

DI

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE LILLE I

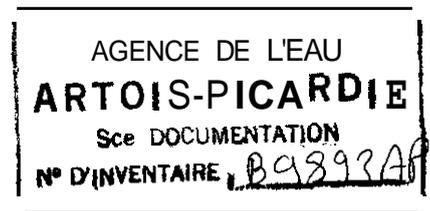
DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES
DE GENIE CIVIL

**PARTS DES TRANSFORMATIONS CHIMIQUES
NATURELLES ET PROVOQUEES
DANS LA NAPPE DE LA CRAIE
DU NORD DE LA FRANCE**

REALISE PAR **BERNARD FERRY**

SEPTEMBRE 1992





RESUME

Ce rapport comporte deux volets :

Le premier est une synthèse bibliographique destinée aux personnes qui désirent acquérir des connaissances sur les structures hydrogéologiques du Nord de la France et sur les transformations chimiques naturelles qui se développent dans la nappe de la craie. (A).
double

Deux unités hydrogéologiques se distinguent :

- La nappe libre de la craie **séno-turonienne** qui s'enfonce au Nord d'une courbe Guines-Valenciennes sous un recouvrement tertiaire (sable et argile) dans la plaine des Flandres.
- Le Bassin d'Orchies où la nappe de la craie est **captive** dans une cuvette sous des sédiments argileux et où plusieurs nappes peuvent se **mélanger**.

Les principales transformations naturelles décrites sont :

- Les échanges de bases, qui par un échange cationique entre l'eau et la couverture argileuse provoquent la baisse des teneurs en ions Mg^{2+} et Ca^{2+} et l'augmentation des ions Na^+ , K^+ , F^{2-} , Cl^- lors du passage en captivité de la nappe sous un recouvrement argileux.
- Les oxydoréductions (dont la dénitrification) qui expliquent que dans une nappe captive et anaérobie, il peut y avoir disparition des nitrates et apparitions de sulfates et d'ions métalliques réduits, et ce par des phénomènes **chimiques** ou biochimiques.
- La dissolution : dans le cas d'un complexe limons sur craie, il a été observé un lessivage des limons par les **précipitations** acides. Dans la partie supérieure de la couche de la craie, on trouve une zone altérée au dessus d'un horizon d'**accumulation** des minéraux insolubles.
- L'effet filtre des berges grâce auquel une partie des éléments polluants des **rivières** reste fixée dans les sédiments des berges des cours de eau.
- Les mélanges de nappes qui si ils sont difficiles à quantifier, ont été mis en évidence et jouent un rôle non négligeable dans la **minéralisation** de la nappe de la craie

De plus, à ces réactions peuvent s'ajouter des pollutions humaines qui modifient les équilibres. Les principales sont les rejets industriels, les eaux usées, les produits chimiques utilisés pour l'agriculture, le lessivage des voiries, les décharges.

Le Bassin Minier dans lequel les pollutions humaines et les transformations chimiques naturelles se superposent, est étudié en exemple.

Le second volet rapporte les **difficultés** que nous avons rencontrées pour essayer de réaliser une carte des teneurs chimiques à partir de fichiers informatiques. Il décrit ensuite la méthodologie suivie pour établir une carte synthétique des transformations chimiques naturelles et les conclusions que l'on a pu tirer de la comparaison de cette carte avec celles des teneurs réelles.

On a mis en évidence deux pôles de **pollution** importants : le bassin Minier et la **région** Lilloise. et on a pu soumettre une explication **naturelle** pour des teneurs fortes en sulfates et chlorures dans des eaux très captives.

REMERCIEMENTS

Au terme de cette étude, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, se sont senties concernées et ont participé d'une façon ou d'une autre, à la parution de ce rapport.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Arnaud GALLEZOT, élève en D.E.S.S. de Chimie des Eaux de Lille avec qui j'ai débuté cette étude et qui m'a permis de mieux appréhender l'aspect chimique du sujet.

Mes remerciements s'adressent aussi à :

Monsieur Henri MAILLOT, Hydrogéologue agréé et responsable du laboratoire cycle urbain et pollution des eaux à l'E.U.D.I.L., pour sa gentillesse et son honnêteté d'âme ainsi que pour sa disponibilité et sa pédagogie. Je le remercie aussi pour la confiance qu'il m'a accordée et pour avoir accepté de diriger mon travail tout en me prodiguant de nombreux conseils et encouragements.

• Monsieur Daniel BERNARD, hydrogéologue à l'Agence de l'Eau Artois Picardie pour les moyens qu'il a bien voulu mettre à ma disposition à l'Agence ainsi que l'aide et le temps qu'il m'a accordés pour me faire partager ses connaissances.

