

Laboratoire cycle urbain
et pollution des eaux



D.E.A Instrumentation et Analyses Avancées

Modélisation des transferts de polluants dans les aquifères du bassin Artois-Picardie . Exemple du bore

Olivier PEGURRI

Juin 1998

RESUME

La modélisation en hydrogéologie et en hydrochimie permet de visualiser des phénomènes non directement observables.

Elle permet notamment de simuler des pollutions ponctuelles ou diffuses et d'en observer le comportement dans le temps.

Une campagne de mesure des concentrations en bore dans les eaux souterraines a été entreprise dans le bassin Artois-Picardie. L'analyse cartographique qui en a été tirée a permis de confirmer l'étroite corrélation qui existe entre le contexte hydrogéologique local et les teneurs observées. Le bore apparaissant dans certains cas comme marqueur des pollutions d'origine urbaine.

L'exemple local du champ captant de Salomé illustre l'application de ces recherches dans le cadre de la surveillance et la gestion de la ressource en eau.

SUMMARY

The use of modelling in hydrogeology and hydrochemistry allows to visualise phenomenons that are not directly observable. It allows notably to simulate limited or diffuse pollutions and to observe its comportment with time.

A campaign was launched in the Artois-Picardie basin in order to measure boron concentrations in groundwaters. The cartographic analysis get out of these measures allowed to confirm the close correlation found between the local hydrogeological context and the observed concentrations.

The boron appearing in some cases as a tracer of urban pollutions.

The local studies of Salomé illustrate the use of these research in the surveillance and the management of the water resource.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : LA MODELISATION DES AQUIFERES	2
- I - Généralités	2
- II – Le logiciel AquiferTest	2
II-1/ Présentation	2
II-2/ Utilisation	2
II-3/ Bilan	3
- III - Le logiciel Visual Modflow	3
III-1/ Principe de fonctionnement	3
a/ Les différences finies	3
b/ Le logiciel Modflow	4
c/ Le logiciel Modpath	5
d/ Le logiciel MT3D	5
III-2/ Le cycle de l'eau	6
DEUXIEME PARTIE : TRACEUR CHIMIQUE DE LA POLLUTION URBAINE : LE BORE	8
- I - Le bore dans le bassin Artois-Picardie	8
I-1/ Les types d'apport	8
a/ Origines naturelles	8
b/ Origines industrielles	9
c/ Origines agricoles	9
I-2/ Evolution des normes	9
I-3/ Rappel des données acquises	9
- II – Nouvelles données	10
II-1/ Les départements du Nord et du Pas-de-Calais	10
II-2/ Le département de la Somme	11
- III - Conclusion	15
TROISIEME PARTIE : UN EXEMPLE REGIONAL : LE CHAMP CAPTANT DE SALOME	16
- I - Présentation	16
I-1/ Généralités sur le champ captant	16
I-2/ Contexte géologique et hydrogéologique	16
- II – Analyse des teneurs en bore	18
II-1/ Résultats	18
II-2/ Analyse et interprétation	18
- III – La modélisation	20
III-1/ Création du modèle	20
III-2/ Simulations	23
a/ Comportement de la nappe	23
b/ Simulations de transfert de particules	24
c/ Modification du modèle	24
d/ Les transferts de bore	25
CONCLUSION	28
BIBLIOGRAPHIE	29

INTRODUCTION

Dans le cadre de mon projet de D.E.A. en instrumentation et analyses avancées j'ai travaillé au Laboratoire Cycle Urbain et Pollutions des Eaux sous la direction du professeur Maillot.

Mon sujet de stage de recherche se décompose en deux thèmes.

Un premier consistant en la modélisation des aquifères régionaux en vue de l'application de traceurs chimiques de pollution.

Un second consistant en l'utilisation d'un traceur chimique spécifique à l'influence des défauts d'assainissement urbain. L'utilisation du Bore fait suite aux travaux réalisés par J.M. Pain dans le cadre de ce même D.E.A en 1996.

Le présent rapport présente dans la première partie la modélisation appliquée à l'hydrogéologie et l'hydrochimie avec l'utilisation des deux logiciels AquiferTest et Visual Modflow, puis, dans la deuxième partie, il envisage une étude statistique de la répartition du bore dans le Bassin Artois-Picardie.

Enfin, dans une troisième partie, un exemple local sera traité afin d'illustrer l'application de ces recherches.

PREMIERE PARTIE : LA MODELISATION DES AQUIFERES

- I - Généralités

Face à l'intérêt croissant de préserver la ressource en eau alimentaire, de nombreux outils sont développés. Ainsi le marché des modèles mathématiques appliqués à l'étude des aquifères a connu une forte croissance ces dernières années.

De nos jours l'utilisation d'un modèle mathématique prend une part essentielle dans toutes les études sérieuses d'un système donné. Par exemple, les experts en modélisation sont de plus en plus sollicités pour concevoir et utiliser des programmes dont le but est de planifier une décontamination locale d'aquifères où la dégradation de la ressource est complexe. ^[1]

Cependant devant une telle quantité de modèles mis sur le marché, le but de ce projet a été aussi de tester la qualité des résultats qui pouvaient en être tirés.

L'intérêt et la difficulté allant de paire avec ces outils résident dans le fait de modéliser un système physique qui ne peut pas être directement observé (l'eau souterraine et le type de sous-sol). Pour cela il faut combiner des méthodes d'investigation sur le terrain (essais de débit, prélèvement d'échantillons,...) avec des méthodes d'évaluation de données.

- II – Le logiciel AquiferTest

II-1/ Présentation

AquiferTest est un logiciel co-développé par Thomas Röhrich et Waterloo Hydrogeologic Inc. ^[4]. Il permet de déterminer **les paramètres hydrauliques indispensables à la connaissance des modes de transfert de polluants chimiques**. Ce logiciel est utilisé dans l'interprétation des essais de puits et met à notre disposition différentes méthodes (Theis, Cooper & Jacob, Hantush, etc.) pour interpréter des pompages à débit constant, des pompages par paliers et des essais de capacité de puits.

Pour de plus amples détails sur les différents essais et les différentes méthodes d'interprétation se référer aux ouvrages indicés ^[2], ^[3] et ^[4] dans la bibliographie de ce présent rapport.

On peut ainsi, grâce à ces méthodes, obtenir à partir de données issues d'essais sur le terrain des valeurs tels que l'emmagasinement (en nappe captive), la transmissivité, la perméabilité (en nappe libre) et les pertes de charge dans le puits.

II-2/ Utilisation

La première étape consiste à acquérir les données. Sur le terrain, un essai de puits est effectué pendant lequel les débits ainsi que le niveau dynamique de la nappe sont relevés en fonction du temps.

Une fois l'essai terminé, les données sont rentrées dans le logiciel. Il faut ensuite choisir une ou plusieurs méthodes d'interprétation en fonction du contexte hydrogéologique dans lequel s'est déroulé l'essai, du type d'essai ainsi que des valeurs résultantes désirées.

Les résultats obtenus peuvent être destinés à des applications différentes :

- Utilisation dans le cadre d'une étude locale des capacités de l'aquifère à fournir de l'eau alimentaire, industrielle ou pour des usages agricoles.

- Utilisation des données caractérisant l'aquifère dans le cadre d'une modélisation du comportement hydrogéologique et hydrochimique régional de la nappe.

C'est cette dernière utilisation qui nous intéresse le plus dans le cadre de ce travail de recherche.

Pour plus de détails en ce qui concerne l'utilisation d'AquiferTest, j'ai rédigé indépendamment de ce mémoire un manuel d'utilisation de ce logiciel ^[5]. Celui-ci est agrémenté d'exemples d'études régionales caractérisant les principaux contextes qui peuvent être rencontrés dans le bassin Artois-Picardie.

II-3/ Bilan

AquiferTest s'utilise dans un environnement Windows®, ce qui lui confère une bonne convivialité ainsi qu'une facilité d'utilisation.

Cependant lors de cette étude des « bugs » ont été décelés dans l'utilisation des interprétations de pompages par paliers. En effet ces logiciels sont rapidement mis sur le marché ce qui laisse une large marge d'incertitude quant au bon fonctionnement de ces outils dès leur commercialisation. Un service technique est toujours présent pour remédier à ce genre de problèmes.

Il est à noter aussi que sur les impressions papier qui sont faites à partir de ce logiciel la présentation laisse à désirer, notamment des fautes d'orthographe lorsque le français est la langue désirée.

Il est à déplorer, de même, que le coefficient d'emménagement ne puisse pas être calculé lorsque l'on se trouve dans un contexte d'aquifère non-confiné.

- III - Le logiciel Visual Modflow

La modélisation en hydrogéologie et en hydrochimie est menée pour établir des prévisions quantitatives sur des flux ainsi que sur des variations du niveau des nappes. Généralement la modélisation est entreprise pour mieux comprendre les effets de l'intervention de l'homme sur le cycle de l'eau.

Par l'utilisation de tels outils on peut évaluer efficacement différentes méthodes de gestion des aquifères ^[6].

Pour plus de précisions sur l'utilisation du package Visual Modflow se référer aux documents ^[7] à ^[15] en bibliographie ainsi qu'au manuel d'utilisation que j'ai rédigé indépendamment de ce mémoire.

III-1/ Principe de fonctionnement

a/ Les différences finies

Pour faire fonctionner un modèle utilisant les différences finies, il n'est pas nécessaire de connaître tous les détails de la résolution. Cependant, une appréciation des opérations effectuées permet d'éviter certaines erreurs.

Principe

L'espace est divisé en blocs encore appelés mailles. Un système d'équations relatif au flux dans chaque bloc est développé. Le flux dans un bloc est une fonction de la charge dans les blocs voisins.

La variation de charge dans un bloc est proportionnelle au flux total dans le bloc.

Le système d'équations est résolu maille par maille sur tout le domaine. Si l'écart entre deux itérations est trop important, le calcul est recommencé autant de fois que nécessaire. 100 à 500 itérations sont parfois nécessaires pour converger.

Le maillage

La première étape de la conception d'un modèle utilisant les différences finies est de générer un maillage sur le domaine étudié. Ce maillage doit être affiné dans les zones d'intérêt ou dans les zones où un gradient élevé de la charge est attendu.

De plus, toutes les conditions aux limites doivent être mises en place (limite à flux nul – potentiel imposé).

Les flux imposés

Ceux-ci peuvent être variables d'un pas de temps à l'autre. Ils servent notamment à modéliser les recharges ainsi que les prélèvements.

Les valeurs initiales

Une valeur initiale de la charge doit être assignée à chaque maille. Celle-ci provient directement d'observations (cartes piézométriques) faites sur le terrain. ^[17]

b/ Le logiciel Modflow

Modflow est un logiciel développé par United States Geological Survey utilisant les différences finies. Sa structure consiste en un programme principal et une série de sous-routines, chacune traitant d'un point particulier du système hydrogéologique à modéliser. Il simule des flux en deux ou trois dimensions. Les flux particuliers tels que l'évapotranspiration, les drains, les fuites au travers des lits de rivières peuvent également être simulés.

Le mouvement en trois dimensions de l'eau souterraine (de densité constante) à travers un milieu poreux peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_S \frac{\partial h}{\partial t}$$

où K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les valeurs de la perméabilité le long des axes x, y et z.
h est la charge.

W est un flux volumique représentant les apports et/ou les pompages.

S_S est l'emmagasinement spécifique de l'aquifère ; c'est-à-dire le volume d'eau libérable/accumulable par unité de volume d'aquifère pour une variation unitaire de la charge.

t est le temps.

Mis à part les systèmes extrêmement simples, cette équation ne peut être résolue analytiquement. Les solutions sont donc obtenues par la méthode des différences finies. Le temps et l'espace sont discrétisés.

A l'intérieur de chaque maille et pour chaque pas de temps une charge est calculée.

Le développement des équations s'effectue par application de l'équation de continuité :

$$\sum Q_i = S_S \Delta h \Delta V \quad , \text{ avec } \Delta h = \text{variation de charge}$$

$$\Delta V = \text{volume de la maille}$$

La convergence est obtenue lorsque la différence de charges entre deux pas de temps est inférieure à une limite. ^[15]

c/ Le logiciel Modpath

Modpath est un logiciel permettant de calculer le temps de transport et les trajectoires prises par des particules imaginaires se déplaçant dans le système modélisé par Modflow. [12]

L'équation aux dérivées partielles décrivant la conservation de la masse en régime permanent dans un système de flux à trois dimensions peut s'écrire :

$$\frac{\partial}{\partial x} (nv_x) + \frac{\partial}{\partial y} (nv_y) + \frac{\partial}{\partial z} (nv_z) = W$$

où v_x , v_y et v_z sont les composantes principales de la vitesse moyenne du flux d'eau.
 n est la porosité.

W est le débit volumique de fuite ou d'apport par unité de volume d'aquifère.

En un point de coordonnées (x_i, y_i, z_i) à l'intérieur d'une maille, les composantes v_{xi} , v_{yi} , v_{zi} du vecteur vitesse moyenne s'obtiennent par interpolation linéaire à partir des valeurs aux nœuds (v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}) :

$$V_{xi} = A_{xi} (x_i - x_1) + v_{x1}$$

$$V_{yi} = A_{yi} (y_i - y_1) + v_{y1}$$

$$V_{zi} = A_{zi} (z_i - z_1) + v_{z1}$$

Où A_{xi} , A_{yi} et A_{zi} sont des constantes correspondant aux composantes du gradient de la vitesse à l'intérieur de la maille.

Les variations en fonction du temps de la vitesse moyenne d'une particule selon la direction x peut s'écrire :

$$\left(\frac{dv_x}{dt} \right)_p = \left(\frac{dv_x}{dx} \right) \left(\frac{dx}{dt} \right)_p \quad \text{de même pour les autres directions.}$$

Or $\left(\frac{dx}{dt} \right)_p$ représente en fait la vitesse v_{xp} et $\frac{dv_x}{dx} = A_x$.

$$\text{D'où} \quad \frac{dv_{xp}}{v_{xp}} = A_x dt$$

En intégrant cette équation sur un pas de temps $(\Delta t = t_2 - t_1)$, on obtient la nouvelle coordonnée x_p au temps t_2 :

$$x_p(t_2) = x_1 + (v_{xp}(t_1) \exp(A_x \Delta t) - v_{x1})/A_x \quad \text{de même pour les directions } y \text{ et } z.$$

d/ Le logiciel MT3D

MT3D est un logiciel simulant l'advection, la dispersion et les réactions chimiques d'éléments dissous dans les eaux souterraines. [8]

L'équation aux dérivées partielles décrivant le transport en trois dimensions de polluants dans les eaux souterraines peut s'écrire :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k$$

où C est la concentration en polluant.
 t est le temps.
 X_i est la distance selon chaque axe du repère cartésien
 D_{ij} est le coefficient de dispersion hydrodynamique.
 V_j est la vitesse de l'eau.
 q_s est le débit volumique de fuite ou d'apport par unité de volume d'aquifère.
 C_s est la concentration de l'apport ou de la fuite.
 θ est la porosité.

$\sum_{k=1}^N R_k$ est le terme de réaction chimique.

$\frac{\partial}{\partial x_i}(v_i C)$ est le terme d'advection. Il décrit le transport des polluants à la même vitesse que l'eau. Dans la majeure partie des cas, c'est le terme dominant dans les problèmes de transport d'éléments miscibles dans l'eau souterraine.

Le programme utilise une approche Eulérienne-Lagrangienne conjuguée pour résoudre cette équation. A savoir que le terme d'advection est résolu par une méthode lagrangienne alors que les autres termes sont résolus par les différences finis sur une grille eulérienne fixe. Pour cela trois options sont disponibles :

- Method Of Characteristic (MOC). Cette méthode a l'avantage de ne pas présenter de dispersion numérique, mais elle peut être lente et elle demande beaucoup d'espace mémoire.

- Modified Method Of Characteristic (MMOC). Cette méthode a l'avantage d'être rapide, de demander peu d'espace mémoire, mais cependant elle peut présenter des problèmes de dispersion numérique.

