-05 .000
15	.000 -.501E-05	-.816E-06 -.623E-05	-.282E-05 -.716E-05	-.453E-05 -.750E-05	-.292E-05 -.736E-05	-.195E-05 -.611E-05	-.216E-05 -.453E-05	-.271E-05 -.390E-05	-.353E-05 -.343E-05	-.446E-05 .000
16	.000 -.550E-05	-.823E-05 -.724E-05	-.393E-05 -.964E-05	-.193E-05 -.963E-05	-.443E-05 -.954E-05	-.438E-05 -.775E-05	-.423E-05 -.476E-05	-.437E-05 -.228E-05	-.497E-05 -.131E-05	-.499E-05 .000
17	.000 -.907E-05	-.728E-05 -.917E-05	-.760E-05 -.118E-04	-.849E-05 -.122E-04	-.800E-05 -.126E-04	-.538E-05 -.102E-04	-.476E-05 -.560E-05	-.472E-05 -.398E-06	-.567E-05 .250E-05	-.835E-05 .000
18	.000 -.132E-04	-.137E-04 -.132E-04	-.133E-04 -.185E-04	-.183E-04 -.185E-04	-.130E-04 -.192E-04	-.412E-05 -.179E-04	-.444E-05 -.741E-05	-.505E-05 .725E-05	-.505E-05 .238E-04	-.106E-04 .000
19	.000 -.148E-04	-.178E-04 -.174E-04	-.139E-04 -.243E-04	-.123E-04 -.317E-04	-.823E-05 -.347E-04	-.694E-05 -.292E-04	-.725E-05 -.926E-05	-.529E-05 .202E-04	-.556E-05 .833E-04	-.877E-05 .000
20	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000

Tableau 5.4. - Vitesses d'écoulement des eaux souterraines suivant la direction X

N.B : Les nombres de 1 à 20 représentent les numéros des rangées du modèle



1	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000
2	.000 .103E-05	-.523E-05 .171E-04	-.517E-05 .106E-04	-.155E-05 .103E-04	-.264E-06 .517E-05	-.113E-04 .109E-04	-.707E-05 .229E-04	.931E-06 .199E-04	.391E-06 .254E-04	.137E-05 .000
3	.000 .794E-05	-.787E-05 .129E-04	-.963E-05 .964E-05	-.291E-05 .920E-05	-.755E-05 .782E-05	-.103E-04 .112E-04	-.685E-05 .197E-04	-.779E-06 .191E-04	-.685E-07 .209E-04	.146E-05 .000
4	.000 .363E-05	-.114E-04 .620E-05	-.161E-04 .667E-05	-.339E-04 .657E-05	-.213E-04 .736E-05	-.123E-04 .808E-05	-.634E-05 .110E-04	-.323E-05 .135E-04	-.103E-05 .141E-04	.604E-06 .000
5	.000 .233E-06	-.122E-04 .190E-05	-.115E-04 .262E-05	-.197E-04 .309E-05	-.129E-04 .343E-05	-.915E-05 .356E-05	-.695E-05 .392E-05	-.305E-05 .609E-05	-.341E-05 .876E-05	-.169E-05 .000
6	.000 -.340E-05	-.120E-04 -.288E-05	-.726E-05 -.233E-05	.154E-05 -.140E-05	-.761E-05 -.140E-05	-.838E-05 -.101E-05	-.748E-05 -.130E-05	-.660E-05 .228E-06	-.589E-05 .171E-05	-.420E-05 .000
7	.000 -.658E-05	-.103E-04 -.683E-05	-.713E-05 -.592E-05	-.558E-05 -.476E-05	-.752E-05 -.452E-05	-.777E-05 -.449E-05	-.828E-05 -.464E-05	-.796E-05 -.394E-05	-.736E-05 -.381E-05	-.640E-05 .000
8	.000 -.949E-05	-.123E-04 -.111E-04	-.104E-04 -.103E-04	-.857E-05 -.853E-05	-.876E-05 -.866E-05	-.889E-05 -.833E-05	-.850E-05 -.955E-05	-.848E-05 -.101E-04	-.918E-05 -.139E-04	-.303E-05 .000
9	.000 -.113E-04	-.134E-04 -.138E-04	-.110E-04 -.144E-04	-.106E-04 -.146E-04	-.104E-04 -.159E-04	-.112E-04 -.160E-04	-.972E-05 -.220E-04	-.101E-04 -.171E-04	-.105E-04 -.173E-04	-.108E-04 .000
10	.000 -.145E-04	-.103E-04 -.162E-04	-.121E-04 -.177E-04	-.140E-04 -.179E-04	-.140E-04 -.184E-04	-.134E-04 -.177E-04	-.131E-04 -.179E-04	-.129E-04 -.211E-04	-.130E-04 -.235E-04	-.132E-04 .000
11	.000 -.170E-04	-.103E-04 -.174E-04	-.139E-04 -.189E-04	-.192E-04 -.206E-04	-.185E-04 -.199E-04	-.173E-04 -.199E-04	-.163E-04 -.168E-04	-.157E-04 -.212E-04	-.155E-04 -.251E-04	-.155E-04 .000
12	.000 -.179E-04	-.136E-04 -.182E-04	-.187E-04 -.186E-04	-.232E-04 -.195E-04	-.248E-04 -.195E-04	-.201E-04 -.220E-04	-.190E-04 -.231E-04	-.183E-04 -.233E-04	-.179E-04 -.258E-04	-.180E-04 .000
13	.000 -.253E-04	-.153E-04 -.208E-04	-.184E-04 -.215E-04	-.165E-04 -.227E-04	-.160E-04 -.229E-04	-.172E-04 -.234E-04	-.216E-04 -.240E-04	-.208E-04 -.254E-04	-.206E-04 -.288E-04	-.198E-04 .000
14	.000 -.226E-04	-.138E-04 -.230E-04	-.126E-04 -.241E-04	-.116E-04 -.251E-04	-.189E-04 -.271E-04	-.258E-04 -.279E-04	-.251E-04 -.285E-04	-.235E-04 -.290E-04	-.220E-04 -.331E-04	-.222E-04 .000
15	.000 -.248E-04	-.145E-04 -.247E-04	-.210E-04 -.266E-04	-.174E-04 -.279E-04	-.235E-04 -.303E-04	-.323E-04 -.323E-04	-.303E-04 -.332E-04	-.269E-04 -.383E-04	-.259E-04 -.378E-04	-.258E-04 .000
16	.000 -.299E-04	-.149E-04 -.283E-04	-.179E-04 -.296E-04	-.204E-04 -.318E-04	-.270E-04 -.339E-04	-.339E-04 -.365E-04	-.358E-04 -.384E-04	-.337E-04 -.378E-04	-.377E-04 -.409E-04	-.261E-04 .000
17	.000 -.373E-04	-.107E-04 -.359E-04	-.130E-04 -.354E-04	-.189E-04 -.356E-04	-.301E-04 -.383E-04	-.330E-04 -.402E-04	-.351E-04 -.445E-04	-.341E-04 -.442E-04	-.342E-04 -.520E-04	-.338E-04 .000
18	.000 -.239E-04	-.111E-04 -.248E-04	-.150E-04 -.258E-04	-.174E-04 -.246E-04	-.179E-04 -.243E-04	-.179E-04 -.279E-04	-.215E-04 -.290E-04	-.246E-04 -.337E-04	-.244E-04 -.454E-04	-.245E-04 .000
19	.000 -.741E-05	-.133E-04 -.694E-05	-.155E-04 -.694E-05	-.146E-04 -.794E-05	-.412E-05 -.694E-05	-.463E-05 -.117E-04	-.946E-05 -.123E-04	-.106E-04 -.101E-04	-.111E-04 -.278E-04	-.117E-04 .000
20	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000	.000 .000

Tableau 5.5. - Vitesses d'écoulement des eaux souterraines suivant la direction Y