Ainsi qu'à :

- Messieurs BRIAND, CACHEUX, HIPPOLITE et THAON, de la Société des Eaux du Nord (S.E.N.)
- Messieurs BARVIAU et FACON, de la Société Eau et Force (S.E.F ANZIN)
- Monsieur CAULIER, du Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord (S.I.D.E.N.)
- Monsieur LEROUX, de la Direction Départementale de l'Équipement du Nord (D.D.E. du Nord)
- Messieurs DELOBEL et HERMAN, de la Direction Départementale de l'Action Sanitaire et Sociale du Nord (D.D.A.S.S. du Nord)
- Monsieur CAOUS et Mademoiselle DUBOST, du Bureau de Recherches Géologiques et Minières du Nord Pas-de-Calais (B.R.G.M. NPC)
- * Mr MELLIEZ de l'U.F.R. "Sciences de la Terre" de Lille I

pour nous avoir consacré avec beaucoup de gentillesse quelques heures de leur temps.

Je tiens aussi à remercier tout le personnel de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie. Et plus particulièrement le Département Ressource, Monsieur DUROUSSEAU et son personnel qui m'a gentiment déchargé de la frappe de ce rapport.

Je tiens enfin aussi à remercier mes parents pour qui ce rapport est l'aboutissement d'années de soutien et d'encouragements.

SOMMAIRE

RESUME

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES DOCUMENTS

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

2.1 GENERALITES

2.2 STRATIGRAPHIE

3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

3.1 GENERALITES

3.2 PRINCIPAUX AQUIFERES

3.3 LA RECHARGE DE NAPPE

4. LES TRANSFORMATIONS CHIMIQUES NATURELLES EN NAPPE

4.1 LES ECHANGES DE BASES

4.2 LA DENITRIFICATION

4.3 D'AUTRES OXYDOREDUCTIONS

4.4 LA DISSOLUTION

4.5 L'EFFET FILTRE DES BERGES

4.6 LES MELANGES DE NAPPES

5. LES POLLUTIONS HUMAINES

6. LA METHODE ISOTOPIQUE : OUTIL DE RECHERCHE DE L'ORIGINE
DE LA MINERALISATION DE L'EAU

6.1 LES ISOTOPES STABLES

6.2 LES ISOTOPES INSTABLES

7. ETUDE DUN CAS : LE BASSIN MINIER

8. ESSAI DE REALISATION DE CARTES DISOTENEURS

9. REALISATION DUNE CARTE DE SYNTHESE DES
TRANSFORMATIONS CHIMIQUES NATURELLES

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

DOCUMENTS

- DOCUMENT 1 SITUATION GENERALE (D.BERNARD.1979)
- DOCUMENT 2 CARTE DES REGIONS NATURELLES (**d'après** BECKELYNCK.1987)
- DOCUMENT 3 CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE DU NORD DE LA FRANCE (G.WATERLOT)
- DOCUMENT 4 COUPE GEOLOGIQUE NW-SE DU SOUS-SOL DU NORD DE LA FRANCE (G.WATERLOT), AXE SITUE SUR LA DOCUMENT 3
- DOCUMENT 5 COUPE GEOLOGIQUE SCHEMATIQUE NE-SW DU SOUS-SOL DU NORD DE LA FRANCE, AXE SITUE SUR LE DOCUMENT 3
- DOCUMENT 6 PORES ET FISSURES DANS LES ROCHES (J.MARGAT)
- DOCUMENT 7 REGIMES LIBRE ET CAPTIF DE LA NAPPE
- DOCUMENT 8 CARTE DES NAPPES DU NORD DE LA FRANCE (**d'après un document** BRGM)
- DOCUMENT 9 ZONES AQUIFERES DE LA CRAIE EN REGIME LIBRE ET EN REGIME CAPTIF DE LA NAPPE (G.WATERLOT)
- DOCUMENT 10 REPARTITION PAR AQUIFERE DES FORAGES AEP DU DEPARTEMENT DU NORD (DOCUMENT AGENCE DE L'EAU)
- DOCUMENT 11 LOCALISATION DES ZONES AQUIFERES PRODUCTIVES DU BASSIN ARTOIS PICARDIE (DOCUMENT AGENCE DE L'EAU)
- DOCUMENT 12 DIAGRAPHIE DE MICROMOULINET DE FORAGE (BRGM)
- DOCUMENT 13 RESEAU AQUIFERE CAPTIF DU CALCAIRE CARBONIFERE DE LA REGION LILLOISE (G.WATERLOT)
- DOCUMENT 14 CARTE DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DE LA CRAIE (P.CAULIER)
- DOCUMENT 15 COUPE DUNE ZONE DE DENITRIFICATION (H.MAILLOT)
- DOCUMENT 16 COMPOSITION ISOTOPIQUE DES NITRATES DE LA NAPPE DE LA CRAIE, SITE DE FLERS EN ESCREBIEUX (A.MARIOTTI)
- DOCUMENT 17 SEQUENCE DE PROCESSUS REDOX DANS UN AQUIFERE CLOS (**dans** B.SIMON,1986)
- DOCUMENT 18 SEQUENCE DE DEMI REACTIONS REDOX (**dans** B.SIMON,1986)
- DOCUMENT 19 PROFIL DU PUIS EXPERIMENTAL DE SAINGHIN-EN-MELANTOIS (D.BERNARD,1979)
- DOCUMENT 20 DESCRIPTION SCHEMATIQUE DE LA BIOGEOCHIMIE DUNE BERGE (D.DARMENDRAIL)