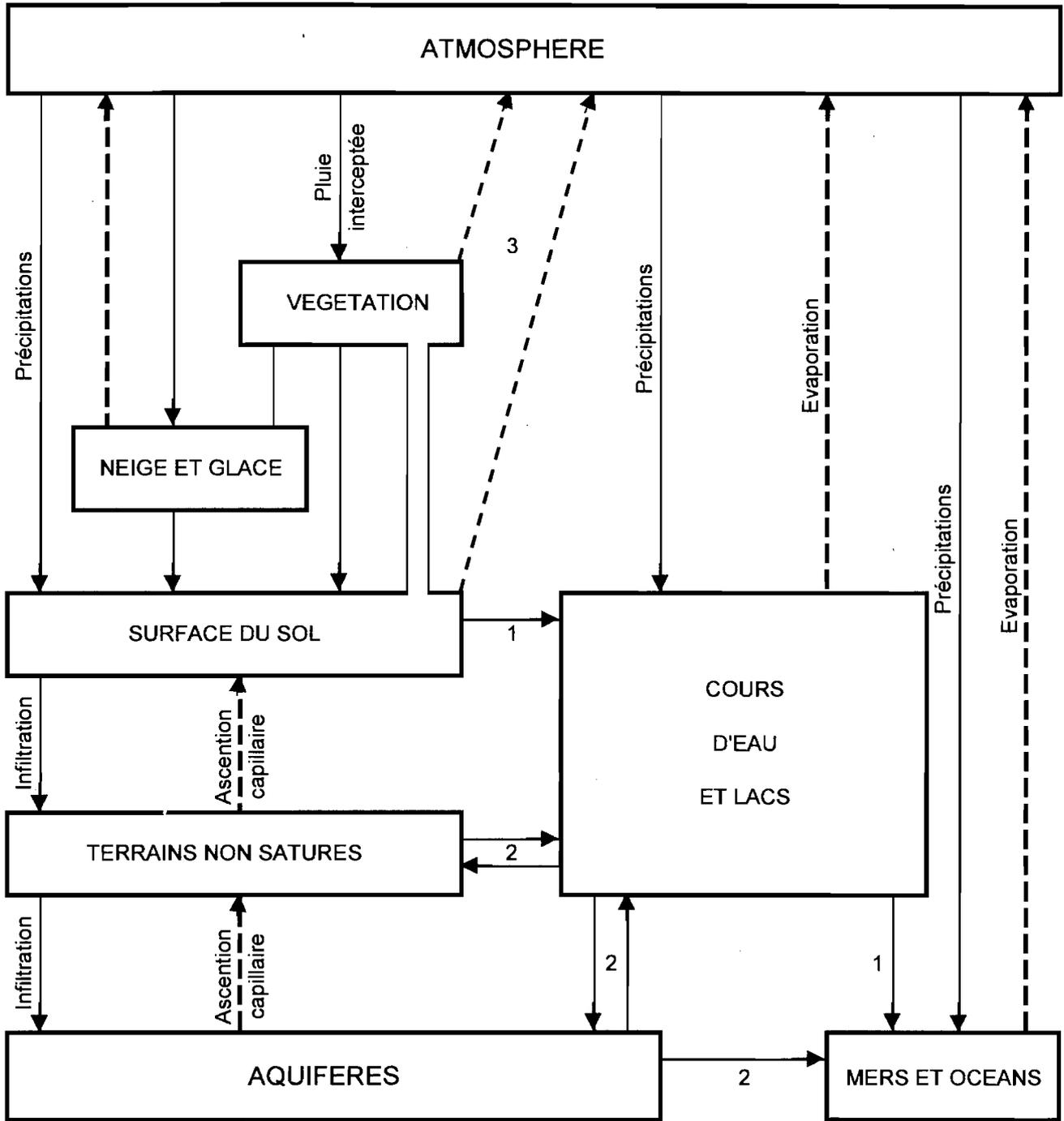
- Hybrid Method Of Characteristic (HMOC). Cette méthode combine les avantages des deux premières méthodes, mais il y a des possibilités d'erreur dans la balance massique.

III-2/ Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, montrant les mouvements de l'eau sous toutes ses formes, est illustré sur la figure 1.1.

L'eau entre dans l'atmosphère depuis la surface et l'eau souterraine par l'évaporation et l'évapotranspiration des végétaux. Elle retourne sur terre par les précipitations sous toutes leurs formes (pluies, chutes de neige, ...) et y incorpore les systèmes d'eaux de surface (cours d'eau, mers, ...) ou les eaux souterraines par infiltration.

C'est ce schéma qu'il faut retranscrire lors de l'élaboration d'un modèle.



- 1: écoulements superficiels
- 2: écoulements souterrains
- 3: évapotranspiration

Figure 1.1: Représentation schématique du cycle de l'eau
(d'après EAGLESON, 1970)

DEUXIEME PARTIE : TRACEUR CHIMIQUE DE LA POLLUTION URBAINE : LE BORE

Le bore est un élément présent dans les effluents liquides urbains : perborates utilisés comme agent blanchissant dans la composition des lessives solides ; acide borique pour la stabilisation des enzymes utilisés dans les formulations pour le lavage de la vaisselle. Ces composés issus des rejets domestiques sont stables. De plus ils sont faciles et peu coûteux à doser ^{[18] [19]}.

Le bore n'est pas retenu lors de l'épuration des eaux usées urbaines par les stations d'épuration biologiques, même les traitements membranaires faisant appel à la nanofiltration ou à l'osmose inverse sont peu efficaces ^[20].

Si l'on s'affranchit des apports naturels ainsi que des autres types d'utilisation, le bore constitue donc un marqueur chimique intéressant de l'impact des pollutions domestiques urbaines sur la ressource en eau tant superficielle que souterraine.

Utilisé avec discernement et associé à d'autres paramètres, il peut donc traduire l'impact des défauts d'assainissement des collectivités sur les aquifères. ^[21]

Ces faits expliquent que depuis quelques années, le Laboratoire Cycle Urbain et Pollution des Eaux, en collaboration avec l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, les Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales de la Somme, du Pas-de-Calais et du Nord, le laboratoire départemental de la Somme, ceux de l'Institut Pasteur de Lille et des Eaux du Nord s'intéresse à ce traceur chimique.

- I - Le bore dans le bassin Artois-Picardie

I-1/ Les types d'apport

a/ Origines naturelles

Dans la nature, le bore existe à l'état de trace dans de nombreux minéraux. Les minéraux riches en bore sont cependant rares (sédimentation en milieu évaporitique pour les borates). Plus généralement, ce sont les phyllosilicates comme les illites qui fournissent du bore dans les eaux. Les illites sont des minéraux résultant de l'altération des roches métamorphiques, et sont assez abondants dans la nature. On peut donc considérer que le bore sera toujours présent à l'état de trace dans les eaux souterraines ^[22].

De même, d'après Guiolot, les pluies d'influence marine peuvent contenir jusqu'à 55 µg/l de bore ^[23]. La composition de l'eau de mer en cet élément est quasi constante à travers le globe, avec une concentration en bore proche de 4.5 mg/l ^[24]. Cette concentration ayant pour origine l'altération des matériaux d'origine volcanique ainsi que les rejets de gaz issus de l'activité volcanique.

Avant d'étudier les teneurs en bore, il est donc important de connaître les différents contextes hydrogéologiques du bassin Artois-Picardie. Ceux-ci ne seront pas développés dans ce rapport, je renvoie donc aux travaux de Crampon, Roux et Bracq ^[25] et aux travaux de B. Ferry ^[26].

b/ Origines industrielles

D'une façon générale, seules les industries amenées à utiliser des agents blanchissants à base de perborates sont susceptibles de rejeter du bore dans leurs effluents [22].

Parmi ceux-ci, on trouve les papeteries et les tanneries, mais aussi et surtout les usines de fabrication de lessives et les verreries.

c/ Origines agricoles

Pour certains types de culture telles que les betteraves, le colza, le maïs, des engrais contenant du bore peuvent être utilisés. D'après les normes NF-U42-002 et NF-U42-003, que ce soit par apport au sol ou en pulvérisation foliaire, la dose maximale annuelle d'apport en bore est limitée à 4 Kg/ha/an.

I-2/ Evolution des normes

La directive européenne de 1980, transcrite en droit français par le décret modifié du 3 janvier 1989 et les circulaires d'application, ne faisait pas apparaître de Concentration Maximale Admissible (CMA) pour les eaux alimentaires, mais une recommandation de 1000 µg/l.

Actuellement, le nouveau décret qui devrait être prochainement promulgué fixe une CMA à 1000 µg/l. Une baisse de cette CMA à 300 µg/l, qui avait été envisagée suite à une recommandation de l'O.M.S., a été abandonnée par l'Union Européenne suite à la parution de nouveaux résultats plus précis sur l'évaluation de la toxicité du bore [27].

I-3/ Rappel des données acquises

Une campagne systématique d'acquisition de mesures a été entreprise depuis le mois d'Août 1995 avec l'aide de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et des DDASS concernées. Des essais d'intercalibration ont été réalisés par M. Ouddanne de l'USTL. Ils ont établi la compatibilité des résultats obtenus, permettant de valider l'ensemble de l'étude réalisée par J-M. Pain en 1996 sur les départements du Nord et du Pas-de-Calais. En ce qui concerne le département de la Somme, une discordance des résultats est alors apparue. [21] [28]

L'approche générale par l'étude cartographique et statistique à l'échelle du bassin, a permis de valider l'utilisation du bore comme marqueur de l'origine urbaine, en reliant les résultats au contexte hydrogéologique. L'analyse des résultats sur une teneur en bore supérieure à 300 µg/l semblait concerner trois principales zones géographiques : la partie orientale du bassin d'Orchies, le territoire de la communauté urbaine de Lille et le bassin minier du Pas-de-Calais. L'analyse du contexte hydrogéologique des secteurs subissant certaines pollutions anthropiques confirme les possibilités d'utilisation du bore comme traceur de pollution. Par ailleurs, l'influence du contexte géologique sur les teneurs en bore dans l'eau souterraine a été confirmée. [28] [29]

- II – Nouvelles données

Au cours de cette étude, j'ai pu recueillir 454 nouvelles mesures des teneurs en bore dans le bassin Artois-Picardie. Celles-ci se répartissent suivant l'histogramme ci-dessous :

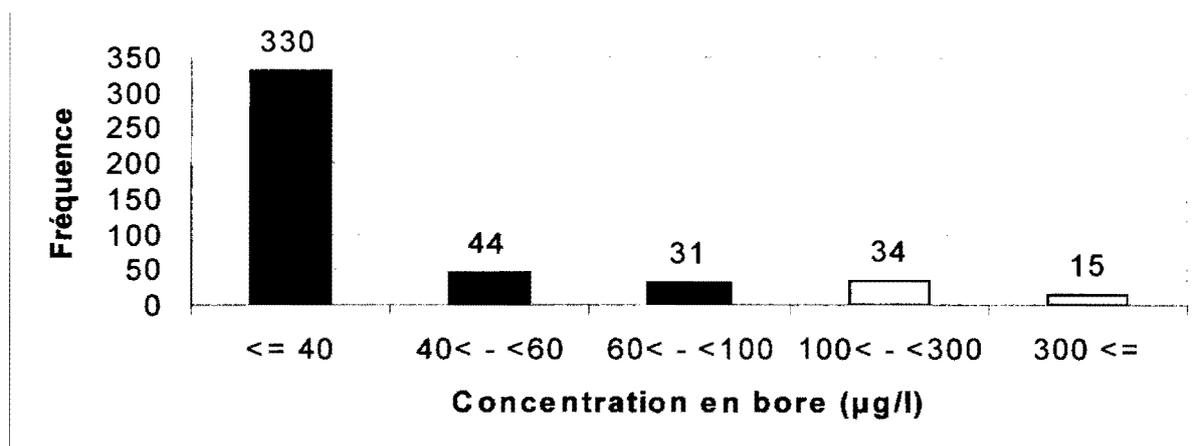


Figure 2.1 : Histogramme des fréquences des teneurs en bore

On constate que 15 mesures sont supérieures à 300 µg/l, aucun dépassement de ce type n'est présent dans la Somme, donc ces valeurs représentent une part de 5.5% des prélèvements effectués dans le Nord et le Pas-de-Calais. On peut noter aussi que 49 mesures dépassent 100 µg/l, soit près de 11% des prélèvements effectués dans le bassin Artois-Picardie.

L'étude cartographique de ces teneurs fait ressortir plusieurs zones (Figure 2.3 p14).

II-1/ Les départements du Nord et du Pas-de-Calais

Dans ces deux départements, on retrouve les trois zones géographiques majoritairement touchées mises en évidence lors des précédentes études.

☞ Le nord et le sud-ouest de l'agglomération lilloise.

Notamment les villes de Roubaix, Tourcoing et Wattrelos au nord où les teneurs en bore s'échelonnent entre 250 µg/l et 350 µg/l.

A Lille, les concentrations en différents points vont de 130 à 200 µg/l.

Au sud, le captage de Houplin-Acoisne présente une teneur en bore d'environ 220 µg/l.

Ce phénomène s'explique par un environnement urbain qui conduit à des difficultés de protection efficace.

☞ Le bassin minier du Pas-de-Calais.

Avec les villes de Wingles, Auchy-les-Mines, Eleu-dit-Leauwette et Lens où les teneurs en bore varient entre 130 et 300 µg/l.

Compte tenu de la vulnérabilité de la nappe et des défauts d'assainissement liés au passé de ces lieux (effondrement d'anciennes galeries, nombreux puits perdus), ces fortes concentrations sont ici liés à une pollution urbaine.

☞ Le bassin d'Orchies.

Avec notamment Orchies, Auchy-lez-Orchies, Saint-Amand-les-Eaux, Millonfosse, Boussignies et Genech où les teneurs en bore varient entre 300 µg/l et 700 µg/l.

Ici la protection de la ressource par le recouvrement du tertiaire laisse présager une origine naturelle de ces surconcentrations liée au relargage du bore par les argiles.

Dans le Boulonnais, les teneurs en bore sont comprises entre 100 et 200 $\mu\text{g/l}$. Nous sommes ici dans la zone du calcaire primaire et du jurassique, la nappe y est peu protégée et directement alimentée par les pluies.

Les concentrations peuvent donc être attribuées à l'infiltration de bore d'origine marine véhiculé par les pluies et les embruns.

II-2/ Le département de la Somme

Ce département présente un contexte tout à fait favorable à l'étude des concentrations en bore. En effet, la nappe y est libre (aquifère de la craie) et aucune usine de fabrication de lessives n'est présente.

La figure 2.2, ci-dessous, nous offre une représentation générale des gammes de concentrations en bore dans ce département.

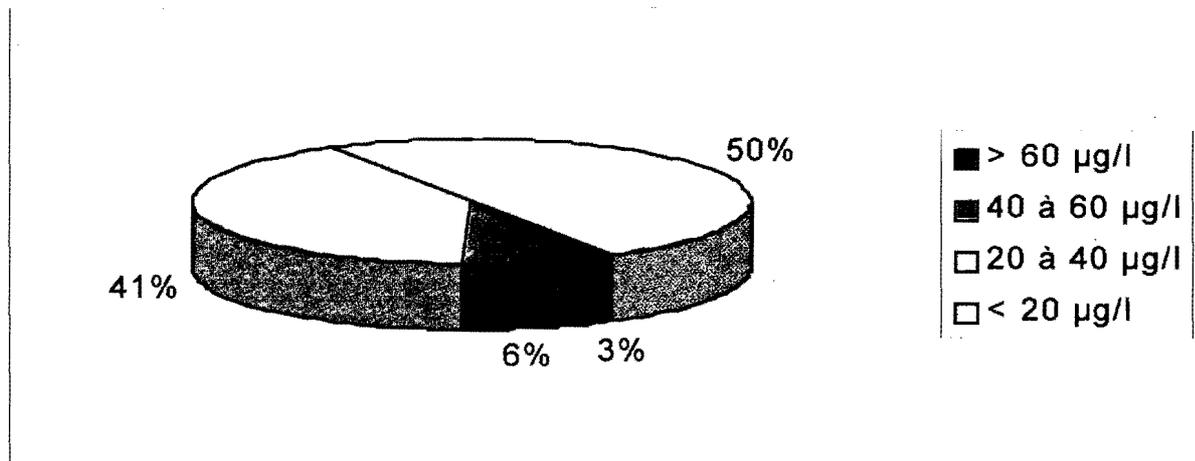


Figure 2.2 : Répartition des résultats par classes de concentrations en bore dans la Somme.

On constate que 91% des valeurs sont inférieures à 40 $\mu\text{g/l}$. Cette concentration peut être considérée comme le « fond continu » d'origine naturelle dans cette configuration hydrogéologique.

La nappe libre de la craie n'est pas protégée des infiltrations verticales. Donc toute apparition de valeurs supérieures à ce « fond continu » permettra de supposer la présence d'une anomalie.

Il convient donc de s'intéresser aux concentrations supérieures à 40 $\mu\text{g/l}$. Dans ce présent rapport seules celles dépassant 60 $\mu\text{g/l}$ seront traitées en détail. Celles-ci sont au nombre de six. Ce sont les prélèvements effectués sur les captages de Vaux-en-Amiénois, Bertangles, Guyencourt-Saulcourt, Muille-Villette, Fressenneville et Quesnoy-le-Montant.

→ Vaux-en-Amiénois (au nord-ouest d'Amiens) : la concentration en bore est de 116 $\mu\text{g/l}$. La présence d'une pollution ne fait ici aucun doute. Ce village ne comptant que 391 habitants, on peut donc supposer que la pollution provient de l'extérieur. Cependant, elle ne peut être attribuée à la proximité d'Amiens car la nappe est ici drainée par la Somme et s'écoule donc en sens inverse.

Une explication pourrait être la présence d'une station d'épuration, d'une capacité de 2250 eq/hab, utilisant comme mode d'exutoire l'infiltration, à Flesselles, c'est-à-dire juste en amont de la commune de Vaux-en-Amiénois.

→ Bertangles (au nord d'Amiens) : la concentration en bore est de 64 µg/l. Les raisons qui peuvent être invoquées dans ce cas sont la présence d'une décharge « sauvage » et d'une station d'épuration en amont de la commune. La station d'épuration se situe à Villers-Bocage, elle a une capacité de 2000 eq/hab et utilise l'infiltration comme mode d'exutoire.

→ Guyencourt-Saulcourt (au nord-est du département) : la concentration en bore est de 68 µg/l. La situation géographique de cette ville est telle qu'aucune décharge, station d'épuration ou commune ne peut être suspectée d'influencer la teneur en bore. On peut donc supposer un dysfonctionnement de son réseau d'assainissement ou l'effet d'effluents urbains rejetés en puits perdu.

Cependant, il faut tout de même garder une certaine prudence, car cette ville se situe au milieu d'une zone d'épandage de déchets de sucrerie, ce qui pourrait aussi expliquer ce léger dépassement de la teneur en bore.