N.B : Les nombres de 1 à 20 représentent les numéros des rangées du modèle



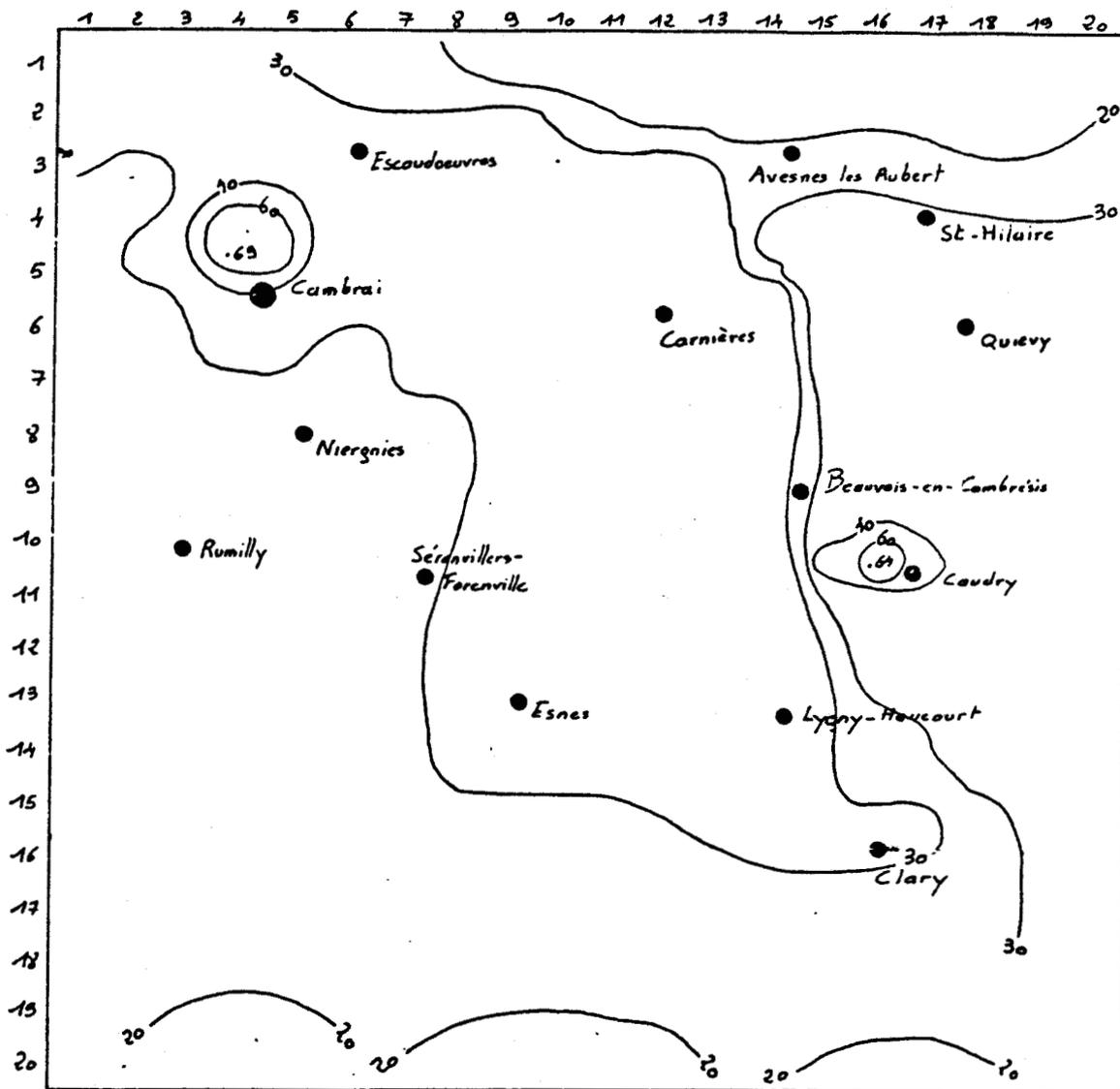


Fig.5.4: Concentrations calculées au temps $t= 5$ ans



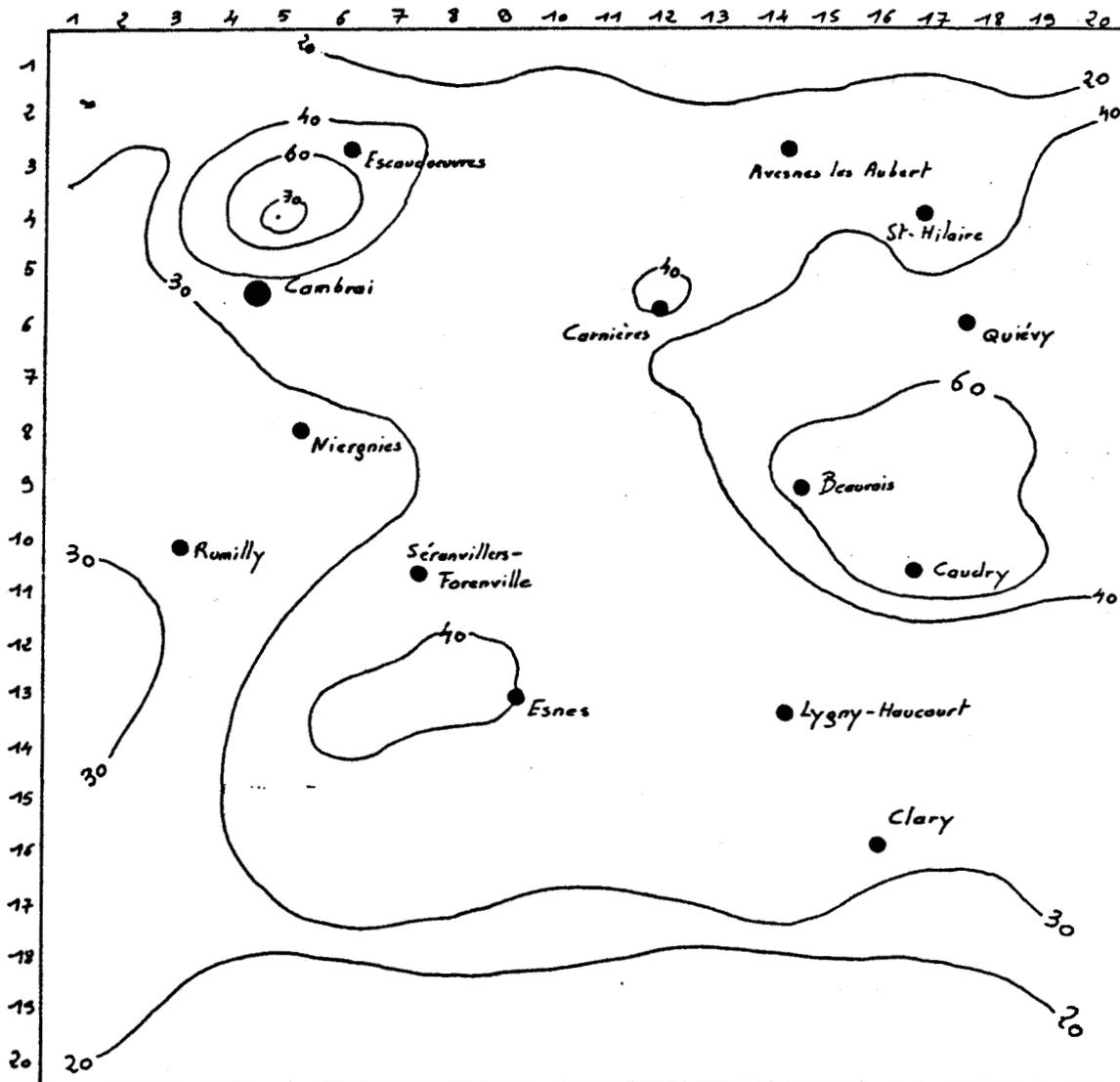


Fig.5.5: Concentrations calculées au temps $t = 11$ ans



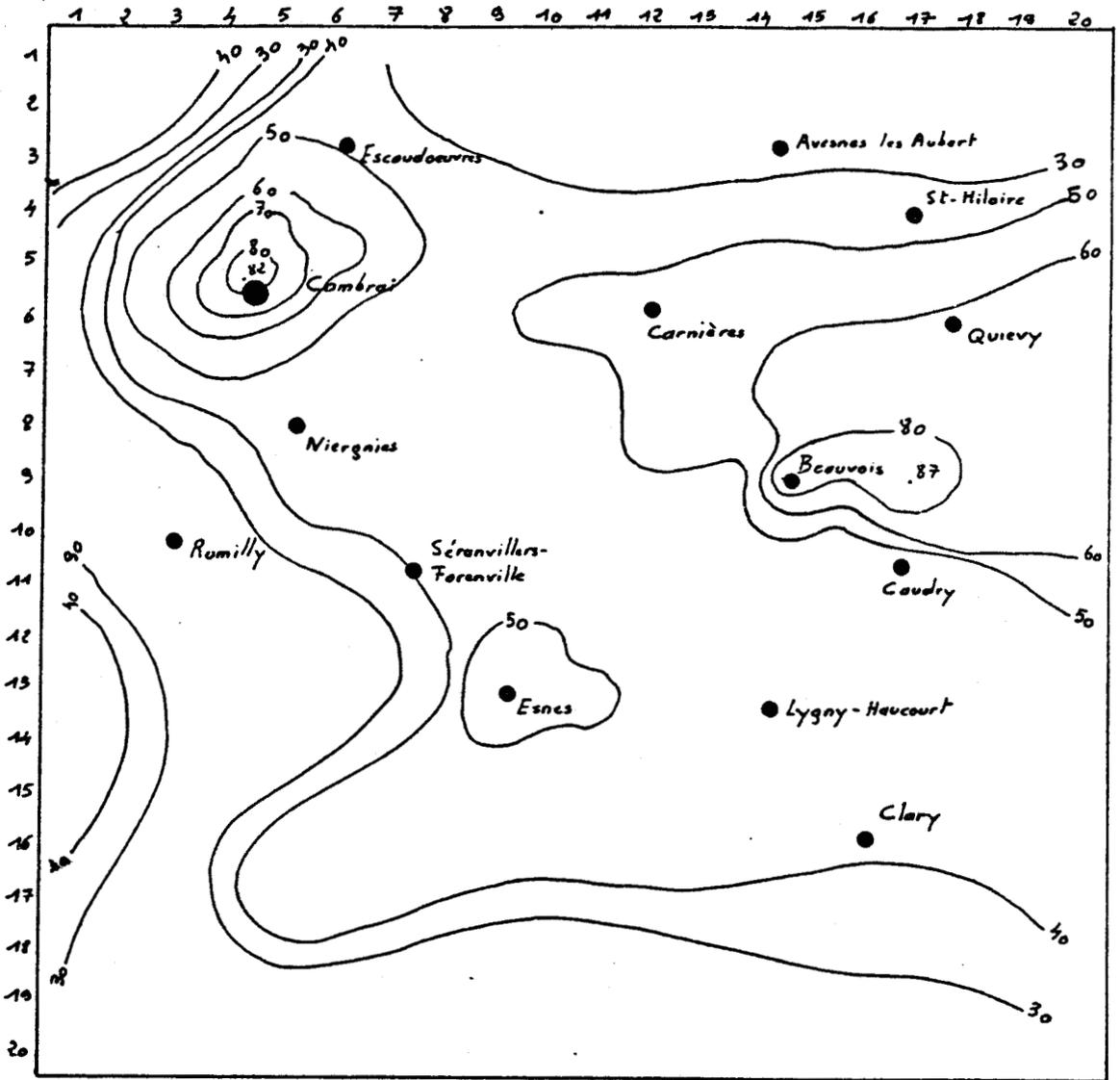


Fig.5.6: Concentrations calculées au temps $t=20$ ans



X	Y	Débits (en CFS)	X	Y	Débits(en CFS)
1	7	5,60	14	10	0,17
1	18	0,31	14	14	- 0,41
2	12	- 0,75	14	15	0,21
2	18	- 0,14	14	19	0,17
3	4	0,17	14	20	- 0,13
3	11	0,42	15	2	4,23
4	5	- 8,00	15	3	- 0,80
5	5	0,24	15	9	0,31
5	13	- 0,34	15	10	- 0,69
6	3	- 0,76	15	13	0,42
6	7	- 0,16	16	16	- 0,23
6	8	0,46	17	1	0,28
6	13	0,10	17	3	0,07
8	10	0,17	17	4	0,21
8	11	- 0,10	17	7	- 0,44
9	5	0,35	17	10	- 2,64
10	13	0,17	17	11	0,88
11	10	0,21	17	14	0,10
11	17	- 0,45	17	20	- 0,30
12	16	0,70	18	3	- 0,46
13	2	0,31	18	19	0,42
13	3	- 0,27	19	8	0,52
13	7	- 0,28	19	15	- 0,44

Tableau 5.6 : Localisation des puits de pompages et d'injection.



telles qu'une injection de substances dissoutes dans un puits et selon un débit donné ou l'imposition d'une maille à une concentration donnée, de calculer et d'indiquer pour chaque maille et donc pour l'ensemble de la zone d'étude une nouvelle composition chimique des eaux souterraines.

Lors de l'exploitation de ce modèle, nous avons introduit 46 puits dont 20 sont des puits d'injection de substances polluantes et 26 des puits de pompage. Le tableau 5.6 permet de localiser en correspondance avec la figure 5.2 ces différents ouvrages fictifs ; les débits ont été mentionnés ici dans l'unité anglaise (CFS).

Les figures 5.4, 5.5 et 5.6 montrent le développement des différents fronts de pollution. On constatera de manière générale que, au bout des vingt années de simulation, la majorité du territoire étudié voit ses teneurs en nitrates doubler voire tripler. De 25 mg/l, imposé au début de l'expérience, les valeurs de concentration en nitrates passent en moyenne à 50 mg/l et à plus de 80 mg/ dans certains secteurs.

Sur la limite Sud, correspondant à la ligne de partage des eaux, le phénomène est inverse et les chiffres diminuent graduellement, ce qui montre l'existence de "fuites" vers le Nord ou vers le Sud ; il n'y a d'autre part aucune injection d'eaux usées à cet endroit.

Deux zones semblent plus particulièrement sensibles à ces injections. Il s'agit de Cambrai et son agglomération où la teneur maximale enregistrée est de 82 mg/l, et de la région de Beauvois-en-Cambrésis et Caudry où l'on note une concentration maximale de 87 mg/l. Les dernières analyses chimiques effectuées par la D.D.A.S.S. confirment ce résultat puisque la teneur en nitrates de l'eau prélevée au captage de Beauvois dépasse 100 mg/l.

L'importance des concentrations obtenues peuvent donc s'expliquer par la présence d'agglomérations plus ou moins grandes où l'activité humaine joue un rôle prépondérant. On peut remarquer d'autre part l'influence de cette pollution sur des zones neutres où aucune injection n'a été réalisée mais où les bonnes caractéristiques hydrauliques favorisent une évolution rapide de cette pollution.

L'outil principal propre à la détermination des propagations des fronts de pollution reste donc la connaissance des vitesses de circula-

tion des eaux souterraines. Il serait par ailleurs utile de compléter l'utilisation de ce modèle par une étude de la percolation de solutions aqueuses dans la zone non saturée.

5.6.- Conclusion.

Le programme "WATQUA" nous a permis d'exprimer ici les répercussions d'une pollution en nitrate par des rejets d'eaux usées. Les différentes cartes chimiques obtenues permettent d'apprécier la vitesse et la propagation de ce polluant au cours du temps. Nous avons pu constater la rapidité d'avancement des fronts de pollution, rapidité qui est étroitement liée aux caractéristiques hydrauliques de la nappe de la craie et à sa porosité. On retiendra principalement que la nappe de la craie offre une vulnérabilité importante à l'injecte, rares sont en effet les secteurs n'ayant pas dépassé au terme des vingt années de simulation la valeur de 44 mg/l. Cette étude, malgré son côté expérimental, montre l'urgence de solutions concernant le problème des eaux usées, il n'a pas été

SIXIEME PARTIE

FACTEURS SOCIO-ECONOMIQUES

La gestion des ressources en eaux souterraines dans une région donnée nécessite une profonde connaissance de l'activité industrielle et agricole et de son évolution ainsi que des variations de population de manière à préciser le schéma d'utilisation des réserves en eau.

On peut en effet considérer que ces trois facteurs (agriculture, industrialisation et population) influencent la demande en eau souterraine. Un accroissement de la population provoque une demande d'eau accrue, le redéploiement des structures agricoles traditionnelles vers une agriculture industrielle se traduit par une élévation des besoins en eau (aspersion, étables modernes, etc...) et l'activité industrielle, en particulier dans le domaine alimentaire, nécessite de grosses quantités d'eau. Ces trois facteurs qui contribuent fortement aux variations des réserves de la nappe ont d'autre part une action prépondérante sur la pollution des eaux souterraines et de surface.

6.1.- Variations de populations et du nombre d'exploitations agricoles.

A l'aide de documents fournis par la D.D.A.* de Lille et d'Arras et des renseignements obtenus à l'observatoire économique de l'I.N.S.E.E.** de Lille, nous avons pu dégager les éléments suivants.

6.1.1.- Etude de la variation de la population.

Les résultats généraux pour l'ensemble du département du Nord indiquent une augmentation sensible de la population entre 1968 et 1972, augmentation qui risque de ne pas persister après l'année 1975 (date du dernier recensement) du fait des difficultés économiques de la région. Dans le Pas-de-Calais une relative stabilité apparaît.

Sur l'ensemble de la région agricole étudiée comprenant les arrondissements de Cambrai et d'Arras, on assiste à un déficit de population sur la zone agricole proprement dite alors que diverses migrations

* Direction Départementale de l'Agriculture.

** Institut National des Statistiques et des Fluides Economiques.

augmentent l'effectif de la population dans les cantons de Cambrai-Ouest, Vimy et dans la région d'Arras et sa banlieue.

6.1.2.- Evolution du nombre total d'exploitation de 1955 à 1970 pour les régions agricoles du Hainaut, du Cambrésis et de l'Artois.

Cette évolution est reproduite figure 1. De l'année 1955 à 1970 le pourcentage du nombre d'exploitations est en baisse régulière, offrant donc un parallélisme avec la diminution de la population dans la zone purement agricole du Cambrésis et de l'Artois. En moyenne, le pourcentage du nombre d'exploitations diminue de 29,7%.

6.1.3.- Conclusions.

Il semblerait donc que l'activité agricole soit en diminution sensible (notamment du point de vue nombre d'exploitations). Mais le tableau n° 1 indique que si ce nombre diminue effectivement, un grand nombre d'exploitations s'aggrandissent en superficie. D'autre part la superficie agricole utile (moyenne ou médiane) s'accroît entre 1955 et 1970 de plus de 15% ce qui amène un accroissement de la demande en engrais artificiels.

Tous ces éléments traduisent donc le passage à une agriculture moderne de type industriel qui nécessitera une demande d'eau accrue et dont l'utilisation intensive d'engrais risquera de perturber le chimisme des eaux souterraines.

6.2.- Activité agricole - Evolution du cheptel et consommation d'engrais.

6.2.1.- Cheptel.

Sur l'ensemble des départements du Nord et du Pas-de-Calais il apparaît une diminution de l'effectif bovin qui est, de toutes les catégories animales, un des plus gros consommateurs d'eau et un grand producteur de déchets organiques. Une diminution du nombre des chevaux, ânes, mulets et caprins est aussi à considérer, tandis que les autres catégories restent plus ou moins stables.

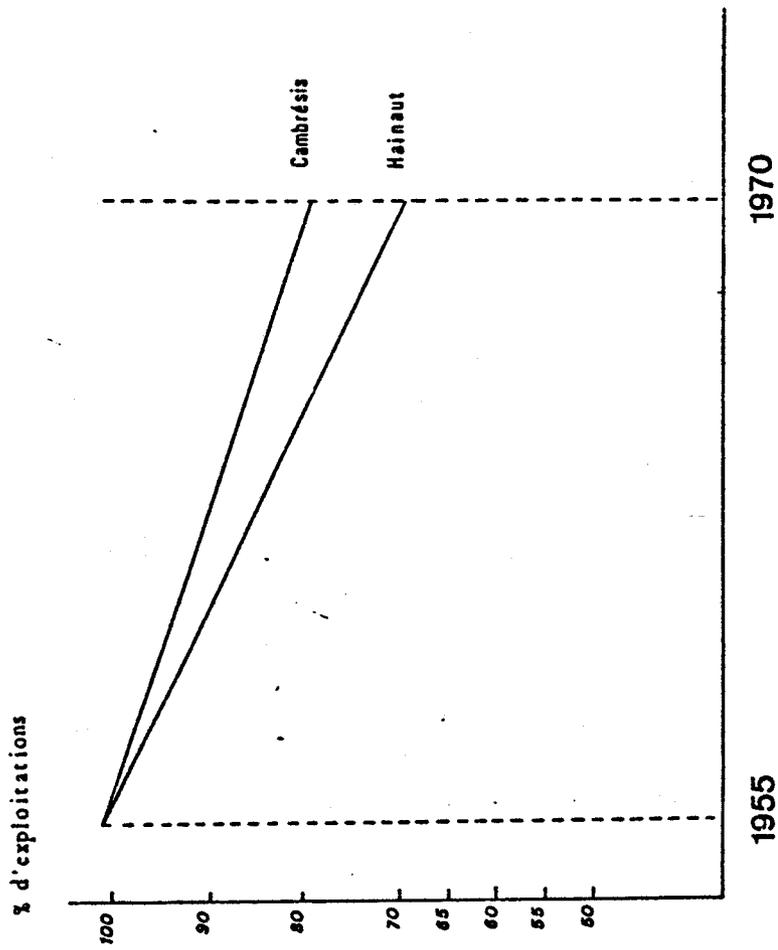


Fig. 6.1.- EVOLUTION DU NOMBRE TOTAL D'EXPLOITATIONS AGRICOLES (NON COMPRIS LES EXPLOITATIONS SANS TERRE)



Connaissant les chiffres de l'effectif du cheptel pour les régions agricoles du Cambrésis et de l'Artois, nous pouvons leur faire subir l'évolution constatée précédemment. Tous ces chiffres sont consignés dans les divers recensements généraux de l'agriculture du Nord et du Pas-de-Calais.

6.2.2.- Consommation d'engrais.

Les documents fournis par les D.D.A. de Lille et d'Arras nous ont permis de constater que, pour une superficie agricole utilisable quasiment constante, la consommation d'engrais après une chute importante en 1973 semble régularisée depuis l'année 1974 avec toutefois une évolution de 10% chaque année. On estime, d'après les chiffres obtenus et l'évolution constatée, que la consommation d'engrais sera de 300 000 tonnes en 1980 dans le Nord et de 350 000 tonnes dans le Pas-de-Calais.

D'autre part, les coopératives agricoles CAFNOR et ESSOR nous ont permis de dresser les tableaux 6.1, 6.2 indiquant les quantités d'engrais utilisés pour les principaux types de cultures. Des communications orales nous ont indiqué que, après une utilisation anarchique des fertilisants de 1962 à 1971, la consommation semblait se régulariser avec toutefois une augmentation continue.

L'accroissement des quantités d'engrais artificiels se manifeste dans la nappe par des teneurs en nitrates déjà proches de la norme admissible (44 mg/l). Une étude faite par le laboratoire de Géologie Dynamique de l'Université Pierre et Marie Curie de Paris, dans la Brie et la Beauce, a montré que ces teneurs risquaient de s'aggraver davantage si les agriculteurs continuaient d'utiliser des engrais en automne où le sol est nu, plus il laisse percoler l'azote non consommé et donc plus il faut lui fournir de fertilisants pour qu'il soit rentable. L'appauvrissement du sol en matières organiques accélère ce processus.

6.3.- Activité industrielle.

Les données utilisées dans ce chapitre sont toutes relatives au Cambrésis et au Valenciennois. L'Artois n'a pas été étudié en détail étant donné la faible industrialisation de cette région qui ne présente que de rares entreprises d'importance visible. L'avenir de cette zone ne correspond qu'à une intensification de l'agriculture.

6.3.1.- Démographie, économie et politique industrielle régionale.

Du point de vue de la population active sur le lieu de travail des années 1962 à 1975, il apparaît que le secteur primaire subit une diminution du nombre de ses emplois de près de 30%.

D'autre part, dans l'arrondissement de Cambrai, l'industrie traditionnelle est représentée par l'industrie textile qui constitue encore plus de 35% des emplois industriels. Le tableau n° 6.3 permet de suivre l'évolution des diverses branches industrielles les plus importantes en Cambrésis. Nous constatons que l'emploi industriel régresse alors que la croissance du tertiaire assure le maintien global du niveau.

6.3.2.- Développement futur.

Nous envisagerons successivement les facteurs favorables et défavorables du développement industriel dans le Cambrésis.

A) Facteurs favorables.