<u>DOCUMENT 21</u>	COUPE DE LA DECHARGE DE FRETIN (D BERNARD.1979)
<u>DOCUMENT 22</u>	CYCLE GEOCHIMIQUE DU SOUFRE SEDIMENTAIRE (dans D.BERNARD,1979)
<u>DOCUMENT 23</u>	CARTE DES COUPURES DE FEUILLES (BRGM)
<u>DOCUMENT 24</u>	SITUATION DU BASSIN MINIER (S.CARLIER)
<u>DOCUMENT 25</u>	TENEURS EN NITRATES DE L'EAU DISTRIBUEE DANS LE BASSIN MINIER (dans B.OLLAGNON.1988)
<u>DOCUMENT 26</u>	CARTE DE VULNERABILITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE DANS LE BASSIN MINIER (dans B.OLLAGNON.1988)
<u>DOCUMENT 27</u>	TENEURS EN NITRATES DE LA NAPPE DE LA CRAIE DANS LE BASSIN MINIER (dans B.OLLAGNON,1988)
<u>DOCUMENT 28</u>	PRODUCTIVITE DE L'AQUIFERE CRAYEUX DANS LE BASSIN MINIER (dans B.OLLAGNON,1988)
<u>DOCUMENT 29</u>	SITUATION DU SITE DE GORRE (BRGM 88 SGN 012 NPC)
<u>DOCUMENT 30</u>	COUPE GEOLOGIQUE DU TRACE DU CANAL (BRGM 88 SGN 012 NPC)
<u>DOCUMENT 31</u>	CARTE DES NITRATES A LEST DE BETHUNE (AGENCE DE L'EAU)
<u>DOCUMENT 32</u>	TENEURS EN AMMONIUM DANS LA NAPPE DE LA CRAIE AVANT POMPAGE (dans B.OLLAGNON.1988)
<u>DOCUMENT 33</u>	TENEURS EN AMMONIUM DANS LA NAPPE DE LA CRAIE APRES POMPAGE (dans B.OLLAGNON,1988)
<u>DOCUMENT 34</u>	CARTE HYDROGEOLOGIQUE DES CHAMPS CAPTANT; DE FLERS EN ESCREBIEUX (BRGM 84 AGI 266 NPC)
<u>DOCUMENT 35</u>	CARTE DES RISQUES MAJEURS DE POLLUTION EN NITRATES DU CHAMPS CAPTANT DE FLERS EN ESCREBIEUX (BRGM 84 NPC 266 NPC)
<u>DOCUMENT 36</u>	CARTE DES CLASSES CHIMIQUES THEORIQUES DE LA NAPPE DE LA CRAIE
<u>DOCUMENT 37</u>	CARTE DE QUALITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE EN NITRATES
<u>DOCUMENT 38</u>	CARTE DE QUALITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE EN SULFATES
<u>DOCUMENT 39</u>	CARTE DE QUALITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE EN CHLORURES

ANNEXES

- ANNEXE Ia DEFINITIONS DE QUELQUES MINERAUX ET ROCHES
- ANNEXE Ib ECHELLE STRATIGRAPHIQUE (dans FOUCAULT et RAOULT.1984)
- ANNEXE IIa CARTE DE TRANSMISSIVITES DE LA NAPPE DE LA CRAIE
- ANNEXE IIb PRINCIPAUX CHAMPS CAPTANTS DU BASSIN ARTOIS PICARDIE (AGENCE DE L'EAU)
- ANNEXE III PLUIES EFFICACES A LILLE-LESQUIN (J.Y. CAOUS)
- ANNEXE IV PLUIES BRUTES ET EFFICACES A LILLE-LESQUIN (J.Y. CAOUS)
- ANNEXE V PIEZOMETRIE DE HARAVESNES (J.Y. CAOUS)
- ANNEXE VI CYCLE DE L'AZOTE (MEMENTO TECHNIQUE DE L'EAU)
- ANNEXE VII CYCLE DE L'AZOTE (AZOTE ET AGRICULTURE DE A à Z)
- ANNEXE VIII NORMES DE POTABILITE
- ANNEXE IX CONTENU DES ANALYSES
- ANNEXE X CODIFICATION DES AQUIFERES (BRGM) (2)
- ANNEXE XI EXEMPLE DE LISTE BRGM DE CAPTAGES IMPLANTEE SUR PLANPERFECT
- ANNEXE XII ANALYSES TYPE PASTEUR (2)
- ANNEXE XIII RAPPORT D'ANALYSES DES EAUX SUPERFICIELLES (BRGM 88 SGN 012 NPC)
- ANNEXE XIV BILAN RECAPITULATIF DES APPORTS D'AZOTE PAR ACTIVITE ET COMMUNE DANS LA BASSIN VERSANT DE L'ESCREBIEUX (B.OLLAGON,1988)
- ANNEXE XV ANALYSES DE PLUIES ET INFILTRATIONS EFFICACES (dans D.BERNARD.1979)

1-OBJECTIFS DE L'ETUDE

Cette étude avait pour sujet initial : "Parts des transformations chimiques naturelles et provoquées dans les nappes d'eau du Nord de la France.". sujet très vaste qui nécessite l'étude de réactions "biu-physico-chimiques".