→ Muille-Villette (au sud-est du département) : la concentration en bore est de 85 µg/l, alors que la concentration en nitrates est quasiment nulle. Ici, seule la présence d'une décharge « sauvage » peut expliquer la teneur en bore. Si on regarde les concentrations en d'autres éléments, on s'aperçoit de la présence de fer et de sulfate en quantité non négligeable. Ceci met en évidence l'activité des bactéries réductrices (la limite de passage en captivité sous les limons de la vallée de la Somme n'est pas loin) et explique l'absence de nitrates. Cependant des études plus précises sont nécessaires pour expliquer une telle teneur en bore.

→ Fressenneville (au sud-ouest du département) : la concentration en bore est de 103 µg/l. Etant donné la proximité de la côte, on pourrait expliquer une telle teneur par un apport naturel par les embruns et les pluies. Mais les concentrations en chlorures et en sodium sont respectivement de 28.2 mg/l et 21 mg/l, ce qui est faible et qui exclue donc cette hypothèse. De plus, si l'on se réfère à la concentration en nitrates, on s'aperçoit qu'elle est de 32 mg/l, ce qui est assez élevé. On peut donc supposer ici, qu'il y a une pollution d'origine urbaine (ceci pourrait être confirmé par une étude du rapport isotopique du bore). Celle-ci peut être attribuée à une décharge « sauvage » et à la station d'épuration de Feuquières-en-Vimeu d'une capacité de 600 eq/hab, utilisant comme mode d'exutoire l'infiltration. Celles-ci étant situées en amont nappe de Fressenneville.

→ Quesnoy-le-Montant (au sud-ouest du département) : au 9.10.95 la concentration en bore était de 206 µg/l, alors qu'au 11.06.97 elle n'était plus que de 63 µg/l, ce qui constitue une nette amélioration. Pourtant, aucun travaux visant à améliorer l'assainissement n'a été réalisé dans cette ville.

Dans cette zone le gradient hydraulique est assez élevé. Or, en amont, dans la ville de Chépy des travaux d'assainissement ont été réalisés en Avril 1996, ce qui peut expliquer cette baisse de la teneur en bore. De plus, étant donnée la proximité de la mer, on pourrait considérer que la pollution urbaine est dorénavant quasiment nulle. Mais les concentrations en chlorures et en sodium sont respectivement de 28 mg/l et 20 mg/l ce qui exclue cette hypothèse.

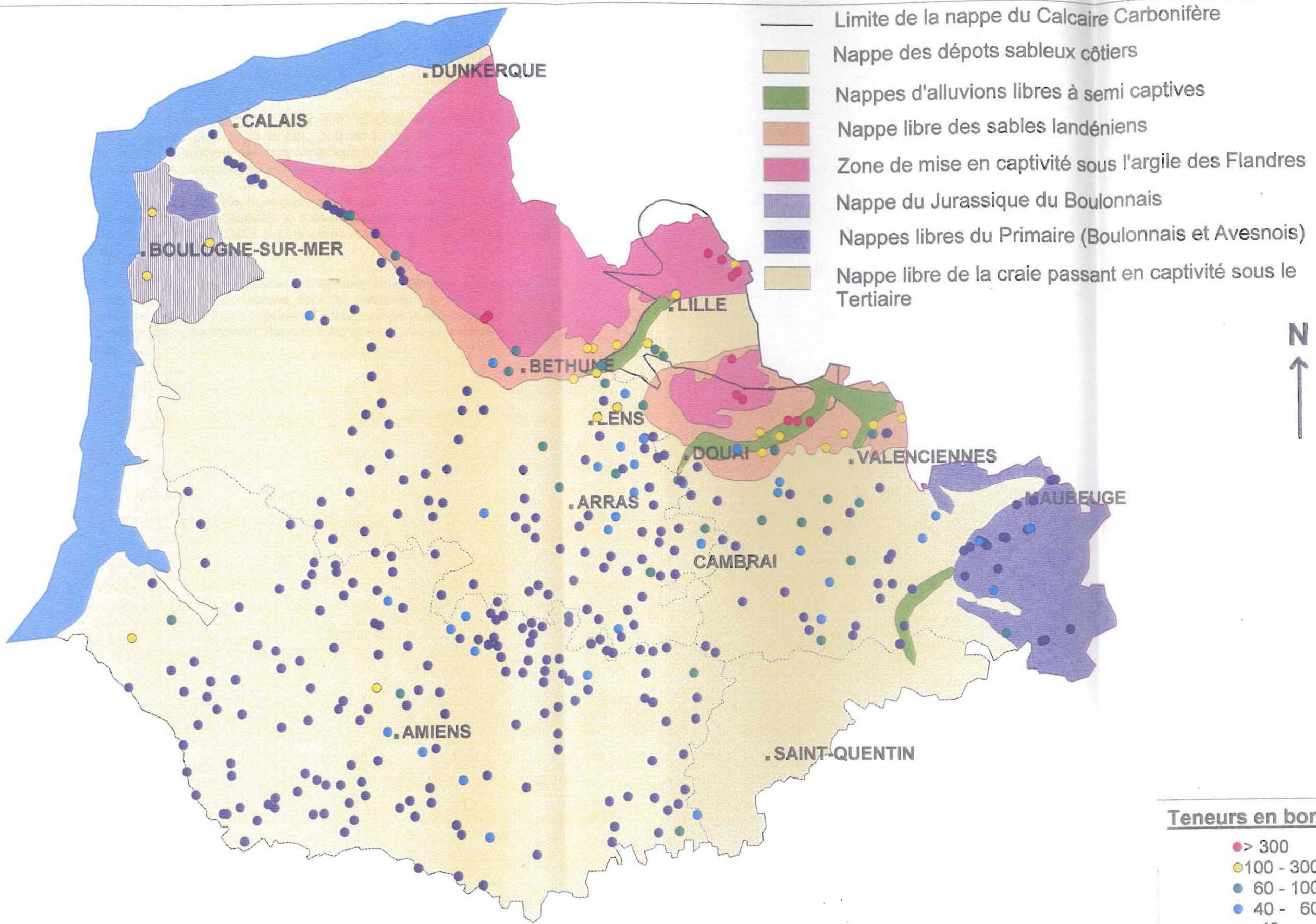
Nous sommes donc bien ici en présence d'une pollution urbaine. Celle-ci peut être attribuée à un défaut d'assainissement, mais des études plus précises doivent être conduites afin de confirmer une telle supposition.

Les autres valeurs comprises entre 40 et 60 µg/l sont au nombre de 10. Pour pouvoir les exploiter des investigations complémentaires sont nécessaires. On peut tout de même noter parmi celles-ci, Amiens avec 57 µg/l (pollution d'origine urbaine très probable) et Caix avec 50 µg/l (fuite d'une conduite transportant des effluents urbains).

Afin d'illustrer une autre facette de l'utilité de l'outil chimique qu'est le bore, intéressons-nous, maintenant, aux teneurs en nitrates dans le département de la Somme. Parmi les dernières données disponibles, deux valeurs dépassent la CMA de 50 mg/l. Il s'agit des captages de Montagne-Fayel et de Gueudecourt où les concentrations en nitrates sont respectivement de 71 et 52 mg/l.

Si on regarde les teneurs en bore dans ces deux même forages, on s'aperçoit qu'elles ne sont que de, respectivement, 16 et 25 µg/l.

Pour ces deux communes les concentrations en nitrates sont très élevées alors que les concentrations en bore sont très faibles. On peut donc conclure que la pollution en nitrates n'est pas d'origine urbaine.



Echelle: 1 / 1 380 000

Figure 2.3: Cartographie des teneurs en bore.

- III - Conclusion

Quand le contexte hydrogéologique le permet, le bore apparaît comme un outil intéressant d'aide au diagnostique. C'est le cas, comme le montre cette étude, dans le département de la Somme. L'analyse des concentrations en bore permet de cibler l'origine des pollutions, ainsi que de repérer l'impact sur l'aquifère des défauts d'assainissement.

Dans les zones où le contexte hydrogéologique est plus complexe, telles que les régions côtières ou de passage en captivité, la mesure du rapport isotopique du bore peut constituer une aide supplémentaire. Celle-ci permettrait de distinguer les origines naturelles des origines anthropiques des apports.

Cependant, il faut tout de même garder une certaine circonspection lors de l'étude du bore en tant que marqueur de pollution urbaine. En effet, l'utilisation de certains engrais peut fausser les résultats. De plus, une étude précise de l'influence de la recharge sur les teneurs en bore et sur les mécanismes de transfert dans la zone non saturée pourraient apporter des éléments nouveaux.

TROISIEME PARTIE : UN EXEMPLE REGIONAL : LE CHAMP CAPTANT DE SALOME

Cette dernière partie vise à montrer les applications possibles de la modélisation appliquée à l'hydrogéologie et à la chimie des eaux ainsi que l'étude des teneurs en bore.

- I - Présentation

I-1/ Généralités sur le champ captant

Le champ captant de Salomé comprend 7 forages situés au lieu-dit « Le Marais d'Hantay » créés à partir de 1962.

Les débits d'exploitation autorisés par arrêté interpréfectoral des 23 & 25 Mai 1984 sont de 14000 m³/j.

Les périmètres de protection de ces ouvrages ont été déclarés d'Utilité Publique par ce même arrêté.

Actuellement les débits pompés sont de l'ordre de 12000 m³/j, alimentant 70000 personnes en eau potable.

L'eau pompée subit un traitement de décarbonatation et de déferrisation dans l'usine conçue et réalisée par DEGREMONT S.A. en 1965.^[34]

I-2/ Contexte géologique et hydrogéologique

Le champ captant de Salomé est situé en périphérie Nord-Est du bassin minier. La craie est à cet endroit recouverte d'une couche de limons argilo-sableux de 1 à 10 m d'épaisseur.

Cette zone correspond à une ancienne vallée alluviale actuellement parcourue par un canal à grand gabarit. La nappe est libre. Elle est contenue dans les fissures de la craie Séno-Turonienne et elle circule du Sud-Ouest vers le Nord-Est avec un gradient de 1.5 ‰. Le Turonien moyen marneux constitue le substratum imperméable de l'aquifère (cf. Figure 3.1).

Les pompages d'essais réalisés sur les forages du champ captant ont permis de calculer un coefficient d'emmagasinement compris entre 1 % et 2%, ce qui confirme le régime libre de la nappe ; la transmissivité obtenue est comprise entre 0.02 m²/s et 0.06 m²/s. Ces valeurs révèlent la bonne productivité de l'aquifère crayeux au droit du site.^[35]

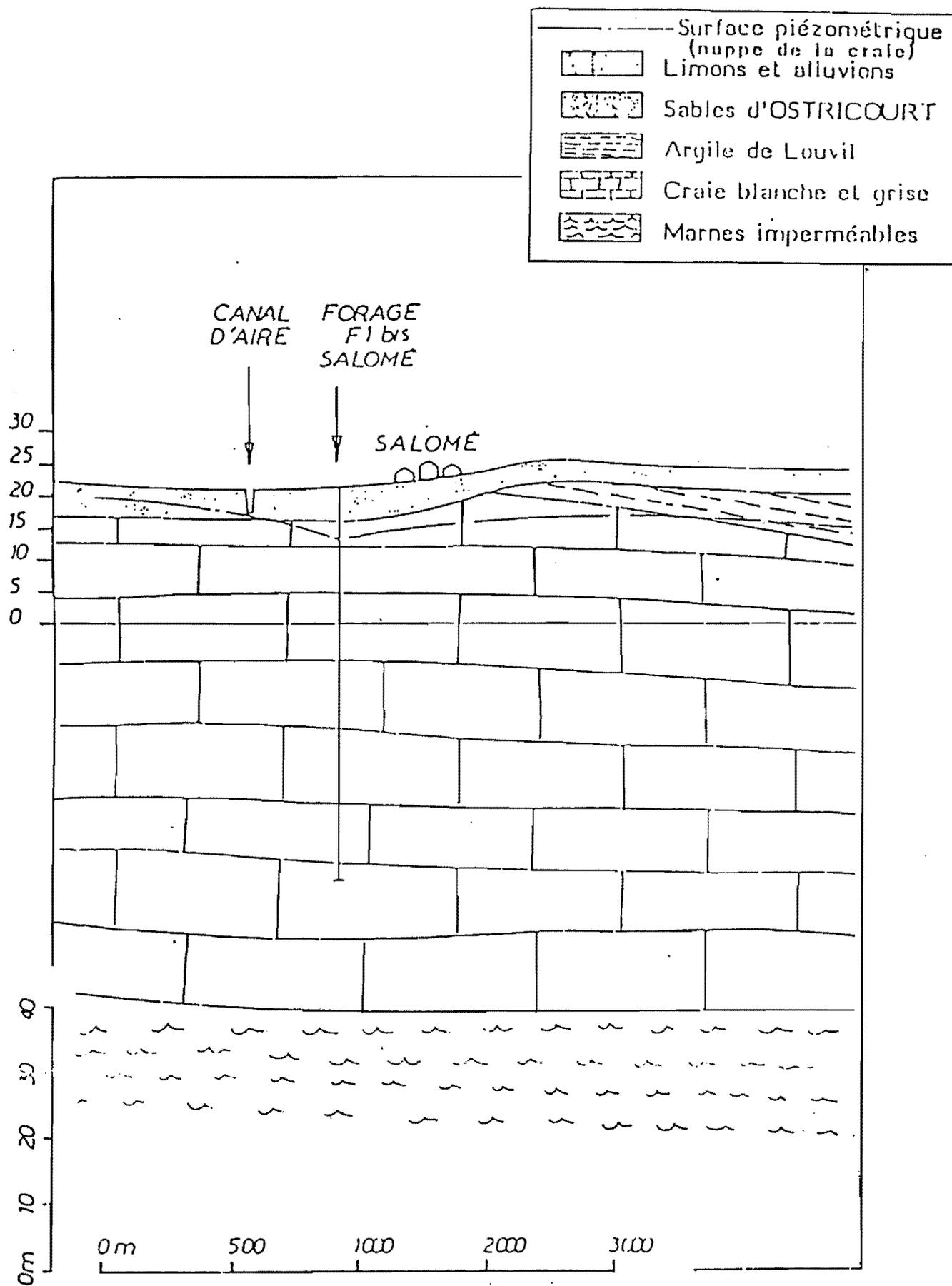


Figure 3.1 : Coupe géologique

- II – Analyse des teneurs en bore

II-1/ Résultats

Peu de résultats sont disponibles dans cette région. Cependant, ceux-ci montrent la présence de fortes concentrations en élément bore dans le canal d'Aire ainsi que dans le fossé.

Afin de pouvoir appliquer les résultats obtenus par J.M. Pain ^[36], les concentrations en Chlorures, Nitrates et Sulfates ont été relevées et prises en considération dans l'analyse des résultats.

Les prélèvements ont été effectués à des distances variables du canal (F4 (200 m), F5 (100 m), Pz2 (65m), Pz1 (30 m)) (voir Figure 3.2 ci-dessous).

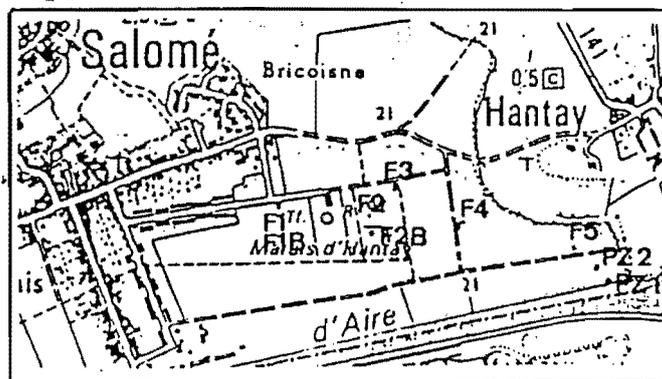


Figure 3.2 : Localisation des prélèvements

Ces résultats sont répertoriés dans le tableau 3.1 ci-dessous.

	BORE ($\mu\text{g} / \text{l}$)	CHLORURES (mg / l)	NITRATES (mg / l)	SULFATES (mg / l)
CANAL	290	76	29	167
FOSSE	380	26	< 1	16
Pz1	255	68	< 1	92
Pz2	185	66	< 1	84
F5	35	47	9	78
F4	70	47	5	100

Tableau 3.1 :Teneurs en bore, chlorures, nitrates et sulfates. ^[34]

II-2/ Analyse et interprétation

Tout d'abord, le plus remarquable dans ces résultats, ce sont les fortes concentrations en bore dans le fossé. Ceci est normal étant donné que celui-ci drainait une partie des rejets urbains de Salomé. Des travaux permettant l'étanchéité du fossé ont été réalisés depuis l'obtention de ces résultats.

Aux vues des données, il semble évident que le canal d'Aire transporte beaucoup de bore et qu'une partie s'infiltré dans la nappe. En effet, la concentration en bore diminue avec l'éloignement au canal. Les autres éléments ne présentent pas de fortes variations (voir la figure 3.3 ci-après).