-
- . réalisation de l'autoroute A 26,
- . mise au grand gabarit du canal de l'Escaut.

B) Facteurs défavorables.

-
- . difficultés de l'industrie textile (90% de la production est destinée à l'exportation - Problèmes de mode),
- . crise actuelle et disparition de la sidérurgie et des ses sous-traitants.

Enfin, au vu des divers articles de presse, nous proposons le scénario économique suivant :

- . disparition à court terme de la sidérurgie et des industries de transformation,
- . réapparition de l'équilibre emploi-population vers 1985 grâce à une implantation d'usines propres (usines de montage, etc....).

6.4.- Estimations des besoins en eau.

Les tableaux n° 6.4, 6.5 indiquent les besoins respectifs des diverses industries et des diverses catégories d'utilisateurs.

Ces chiffres permettent de visualiser les besoins en eau pour une région donnée et servent de base pour une étude quantitative. Des précautions sont malgré tout à prendre pour appliquer en particulier l'évolution dessinée dans le tableau n°65 à une région agricole telle que le Cambrésis et l'Artois.

	N	P	K
Orge	60	100	100
Blé hiver	70	100	100
Blé printemps	100	100	100
Betteraves	180	180	300

Tableau 6.1 : Consommation d'engrais dans le Cambrésis- Chiffres ESSOR
(unités en Kg/ha).

	N	P	K
Betteraves	150	120	220
Pommes de terre	150	120	300
Blés	100	100	100
Maïs	150	200	100
Pâtures	30-150	140	70

Tableau 6.2 : Consommation d'engrais dans le Cambrésis - Chiffres
CAFNORD (unités en Kg/ha).



	1962	1968	1975
Toutes industries	100	100	100
Première transformation des métaux - Industries mécaniques et électriques	11,8	11,6	13,8
Textiles et annexes	43,5	43,1	37,1
Habillement	9,1	10,1	11,7
Bâtiment et T.P.	15,7	16,6	15,2
Autres	19,9	18,7	22,2

Tableau 6.3: Structures industrielles en Cambrésis (en pourcentages).



INDUSTRIES	M3 D'EAU
- Acier (par tonne)	6 à 300
- Aluminium (par tonne)	1 300
- Papier (par tonne)	80 à 1 000
- Sucre de betterave (par m3 de betteraves)	
. préparation à sec	0
. préparation hydraulique	10
. raffinage	6
- Brasserie (par m3 de bière)	25
- Electricité (par megawatt/heure)	3 à 400
- Lavage de laine (par m3)	
. par solvant chimique	0
. par eau et détersif	8 à 15

Tableau 6.4: Besoins en eau respectifs des principales industries du Nord (chiffres CERES, 1974).

	1955	1970	2050
Population (en millions)	45	49	60
Eau potable	44	81	125
Eau industrielle en circulation	240	470	1200
Eau industrielle consommée	150	285	600
Consommation agricole	232	295(1)	670
Eau fluviale	30	30	33
Consommation totale	456	690	1428

Tableau 6.5: Demande d'eau en France (recirculation d'eau domestique et agricole exclue) en m3 par personne et par an (d'après F. VAN DER LEEDEN (1978)).

(1) dont consommation humaine et besoins domestiques : 21.9 m3/habitant/an.

CONCLUSIONS GENERALES

Après avoir réalisé cette étude, il nous est apparu deux considérations principales. D'une part, l'étendue de la région à étudier, ainsi que certaines absences de données, ne nous ont pas permis d'avancer des résultats complets et de confirmer certaines hypothèses. Nous noterons d'autre part, la multiplicité des phénomènes rencontrés qu'il s'agisse de l'acquisition du chimisme de l'eau ou des caractéristiques hydrauliques de la nappe de la craie.

En effet, dès l'obtention des données géologiques et hydrogéologiques, on peut distinguer plusieurs zones où ces phénomènes sont identiques. C'est ainsi qu'il faut différencier la région Ouest du Cambrésis où l'importance du recouvrement tertiaire (en particulier l'argile de Clary) favorise le ruissellement de surface au détriment de l'infiltration et entraîne le développement et le resserrement du réseau hydrographique du reste de la zone d'étude où la craie séno-turonienne affleure largement seulement recouverte dans les vallées par les limons quaternaires.

Il convient d'autre part, de distinguer les régions de plateaux proches de la ligne de partage des eaux, où les caractéristiques sont faibles, des régions situées plus au Nord : vallées de la Scarpe, de la Sensée, de l'Escaut où les faibles variations piézométriques indiquent un coefficient d'emmagasinement convenable et donc l'assurance de débits de pompage importants.

A ces différents éléments, il est important d'ajouter l'analyse de la carte de l'épaisseur de la craie mouillée. Ainsi, on notera les faibles valeurs de la carte de l'épaisseur de craie mouillée et les épaisseurs importantes (50 m.) relevées au Sud de Douai et dans la partie Ouest de l'Artois (30 m.). Les caractéristiques hydrauliques issues de pompages d'essais confirment l'importance de l'implantation des différents captages, ceux situés dans les vallées offrent des débits très importants, souvent supérieurs à 100 m³/h.

Les diverses méthodes d'analyse employées nous conduisent à une meilleure définition des processus d'alimentation des systèmes et permet d'aboutir à l'obtention d'un modèle plus proche de la réalité. Les résultats du programme MMØ1 offrent ainsi la possibilité de connaître le meilleur parti à tirer de la nappe. Les ressources exploitables existantes dans la région définie par les bassins de la Selle, de l'Ecaillon et de la Rhonelle correspondent aux débits d'étiage de ces cours d'eau tels qu'ils ont été définis et calculés.

On constatera qu'il existe une relation directe entre la superficie des bassins étudiés et l'écoulement total des rivières, ce qui permet l'implantation plus aisée des futurs captages en vue des besoins, relation confirmée par l'égalité des valeurs de débit total moyen interannuel de l'écoulement souterrain, compris entre 7,8 et 6,1 l/s.Km².

Après l'examen des diverses données hydrogéologiques relatives à l'Artois et au Cambrésis, a pu être établi un modèle de gestion des ressources en eaux souterraines. La diversité de comportement de la nappe de la craie dans le secteur étudié a amené à réviser certains paramètres introduits, ainsi les valeurs de transmissivité calculées généralement sur d'anciens captages où les pertes de charges sont importantes ont dû être optimisés de façon importante.

Le calage du modèle utilisé sur l'ensemble du bassin du Haut-Escaut a montré l'importance des entrées et des sorties constituées par les échanges réalisés entre la nappe et le réseau hydrographique par rapport aux prélèvements effectués et à la recharge par précipitation.

Après le calage du modèle, on peut s'apercevoir de la faible influence d'une augmentation très notable des débits sur la piézométrie en raison de l'énorme possibilité de ressources de la nappe de la craie. Cependant, en l'absence de recharge (précipitations, etc....), les puits étudiés ne permettent plus de satisfaire aux besoins actuels et futurs du fait de leur mauvaise implantation. Il est donc nécessaire de modifier de façon impérative les conditions de prélèvements par la création de nouveaux captages situés dans des vallées ou des vallons secs où les ressources exploitables s'avèrent très importantes.

L'analyse du mécanisme de la pollution des eaux souterraines en zone rurale apparaît très complexe et permet difficilement de trancher sur l'origine précise des modes de pollutions.

Cependant les méthodes d'analyse utilisées tant chimiques qu'isotopiques amènent certaines conclusions.

La superposition des anomalies de teneurs importantes en nitrates et en sulfates montre une origine organique (activité humaine, élevage de bovins et de porcins) de la pollution azotée, celle-ci se situant essentiellement au niveau des communes importantes où le réseau d'assainissement est insuffisant. Ailleurs, les teneurs rencontrées sont le fait de l'utilisation d'engrais azotés artificiels.

L'analyse de l'évolution chimique de l'eau de la nappe de la craie indique une augmentation lente mais régulière des teneurs en nitrates avec un accroissement spectaculaire en 1979 et 1980 consécutif à l'emploi intensif des engrais entre 1960 et 1970. Des eaux non tritiées présentent en effet d'importantes teneurs en nitrates, supérieures à 40 mg/l, ce qui suggère que l'infiltration verticale est parfois le seul phénomène qui entre en compte. Par ailleurs, un écoulement latéral important et rapide jumelé à une bonne transmissivité prévaut. Ces différents résultats complétés par l'analyse des teneurs en azote 15 et en soufre 34 confirme le fait que les sites présentant de fortes teneurs en nitrates sont atteints par une pollution organique liée à l'activité humaine, les deux traçages effectués à Doignies et Avesnes-le-Sec nous ont permis de confirmer ce point.

Dans le cadre de la restructuration des ressources en eaux souterraines, nous avons utilisé un modèle de simulation des fluctuations de la concentration en éléments chimiques. Les différentes cartes chimiques obtenues permettent d'apprécier la vitesse de propagation d'un polluant quelconque et de déterminer les zones vulnérables. On remarquera une nette augmentation des concentrations (de 25 mg/l à 80 mg/l en 20 ans, dans certains cas) sur l'ensemble de la région modélisée, cet accroissement se situant entre 1 et 3 mg/l par an.

On pourra retenir au terme de ce travail que l'Artois et le Cambrésis offrent à l'heure actuelle d'importantes ressources en eaux souterraines, celles-ci étant toutefois mal exploitées. Les diverses études hydrogéologiques et l'application de modèles mathématiques de simulation ont démontré les grandes capacités d'exploitation de la nappe pour des captages judicieusement implantés.

[Du point de vue de la qualité chimique des eaux souterraines, le bilan est par contre moins optimiste. Si certains secteurs s'avèrent en effet non pollués, l'ensemble est menacé à plus ou moins long terme. Il convient donc de concentrer les recherches futures vers l'acquisition du chimisme de l'eau à partir de substances chimiques connues (engrais, lisier, fumier.....) sur des zones où la connaissance des caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe sont suffisantes. Parallèlement, il s'avère nécessaire de surveiller de façon permanente l'évolution des teneurs en nitrates et sulfates et de régulariser les rejets d'eaux usées et les épandages d'engrais.]

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Note :

Les ouvrages précédés d'une croix ne sont pas cités dans le texte mais ont un rapport direct avec celui-ci.

1.- Géologie du Nord de la France. *Ann. Soc. Geol. du Nord*, tome 89, 1969 n° 1, p. 1 à 129.

2.- C.F.T. (M.), COPESEP, RAP et S.N.P.A., 1965. Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France.

3.- CAULIER P., 1974.- Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Thèse 3ème cycle, Univ. Sc. et Techn. de Lille.

ADRIANO D.C., PRATT P.F., SAMSON A. (1971).- Nitrate and saltin soils and ground waters from land disposal of dairy manure. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 35, n° 5, sept.-oct. 1971, p. 759-762.

ALBINET M., CHAMAYOU J., SAMSON A. (1974).- Qualité chimique de l'eau souterraine sous une exploitation agricole : constatation, évolution. Rapport B.R.G.M. 74 SGN 429 AME.

ARNOULT P. (1979).- Contribution à l'étude de la nappe de la craie en Artois. D.E.A. Univ. Sc. et Techn. de Lille.

BALLIF J.L., DUTIL P. (1978).- Décalage chronologique entre le début de la remontée de la nappe de la craie et la reprise du drainage des sols en Champagne. *Coll. de Rouen sur l'hydro. du bassin de Paris*, tome 1, p. 37.

- BERNARD D. (1979).- Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Thèse de 3ème cycle de l'Univ. Sc. et Techn. de Lille.
- BESBES M., de MARSILY G. (1977).- Modélisation des écoulements souterrains dans le bassin de la Haute-Lys. LHM/RD/77/48.
- + 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 de Doctorat d'Etat de l'Univ. de Paris VI.
- CAOUS J.Y., COMON D., MERCIER E. (1978).- Etat actuel des ressources et des prélèvements dans la nappe libre de la craie en Picardie. *Coll. Rég. de Rouen*.
- CASTANY G. (1967).- Traité pratique des eaux souterraines, 2ème édition. DUNOD, Paris, 661 p.
- CASTANY G. (1968).- Prospection et exploitation des eaux souterraines. DUNOD, Paris, 717 p.
- CAULIER P. (1976).- Réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines dans les départements du Nord et du Pas-de-Calais. Interprétation des données recueillies en 1975 et de 1971 à 1975. Rapport B.R.G.M. 76 SGN 468 NPA.
- DELPORTE B. (1979).- Traitement de l'information hydrogéologique, socio-économique et économique. Application au bassin de la Sambre (Nord de la France), Thèse de 3ème cycle de l'Univ. Sc. et Techn. de Lille.
- + DOLLE L. (1923).- Etude sur les eaux souterraines de la région de Cambrai. Minist. Agric. Eau et Gen. Rur., Etudes sur les eaux souterraines du département du Nord. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Univ. Sc. et Techn. de Lille.

- DOWNING R.A., SMITH D.B., WARREN S.C. (1978).- Seasonal variations of tritium and other constituents in groundwater in the chalk near Brighton, England. *J.I.W.E.S.*, 1978, 32, n° 2.
- DUERMAEL G., MORFAUX P. (1978).- Infiltration en aquifère crayeux, mouvements d'eau dans la zone non saturée et leur incidence sur l'évapotranspiration et l'alimentation de la nappe. *Coll. de Rouen sur l'hydro. du bassin de Paris*, tome 1, p. 235.
- FLACK J.E., HOWE C.W. (1974).- Salinity in water resources. *Proceedings of the 15th annual western Resources Conference*, July 1973, Univ. of Colorado, p. 40.
- FONTES J.C. (1976).- Isotages du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Univ. de Paris VI, 208 p.
- FOSTER S.S. (1975).- The chalk groundwater tritium anomaly. A possible explanation. *Jour. of Hydro.*, n° 25, p. 159.
- FRIED J.J. (1975).- Groundwater pollution. Theory, methodology, modeling and practical rules. *Elsevier scientific publishing company*. Amsterdam, 330 p.
- KONIKOV L.F., BREDEHOEFT J.O. (1973).- Simulation of hydrologie and chemical quality variations in an irrigated stream-aquifer system. *A preliminary rapport, Colorado Resources Circular n° 17*, Colorado Water Conservation Board, 1973.
- LEDOUX E., de MARSILY G. (1976).- Transport de masse et d'énergie en milieu poreux. *LHM/RD/76/16*. Fontainebleau.
- LETOLLE R., MARIOTTI A. (1977).- Application de l'étude isotopique de l'azote en hydrologie et hydrogéologie. Analyse des résultats obtenus sur un exemple précis : le bassin de Mélarchez (Seine et Marne). *Journ. Hydrol.*

- MANIA J. (1973).- Etude de l'évolution saisonnière du chimisme et de la pollution des eaux souterraines. Rapport B.R.G.M. 73 SGN 321 NPA
- MANIA J. (1978).- Gestion des systèmes aquifères. Application au Nord de la France. *Soc. Géol. du Nord*, Mémoires tome XV, 228 p.
- MARCE A. (1978).- Contribution des méthodes isotopiques à l'étude des modalités d'alimentation et de renouvellement des réserves de quelques nappes souterraines du Maroc. *I.A.E.A. Vienne SM 228/25*.
- MERO F. (1978).- The MMØ8 hychometeorological simulation system basic concepts and operators guide. *Rapport of Water Quality Management Unit. Israel*, 18 p.
- MOLINARI J. (1976).- Perspectives offertes par l'utilisation rationnelle des traceurs naturels et artificiels en hydrologie barstique. Commentaires de nombreux exemples récents de multitraçages. *2ème Coll. d'Hydro. en pays calcaire*. Université de Franche-Comté, Besançon.
- REMY J.C. (1977).- Contribution de la fertilisation à la pollution des nappes par les nitrates. Etude de la migration d'un nitrate marqué à l'azote 15. *Protect. des eaux souter. capt. pour l'alim. humaine. Colloque National*, Orléans.
- RICOUR J. (1974).- Exploitation des données recueillies en 73/74 dans le cadre du réseau de surveillance chimique des nappes dans les départements du Nord et du Pas-de-Calais. Rapport B.R.G.M. 74 SGN 393 NPA.
- RIGHTMIRE C.T., PEARSON F.J., BACK W. (1974).- Distribution of sulfur isotopes of sulfates in groundwater from the principal artesian aquifer of Florida and the Edwards aquifer of Texas U.S.A., *I.A.E.A. Vienne, SM 182/39*.
- SAUTY J.P. (1977).- Analyse de la courbe de restitution d'une injection instantanée de traceur dans une nappe en écoulement uniforme. *Coll. Nation. organisé par la S.G.N./B.R.G.M., Thème 2*.