Pour cette raison. il a été intéressant de faire travailler en doublon deux personnes spécialisées pour l'une en chimie des eaux et pour l'autre en hydrogéologie.

La complexité des réactions chimiques en hydrogéologie ainsi que la relative connaissance actuelle des différentes étapes des processus concernés, ne nous ont pas permis d'étudier le sujet de manière complète dans le temps dont nous disposions.

* Le premier objectif est de réaliser des cartes isoteneurs pour plusieurs éléments impliqués dans des réactions naturelles (Ca^{2+} , Na^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , F^{2-} , Cl^- ...). Ces cartes d'isoteneurs seront à comparer à des cartes isoteneurs prévisibles naturellement et les anomalies révélées pourront être imputées à des pollutions. Cette réalisation demande donc une **globalisation** des phénomènes chimiques et une connaissance la plus complète possible des réactions naturelles que l'on peut rencontrer. Elle demande aussi un traitement informatique et **cartographique** dont la complexité sera développée dans la phase finale du rapport.

* Le second objectif est de pouvoir éventuellement expliquer par des transformations naturelles les teneurs fortes mais non nocives en certains éléments dans les eaux de régions où la ressource est faible. Il s'agit alors appuyer des demandes de dérogations pour l'exploitation des eaux dont l'origine naturelle serait démontrée.

Pour l'étude **présente**, nous nous sommes restreints à l'étude de l'aquifère de la craie pour modéliser les **réactions** chimiques. Ce choix est logique quand on sait que la nappe de la craie qui est **captée** par pratiquement 90 % des forages AEP dans le Nord Pas-de-Calais.

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

(Pour une meilleure compréhension des termes géologiques, se référer aux annexes la et lb)

21 GENERALITES

La tectonique, les transgressions marines et l'érosion ont formé diverses régions géologiques (doc.1 et 2) :

- Le Bassin d'**Orchies** correspond à une cuvette de la craie et comprend une région relativement accidentée, la **Pévèle**, qui détermine une inversion de relief.

- La Flandre Continentale ou plaine flamande intérieure est ondulée et possède un sous-sol constitué par une forte masse d'argile (argile des Flandres) ; toutefois, celle-ci est souvent pourvue d'une couverture de limons et parfois surmontée de collines sableuses (les monts de Flandre).

- La Plaine maritime flamande, élargie par le golfe de l'Aa jusqu'à Saint-Omer, est formée par une masse pouvant atteindre 35 m de puissance de sédiments quaternaires marins et poldériens. admettant quelques sédiments tourbeux et reposant sur l'argile des Flandres ou sur la craie, comme dans la région de Calais.

- L'Artois : situé au sud des Flandres. c'est un axe anticlinal de direction NW-SE. Cette région de collines n'a pas de couverture argileuse. Les terrains crétacés y affleurent. Le quaternaire est représenté par des limons ou des alluvions en vallée.