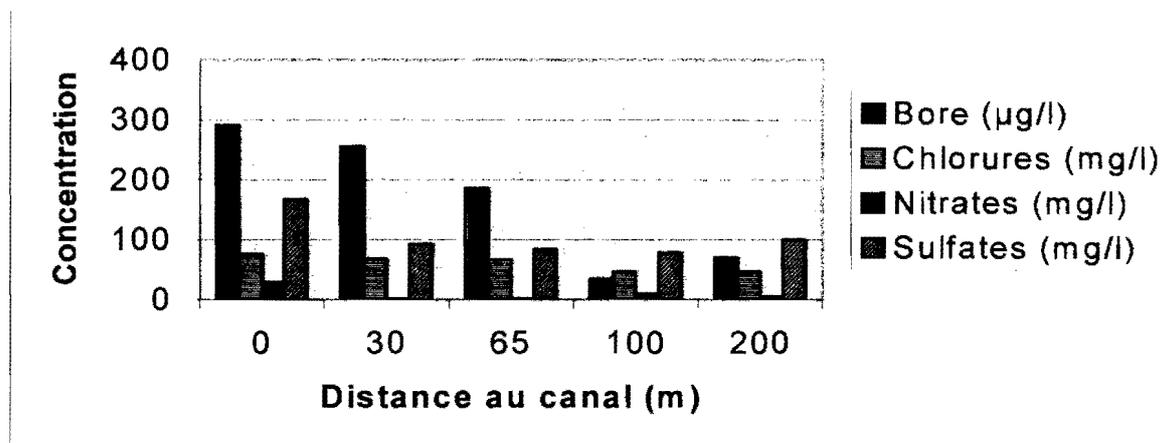


Figure 3.3 : Concentrations en fonction de la distance au canal.

Ces résultats témoignent d'une forte minéralisation et de faibles teneurs en nitrates. Ce contexte peut s'avérer caractéristique d'une zone de mise en captivité. ^[36]

Nous sommes en présence d'une nappe libre.

Ceci peut s'interpréter par le fait que la nappe n'est libre que localement et cela dû aux pompages du champ captant. Pour en avoir confirmation, il serait donc intéressant de simuler un arrêt des pompages sur le modèle et de voir, en observant la piézométrie, si la nappe revient en captivité.

Devant les faibles valeurs en nitrates, il serait intéressant de regarder les autres matières azotées telles que les nitrites et l'ammonium. En effet, il semblerait que les nitrates aient été réduits. Pour cela il faut de même regarder le Carbone Organique Total (COT). L'hypothèse avancée est en accord avec la présence d'une usine de déferrisation traitant l'eau puisée par le champ captant. En effet, la présence de fer montre l'activité des bactéries réductrices des nitrates puisque celles-ci libèrent des ions Fe^{2+} lors de leur activité dénitrifiante.

Les analyses ont données :

	NH_4^+ (mg / l)	NO_2^- (mg / l)	COT (mg / l)
CANAL	5.6	0.87	8
FOSSE	11.9	0.14	20
Pz1	3.1	0.03	2
Pz2	1.2	0.02	2
F5	0.5	0.03	1
F4	< 0.2	0.04	2

Tableau 3.2 : Résultats complémentaires. ^[34]

L'hypothèse formulée est donc bien vérifiée. Le Carbone Organique Total est élevé ce qui montre une tendance réductrice du milieu.

De plus, les concentrations en ions ammonium et nitrites montrent l'état réduit des nitrates.



Cette tendance semble s'atténuer au niveau des forages F4 et F5 où les concentrations en nitrates augmentent parallèlement à une baisse des teneurs en nitrites et en ions ammonium.

- III – La modélisation

III-1/ Création du modèle

Pour construire un modèle d'aquifère les informations nécessaires sont :

- la géométrie de l'aquifère en plan et en section
- les paramètres et les variations de l'aquifère dans la zone à modéliser
- les conditions aux limites : leur localisation et leur nature
- les recharges (précipitations) et les évaporations
- les flux imposés (puits, irrigation)
- les niveaux imposés (rivières, étendues d'eaux, canaux)

Parmi ces informations, certaines peuvent nécessiter des campagnes d'investigation afin d'améliorer la qualité de la modélisation.

Dans certains cas quelques paramètres ne peuvent pas être déterminés, il faut alors les estimer en faisant appel à une certaine connaissance du site. Il faut alors pouvoir évaluer les incertitudes résultant de telles approximations.

Les étapes nécessaires à l'élaboration d'un modèle sont les suivantes :

- regroupement des données
- définition des paramètres du modèle
- définition et génération de la géométrie du modèle
- caler le modèle

regroupement des données

Les données sur lesquelles le modèle va être construit doivent être issues de sources sûres. Un nombre suffisant de données doit être rassemblé et si ce n'est pas le cas, il faut trouver un moyen de combler cette lacune.

- par une campagne d'investigation supplémentaire
- par une recherche bibliographique sur un projet similaire
- par ajustement de valeurs supposées, ceci faisant appel à l'expérience du modélisateur.

Cependant, il faut toujours garder à l'esprit le niveau de qualité des données et être conscient du niveau d'incertitude qui en résulte.

définition des paramètres du modèle

Il est important de définir les paramètres nécessaires à l'analyse mathématique. Il faut se constituer un jeu de données, dans les unités choisies, qui sera utilisé tout au long de la modélisation.

Il faut notamment introduire les perméabilités, les transmissivités, les coefficients d'emmagasinement (ces différents paramètres peuvent être évalués par essais de pompage

interprétés par AquiferTest). En outre, il est nécessaire de connaître les épaisseurs de nappe, la piézométrie, la topographie.

En plus de ces paramètres il faut connaître ceux caractérisant le cycle de l'eau. Ceux-ci répondent à l'équation : $P = R + E + I$

Avec P = précipitations

R = ruissellements

E = évaporations

I = infiltrations

Souvent pour simplifier le problème, on calcule la pluie efficace, c'est à dire la quantité d'eau issue des précipitations qui réalimente la nappe.

A tout cela doivent être ajoutés des données concernant les interventions de l'homme dans le domaine étudié, par exemple les prélèvements dans l'aquifère.

définition et génération de la géométrie du modèle

Pour les besoins des calculs numériques qui seront effectués, un maillage comprenant les limites physiques du domaine étudié doit être créé. Ce maillage doit être affiné dans les zones où une plus grande précision est nécessaire. Cependant le maillage ne doit pas être trop fin car la durée des calculs ne doit pas être excessive.

Les conditions aux limites peuvent être de deux sortes :

- limite à flux nul, ce qui est équivalent à une barrière (souvent géologique) qui empêche l'eau de passer.
- limite à potentiel imposé, c'est à dire que dans certaines zones on peut considérer que la piézométrie ne varie pas ou très peu.

calage du modèle

Pour calibrer le modèle, on compare la piézométrie observée à la piézométrie calculée. En fonction de cela les paramètres (souvent les perméabilités) sont modifiés petit à petit et les calculs sont relancés jusqu'à ce que la ressemblance entre les phénomènes observés et ceux calculés soit satisfaisante.

Cette étape de la modélisation n'est pas simple. Elle demande beaucoup de temps (nombreuses itérations) et d'expérience.

Dans le cas présent l'étendue du domaine étudié a été divisée en 380 mailles rectangulaires de 300 m de long pour 240 m de large.

Le système est modélisé par un monocouche.

L'élaboration du modèle a nécessité :

- La géométrie du toit du substratum. Une cote a été rentrée à chaque nœud du maillage.
- La piézométrie servant aux calculs comme charge initiale (Figure 3.4 p22).
- Les recharges de la nappe. Ceci permet de modéliser les recouvrements de l'aquifère. Par exemple là où le recouvrement est imperméable, la recharge est égale à zéro. Sur l'ensemble du domaine la recharge est égale aux précipitations auxquelles ont été soustraits les évapotranspirations (soit 190 mm/an). Les fuites du canal vers la nappe ont été aussi modélisées en assignant tout au long du tracé une recharge plus importante (1100 mm/an).
- Les conditions aux limites, indispensables pour la résolution numérique, ont été déterminées par observation de la piézométrie. En effet, on s'aperçoit aux vues de celles-ci que la limite Nord du domaine est à potentiel imposé. Cela se traduit en terme de modélisation par l'attribution d'une charge constante tout au long de la frontière Nord.

- Les pompages du champ captant ainsi que le forage industriel de Douvrin ont été modélisés par des puits ; les débits étant connus. Etant donné la taille des mailles, pour une question d'échelle, les 4 forages du champ captant ont été représentés par 3 puits, le débit de F3 étant partagé entre les forages F4 et F2. Les débits sont répertoriés dans le tableau 3.3.

Forage	Débit (m ³ /j)
F5	3600
F4 + 0.5 F3	3900
F2 + 0.5 F3	4500
DOUVRIN	350

Tableau 3.3 : Débits des forages.^[34]

- Le calage du modèle s'est effectué par « tâtonnement » en ajustant maille par maille la perméabilité jusqu'à l'obtention de la piézométrie observée. Pour lancer le premier calcul les perméabilités ont été approchées par la formule : $T = k * h$ avec
 - T : Transmissivité.
 - k : Perméabilité.
 - h : Epaisseur d'aquifère mouillé.

Les transmissivités étant à peu près connues. La piézométrie n'a pas été retrouvée tout de suite. En effet, il a fallu, pour caler l'isopièze +18, imposer sur une maille en limite Sud un flux négatif (modélisé par un pompage) afin de simuler une circulation d'eau à destination de Wingles.

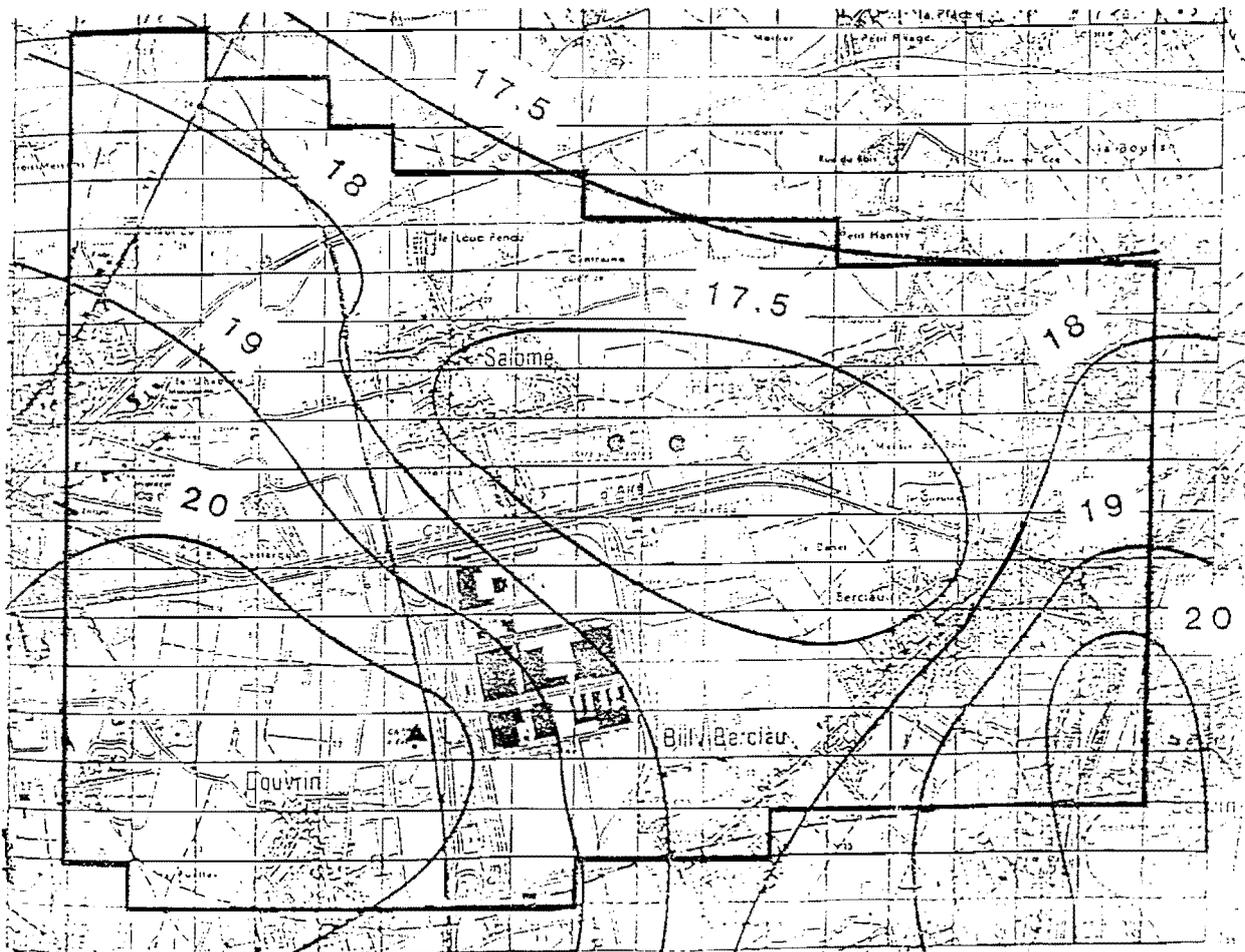


Figure 3.4 : Situation, piézométrie et maillage de la zone étudiée

Finalement, le modèle a été calé avec des perméabilités comprises entre $2 \cdot 10^{-5}$ et $6 \cdot 10^{-4}$ m/s.

La piézométrie obtenue est illustrée sur la figure 3.5 et peut être comparée à la figure 3.4.

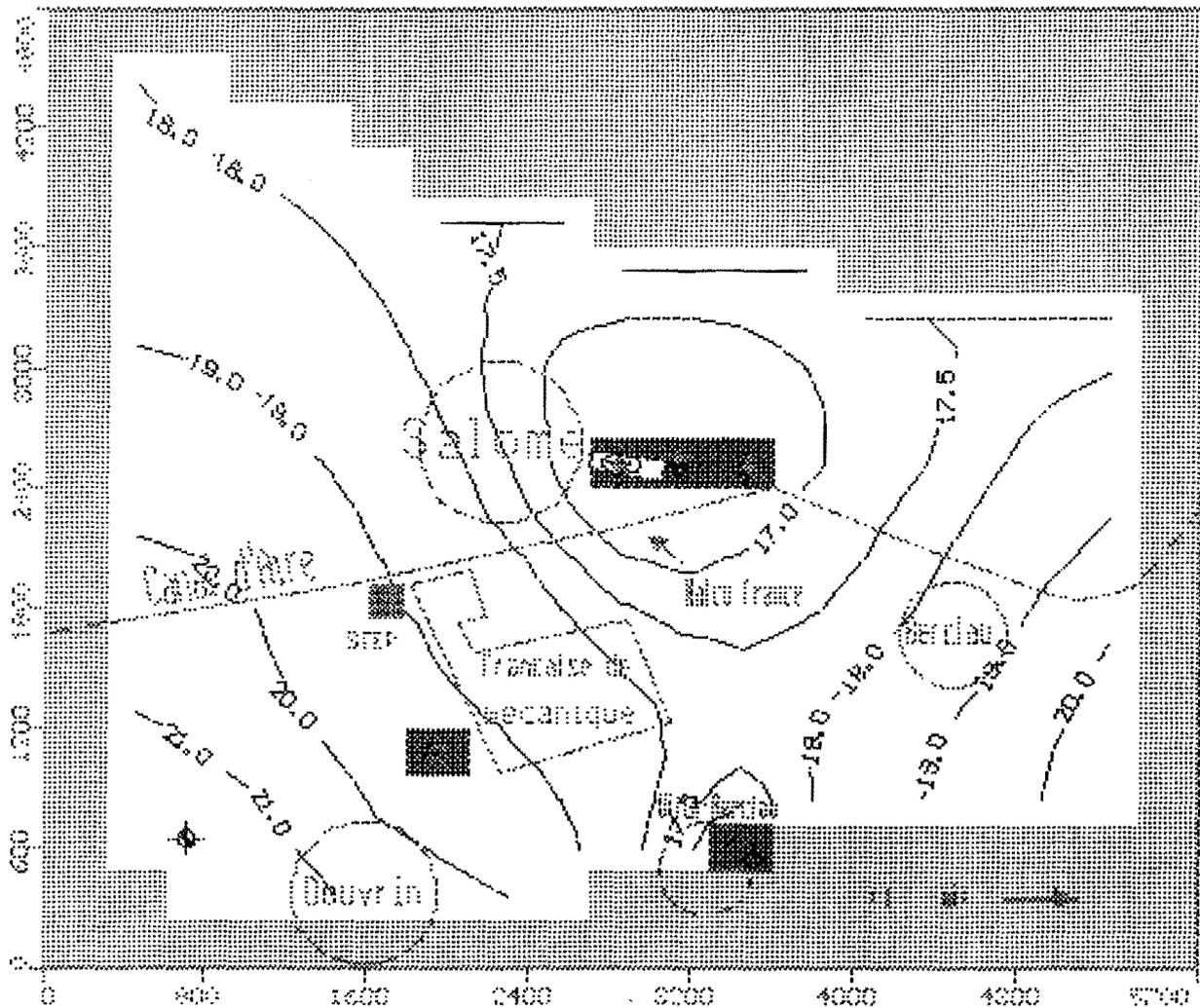


Figure 3.5 : Piézométrie calculée calée

III-2/ Simulations

a/ Comportement de la nappe

Avec ce modèle, un arrêt total des pompages a été simulé afin de voir le comportement des courbes piézométriques en l'absence d'utilisation du champ captant.

Ceci a montré que la nappe passe en captivité dans cette région, ce qui confirme les résultats obtenus par l'analyse des teneurs en bore, nitrates, chlorures et sulfates.

La nappe n'est libre que localement et ceci de manière artificielle par l'effet des pompages du champ captant.