SMITH D.B., RICHARD H.J. (1974).- Les techniques à base de tritium naturel. *Bull. du B.R.G.M.*, III, 2.

+ SOLTNER D. (1979).- Les bases de la production végétale. 8ème édition 1979, *Collection Sciences et Techniques Agricoles*, tome 1.

TONNERRE, TESSON (1970).- Description du réseau hydrographique du bassin de l'Escaut français et inventaire des points de mesures hydrogéologiques. Agence de Bassin Artois-Picardie. RF 172.

TRESCOTT P.C., PINDER G.F., LARSON S.P. (1976).- Finite difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments. *Technics of Water Resources Investigations of the United States of Geological Survey*.

Annexes

Annexe I

COMMUNES	DESIGNATION	PROFONDEUR (m) (période d'été)	PROFONDEUR (m) (hautes eaux)	COTE ABSOLUE (période d'été) (m)	COTE ABSOLUE (hautes eaux) (m)
Escaudoevres	Forage Siden	29,23	29,46	20,27	20,04
Beauvois	Forage Siden	30,28	35,30	69,72	64,70
Avesnes-les-Aubert	Château d'eau communal	28,30	28,50	46,70	46,50
Solesmes	Château d'eau communal	13,00	12,80	73,50	73,70
Villers-Outreau					
Elincourt	Château d'eau communal	26,20	29,20	101,80	98,80
Saint-Benin	Château d'eau communal	33,00	22,80	99,00	108,80
Le Cateau	Puits de l'usine des Bas-Carats	12,60	8,60	107,40	111,40
Saint-Souplet	Château d'eau communal	52,30		90,70	
Fontay	Château d'eau communal	9,50		89,50	
Noyelles-sur- Escaut	Château d'eau communal	20,20	19,90	49,80	50,10
Fontaine-Notre- Dame	Forage Siden	5,00	4,69	47,00	47,31
Rumilly-en-Cambré- sis	Château d'eau communal	45,70	45,00	53,50	54,30
Rue-des-Vignes	Puits de M. Durieux		27,60		57,40
Awoingt	Château d'eau communal		49,20		45,80
Niergnies	Château d'eau communal		57,80		35,20
Marcoing	Puits de la Maison Forestière du Bois Couillet	32,53	32,55	57,47	57,45
Ribécourt-la-Tour	Fontaine communale	23,10	22,70	46,90	47,30
Fontaine-au-Pire	Château d'eau communal	46,70		77,90	
Banteux	Forage Siden	5,58	3,08		



Gouzeaucourt	Puits du P.N. 36 (route Honnecourt- Gouzeaucourt)		26,80		81,20
Lesdain	Château d'eau communal	23,20		66,80	
Epinay	Puits communal (route nationale)	36,60	35,70	35,40	36,30
Abancourt	Puits du champ	27,30	26,40	27,70	28,60
Sauchy-Lestrée	Château d'eau communal	30,20	29,60	41,80	42,40
Saint-Python	Forage Siden	32,83	33,96	61,67	60,54
Clary	Château d'eau communal	35,10	33,90	107,90	109,10
Rieux	Château d'eau communal	15,00		53,00	
Rieux	Fontaine communale	7,95	8,01	44,05	43,99
Saint-Aubert	Château d'eau communal	27,60	25,90	54,40	56,10
Iwvy	Forage Siden	3,15	2,78		
Maretz	Forage Siden	14,28	14,36	127,72	127,80
Pommereuil	Forage Siden	29,81	29,87		
Rejet de Beaulieu	Source)	2,56	1,63		
)				
Rejet de Beaulieu	Forage 1) Siden	4,12	1,58		
)				
Rejet de Beaulieu	Forage 2)	7,76	4,56		
Saint-Vaast	Forage Siden	22,90	22,75	65,10	65,25
Troisvilles	Forage Siden	23,50	24,20		
Viesly	Forage Siden	45,10	45,97	82,90	82,03
Bethencourt	Forage Siden	33,53	35,78	81,47	79,22
Montigny	Forage Siden	20,48	20,70		
Caullery	Château d'eau communal	47,60	49,30	98,40	96,70
Bevillers	Château d'eau communal	38,30	38,20	73,70	73,80



Boussières	Château d'eau communal	39,45		56,55	
Saint-Hilaire	Château d'eau communal	37,40	37,40	62,60	62,60
Quienvry	Château d'eau communal	37,60	37,80	71,40	71,20
Flesquières	Château d'eau communal	53,40	62,90	55,60	46,10
Flesquières	Puits de la rue d'Artois		42,60		60,40
Graincourt-les-Havrincourt	Château d'eau communal	35,90		46,10	
Havrincourt	Château d'eau communal	47,40	47,00	57,60	58,00
Trescault	Château d'eau communal	51,50		62,50	
Vaux-Andigny	Château d'eau communal	37,40		124,60	
Malincourt	Château d'eau communal	44,50		97,50	
Sancourt	Château d'eau communal	33,70		31,30	
Sailly-les-Cambresis	Château d'eau communal	29,10	28,50	46,90	47,50
Fressain	Château d'eau communal	46,90		30,10	
Le Quesnoy	Forage Siden des 4 Chemins	24,73	24,98	111,27	111,02
Ghissignies	Forage Siden	17,04	16,99	91,96	92,01
Neuville-en-Avesnois	Forage Siden à Vendegies-au-Bois	12,18	10,67	98,35	99,86
Englefontaine	Forage Siden de "la Fosse à Charbon"	25,33	23,39	114,67	116,61
Romerries	Forage Siden	18,02	18,72	84,98	84,28
Saulzoir	Forage Siden	32,63	32,47	42,3	42,53

815
LILLE

Vendegies-sur-Ecaillon	Forage Siden	25,53	25,82	51,47	51,18
Artres	Forage Siden	25,30	24,64	55,20	55,86
Curgies	Forage Siden "La Patte d'Oie"	19,72	11,67	77,28	79,33
Feuchy	Puits communal	35,80		49,20	
Fampoux	Puits communal	24,30	24,80	45,70	45,20
Arleux-en-Gohelle	Puits communal	33,48		23,52	
Gommecourt	Puits communal	40,60	40,08	109,40	109,92
Foncquevillers	Puits communal	27,00		128,00	
Achicourt	Puits communal	4,60		71,40	
Riencourt-les-Bapaume	Puits 1 de la C.G.E.	23,85	24,26	98,15	97,74
Beauvraains	Puits communal	25,90	26,90	66,10	65,10
Bailleul-Sire-Berthoult	Puits communal	28,10	28,10	42,90	42,90
Bourlon	Forage de la com- mune	54,25	51,42	42,75	45,58
Essarts-les-Bucquoy	Puits communal	43,02		111,00	
Maroeuil	Puits communal	29,90	30,90	58,10	57,10
Dainville	Puits communal	23,00	23,40	59,00	58,60
Neuville-Vitasse	Château d'eau communal	29,80	29,10	57,20	57,90
Mercatel	Château d'eau communal	23,10	22,40	61,90	62,60
Ficheux	Château d'eau communal	27,00	25,80	68,00	69,20
Moyenneville	Château d'eau communal	38,70	38,10	75,30	75,90
Courcelles	Château d'eau communal	39,40	39,10	82,60	82,90
Achiet-le-Grand	Château d'eau communal	37,10		80,90	



Boiry-Notre-Dame	Forage du camping de M. Catoun	42,00		44,00	
Hermies	Château d'eau communal	50,00		68,00	
Doignies	Château d'eau communal		27,60		71,40
Doignies	Puits de M. X. (Hameau de Louverval)		26,30		60,70
Vaulx-Vraucourt	Château d'eau communal	32,25	32,60	78,75	78,40
Hendecourt-les-Cagnicourt	Château d'eau communal	22,20	21,90	55,80	56,10
Monchy-le-Preux	Forage communal	45,10	43,60	52,90	54,40
Simencourt	Forage communal	23,80	22,90	78,20	79,10
Wanquetin	Château d'eau communal	33,70	33,00	79,30	80,00
Montenescourt	Forage intercommunal du Syndicat de la vallée du Gy	6,10	6,30	73,90	73,70
Avesnes-le-Comte	Forage communal	20,30	18,60	94,70	96,40
Gouy	Ancien puits communal	17,30	16,10	92,70	93,90
Bavincourt-l'Arbret	Château d'eau communal	52,40	34,50 ?	119,60	?
Bavincourt	Puits de l'Eglise	36,90	33,70	110,10	113,30
Barly-Fosseux	Forage communal	38,00	36,20	104,00	105,80
Sombrin	Puits de la Thérèse	26,00	23,80	124,00	126,20
Saulty	Château d'eau communal	39,10	32,30	115,90	122,70
Oppy	Puits communal	19,50	18,10	36,70	38,10
Berneville	Puits du Syndicat de Berneville-Warlus	46,08	46,53	67,12	66,67
Auberchicourt	Puits du P.N. 36	32,28	29,93	24,05	26,40
Guemappe	Puits de M. Hardelin	9,62	8,35	50,48	51,75



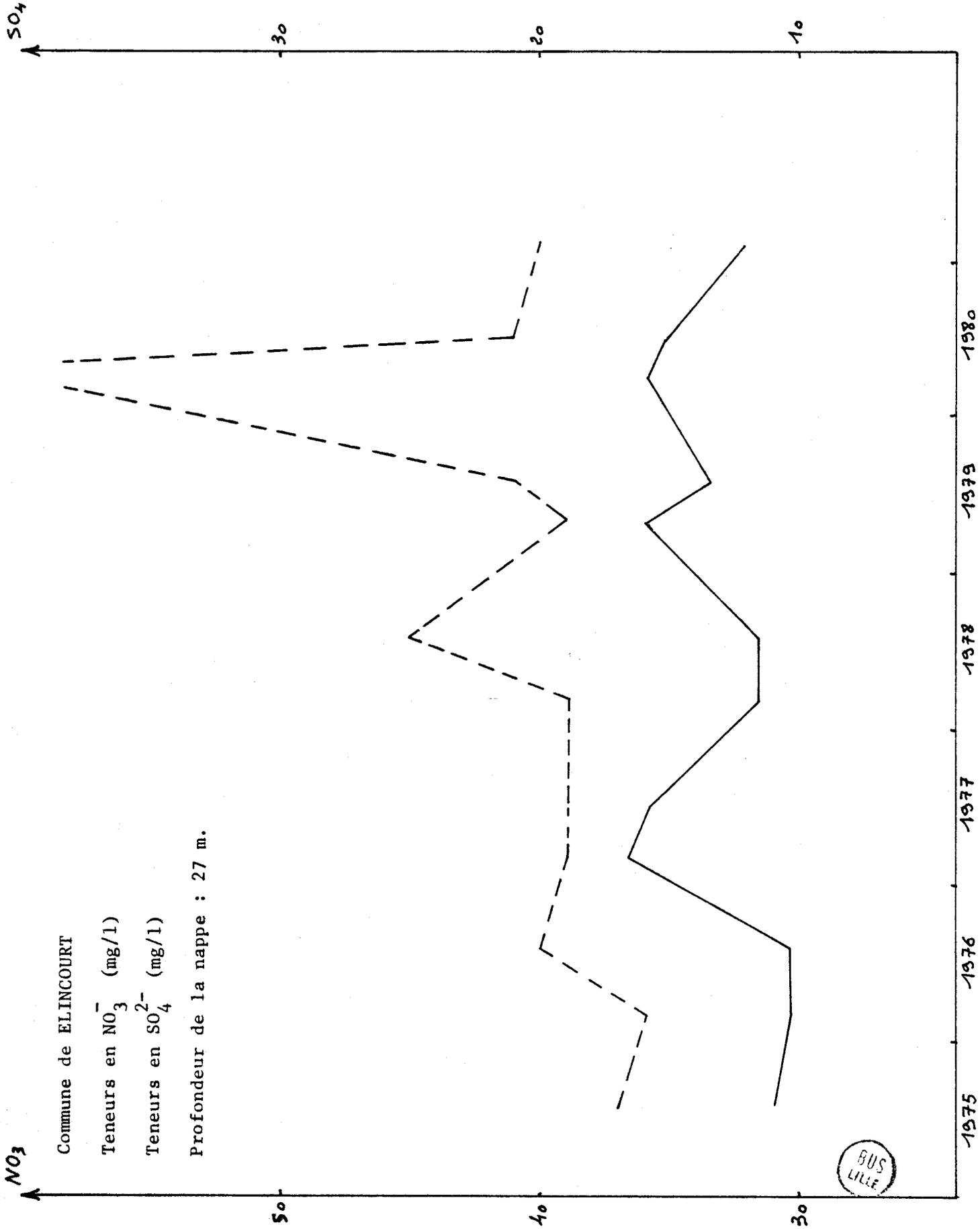
Bellonne	Forage B.R.G.M.	13,84	15,40	35,16	33,60
Iwvy	Puits de M. Dhaussy	6,32	5,83	36,18	36,67
Lieu-Saint-Amand	Puits de M. Robail	20,27	19,36	31,48	32,39
Villers-en-Cauchy	P.S.T.2.76	21,55	21,50	52,45	52,50
Bienvillers-au-Bois	Puits de M. Duvi- vier	33,46	33,32	122,54	122,68
Boisleux-au-Mont	Puits de l'usine élevatoire SNCF	10,27	10,72	71,73	71,08
Quéant	Puits communal	24,31	24,27	57,69	57,73
Proville	Forage 1 de la vil- le de Cambrai	8,40	8,32	46,60	46,68
Barastre	Puits du Syndicat intercommunal	27,16	26,85	93,84	94,15
Ytres	Puits de la Mino- terie	35,65	35,66	82,95	82,94
Metz-en-Couture	Puits communal	28,72	28,16	86,56	87,12
Havrincourt	Puits communal	46,45	46,40	62,50	62,55
Equancourt	Puits communal	39,90	39,83	80,67	80,74
Romeries	Puits de M. Del- fosse	19,71	19,70	90,21	90,22
Maretz	Puits de M. Barreux	9,11	9,80	118,89	118,22
Pommereuil	Piezo. Le Cat. 1 de l'ABAP	22,20	22,30	126,70	126,60
Honnecourt	Forage de M. Leroy	30,84	30,92	79,16	79,08
Etricourt- Manancourt	Puits de secours n° 1	13,96	13,86	79,54	79,64
Achicourt	Puits de la stab. de pompage SNCF	5,05	4,56	60,15	60,64
Dury		22,80	21,33		
Maroeuil		32,20	31,87		
Ytres	Puits communal	45,51	45,38	82,03	82,16
Wambaix	Château d'eau communal		39,90		



Cuvillers	Château d'eau communal	36,10
Beaumont-les-Cambrai	Forage du Syndicat Velu, Beaumont, Lebucquière	34,60
Fremicourt	Ancien puits communal	14,40