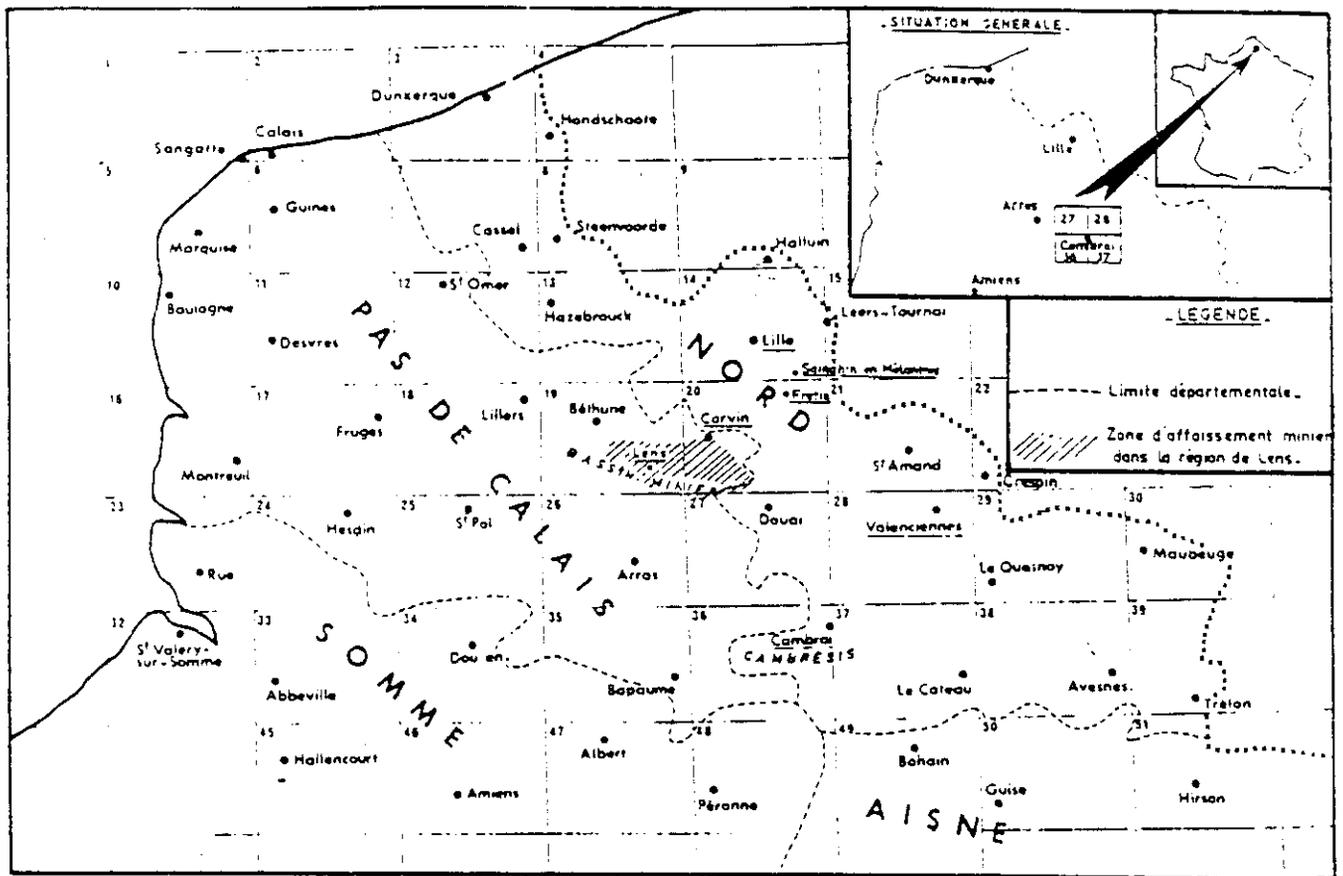
- La terminaison occidentale de l'Ardenne a donné l'**Avesnois** au sol calcaire et schisteux. C'est une région assez accidentée.

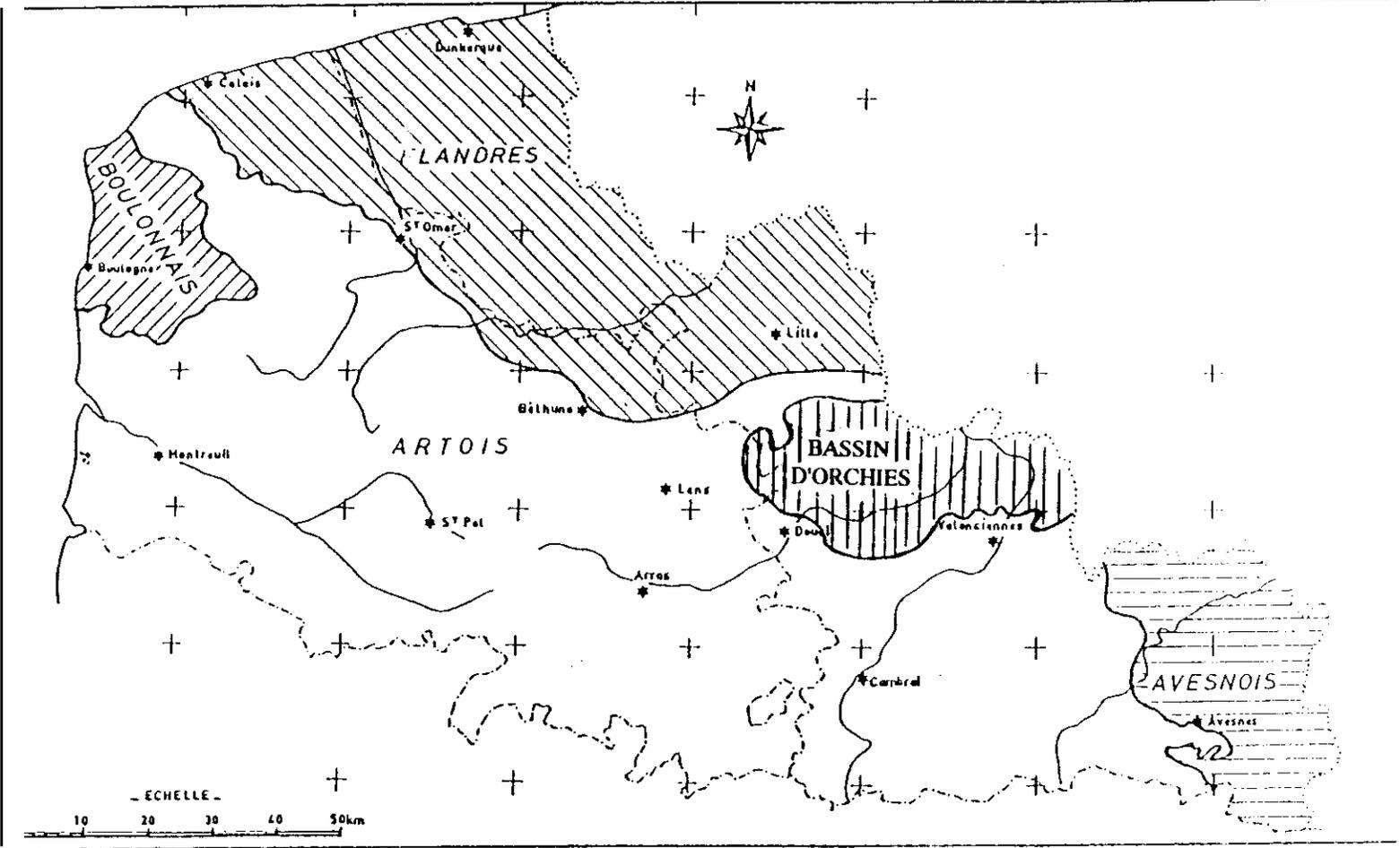
- Le Boulonnais correspond à une voûte anticlinale de la craie dont la partie centrale a été décapée par l'érosion et laisse affleurer des terrains plus anciens (jurassique et primaire).