Les pompages du champ captant génèrent un champ de vitesse dans la nappe. Par l'utilisation du modèle, on peut visualiser les directions d'écoulement (Figure 3.6).

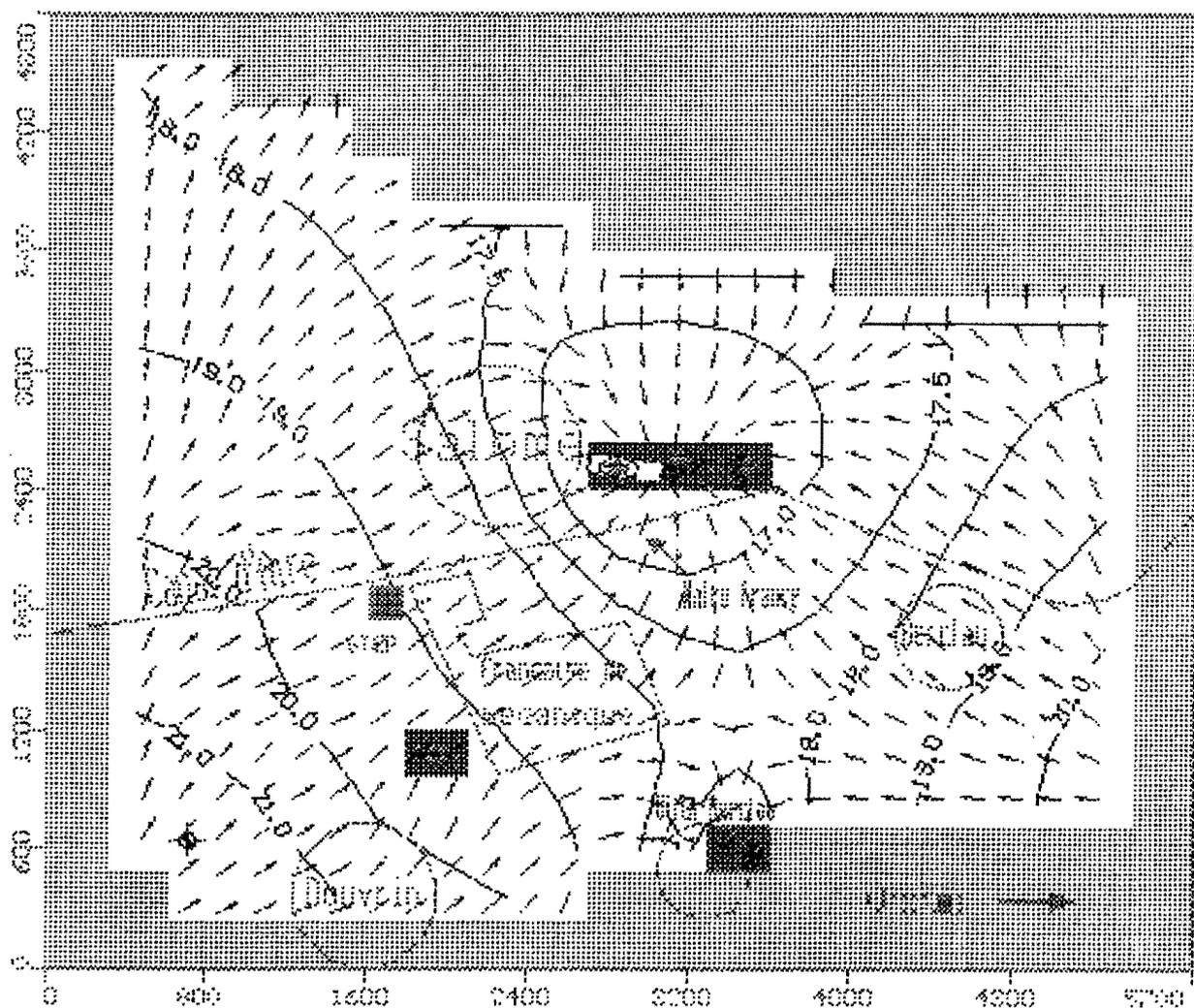


Figure 3.6 : Directions d'écoulement dans la nappe

b/ Simulations de transfert de particules

Par l'utilisation de Modpath, on peut localiser les zones susceptibles de polluer le champ captant.

En localisant des particules sur les faces de la maille centrée sur un forage, on peut visualiser les trajectoires que peuvent emprunter les pollutions pour atteindre le champ captant. ^[35]

Grâce à ce même logiciel, on peut simuler une pollution accidentelle issue d'un dysfonctionnement de la station d'épuration située en bordure du canal d'Aire. On peut ainsi observer les trajectoires empruntées par les polluants avant d'être captés par les forages du champ captant.

c/ Modification du modèle

Etant donné que le canal d'Aire a été modélisé par une recharge, le modèle ne tient pas compte du courant présent dans le canal ; ce dernier pouvant jouer un rôle important dans les transferts de polluants.

Pour cela une deuxième modélisation a été réalisée en utilisant le « Rivers Package » de Modflow afin de simuler le canal par une rivière.

Les données supplémentaires, nécessaires à cette nouvelle modélisation sont répertoriées dans le tableau 3.4.

	Niveau de la rivière (m)	Niveau du lit (m)	Conductance (m ² /j)
Limite Est	21.5	17	12
Limite Ouest	20	15.5	12

Tableau 3.4 : Données pour simuler la rivière

La conductance C est donnée par la formule suivante : $C = \frac{KLW}{M}$

- Où
- K = perméabilité du lit de la rivière
 - L = distance entre le fond de la rivière et le toit de la nappe
 - W = profondeur de la rivière
 - M = épaisseur du lit de la rivière

Le problème posé par ce modèle est que la piézométrie s'en trouve complètement changée, même en essayant de le caler avec la conductance.

C'est pourquoi les valeurs de perméabilité ont du être changées par rapport au premier modèle.

Ainsi un deuxième calage a été réalisé.

Cependant, la piézométrie exacte ne peut être retrouvée dans son intégralité.

On la retrouve de façon correcte sur la partie Est du domaine, mais elle ne peut être obtenue sur l'ensemble Ouest de la zone étudiée.

Plusieurs interprétations peuvent être apportées à ces résultats :

tout d'abord, un doute peut être émis sur l'exactitude des données piézométriques dont nous disposons ;

de plus, on peut formuler l'hypothèse de fuites ponctuelles venant du canal et non des fuites diffuses comme celles simulées par le « Rivers Package ».

En effet, par des phénomènes tectoniques, des blocs peuvent être remontés, et ainsi nous pourrions nous retrouver en présence de craie subaffleurante engendrant des fuites ponctuelles importantes.

Ainsi, ici nous sommes confrontés au problème de la solution non unique. Le premier modèle qui consistait à simuler le canal par une recharge semble ne pas être tout à fait exacte, mais il apparaît tout de même comme une bonne modélisation pour la gestion du champ captant dans son ensemble.

d/ Les transferts de bore

Etant donné la taille des mailles utilisées et la distance entre les points de prélèvement (tableau 3.1), un problème d'échelle se pose pour l'observation des phénomènes sur des petites distances.

Pour cela des mailles rectangulaires de 75 m de long sur 60 m de large ont été rajoutées sur le maillage existant dans la zone d'intérêt (Figure 3.7).

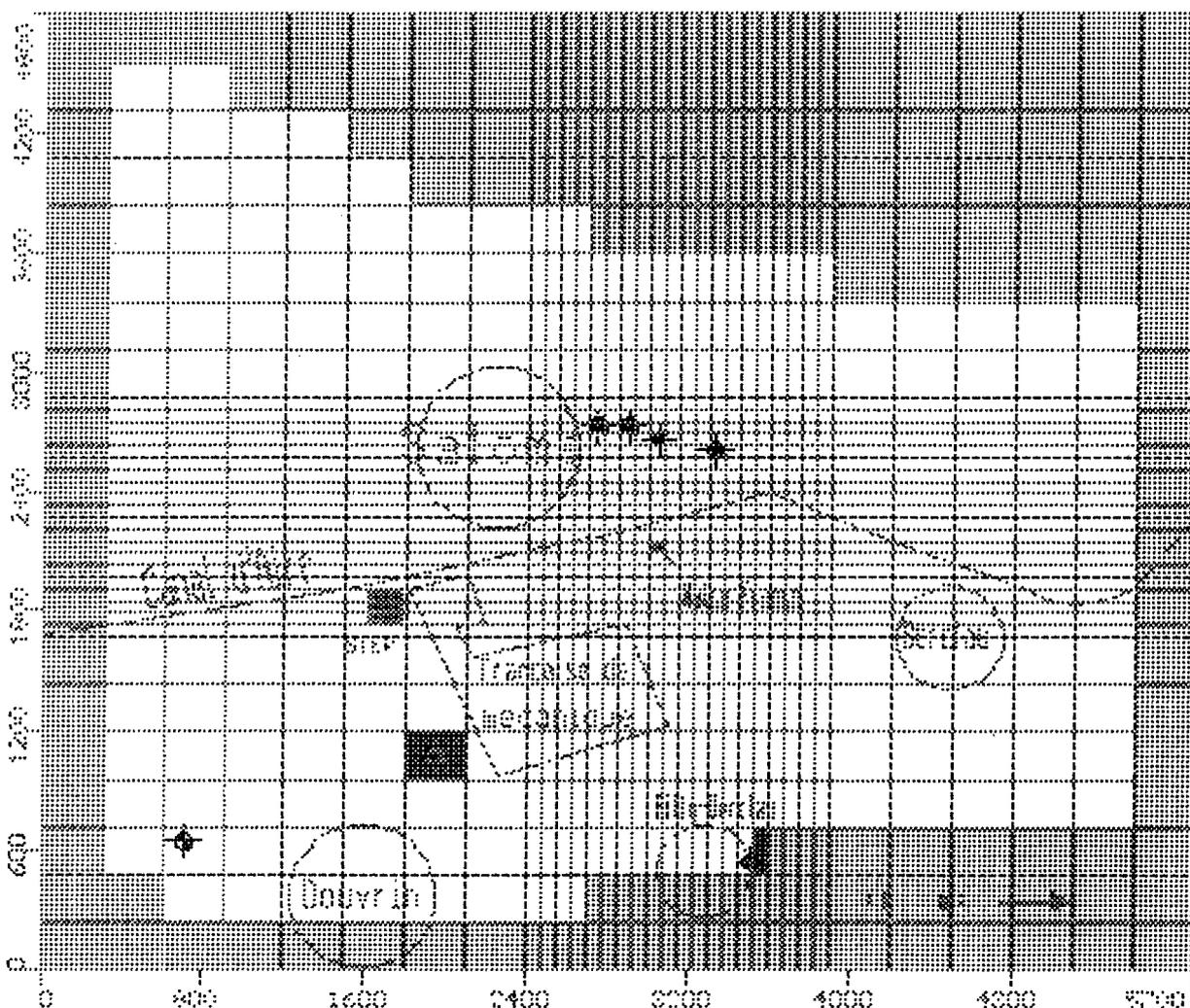


Figure 3.7 : Maillage affiné

Etant donné la finesse du nouveau maillage, les forages ont pu être modélisés individuellement. Les débits utilisés sont répertoriés dans le tableau 3.5.

Forage	Débit (m ³ /j)
F5	3600
F4	2400
F3	3000
F2	3000

Tableau 3.5 : Débits des forages

Pour modéliser les teneurs en bore, une concentration initiale de 30 µg/l a été affectée à tout le domaine pour simuler la teneur naturelle en bore de l'aquifère. De plus, une concentration constante de 250 µg/l a été affectée au canal d'Aire. Le calage a été effectué sur les valeurs des coefficients de dispersion en prenant comme valeur de référence les concentrations en bore du tableau 3.1. Le modèle a été calé pour les valeurs suivantes :

- Dispersion longitudinale : 1 m
- Dispersion horizontale : 0.1 m
- Dispersion verticale : 10⁻⁵ m

A la dispersion moléculaire une valeur nulle a été affectée afin de simplifier le problème, en partant de l'hypothèse que celle-ci est négligeable pour l'élément bore. Les résultats obtenus par la modélisation sont illustrés sur la figure 3.8.

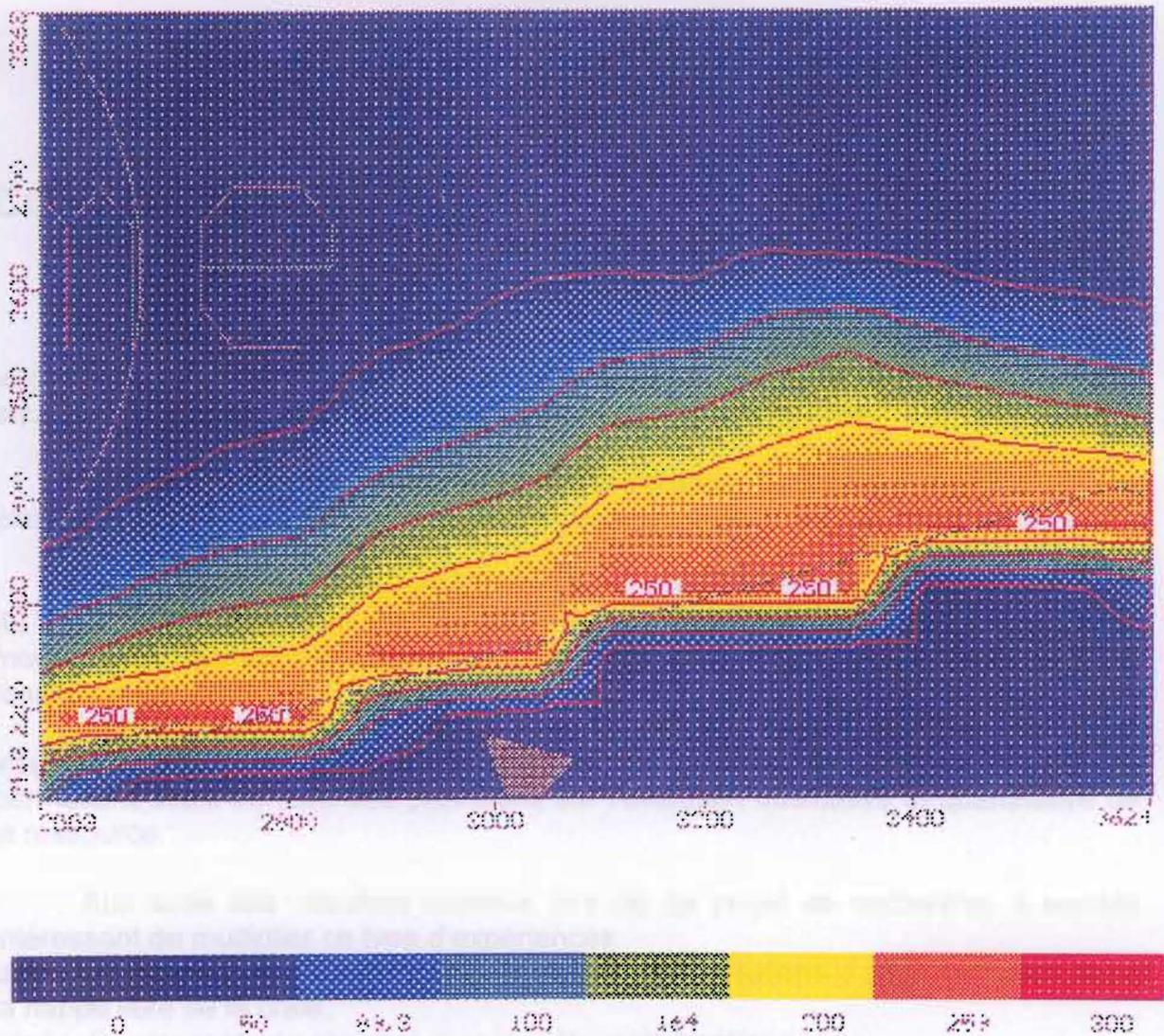


Figure 3.8 : Plume de pollution en bore dans la zone d'intérêt

On voit sur cette figure le comportement de la pollution en bore issue du canal. Le modèle nous permet donc de voir ici que les forages du champ captant ne sont pas atteints par la pollution. Les concentrations en bore deviennent raisonnables à partir d'une distance de 100 m au delà du canal.

Cependant, il faut garder un œil critique vis à vis de ces résultats. En effet, le modèle n'est qu'une simplification de phénomènes physiques beaucoup plus complexes. Comme évoqué précédemment dans ce rapport, le canal est ici modélisé par une recharge, ce qui est correct d'un point de vue bilan hydraulique (Entrées - Sorties), mais qui l'est beaucoup moins pour d'autres phénomènes. Ici aucun courant n'est affecté au canal, et ce modèle ne tient pas compte des temps de transfert des pollutions au travers de la zone non saturée. De plus, les phénomènes de sorption / désorption n'ont pas été pris en compte dans cette modélisation.

En outre, un tel modèle est une bonne première approche de la réalité et peut être suffisant, tout dépend de pourquoi il a été créé.

On voit ici apparaître une des grosses difficultés liées à la modélisation : l'acquisition des données. Plus le modèle est évolué, plus celles-ci sont nécessaires en quantité. Surgis alors un autre problème : la détermination de paramètres (tels que les constantes de sorption) dont la mesure n'est pas toujours évidente.

CONCLUSION

Les modèles mathématiques en hydrogéologie et en hydrochimie sont des outils très rigoureux. Ils sont devenus indispensables à la bonne gestion des aquifères, compte tenu de la multiplicité des données disponibles.