Annexe II



BUS
LILLE

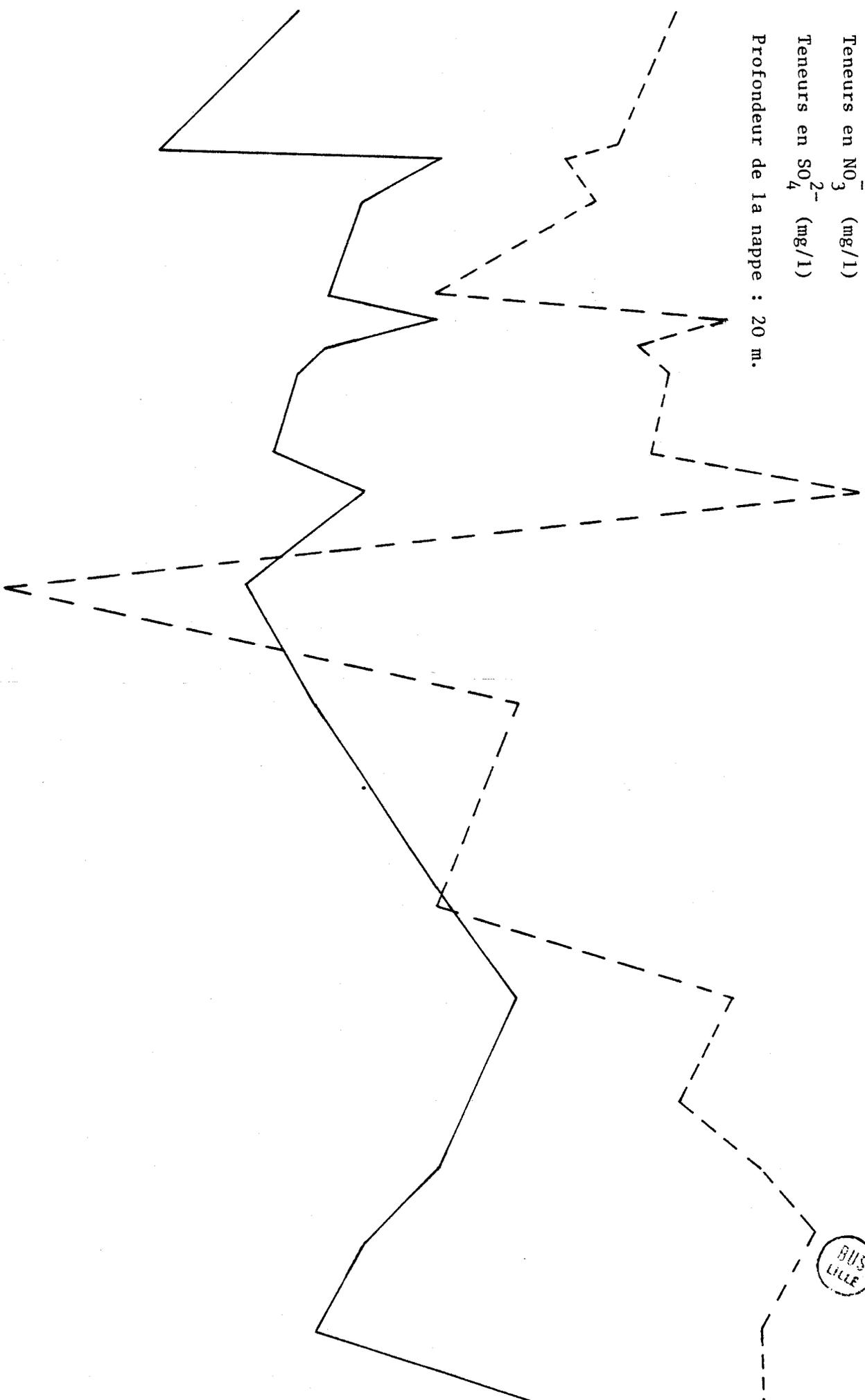
NO₃

Commune de ROMERIES

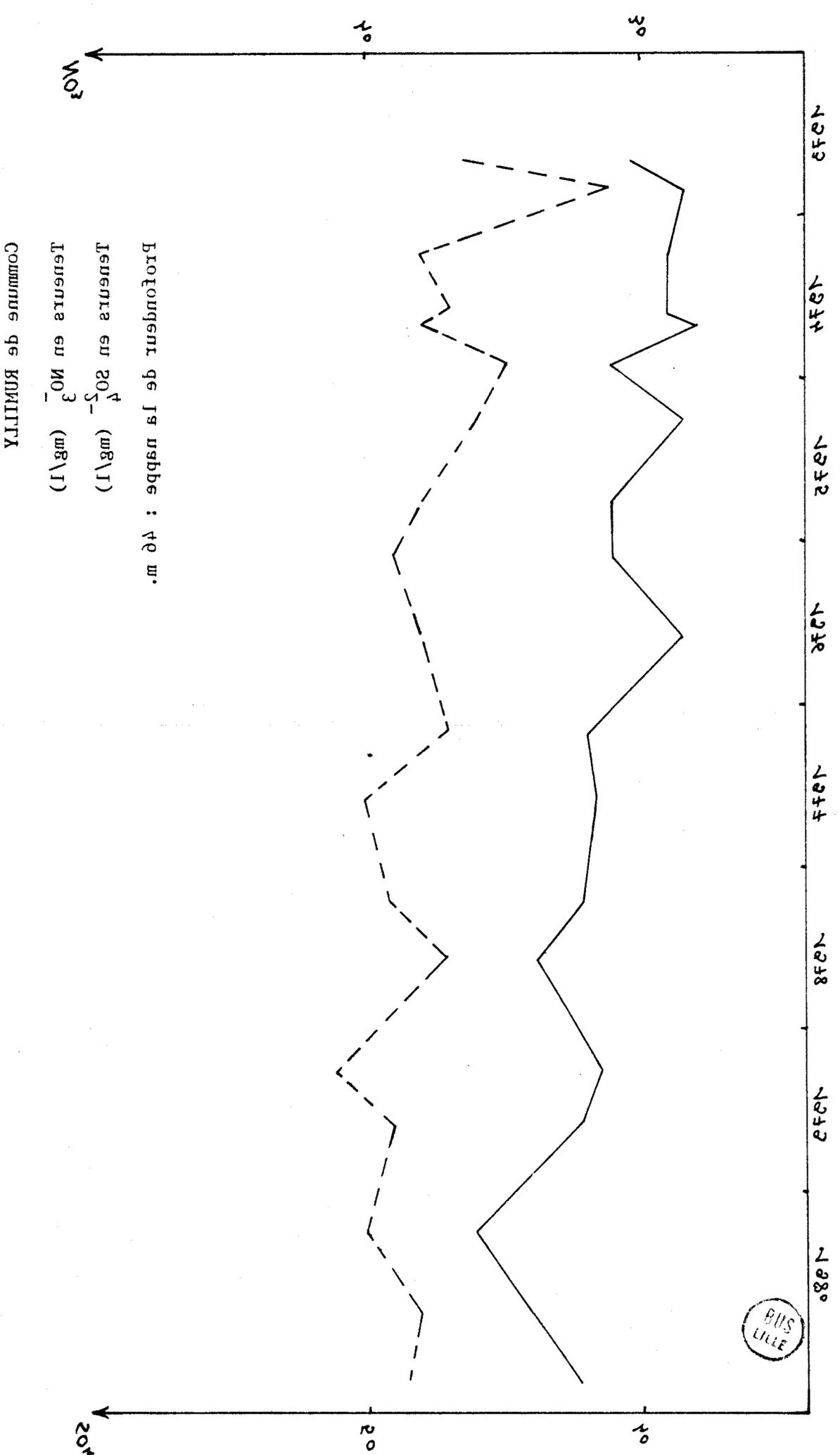
Teneurs en NO₃⁻ (mg/l)

Teneurs en SO₄²⁻ (mg/l)

Profondeur de la nappe : 20 m.



BUS
LILLE

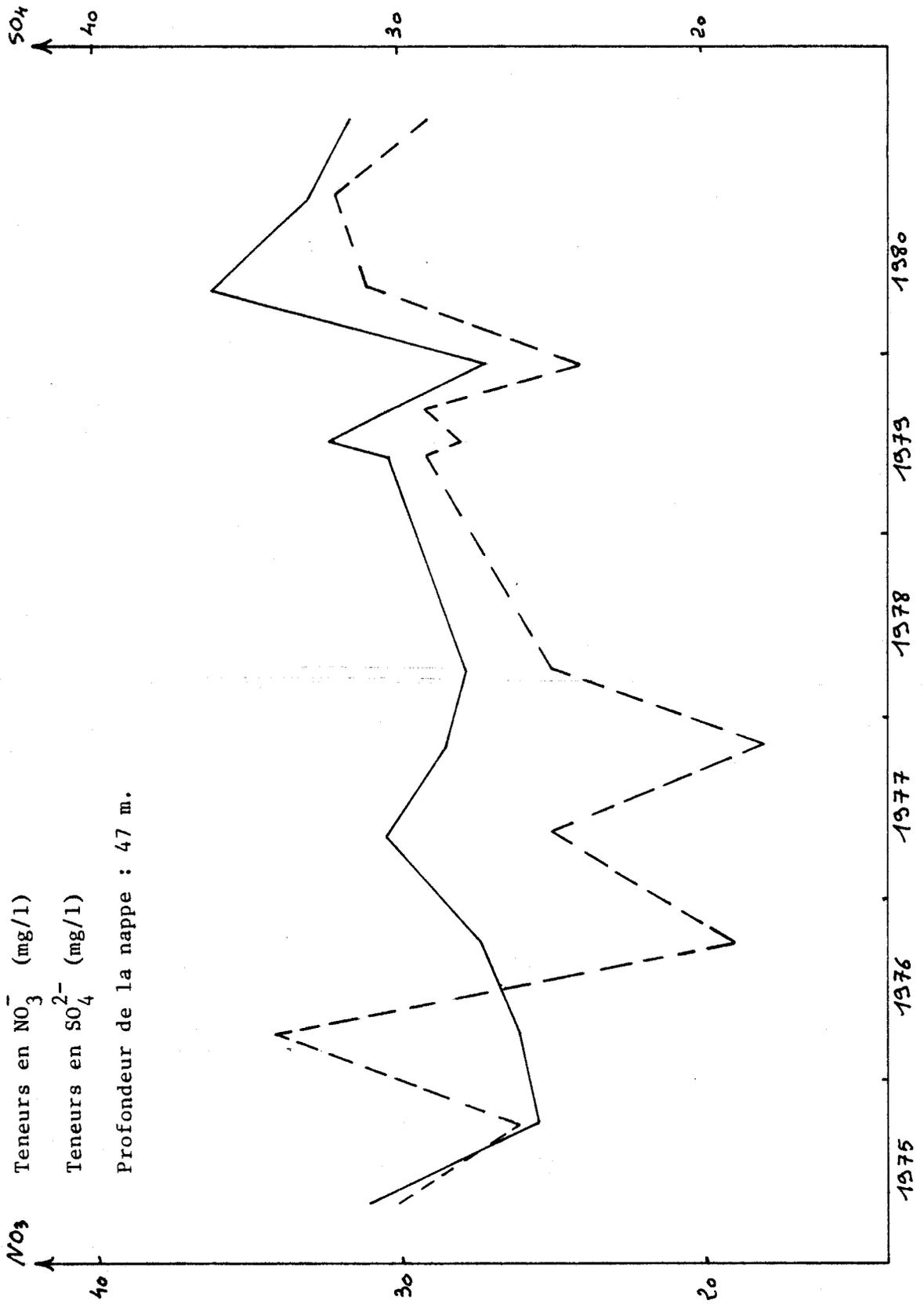


Commune de FONTAINE-AU-PIRE

Teneurs en NO_3^- (mg/l)

Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)

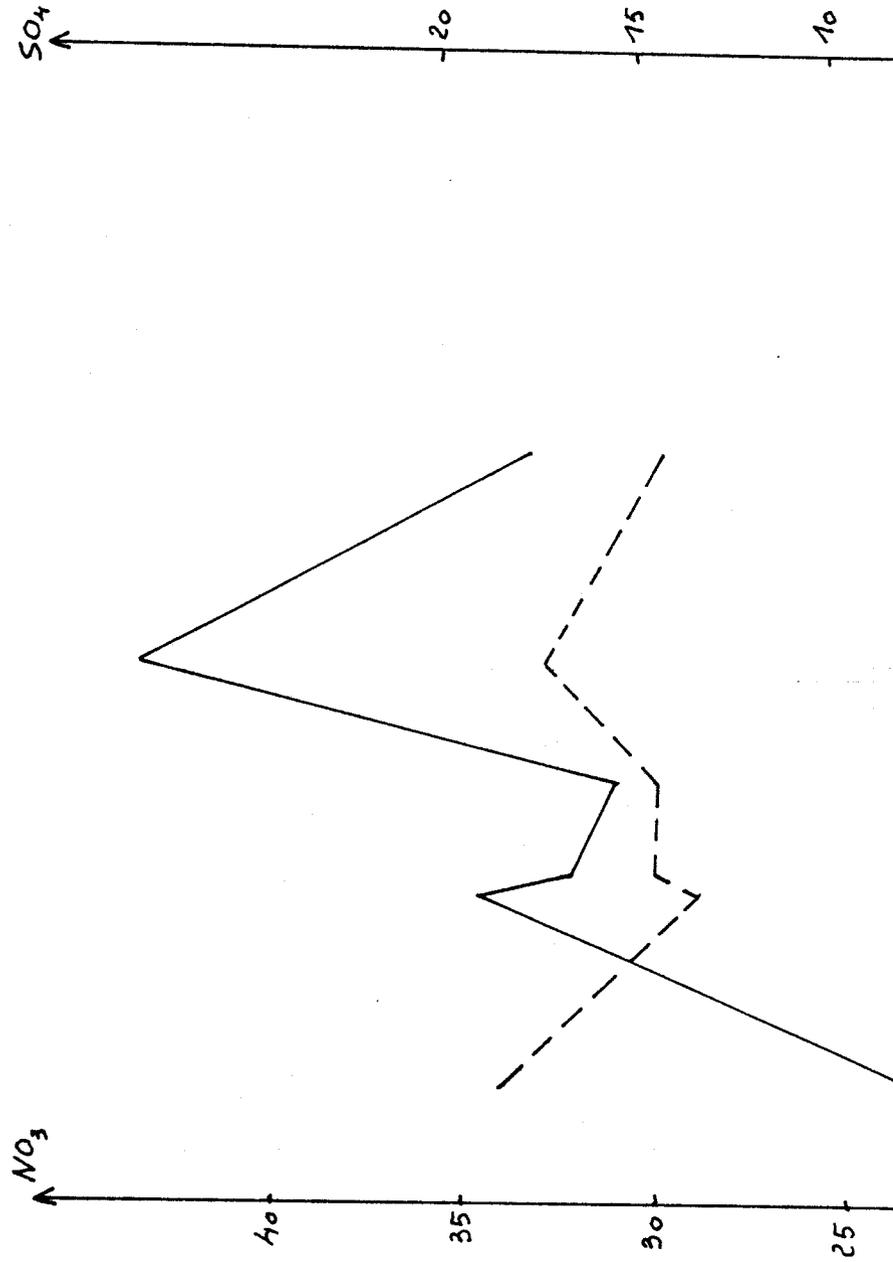
Profondeur de la nappe : 47 m.