Nous nous intéressons principalement aux deux structures en évidence sur le document 3 qui sont :

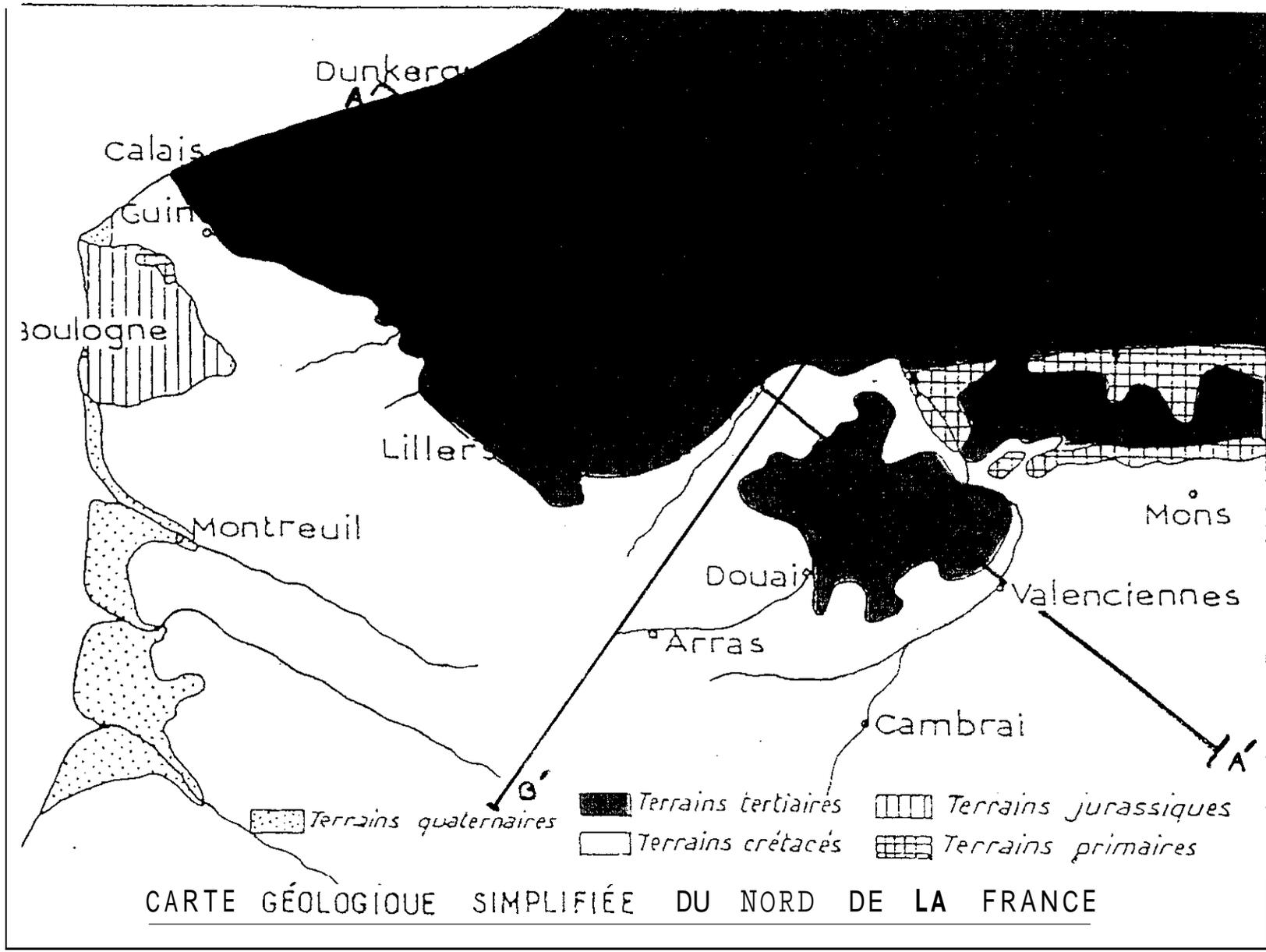
- Artois-Flandres au Nord du dôme du **Mélantois**
- Bassin d'Orchies au Sud de ce dôme.