Le bore, selon les contextes hydrogéologiques, peut être considéré comme marqueur des défauts d'assainissement et donc indicateur des pollutions urbaines.

Dans le bassin Artois-Picardie, où l'eau alimentaire provient essentiellement du sous-sol, l'outil chimique qu'est le bore et l'outil informatique qu'est la modélisation montrent dans ce contexte toute leur utilité pour la gestion de la ressource en eau.

Leur utilisation sur des sites d'extension réduite permet de déterminer et de visualiser l'origine et l'étendue des pollutions, notamment d'origine domestique. Ils permettent aussi de faire des prévisions sur l'évolution qualitative et quantitative de la ressource.

Aux vues des résultats obtenus lors de ce projet de recherche, il semble intéressant de multiplier ce type d'expériences :
utilisation du bore comme marqueur et traceur des pollutions d'origine urbaine dans la nappe libre de la craie,
application au contexte régional d'un modèle mathématique.

En ce qui concerne l'élément bore, des améliorations dans les études seront apportées, en particulier pour le département de la Somme, notamment grâce à l'utilisation des mesures du rapport isotopique du bore (étude en cours réalisée par l'université de Nancy I en collaboration avec la SAGEP et l'université de Poitiers), mais aussi en quantifiant de façon plus précise les apports d'origines non-urbaines (engrais enrichis en oligo-éléments, rejets de certaines industries).

De plus, la poursuite d'études du mécanisme de migration du bore permettra d'affiner les résultats des travaux utilisant cet élément comme traceur naturel que ce soit en modélisation ou lors d'études de la répartition des concentrations.

BIBLIOGRAPHIE

- ^[1] – L.C. WROBEL, C.A. BREBBIA - Modelling, Measuring and Prediction – Water Pollution II – 1993 - p. 13 – 14.
- ^[2] – M. DETAY – Le forage d'eau – Masson – 1993.
- ^[3] – G. CASTANY – Principes et méthodes d'hydrogéologie – Dunod – 1982.
- ^[4] – WATERLOO HYDROGEOLOGIC – AquiferTest User's manual.
- ^[5] – O. PEGURRI – Utilisation d'AquiferTest – Laboratoire Cycle Urbain et Pollutions des Eaux - 1998.
- ^[6] – UNITED NATION – Computer Application For Groundwater Assessment And Management – 1993 - p. 56 – 63.
- ^[7] – N. GUIGUER, T. FRANZ - Visual MODFLOW User's Manual - Waterloo Hydrogeologic, Inc.
- ^[8] – C. ZHENG – A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems – S. S. Papadopoulos & Associates, Inc. – Octobre 1990.
- ^[9] – P. A. HSIEH, J. R. FRECKLETON – Documentation of a computer program to simulate horizontal-flow barriers using the U. S. geological survey's modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model – U. S. Departement of the Interior - 1993.
- ^[10] – M. G. Mc DONALD, A. W. HARBAUGH, B. R. ORR, D. J. ACKERMAN – A method of converting no-flow cells to variable-head cells for the U. S. geological survey's modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model – U. S. Departement of the Interior.
- ^[11] – M. C. HILL – Preconditioned Conjugate-Gradient 2, a computer program for solving ground-water flow equations – U. S. Departement of the Interior.
- ^[12] – D. W. POLLOCK – A partial tracking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model – U. S. Departement of the Interior – Septembre 1994.
- ^[13] – A. W. HARBAUGH – A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U. S. geological survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model – U. S. geological survey - 1990.
- ^[14] – S. A. LEAKE, D. E. PRUDIC – Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model – U. S. Geological Survey.
- ^[15] – G. Mc DONALD, A. W. HARBAUGH – A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model – Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey - 1988.
- ^[16] – O. PEGURRI – Utilisation de Visual MODFLOW – Laboratoire Cycle Urbain et Pollutions des eaux – document EUDIL – (en préparation).
- ^[17] – UNITED NATION – Computer Application For Groundwater Assessment And Management – p. 68.
- ^[18] – B. OUDDANE, S. LECLERCQ, M. WARTEL, H. MAILLOT, J-M. PAIN, D. BERNARD, F. BLIN – Méthodologie analytique de dosage du bore dans les eaux souterraines - TSM N°10 – Octobre 1996 – p.668 – 672.

- ^[19] – A. MONTIEL, B. WELTE – Synthèse bibliographie sur les méthodes de dosage du bore – TSM N°10 – Octobre 1996 – p.694 – 700.
- ^[20] – M. NICOLAÏ, C. ROSIN, P. HARTEMANN, M.-O. NICOLAS-SIMONNOT, M. SARDIN – Etat des connaissances sur les moyens d'élimination du bore présent dans l'eau – TSM N°10 – Octobre 1996 – p.686 – 689.
- ^[21] – J.-M. PAIN – Traceurs chimiques naturels, marqueurs de la pollution urbaine : exemple du bore – DEA IAA USTL-EUDIL – Juin 1996 – p. 9 - 13.
- ^[22] – B. OUDDANE, S. LECLERCQ, H. MAILLOT, D. BERNARD, F. BLIN – Apport du traçage naturel du bore dans l'évaluation de la pollution des eaux souterraines : cas de la nappe de la craie dans le bassin Artois-Picardie ; premiers résultats – Conférence AGHTM à Mulhouse – 10-12 Mai 1995 – p. 281.
- ^[23] – B. GUIOLLOT – Contribution à l'étude du bore dans les eaux du bassin parisien – Thèse de 3^{ème} cycle – Université Pierre et Marie Curie – Paris VI – 1978.
- ^[24] – M. NICOLAÏ – Détermination des origines du bore dans l'eau, par mesures de rapports isotopiques en ICP-MS – Universités de Nancy I, Pau et Poitiers – Juin 1996 – p. 5 - 6.
- ^[25] – CRAMPON, ROUX, BRACQ – Hydrogéologie de la craie en France – Hydrogéologie – 1993 – N°2, P. 81 – 123.
- ^[26] – B. FERRY – Part des transformations chimiques naturelles et provoquées dans la nappe de la craie du Nord de la France – DEA USTL-EUDIL – 1992.
- ^[27] – Ch. LALLY – Toxicité du bore. Evaluation du risque chez l'homme – Communication orale à la CHA de l'AGHTM à Lille – Janvier 1996.
- ^[28] – J.-M. PAIN, H. MAILLOT, D. BERNARD, F. BLIN, M. WARTEL, B. OUDDANE – Le bore marqueur de la pollution urbaine, le bore naturel : état des connaissances et illustrations régionales dans le bassin Artois-Picardie - TSM N°10 – Octobre 1996 – p.673 – 679.
- ^[29] – F. BLIN, D. BERNARD, J.-M. PAIN, H. MAILLOT, K. VALLEE, B. OUDDANE, M. WARTEL – Aperçu des teneurs en bore et en nickel dans les eaux du bassin Artois-Picardie. Conséquences sur les systèmes d'approvisionnement en eau potable - TSM N°10 – Octobre 1996 – p.680 – 685.
- ^[30] – VENGOSH et al. – Boron isotope variations during fractional evaporation of sea water : new constraint on the marine vs. Nonmarine debate – Geology – 1992 – V.20, p. 799 – 802.
- ^[31] – SCHWARZ et al. – Boron isotopic fractionation during clay adsorption from sea water – Earth and planetary science letter – 1969 – V. 6, p. 1 – 5.
- ^[32] – MOSSADIK, GUERROT, COCHERIE – Analyse isotopique du bore en spectrométrie de masse à source solide. Mise au point de la méthode et exemple d'application sur les aquifères du Bassin Parisien – Principaux résultats scientifiques et techniques du BRGM 92/93 – 1993 – p. 220 – 222.
- ^[33] – MOSSADIK – Analyse isotopique du bore en spectrométrie de masse à source solide. Mise au point de la méthode et exemple d'application sur les aquifères du Bassin Parisien – Université d'Orléans / Université de Poitiers – 1993.
- ^[34] – A. CAUTERMAN, B. GALLIOT – Champ captant de Salomé. Influence du canal d'Aire et risques de pollution – Ecole des Mines de Douai – 1991 – p. 14.
- ^[35] – E. CARLIER, P. CAULIER, A. CAUTERMAN, B. GALLIOT, F. MELLIEZ – Annales de la Société Géologique du Nord – Mars 1998 – p. 31 - 32.
- ^[36] – J.-M. PAIN – Traceurs chimiques naturels, marqueurs de la pollution urbaine : exemple du bore – DEA IAA USTL-EUDIL – Juin 1996 – p. 19.

ANNEXES

**RESULTATS DES ANALYSES DE TENEUR EN BORE DANS
LE DEPARTEMENT DU NORD.
(116 mesures)**

ANNEXE 1

Commune	Identification BRGM	Date	Concentration (µg/l)
ARTRES	00288X0010	12-mars-97	140,50
GRANDE-SYNTHÉ	00125X0005	26-mars-97	36,00
LANDRECIES	00381X0053	22-avr-97	<10
ROUBAIX	00144D0002	22-avr-97	346,00
WATTRELOS	00144D1167	22-avr-97	301,00
TRELON	00396X0113	22-avr-97	9,00
FERON	00395X0002	22-avr-97	13,00
TAISNIERES-EN-THIERACHE	00383X0049	22-avr-97	29,00
SAINTE-HILAIRE-SUR-HELPE	00384X0216	22-avr-97	<10
VIEUX-RENG	00302X0005	17-avr-97	<10
SAINTE-AUBIN	00384X0029	17-avr-97	<10
ROUSIES	00305X0292	17-avr-97	28,00
ROEULX	00285X0059	25-avr-97	58,00
POIX-DU-NORD	00381X0044	17-avr-97	26,00
FERIN	00273X0001	21-avr-97	56,00
LIGNY-HAUCOURT	00376X0004	22-avr-97	18,00
GOUZEAUCOURT	00367X0082	22-avr-97	<10
CLARY	00376X0008	22-avr-97	<10
ERRE	00281X0007	25-avr-97	73,00
AUCHY-LEZ-ORCHIES	00208X0010	25-avr-97	566,00
VICQ	00225X0011	12-mars-97	55,40
RAISMES	00217X0175	12-mars-97	187,40
FRESNES-SUR-ESCAUT	00218X0344	12-mars-97	135,10
SAINTE-HILAIRE-SUR-HELPE	00384X0216	13-nov-96	47,00
AVESNES-LE-SEC	00286X0361	27-nov-96	79,00
SOMAIN	00281X0327	27-nov-96	134,00
TOURCOING	00143B0102	03-déc-96	279,00
AVESNES-LES-AUBERT	00372X0029	04-déc-96	47,00
REJET-DE-BEAULIEU	00385X0021	04-déc-96	32,00
SOLESME	00374X0057	04-déc-96	68,00
WAVRECHAIN-SOUS-FAULX	00285X0440	04-déc-96	61,00
BERTRY	00377X0160	05-déc-96	47,00
VILLERS-GUISLAIN	00484X0003	10-déc-96	19,00
ARTRES	00288X0010	11-déc-96	66,00
CRESPIN	00225X0280	11-déc-96	150,00
LOCQUIGNOL	00296X0036	11-déc-96	47,00
LOCQUIGNOL	00296X0043	11-déc-96	48,00
SAULZOIR	00287X0101	11-déc-96	22,00
SIN-LE-NOBLE	00273X0038	12-déc-96	36,00
VIESLY	00373X0002	12-déc-96	46,00
AULNOYE-AYMERIES	00383X0033	16-oct-96	<10
BACHANT	00384X0196	16-oct-96	<10
BACHANT	00384X0168	16-oct-96	<10
BACHANT	00383X0044	16-oct-96	41,00
BOUSIGNIES	00216X0136	16-oct-96	335,00
ESQUERCHIN	00272X0026	16-oct-96	28,00
FERIN	00273X0005	16-oct-96	17,00
FERRIERE-LA-GRANDE	00305X0140	16-oct-96	<10
FRESNES-SUR-ESCAUT	00218X0344	16-oct-96	103,00
MADELEINE	00147A0350	16-oct-96	129,00
LIMONT-FONTAINE	00298X0013	16-oct-96	11,00
NEUVILLE-SUR-ESCAUT	00286X0270	16-oct-96	14,00
ONNAING	00218X0371	16-oct-96	69,00
ROUBAIX	00144D0002	16-oct-96	314,00
ROUSIES	00305X0292	16-oct-96	<10
SECLIN	00202B0059	16-oct-96	67,00
THIANT	00287X0122	16-oct-96	50,00
TOURCOING	00143B0102	16-oct-96	333,00

VIEUX-RENG	00302X0002	16-oct-96	<10
VIEUX-RENG	00302X0007	16-oct-96	<10
WATTRELOS	00144D0208	16-oct-96	276,00
MADELEINE	00147A0351	06-nov-96	166,00
ILLIES	00194A0397	07-nov-96	124,00
QUAROUBLE	00225X0016	12-mars-97	36,93
RAISMES	00283X0131	12-mars-97	101,10
WANDIGNIES-HAMAGE	00216X0115	12-mars-97	121,10
SAINT-AMAND-LES-EAUX	00216X0020	12-mars-97	588,60
ESTREES	00277X0034	25-mars-97	24,80
MARCHIENNES	00215X0044	25-mars-97	141,20
PECQUENCOURT	00274X0193	25-mars-97	55,80
BUGNICOURT	00278X0099	25-mars-97	20,20
MILLONFOSSE	00216X0021	25-mars-97	547,80
ESCAUDAIN	00282X0094	25-mars-97	59,70
MAUBEUGE	00305x0045	26-mai-97	34,00
AULNOYE-AYMERIES	00383x0174	26-mai-97	16,00
VIEUX-RENG	00302x0026	26-mai-97	6,00
FERRIERE-LA-GRANDE	00305x0106	26-mai-97	16,00
BACHANT	00383x0042	26-mai-97	24,00
LIMONT-FONTAINE	00298x0010	26-mai-97	8,00
RUMILLY-EN-CAMBRESIS	00368x0026	28-mai-97	22,00
GENECH	00204x0216	28-mai-97	309,00
BLECOURT	00364x0044	28-mai-97	18,00
FERRIERE-LA-GRANDE	00305x0290	28-mai-97	50,00
ORCHIES	00208x0123	28-mai-97	697,00
ENGLEFONTAINE	00381x0040	28-mai-97	29,00
BOUSIES	00381x0022	28-mai-97	<5
SAINT-BENIN	00378x0085	28-mai-97	7,00
CATTENIERES	00372x0075	04-juin-97	14,00
NEUVILLE-SUR-ESCAUT	00286x0271	10-juin-97	24,00
NEUVILLE-SUR-ESCAUT	00286x0269	10-juin-97	35,00
MARETZ	00377x0002	11-juin-97	99,00
WATTRELOS	00144d1166	11-juin-97	297,00
WATTRELOS	00144d1082	11-juin-97	315,00
POMMEREUIL	00378x0149	11-juin-97	<5
CATILLON-SUR-SAMBRE	00385x0010	11-juin-97	<5
SAINT-SOUPLET	00378x0156	11-juin-97	24,00
ROUBAIX	00144d0002	11-juin-97	338,00
LANDRECIES	00381x0053	12-juin-97	<5
FERON	00395x0196	12-juin-97	20,00
ETROEUNGT	00388x0024	12-juin-97	60,00
SECLIN	00202a0122	16-juin-97	108,00
SECLIN	00202a0125	16-juin-97	88,00
HOUPLIN-ANCOISNE	00202a0131	16-juin-97	224,00
WATTRELOS	00144c1075	18-juin-97	344,00
SOLESMES	00374x0057	09-juil-97	72,00
VENDEGIES-SUR-ECAILLON	00288x0040	09-juil-97	5,00
PRESEAU	00291x0183	09-juil-97	8,00
FOREST-EN-CAMBRESIS	00374x0140	09-juil-97	<5
THIANT	00287x0122	09-juil-97	62,00
SAINGHIN-EN-WEPPE	00201A0117	07-nov-96	113,00
SALOME	00194D0380	07-nov-96	84,00
ILLIES	00194A0398	12-nov-96	150,00
SAINT-ANDRE	00146B0019	12-nov-96	184,00
LILLE	00146B0688	12-nov-96	173,00
SAINT-ANDRE	00146B0018	12-nov-96	173,00
FERRIERE-LA-GRANDE	00305X0106	13-nov-96	42,00

RESULTATS DES ANALYSES DE TENEUR EN BORE DANS
LE DEPARTEMENT DU PAS-DE-CALAIS.
(158 mesures)