Commune de BANTEUX

Teneurs en NO_3^- (mg/l)

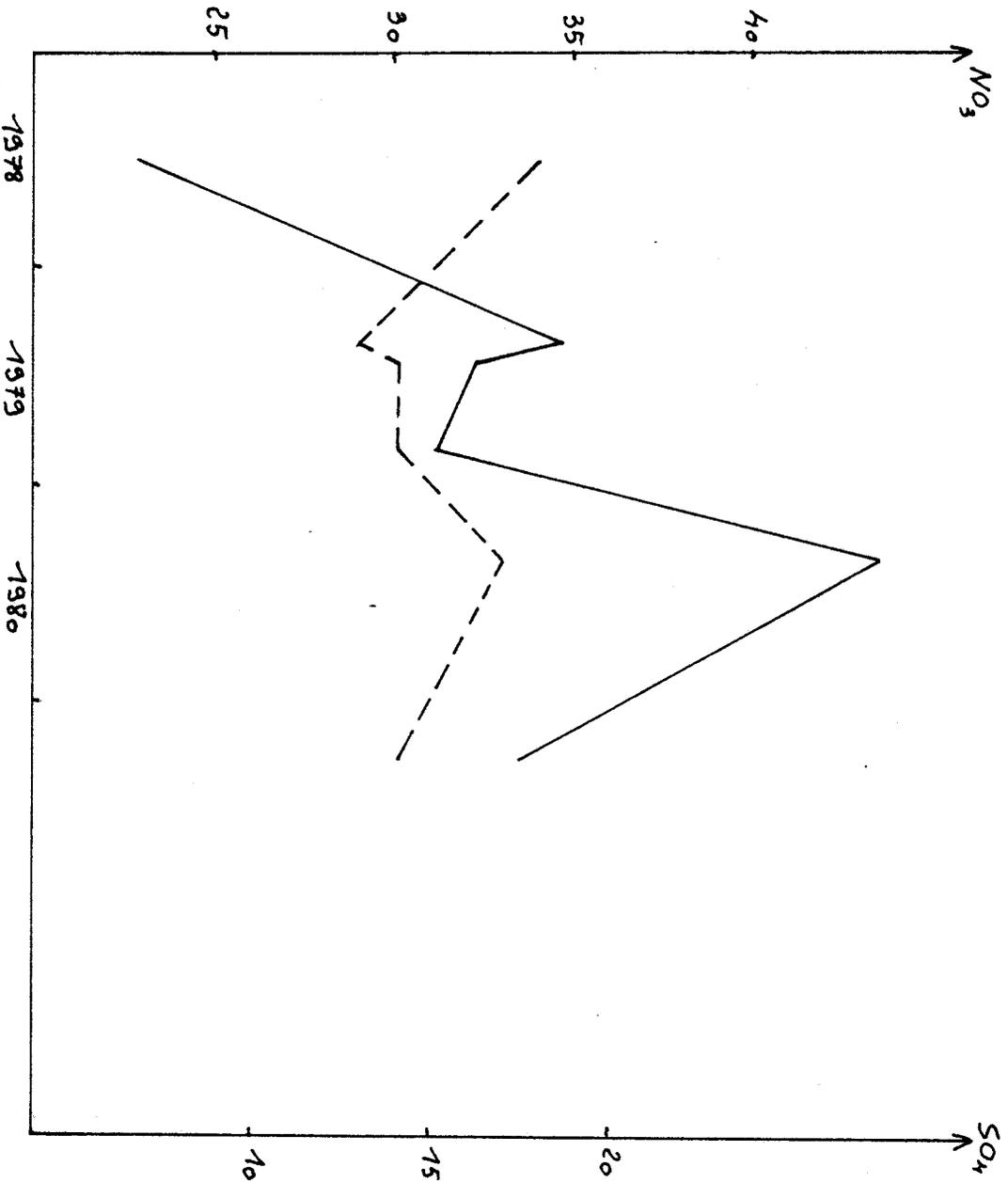
Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)



Commune de BANTEUX

Teneurs en NO_3^- (mg/l)

Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)

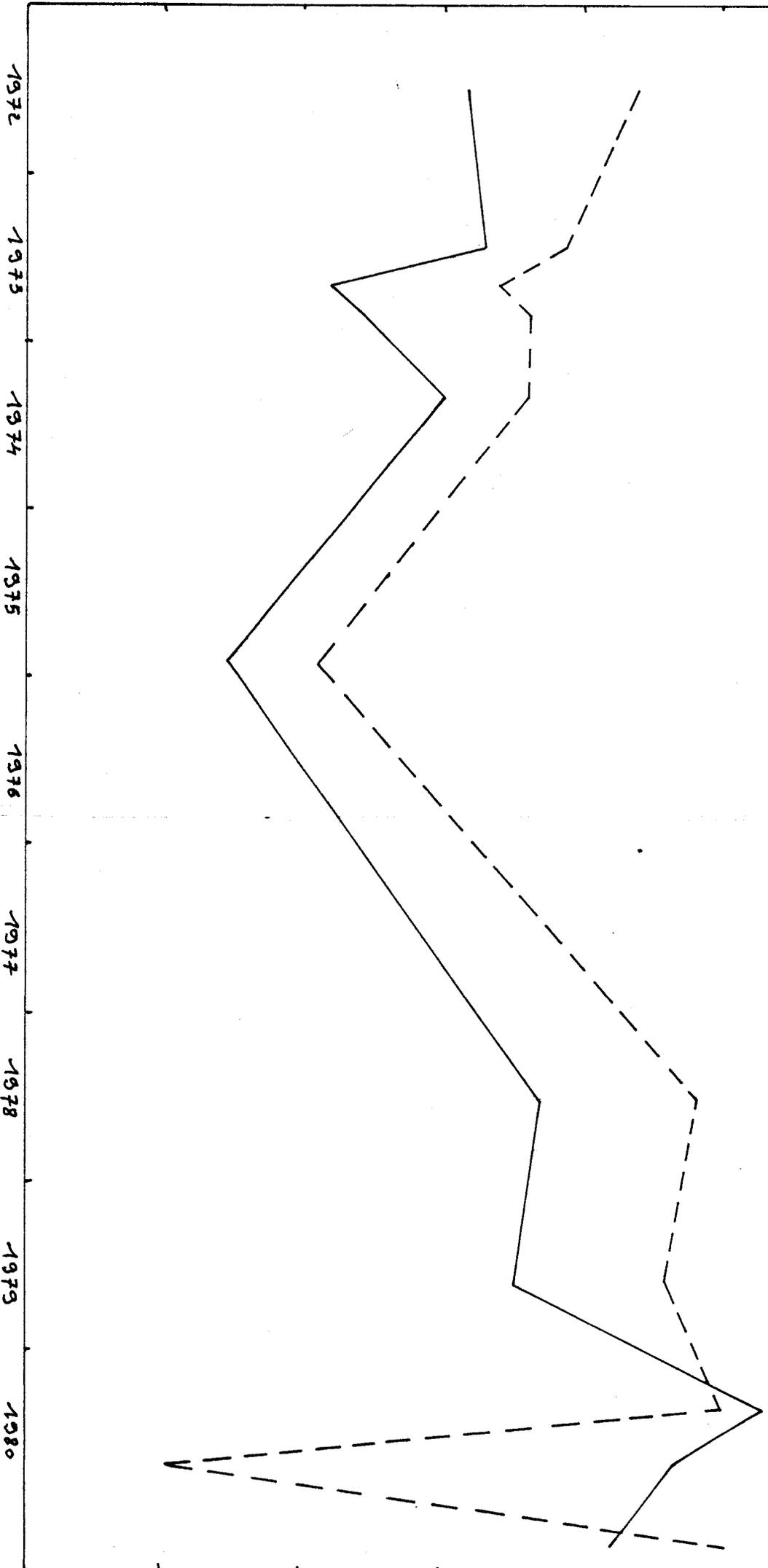


NO₃

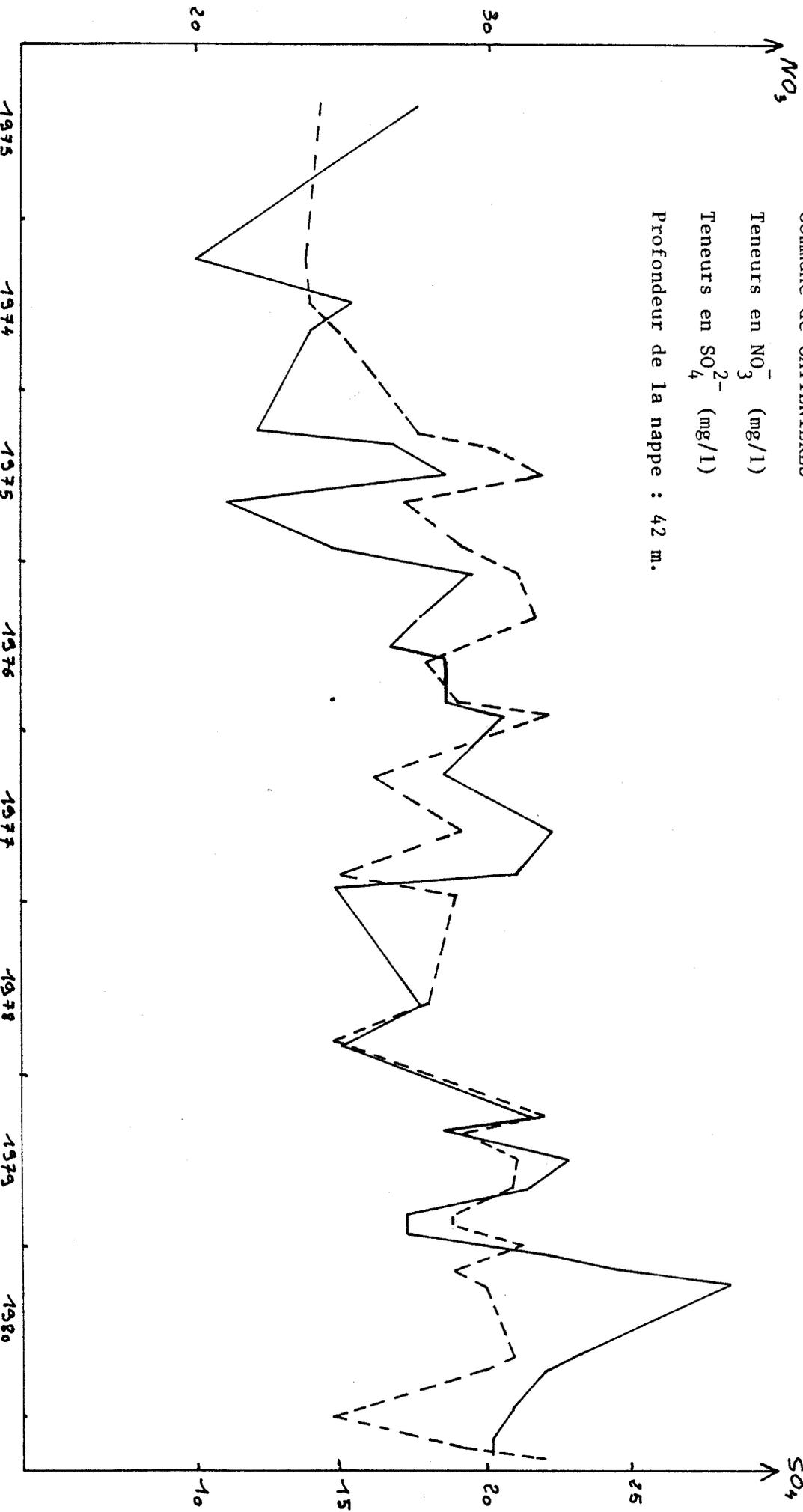
Commune d'AVESNES-LES-AUBERT

Teneurs en NO₃⁻ (mg/l)

Teneurs en SO₄²⁻ (mg/l)



50



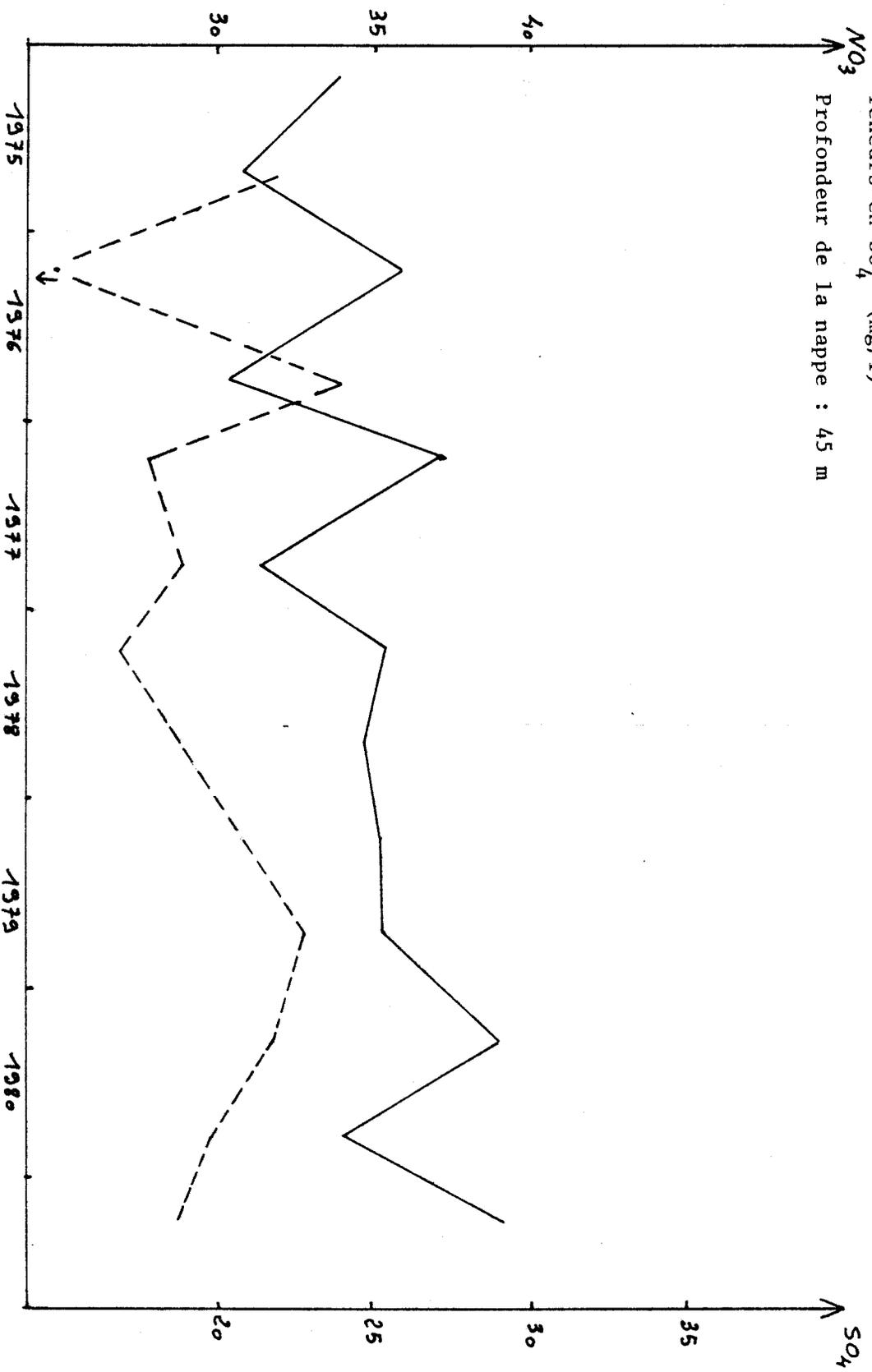


Commune de MALINCOURT

Teneurs en NO_3^- (mg/l)

Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)

Profondeur de la nappe : 45 m

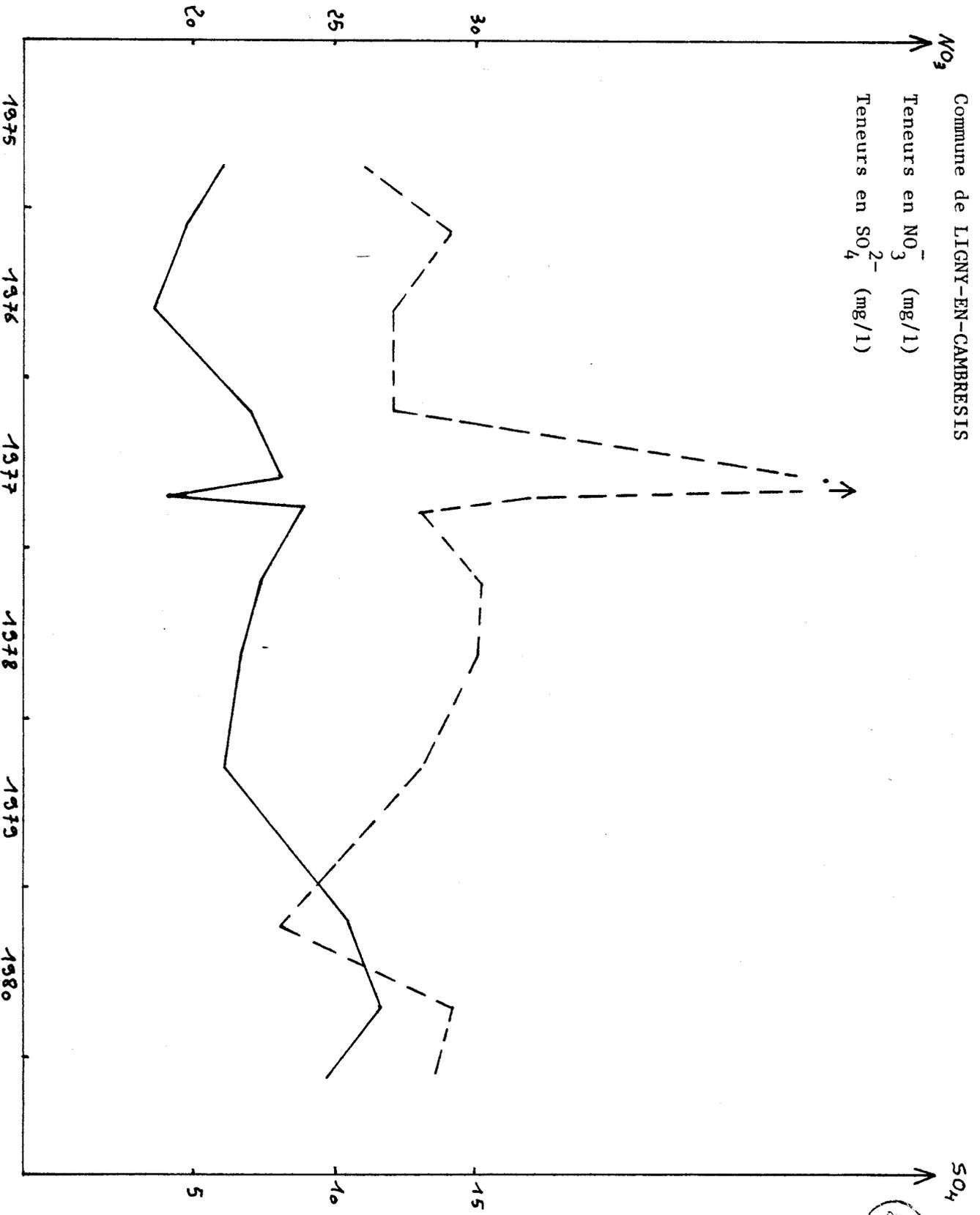


NO₃

Commune de LIGNY-EN-CAMBRESIS

Teneurs en NO₃⁻ (mg/l)