DOCUMENT 1
SITUATION GÉNÉRALE (D BERNARD.1979)





DOCUMENT 2
 CARTE DES REGIONS NATURELLES (d'après BECKELYNCK, 1987)



2.2. STRATIGRAPHIE

Nous essayerons d'être le plus précis possible dans la description des étages qui peuvent nous intéresser, Leur connaissance est primordiale pour l'étude des transformations chimiques qui s'opèrent dans la nappe à leur contact. Pour une meilleure compréhension on pourra se référer aux documents 3, 4 et 5, [81].

A - TERRAINS PRIMAIRES

Le Dinantien est souvent désigné par le terme de "Calcaire carbonifère" parce qu'il supporte le terrain houiller. Il est essentiellement composé de calcaire dur (200 m d'épaisseur à Avesnes). Le calcaire carbonifère occupe une série de cuvettes synclinales, orientées sensiblement E-W.

Souvent dolomitisé, il est présent dans le sous-sol profond de la région de Lille-Roubaix-Tourcoing, on le connaît par les nombreux sondages qui l'atteignent dans le but d'exploiter sa nappe aquifère (doc.4).

Le terrain houiller du Nord de la France n'affleure pas ; il est recouvert par les "morts-terrains" crétacés, tertiaires et quaternaires et n'est atteint que par puits. Sur le flanc nord du bassin, il repose normalement sur le calcaire carbonifère mais il est limité au **sud** par une faille de charriage, dite "Grande Faille du Midi".

B - TERRAINS SECONDAIRES

Terrains jurassiques : (présents uniquement dans le Boulonnais)

La partie inférieure de cet étage (Bathonien à Rauracien) est formée de couches de calcaires et d'argiles tandis que la partie supérieure (Séquanien à Portlardien) se compose de grès et d'argile avec de minces bancs calcaires.