ANNEXE 2

Commune	Identification BRGM	Date	Concentration (µg/l)
COURCELLES-LE-COMTE	00353X0062	17-avr-97	13,00
LISBOURG	00181X0126	15-avr-97	12,00
FICHEUX	00353X0097	15-avr-97	10,00
HAUCOURT	00275X0014	15-avr-97	10,00
VILLERS-LES-CAGNICOURT	00276X0024	15-avr-97	14,00
ECOURT-SAINT-QUENTIN	00276X0032	15-avr-97	37,00
BUISSY	00362X0010	15-avr-97	33,00
INCHY-EN-ARTOIS	00362X0022	15-avr-97	37,00
OURTON	00188X0019	17-avr-97	10,00
MAGNICOURT-EN-COMTE	00188X0044	16-avr-97	22,00
MAGNICOURT-EN-COMTE	00188X0009	16-avr-97	13,00
TRANSLOY	00365X0033	17-avr-97	27,00
BERNEVILLE	00266X0030	14-avr-97	20,00
PAS-EN-ARTOIS	00344X0001	14-avr-97	24,00
WANQUETIN	00266X0028	14-avr-97	30,00
GUINES	00061X0093	10-avr-97	33,00
MAGNICOURT-SUR-CANCHE	00257X0012	11-avr-97	27,00
QUOEUX-HAUT-MAINIL	00248X0029	11-avr-97	34,00
AUXI-LE-CHATEAU	00248X0053	11-avr-97	26,00
PONCHEL	00248X0059	11-avr-97	27,00
GOMMECOURT	00352X0010	14-avr-97	25,00
BEAURAINS	00268X0042	09-avr-97	32,00
TILLOY-LES-MOFFLAINES	00268X0120	09-avr-97	32,00
WANCOURT	00268X0126	09-avr-97	46,00
AVESNES-LE-COMTE	00265X0008	09-avr-97	53,00
MONCHY-LE-PREUX	00275X0023	09-avr-97	41,00
ANZIN-SAINT-AUBIN	00263X0123	09-avr-97	78,00
WILLERVAL	00264X0025	09-avr-97	41,00
LIGNY-SAINT-FLOCHEL	00254X0007	16-avr-97	10,00
QUIERY-LA-MOTTE	00272X0029	16-avr-97	54,00
CORBEHEM	00272X0105	16-avr-97	89,00
AVION	00198X0081	16-avr-97	39,00
SIMENCOURT	00266X0035	14-avr-97	27,00
HAMES-BOUCRES	00061X0119	10-avr-97	33,00
WISSANT	00053X0002	09-avr-97	29,00
MAISNIL	00253X0006	11-avr-97	17,00
NOEUX-LES-AUXI	00255X0036	11-avr-97	34,00
GOUVES	00266X0068	14-avr-97	37,00
RIVIERE	00266X0066	14-avr-97	23,00
ARQUES	00122X0156	07-avr-97	73,00
ENQUIN-LES-MINES	00126X0001	02-avr-97	23,00
BOMY	00181X0038	10-avr-97	34,00
THIEMBRONNE	00117X0001	10-avr-97	43,00
NIELLES-LES-BLEQUIN	00113X0090	10-avr-97	36,00
SAINT-MARTIN-D'HARDINGHEM	00118X0095	10-avr-97	34,00
RIENCOURT-LES-CAGNICOURT	00361X0005	30-avr-97	26,00
BELLEBRUNE	00104X0156	25-avr-97	160,00
ESTEVELLES	00205X0126	22-avr-97	56,00
ANNAY	00205X0001	22-avr-97	200,00
BUCQUOY	00353X0060	17-avr-97	10,00
LIGNY-THILLOY	00358X0011	17-avr-97	15,00
FILLIEVRES	00251X0016	24-mars-97	10,00
MONCHY-CAYEUX	00186X0016	24-mars-97	10,00
ABLAIN-SAINT-NAZAIRE	00262X0002	21-mars-97	86,00
ORVILLE	00343X0207	21-mars-97	10,00
DOUVVIN	00194D0214	24-mars-97	140,00
ROUVROY	00271X0037	26-mars-97	46,00
HENIN-BEAUMONT	00271X0016	26-mars-97	25,00
HENIN-BEAUMONT	00205X0214	26-mars-97	37,00
HENIN-BEAUMONT	00205X0210	26-mars-97	46,00

NOYELLES-GODAULT	00206X0326	26-mars-97	38,00
BALINGHEM	00066X0149	25-mars-97	12,00
FREVIN-CAPELLE	00262X0012	25-mars-97	33,00
OEUF-EN-TERNOIS	00251X0005	25-mars-97	25,00
BERGUENEUSE	00186X0012	25-mars-97	23,00
FREVENT	00256X0020	25-mars-97	25,00
COURRIERES	00205X0091	28-mars-97	62,00
ANDRES	00062X0156	28-mars-97	27,00
CHOCQUES	00191X0158	17-mars-97	44,00
FOUQUEREUIL	00191X0108	17-mars-97	73,00
HINGES	00192X0030	17-mars-97	72,00
NEUVIREUIL	00271X0019	19-mars-97	38,00
IZEL-LES-EQUERCHIN	00271X0023	19-mars-97	57,00
SAILLY-EN-OSTREVENT	00276X0027	19-mars-97	32,00
SAINT-VENANT	00135X0013	19-mars-97	570,00
HOUDAIN	00195X0079	19-mars-97	33,00
WIMEREUX	00057X0004	18-mars-97	140,00
VENDIN-LE-VIEIL	00198X0089	20-mars-97	33,00
LENS	00198X0293	20-mars-97	250,00
SAINT-VENANT	00135X0012	19-mars-97	610,00
ESTREE-WAMIN	00257X0003	21-mars-97	10,00
HOUVIN-HOUVIGNEUL	00257X0002	21-mars-97	14,00
HAUTECLOQUE	00252X0003	21-mars-97	10,00
PONCHEL	00248X0059	25-mars-97	31,00
AUCHY-LES-MINES	00193X0020	24-mars-97	290,00
TENEUR	00185X0009	24-mars-97	17,00
BLANGY-SUR-TERNOISE	00185X0012	24-mars-97	27,00
CROIX-EN-TERNOIS	00252X0013	24-mars-97	10,00
BAYENGHEM-LES-EPERLECCQUES	00068X0127	23-avr-97	12,00
HOULLE	00075X0005	23-avr-97	99,00
EPERLECCQUES	00068X0122	23-avr-97	10,00
MOULLE	00075X0001	23-avr-97	73,00
BLENDECQUES	00122X0002	23-avr-97	37,00
ECQUES	00122X0212	23-avr-97	15,00
VIMY	00264x0074	10-juin-97	17,00
ANNAY	00205x0001	10-juin-97	30,00
ESTEVELLES	00205x0126	10-juin-97	50,00
SAINT-LEONARD	00103x0308	19-juin-97	120,00
BELLEBRUNE	00104x0156	17-juin-97	150,00
WINGLES	00194d0037	26-juin-97	88,00
BARASTRE	00365x0003	26-juin-97	17,00
FREMICOURT	00365x0009	26-juin-97	<10
QUIERY-LA-MOTTE	00272x0031	25-juin-97	47,00
AVION	00264x0134	24-juin-97	49,00
QUIERY-LA-MOTTE	00272x0032	25-juin-97	34,00
OPPY	00271x0003	27-juin-97	88,00
GUINES	00061x0077	26-juin-97	15,00
COQUELLES	00061x0021	26-juin-97	27,00
WISSANT	00053x0002	03-juin-97	24,00
OISY-LE-VERGER	00277x0016	13-juin-97	71,00
EPINOY	00278x0020	13-juin-97	32,00
BUCQUOY	00352x0011	17-juin-97	26,00
GREVILLERS	00358x0013	17-juin-97	39,00
VILLERS-AU-FLOS	00365x0022	17-juin-97	46,00
MORVAL	00474x0001	17-juin-97	31,00
SAUCHY-LESTREE	00277x0015	19-juin-97	42,00
PRONVILLE	00362x0019	19-juin-97	37,00
QUEANT	00362x0012	19-juin-97	67,00
HAUCOURT	00275x0014	13-juin-97	<10
DURY	00276x0019	13-juin-97	13,00
ECOURT-SAINT-QUENTIN	00276x0032	13-juin-97	21,00

BIACHE-SAINT-VAAST	00271x0050	12-juin-97	56,00
SAILLY-EN-OSTREVENT	00276x0027	12-juin-97	26,00
VITRY-EN-ARTOIS	00272x0173	12-juin-97	26,00
ANDRES	00062x0001	05-juin-97	11,00
SAINT-MARTIN-AU-LAERT	00075x0095	04-juin-97	17,00
MORCHIES	00361x0034	06-juin-97	11,00
SAINT-LEGER	00354x0066	06-juin-97	22,00
BOISLEUX-SAINT-MARC	00354x0002	06-juin-97	16,00
CROISILLES	00354x0069	06-juin-97	7,00
ECOUST-SAINT-MEIN	00361x0012	06-juin-97	7,00
BLENDECQUES	00122x0001	18-juin-97	36,00
BAYENGHEM-LES-EPERLECQUES	00068x0148	18-juin-97	13,00
HEURINGHEM	00122x0413	18-juin-97	11,00
HOULLE	00075x0093	18-juin-97	71,00
MOULLE	00075x0002	18-juin-97	105,00
MAMETZ	00126x0002	10-avr-97	29,00
TRESCAULT	00367x0019	26-mai-97	14,00
BUISSY	00362X0010	26-mai-97	21,00
ELEU-DIT-LEAUWETTE	00198X0312	16-mai-97	270,00
LIEVIN	00197X0037	16-mai-97	220,00
LIEVIN	00197X0036	16-mai-97	65,00
CAMBLAIN-CHATELAIN	00188X0067	22-mai-97	38,00
BEUVRY	00192X0110	22-mai-97	96,00
BEUVRY	00192X0137	22-mai-97	130,00
DIVION	00188X0014	22-mai-97	31,00
HOUDAIN	00195X0163	22-mai-97	53,00
ROMBLY	00127X0773	23-mai-97	32,00
BEUGNY	00365X0013	02-juin-97	22,00
FRESNOY-EN-GOHELLE	00271X0014	02-juin-97	43,00
PLOUVAIN	00275X0036	29-mai-97	23,00
SAINT-LEONARD	00103X0002	07-mai-97	110,00
SAMER	00108X0004	07-mai-97	25,00
ALLOUAGNE	00184X0140	07-mai-97	33,00
AUMERVAL	00183X0157	07-mai-97	41,00
BEUVRY	00192X0110	14-mai-97	83,00
WINGLES	00194D0038	13-mai-97	160,00
LEULINGHEN-BERNES	00057X0001	03-juin-97	110,00

**RESULTATS DES ANALYSES DE TENEUR EN BORE DANS
LE DEPARTEMENT DE LA SOMME.
(226 mesures)**

ANNEXE 3

Commune	Nom	Identification	Date	Concentration (µg/l)
AILLY SUR SOMME	CAPTAGE	46-5X-14	28-mai-97	11
ARQUEVES	CAPTAGE	34-8X-7	1-avr-97	25
AUCHONVILLERS	CAPTAGE	35-6X-28	28-mai-97	18
AUMATRE	CAPTAGE	44-8X-27	30-mars-98	18
AUTHEUX	CAPTAGE	34-1X-16	23-juin-97	19
AVELUY	CAPTAGE	47-2X-7	14-avr-97	10
BALATRE	CAPTAGE	63-8X-2	9-avr-97	31
BARLY	CAPTAGE	34-2X-9	8-avr-97	18
BEAUCOURT SUR L'ANCRE	CAPTAGE	35-6X-1	27-mai-97	13
BEAUMONT-HAMEL	CAPTAGE DE BEAUMONT	35-6X-6	27-mai-97	10
BEAUMONT-HAMEL	CAPTAGE DE HAMEL	35-6X-4	27-mai-97	10
BEAUMONT-HAMEL	CAPTAGE DE HAMEL	35-6X-4	22-oct-97	19,8
BEAUMONT-HAMEL	CAPTAGE DE HAMEL	35-6X-4	16-déc-97	13,5
BEAUMONT-HAMEL	CAPTAGE DE HAMEL	35-6X-4	3-févr-98	17
BEAUVAL	CAPTAGE NOUVEAU	34-6X-26	9-juin-97	22
BEAUVAL	CAPTAGE NOUVEAU	34-6X-26	31-mars-98	20
BECORDEL-BECOURT	CAPTAGE DE BECORDEL	47-2X-63	28-mai-97	19
BECORDEL-BECOURT	CAPTAGE DE BECOURT	47-2X-9	28-mai-97	18
BERTANGLES	CAPTAGE DU LOTISSEMENT	46-2X-7	8-avr-97	64
BERTRANCOURT	CAPTAGE	35-5-17	1-avr-97	10
BERTRANCOURT	CAPTAGE	35-5-17	22-mai-98	21
BOUFFLERS	CAPTAGE ANCIEN	24-7X-201	31-mars-98	18
BUS LES ARTOIS	CAPTAGE	35-5X-21	1-avr-97	17
BUSSU	CAPTAGE	48-6X-1	22-avr-97	21
CARNOY	CAPTAGE	47-3X-7	2-avr-97	39
CHUIGNOLLES	CAPTAGE	47-7X-4	15-avr-97	19
CONTALMAISON	CAPTAGE	47-3X-23	15-avr-97	14
CONTEVILLE	CAPTAGE	33-3X-6	8-avr-97	19
CONTOIRE-HAMEL	CAPTAGE	63-5X-39	25-févr-97	40
COTTENCHY	CAPTAGE	62-3X-2	16-juin-97	21
COURCELLES AU BOIS	CAPTAGE	35-5X-19	1-avr-97	18
COURCELLES AU BOIS	CAPTAGE	35-5X-19	22-mai-98	19
FRESNOY-AU-VAL	CAPTAGE	61-3X-8	4-juin-97	12
CRAMONT	CAPTAGE	33-3-39§43	23-juin-97	22
CROIXRAULT	CAPTAGE	61-2X-3	9-avr-97	10
CURCHY	CAPTAGE	63-4X-5	25-juin-97	31
DEMUIN	CAPTAGE	63-1X-51	9-avr-97	24
DOUILLY	CAPTAGE	64-3X-16	22-avr-97	32
EPLESSIER	CAPTAGE	61-2X-5	4-juin-97	19

EQUANCOURT	CAPTAGE	36-6X-214	2-avr-97	14
ESTREES-SUR-NOYE	CAPTAGE	62-2X-4	21-avr-97	19
ETINEHEM	CAPTAGE	47-6X-16	15-avr-97	15
ETOILE (L')	CAPTAGE	45-3X-15	10-juin-97	20
ETRICOURT-MANANCOURT	CAPTAGE	48-2X-31	26-juin-97	10
FERRIERES	CAPTAGE	46-5X-78	9-avr-97	12
FLERS	CAPTAGE	35-8X-213	2-avr-97	18
FOLLEVILLE	CAPTAGE	80-3X-2	30-mars-98	21
FONTAINE-LE-SEC	CAPTAGE	45-5X-48	23-avr-97	11
FORCEVILLE	CAPTAGE	35-5X-12	28-avr-97	10
FORCEVILLE	CAPTAGE	35-5X-12	20-mai-97	22
FOURCIGNY	CAPTAGE	61-5X-1	26-mars-97	10
FRANSU	CAPTAGE	33-8X-2	8-avr-97	15
FREMONTIERS	CAPTAGE	61-8X-7	2-avr-97	22
GAMACHES	CAPTAGE	44-2X-43	28-mai-97	18
GAMACHES	CAPTAGE	44-2X-43	30-mars-98	21
GUYENCOURT-SAULCOURT	CAPTAGE	48-3X-2	22-avr-97	68
HALLENCOURT	CAPTAGE D'HOCQUINCOURT	45-1X-13	27-mai-97	12
HANGEST SUR SOMME	CAPTAGE	45-3X-18	10-juin-97	25
HEDAUVILLE	CAPTAGE	35-5X-4	28-avr-97	10
HEDAUVILLE	CAPTAGE	35-5X-4	20-mai-97	25
HESCAMPS SAINT CLAIR	CAPTAGE	61-6X-5	27-mai-97	10
HEUCOURT-CROQUOISON	CAPTAGE	45-5X-7	23-avr-97	10
HEUZECOURT	CAPTAGE	34-1X-3	16-avr-97	16
HIERMONT	CAPTAGE	33-4X-23	8-avr-97	24
HUPPY	CAPTAGE	44-4X-35	28-mai-97	19
IRLES	CAPTAGE	35-7X-13	27-mai-97	11
JUMEL	CAPTAGE	62-7X-5	28-mai-97	10
JUMEL	CAPTAGE	62-7X-5	30-mars-98	10
LAFRESGUIMONT SAINT MARTIN	CAPTAGE DE MONTMARQUET	60-4X-1	12-févr-97	15
LAFRESGUIMONT SAINT MARTIN	CAPTAGE DU TRONCHOY	61-1X-5	29-avr-97	14
LEALVILLERS	CAPTAGE	34-8X-3	28-avr-97	10
LEALVILLERS	CAPTAGE	34-8X-3	20-mai-97	14
LESBOEUFS	CAPTAGE SOUS LE CHATEAU D'EAU	47-4X-2	2-avr-97	12
LIGNIERES-CHATELAIN	CAPTAGE	61-1X-36	27-mai-97	12
LONGPRE LES CORPS SAINTS	CAPTAGE	45-3X-4	28-mai-97	20
LONGUEVILLE	CAPTAGE	34-6X-8	8-avr-97	50
MAILLY-RAINEVAL	CAPTAGE	62-8X-31	1-avr-97	19
MAZICOURT	CAPTAGE	33-4X-11	16-avr-97	15
MAMETZ	CAPTAGE	47-3X-14	15-avr-97	10