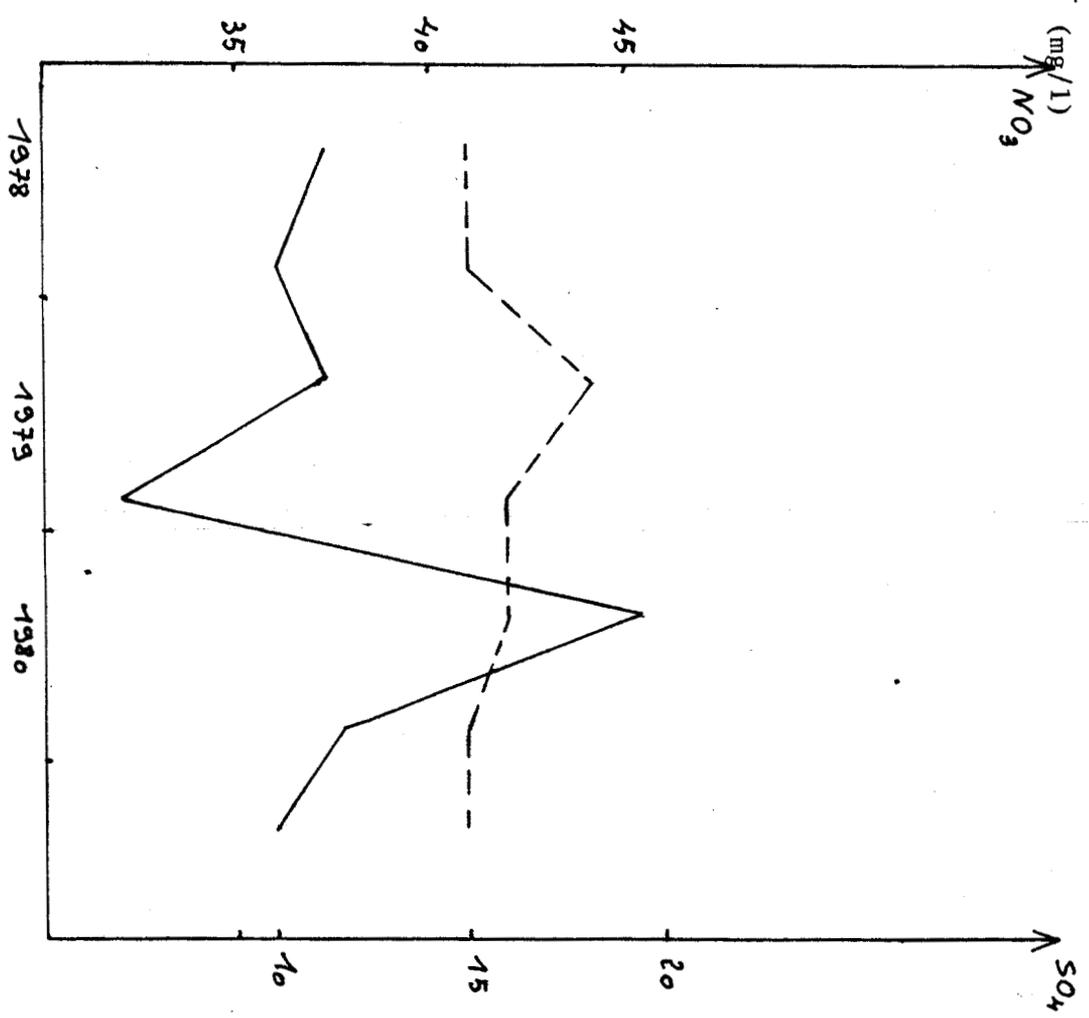
Teneurs en SO₄²⁻ (mg/l)



Commune de BOUSSIÈRES-EN-CAMBRESIS

Teneurs en NO_3^- (mg/l)

Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)



NO₃

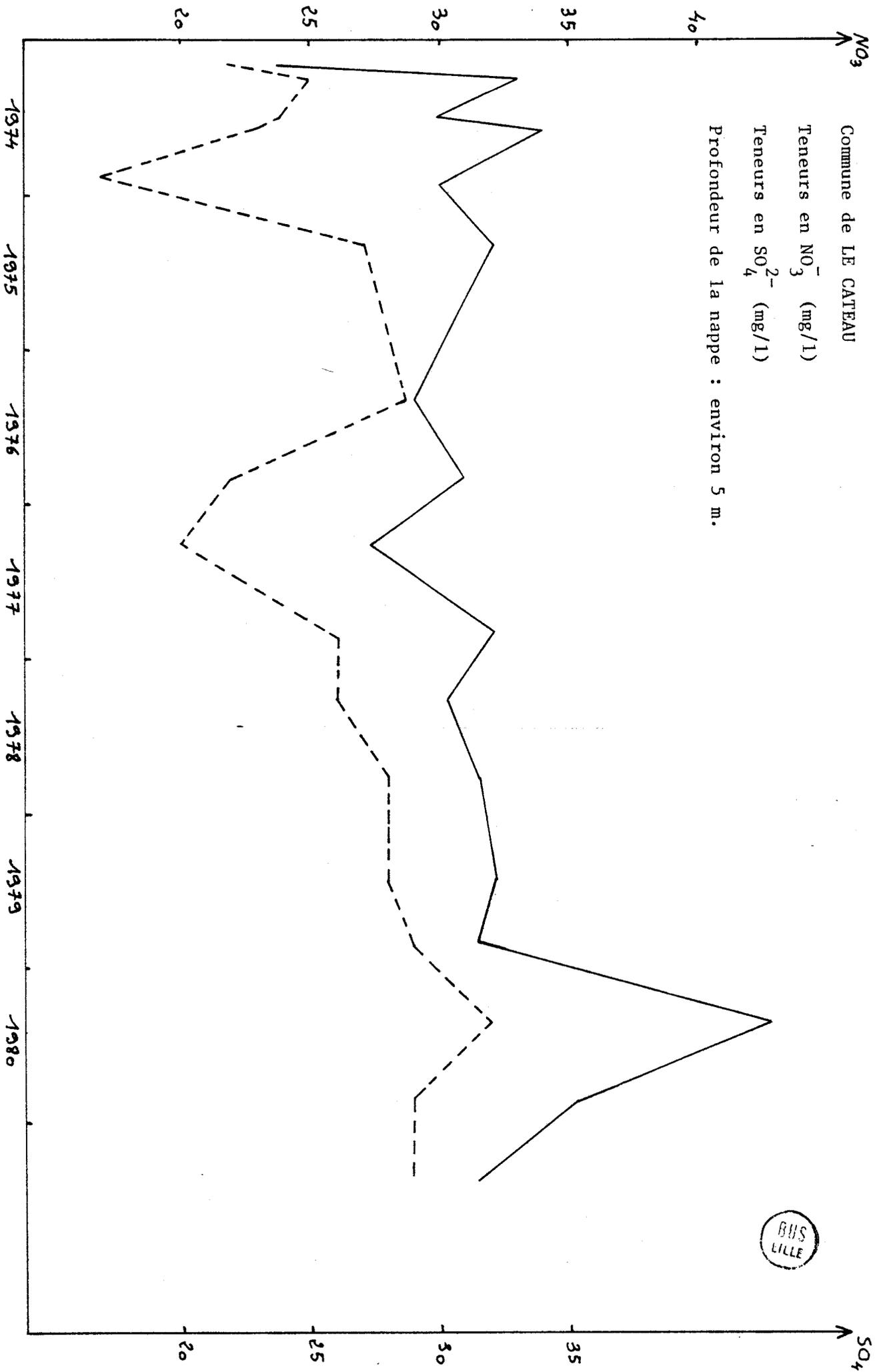
SO₄

Commune de LE CATEAU

Teneurs en NO₃⁻ (mg/l)

Teneurs en SO₄²⁻ (mg/l)

Profondeur de la nappe : environ 5 m.

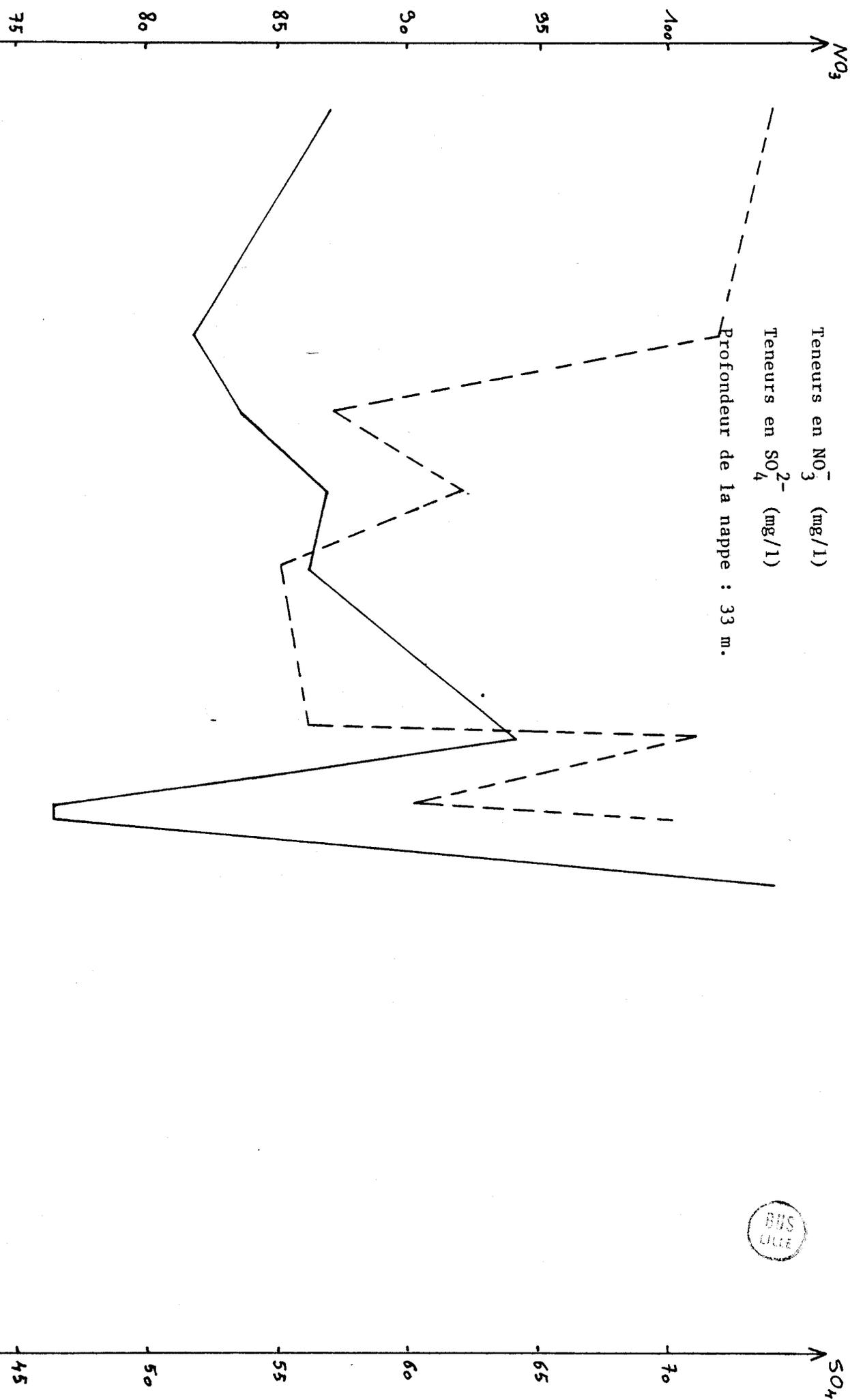


Commune d'AVESNES-LE-SEC

Teneurs en NO_3^- (mg/l)

Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)

Profondeur de la nappe : 33 m.



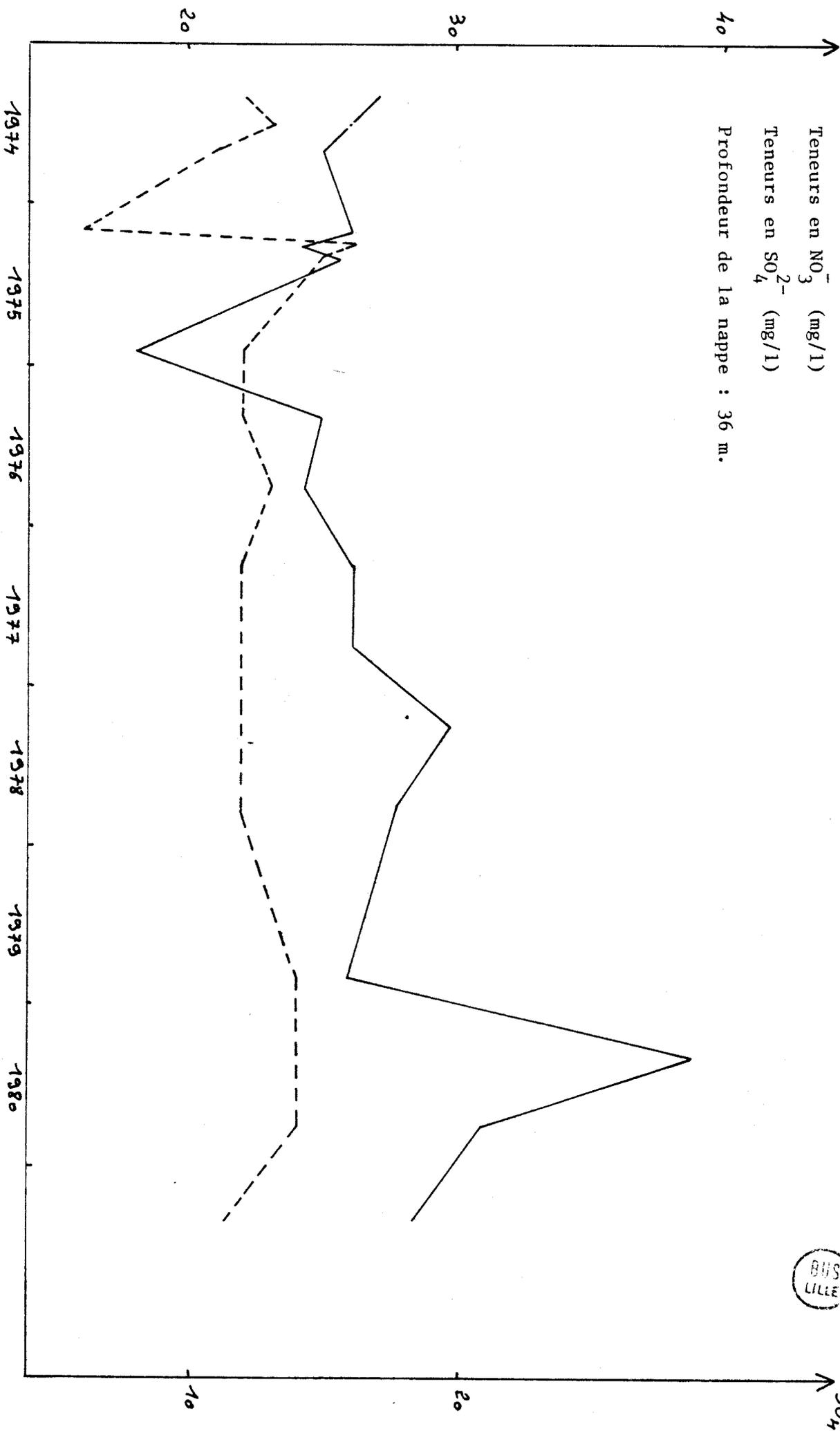
NO₃

Commune de MASNIERES

Teneurs en NO₃⁻ (mg/l)

Teneurs en SO₄²⁻ (mg/l)

Profondeur de la nappe : 36 m.