MARLERS	CAPTAGE	61-5X-30	26-mars-97	21
MESNIL EN ARROUAISE	CAPTAGE	36-5X-203	2-avr-97	15
MESNIL MARTINSART	CAPTAGE	35-6X-19	25-juin-97	32
MESNIL SAINT GEORGES	CAPTAGE	81-1X-9	7-avr-97	15
MILLENCOURT	CAPTAGE	47-1X-4	14-avr-97	12
MONTAGNE FAYEL	CAPTAGE	45-7X-30	9-avr-97	16
MONTIGNY LES JONGLEURS	CAPTAGE	33-4X-4	16-avr-97	21
FIEFFES-MONTRELET	CAPTAGE	34-5X-20	8-avr-97	39
MOYENCOURT LES POIX	CAPTAGE	61-3X-19	26-mars-97	15
NAMPS MAISNIL	CAPTAGE DE RUMAINNIL	61-4X-20	2-avr-97	22
NAMPS MAISNIL	CAPTAGE DE NAMPS AU MONT	61-4X-24	2-avr-97	18
NAMPTY	CAPTAGE	62-1X-44	2-avr-97	21
NAMPTY	CAPTAGE	62-1X-44	30-mars-98	18
NEUVILLE AU BOIS	CAPTAGE	44-4X-6	23-avr-97	26
OCCOCHES	CAPTAGE	34-2X-62	27-mai-97	13
OFFOY	CAPTAGE	64-6X-12	22-avr-97	19
GRATTEPANCHE	CAPTAGE	62-2X-15	29-avr-97	18
OVILLERS LA BOISSELLE	CAPTAGE	47-2X-59	14-avr-97	22
PICQUIGNY	CAPTAGE	45-8X-1	10-juin-97	28
POIX DE PICARDIE	CAPTAGE DE POIX FORAGE	61-2X-23	30-mars-98	23
POULAINVILLE	CAPTAGE	46-6X-149	23-juin-97	19
PROUZEL	CAPTAGE	62-1X-2	2-avr-97	21
PYS	CAPTAGE	35-7-12	27-mai-97	11
QUERRIEU	CAPTAGE	46-7X-1	16-juin-97	21
QUEVAUVILLERS	CAPTAGE	61-4X-6	24-juin-97	24
RAINCHEVAL	CAPTAGE	34-8X-8	1-avr-97	52
RAINNEVILLE	CAPTAGE	46-3X-1	4-juin-97	21
RAMBURELLES	CAPTAGE	44-4X-18	3-juin-97	18
REMAISNIL	CAPTAGE	34-1X-7	16-avr-97	15
REMIENCOURT	CAPTAGE	62-3X-26	21-avr-97	13
PIERREGOT	CAPTAGE	46-3X-9	4-juin-97	21
SAILLY-LAURETTE	CAPTAGE	47-6X-2	15-avr-97	13
SAINTE GRATIEN	CAPTAGE	46-3X-14	8-avr-97	18
SAUVILLERS MONGIVAL	CAPTAGE	62-8X-28	1-avr-97	10
SENLIS LE SEC	CAPTAGE	47-1X-9	23-avr-97	28
SUZANNE	CAPTAGE	47-3X-6	15-avr-97	10
THIEULLOY LA VILLE	CAPTAGE	61-1X-16	27-mai-97	10
TILLOY LES CONTY	CAPTAGE	62-5X-3	2-avr-97	25
VARENNES	CAPTAGE	35-5X-6	23-avr-97	21
VAUCHELLES LES AUTHIE	CAPTAGE	34-8X-28	23-avr-97	44

VAUX EN AMIENOIS	CAPTAGE DE FREMONT	46-1X-1	27-mai-97	116
VAUX MARQUENNEVILLE	CAPTAGE	44-4X-5§66	27-mai-97	16
VELENNES	CAPTAGE	61-8X-1	2-avr-97	15
LA VICOIGNE	CAPTAGE	34-6X-5	8-avr-97	12
VILLERS TOURNELLE	CAPTAGE	80-4X-29	1-avr-97	16
VISMES AU VAL	CAPTAGE	44-4X-2	3-juin-97	23
BRAY SUR SOMME	LOCAL CAPTAGE		26-mai-97	20
CONTY	FORAGE F2 ROUTE DE LUZIERES	61-8X-50	29-avr-97	25
GRECOURT	LOCAL CAPTAGE		17-juin-97	31
HAM	CAPTAGE D'ESTOUILLY	64-7X-190	1-avr-98	42
HAM	RESERVOIR DE HAM		13-mai-97	41
MUILLE VILLETTE	CAPTAGE	64-6X-107	1-avr-98	85
EPPEVILLE	RESERVOIR		25-mars-97	61
EPPEVILLE	RESERVOIR		26-mai-97	52
SAINT LEGER LES DOMART	CAPTAGE	33-8X-45	31-mars-98	10
SAINT LEGER LES DOMART	RESERVOIR SUR PUIITS		23-juin-97	23
HALLOY LES PERNOIS	LOCAL CAPTAGE		23-juin-97	27
SANCOURT	CAPTAGE	64-2X-5	17-juin-97	32
BOVES	RESERVOIR DE LONGUEAU VILLE		13-mai-97	45
CURLU	CAPTAGE	47-4X-78	1-avr-98	32
CURLU	LOCAL CAPTAGE		18-juin-97	30
CREUSE	LOCAL CAPTAGE		18-juin-97	37
CAVILLON	CAPTAGE	45-7X-38	10-juin-97	19
MIANNAY	RESERVOIR DE MIANNAY		23-juin-97	24
ONEUX	CAPTAGE F1	33-3X-45	31-mars-98	23
ONEUX	LOCAL CAPTAGE		26-mars-97	11
ONEUX	LOCAL CAPTAGE F2		26-mai-97	18
QUESNOY LE MONTANT	CAPTAGE	32-7X-8	11-juin-97	63
SAILLY-FLIBEAUCOURT	CAPTAGE NOUVION	32-4X-88	31-mars-98	34
SAINT GERMAIN SUR BRESLE	CAPTAGE	60-4X-16	11-juin-97	23
SALEUX	LOCAL CAPTAGE		13-mai-97	23
WARGNIES	LOCAL CAPTAGE		23-juin-97	38
COIGNEUX	LOCAL CAPTAGE		9-juin-97	24
ACHEUX EN AMIENOIS	LOCAL CAPTAGE		11-mars-97	18
ALBERT	CAPTAGE MILLENCOURT	47-2X-49	1-avr-98	25
BERNAVILLE	LOCAL CAPTAGE		27-mai-97	11
ARGOEUVES	AEP AGOEUVES CCI	46-5X0084	30-mars-98	14,7
COCQUEREL	LOCAL CAPTAGE		29-avr-97	18
COCQUEREL	LOCAL CAPTAGE		20-mai-97	18
AIGNEVILLE	SEMI ENTERRE D'AIGNEVILLE		28-mai-97	16

PONT REMY	RESERVOIR DE PONT REMY		26-mai-97	13
PONT REMY	LOCAL CAPTAGE		26-mars-97	16
GUERBIGNY	CAPTAGE AVANT TRAITEMENT	63-6X-42	1-avr-98	24
GUERBIGNY	CAPTAGE APRES TRAITEMENT		7-avr-97	19
CARTIGNY	LOCAL CAPTAGE		20-mai-97	11
LAFRESGUIMONT SAINT MARTIN	GUIBERMESNIL NOUVEAU FORAGE	61-1X-0048	30-mars-98	25
SENARPONT	CAPTAGE LIGER FORAGE 1	44-8X-0064	13-mai-97	21
LAFRESGUIMONT SAINT MARTIN	GUIBERMESNIL NOUVEAU CAP		13-mai-97	28
POTTE	CAPTAGE F1	64-1X-90	1-avr-98	34
ROISEL	CAPTAGE	48-3X-12	1-avr-98	33
ROISEL	LOCAL CAPTAGE		14-mai-97	31
CAOURS	CAPTAGE FOND DE L'HEURE F1	33-5X-138	31-mars-98	22
CAIX	CAPTAGE F3.1	63-2X-69	1-avr-98	29
CAIX	LOCAL CAPTAGE F1.2		5-févr-97	50
CAIX	LOCAL CAPTAGE F3.1		5-févr-97	18
BERNAY EN PONTHEU	LA BUCAILLE F1	23-8X-67	31-mars-98	22
VRON	CAPTAGE D'HEMENCOURT F1	23-4X-242	31-mars-98	29
VRON	LOCAL CAPTAGE D'HEMENCOURT		10-juin-97	19
CRECY EN PONTHEU	RESERVOIR CRECY		11-juin-97	19
LUCHEUX	REFOULEMENT VERS LUCHEUX		3-juin-97	12
LOEUILLY	LOCAL CAPTAGE		29-avr-97	31
GLISY	LOCAL CAPTAGE ANCIEN		16-juin-97	24
GLISY	LOCAL CAPTAGE NOUVEAU		16-juin-97	18
GUEUDECOURT	CAPTAGE	35-8X-205	18-juin-97	25
HARPONVILLE	CAPTAGE	34-8X-0001	22-mai-98	53
HARPONVILLE	CAPTAGE RESERVOIR		16-juin-97	42
CHAUSSEE-TIRANCOURT (LA)	CAPTAGE RESERVOIR		10-juin-97	31
MOISLAINS	CAPTAGE RESERVOIR		20-mai-97	17
AILLY SUR NOYE	LOCAL CAPTAGE SNCF		25-juin-97	24
RETHONVILLERS	LOCAL CAPTAGE		2-juin-97	25
DOMART-SUR-LA-LUCE	LOCAL CAPTAGE		16-juin-97	48
ROIGLISE	CAPTAGE	63-8X-0066	2-juin-97	24
ESTREBOEUF	LOCAL CAPTAGE		11-juin-97	24
SAVEUSE	RESERVOIR S. ENTERRE		16-juin-97	26
FRESSENEVILLE	CAPTAGE RESERVOIR		27-mai-97	103
MONCHY LAGACHE	LOCAL CAPTAGES		3-juin-97	20
ATHIES	CAPTAGE	64-2X-20	17-juin-97	39
BEAUMONT-HAMEL	BEAUMONT CENTRE		4-mai-98	28
BERNES	LOCAL CAPTAGE		25-mars-97	20
BONNEVILLE	RESERVOIR BONNEVILLE		4-juin-97	18

MORVAL	CAPTAGE		17-juin-97	31
PAS EN ARTOIS	REFOULEMENT APRES TRAITEMENT		14-avr-97	24
VOYENNES	CAPTAGE	64-2X-21	22-avr-97	23
AUMATRE	AEP AUMATRE	44-8X0027	30-mars-98	18
BEAUVAL	AEP BEAUVAL	34-6X0010	31-mars-98	20
BERNAY EN PONTHEIU	AEP LA BUCAILLE	23-8X0067	31-mars-98	22
BOUFFLERS	AEP BOUFFLERS	24-7X0201	31-mars-98	18
CAIX	AEP CAIX 3 F3.1	63-2X0069	1-avr-98	29
ALBERT	AEP ALBERT RT DE MILLENCOURT	47-2X0049	1-avr-98	25
CAOURS	AEP ABBEVILLE FOND DE L'HEURE	33-5X0141	31-mars-98	22
CURLU	AEP CURLU	47-4X0078	1-avr-98	32
EPPEVILLE	AEP EPPEVILLE-MUILLE VILLETTE	64-6X0107	1-avr-98	85
FOLLEVILLE	AEP FOLLEVILLE	80-3X0002	30-mars-98	21
GAMACHES	AEP GAMACHES	44-2X0043	30-mars-98	21
GUERBIGNY	AEP GUERBIGNY	63-6X0042	1-avr-98	24
HAM	AEP HAM CAP D'ESTOUILLY	64-7X0190	1-avr-98	42
JUMEL	AEP JUMEL	62-7X0005	30-mars-98	10
LAFRESGUIMONT SAINT MARTIN	AEP GUIBERMESNIL	61-1X0048	30-mars-98	25
NAMPTY	AEP NAMPTY	62-1X0044	30-mars-98	18
ONEUX	AEP ONEUX	33-3X0045	31-mars-98	23
POIX DE PICARDIE	AEP POIX DE PICARDIE	61-2X0023	30-mars-98	23
POTTE	AEP DE BETHENCOURT POTTE	64-1X0089	1-avr-98	34
ROISEL	AEP HAUTE COLOGNE ROISEL	48-3X0012	1-avr-98	33
SAILLY-FLIBEAUCOURT	AEP NOUVION EN PONTHEIU	32-4X0088	31-mars-98	34
SAINT LEGER LES DOMART	AEP SAINT LEGER LES DOMART	33-8X0045	31-mars-98	10
VRON	AEP VRON A HEMENCOURT	23-4X0242	31-mars-98	29

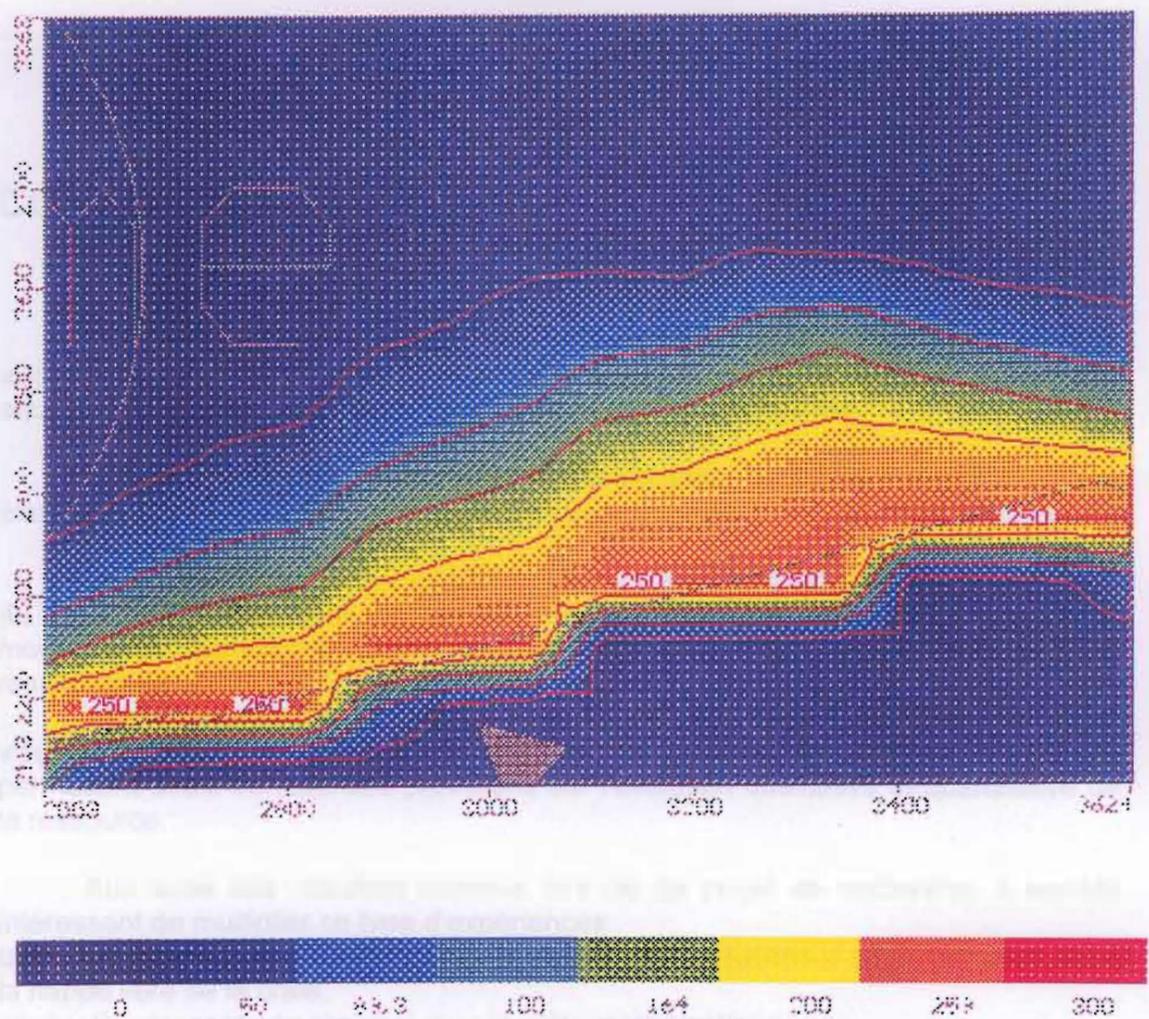


Figure 3.8 : Plume de pollution en bore dans la zone d'intérêt

On voit sur cette figure le comportement de la pollution en bore issue du canal. Le modèle nous permet donc de voir ici que les forages du champ captant ne sont pas atteints par la pollution. Les concentrations en bore deviennent raisonnables à partir d'une distance de 100 m au delà du canal.

Cependant, il faut garder un œil critique vis à vis de ces résultats. En effet, le modèle n'est qu'une simplification de phénomènes physiques beaucoup plus complexes. Comme évoqué précédemment dans ce rapport, le canal est ici modélisé par une recharge, ce qui est correct d'un point de vue bilan hydraulique (Entrées - Sorties), mais qui l'est beaucoup moins pour d'autres phénomènes. Ici aucun courant n'est affecté au canal, et ce modèle ne tient pas compte des temps de transfert des pollutions au travers de la zone non saturée. De plus, les phénomènes de sorption / désorption n'ont pas été pris en compte dans cette modélisation.

En outre, un tel modèle est une bonne première approche de la réalité et peut être suffisant, tout dépend de pourquoi il a été créé. On voit ici apparaître une des grosses difficultés liées à la modélisation : l'acquisition des données. Plus le modèle est évolué, plus celles-ci sont nécessaires en quantité. Surgit alors un autre problème : la détermination de paramètres (tels que les constantes de sorption) dont la mesure n'est pas toujours évidente.