NO_3

Commune de DOIGNIES

Teneurs en NO_3^- (mg/l)

Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)

Profondeur de la nappe : 27,60 m.



SO_4

70

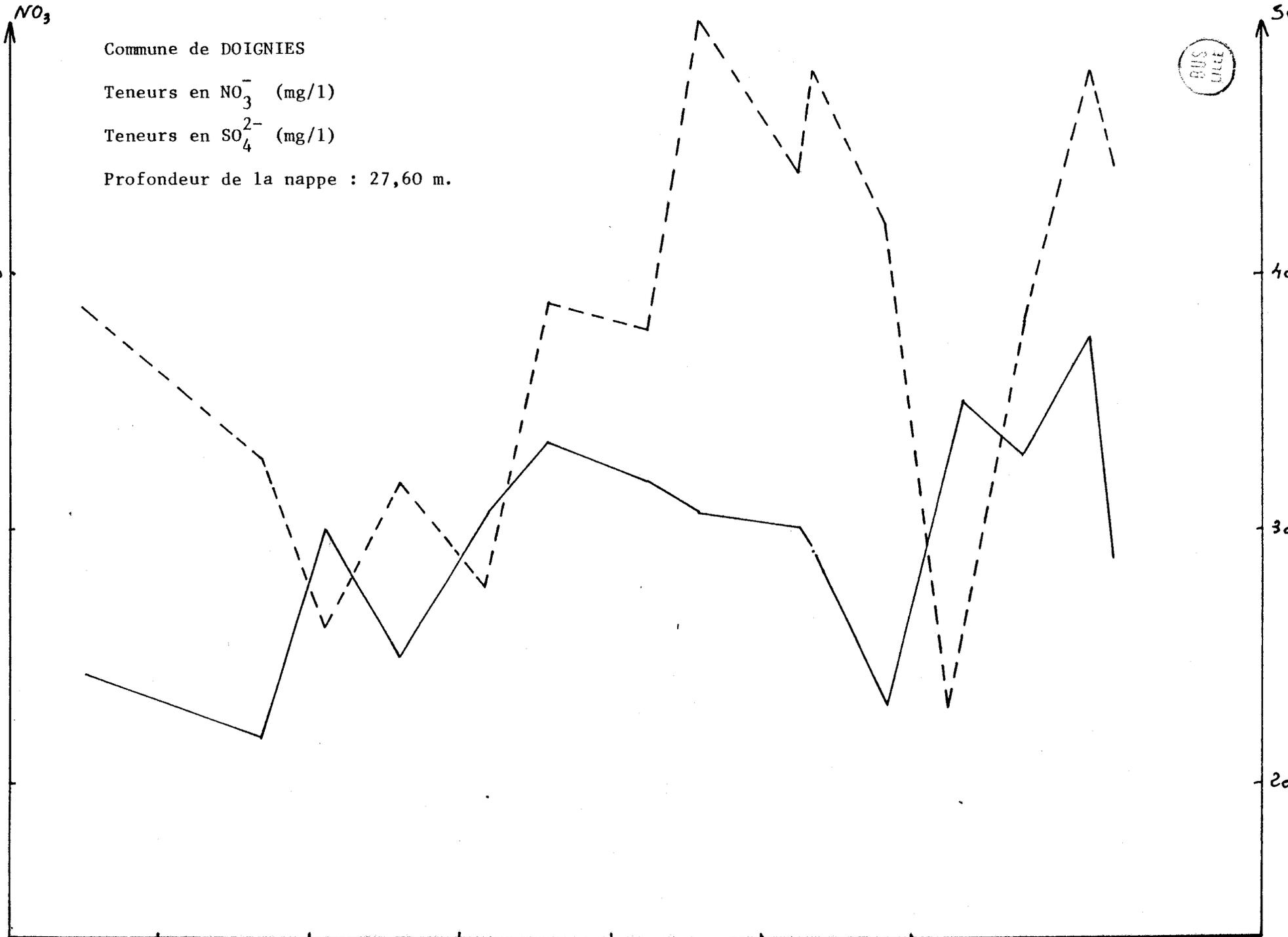
60

50

40

30

20



Teneurs en NO_3^- (mg/l)

Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)

Profondeur de la nappe : 27,60 m.

NO₃

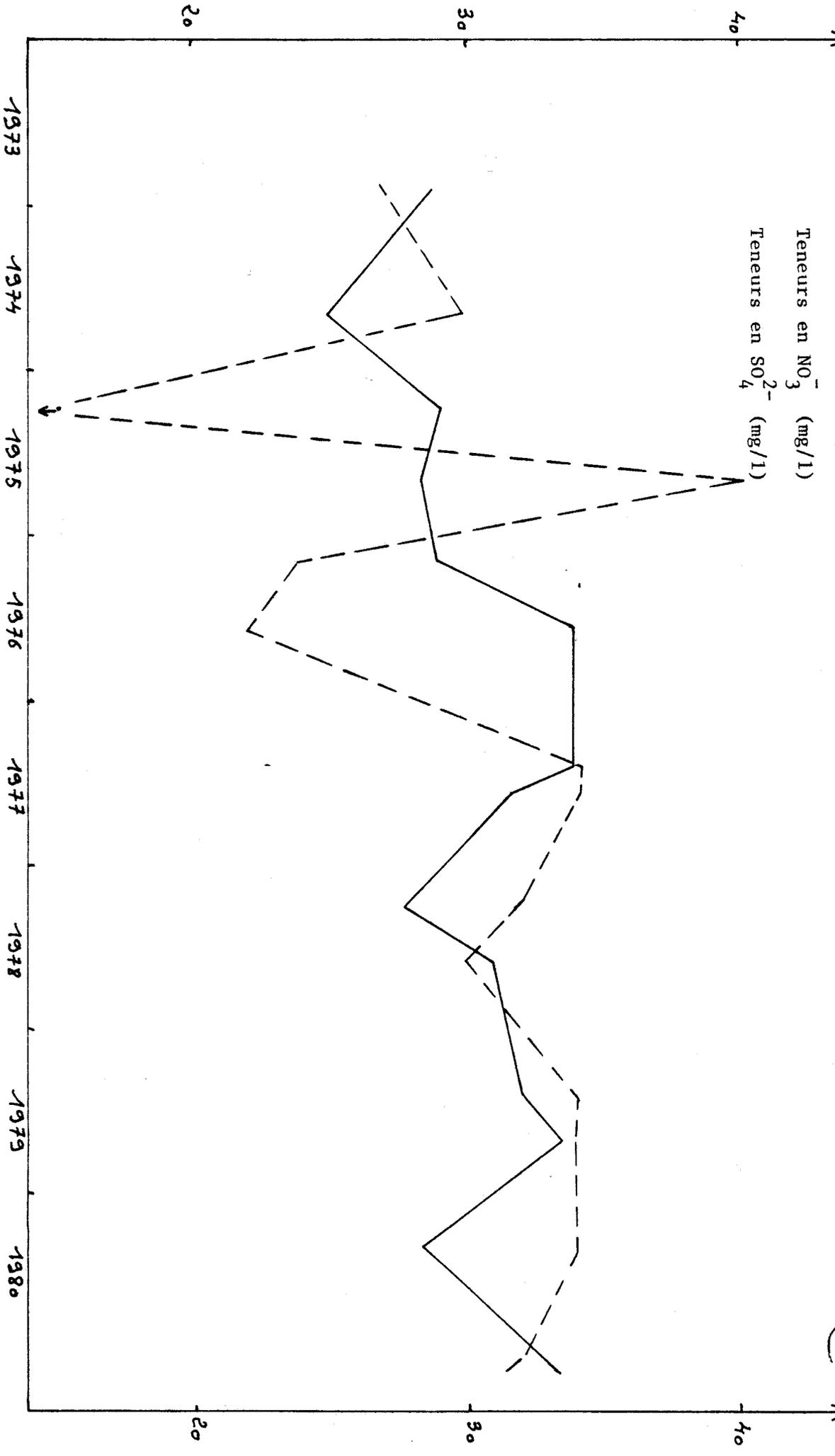
BILIS
LILLE

SO₄

Commune de NEUVILLY

Teneurs en NO₃⁻ (mg/l)

Teneurs en SO₄²⁻ (mg/l)

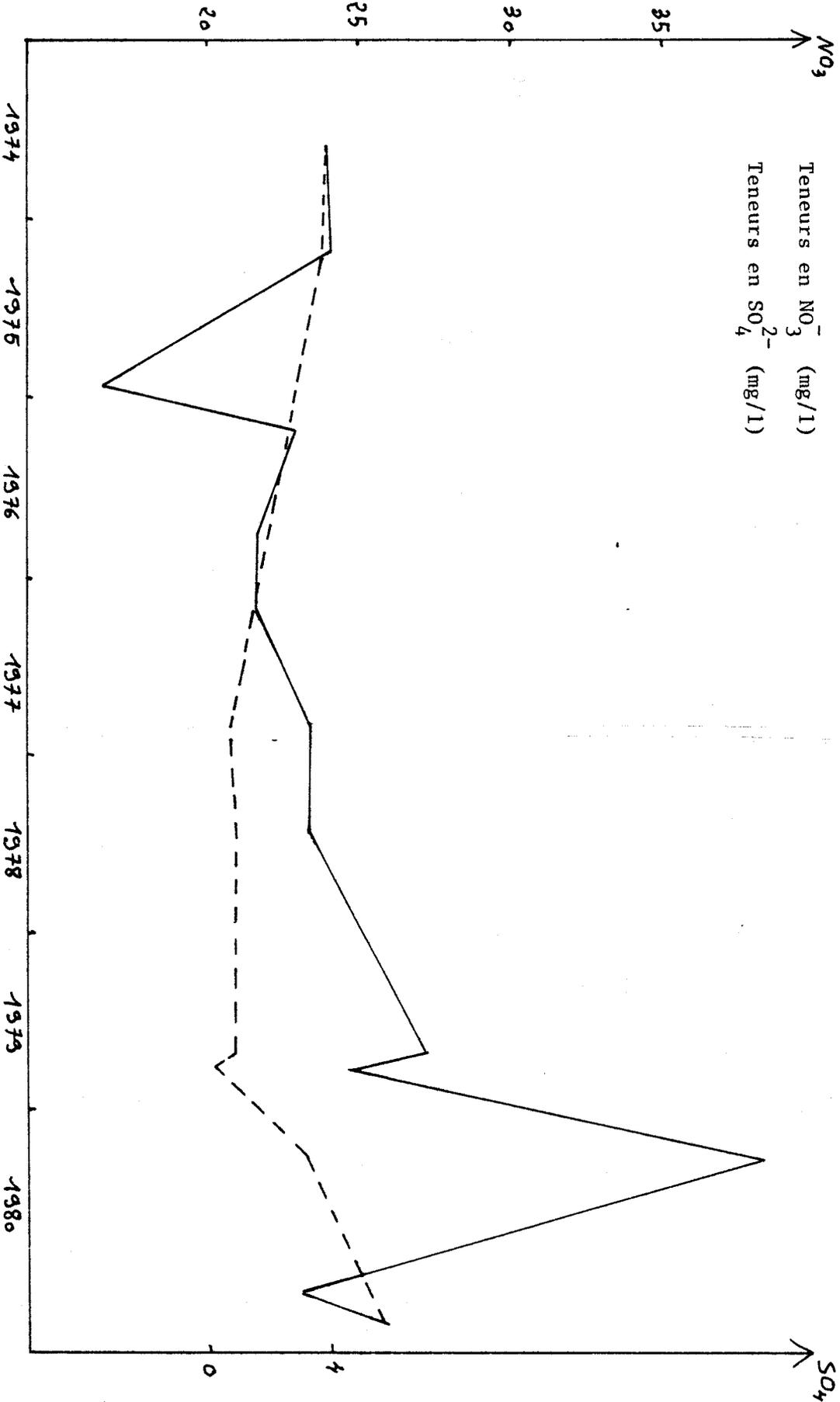




Commune de GOUZEAUCOURT

Teneurs en NO_3^- (mg/l)

Teneurs en SO_4^{2-} (mg/l)



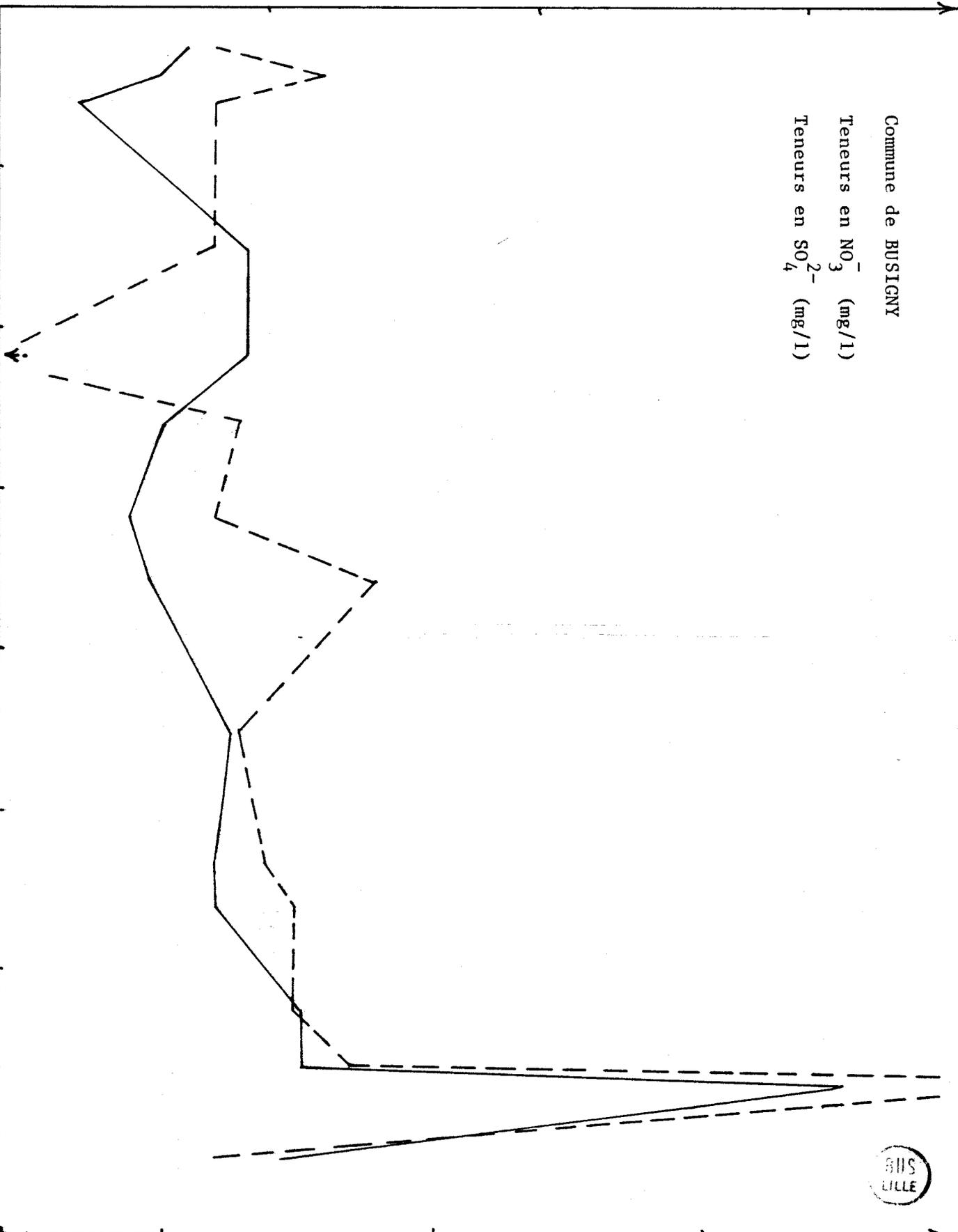
NO₃

Commune de BUSIGNY

Teneurs en NO₃⁻ (mg/l)

Teneurs en SO₄²⁻ (mg/l)

1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980



SO₄

NO₃

Commune de CAULLERY

Teneurs en NO₃⁻ (mg/l)

Teneurs en SO₄²⁻ (mg/l)

Profondeur de la nappe : 48 m