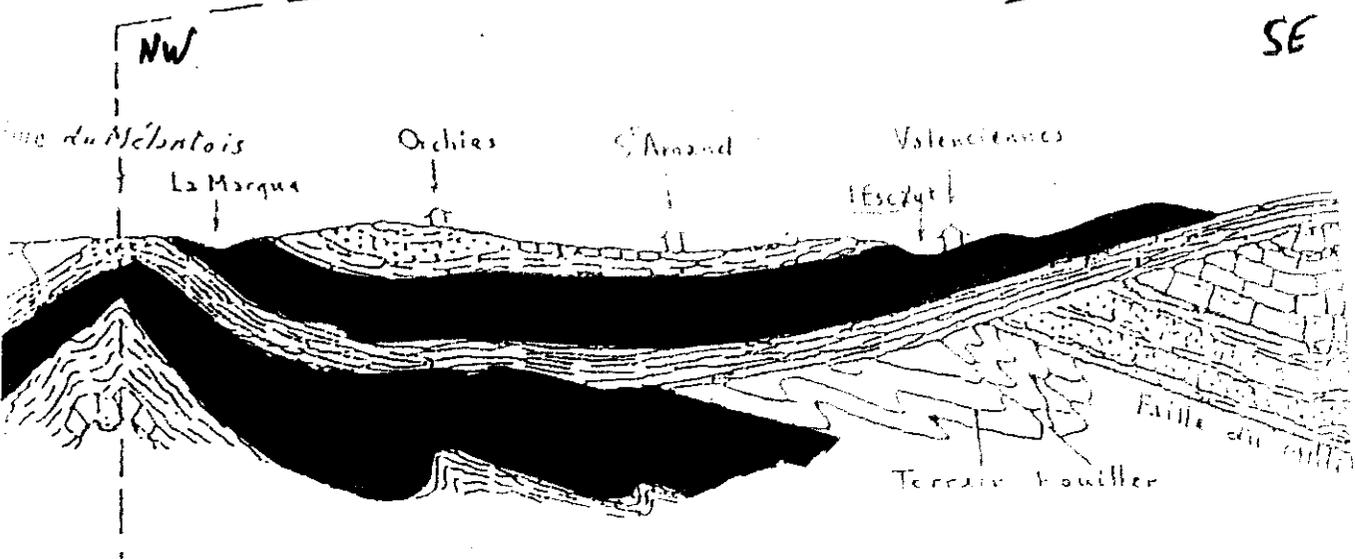
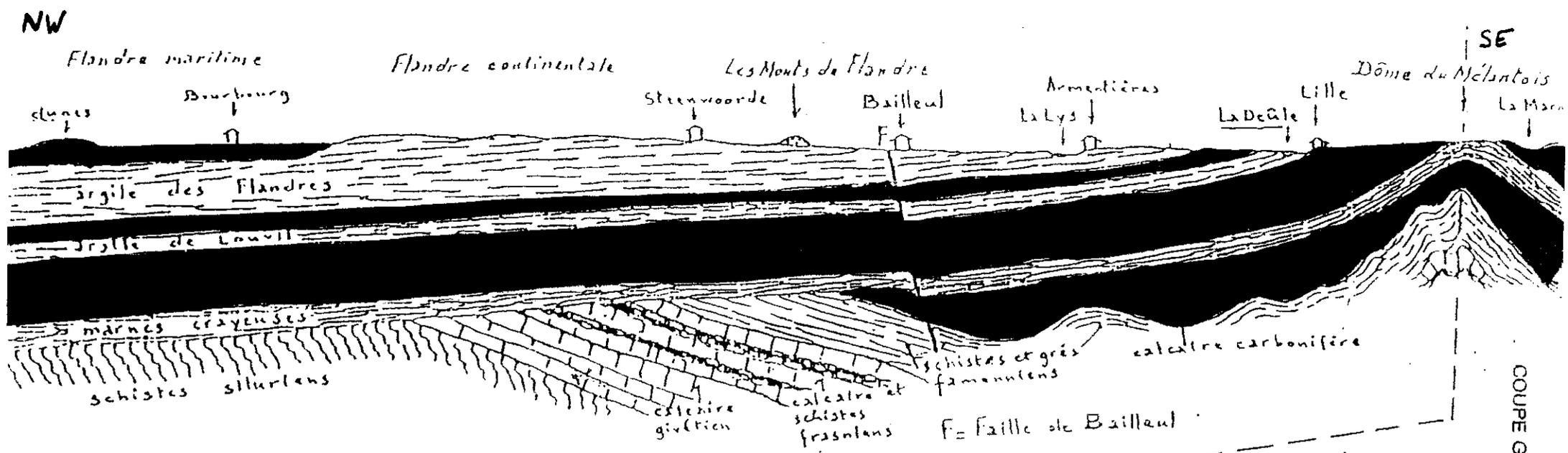
Terrains crétacés.

Ils occupent une grande partie du pays, entre l'Avesnois, le Boulonnais et la limite sud des Flandres. Ils débutent par une partie sableuse et argileuse et se poursuivent par une masse importante de craie.

Le Crétacé Inférieur correspond, en réalité, à la partie non calcaire et comprend divers étages.

Le Wealdien est un dépôt continental, d'épaisseur variable (0 à 30 m), qui s'est accumulé dans des dépressions du socle anté-crétacé (jurassique ou primaire) ; c'est un produit de l'érosion subaérienne qui a nivelé et modelé la région au cours de la période d'émersion qui a précédé l'invasion du pays par la mer crétacée.

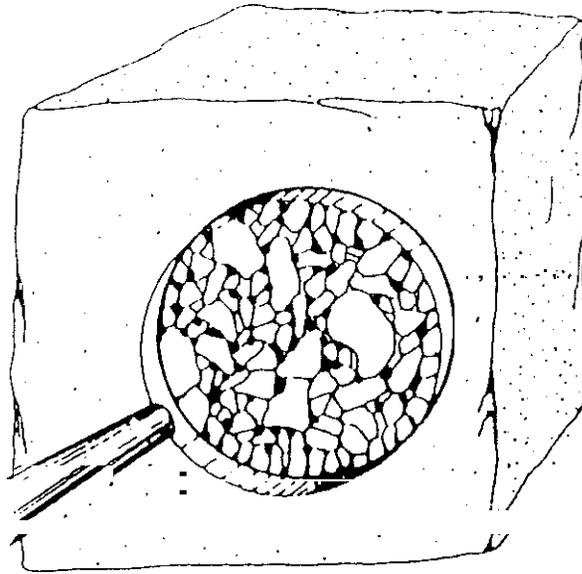
On y trouve, en alternance irrégulière, de l'argile plastique, réfractaire, blanche, ocreuse ou noire et lignitifère, des sables quartzes, blancs ou roux très aquifères, des graviers et cailloux irréguliers de nature siliceuse, des grès roux ferrugineux et même du minerai de fer concrétionné.



DOCUMENT 4
 COUPE GEOLOGIQUE NW-SE DU SOUS-SOL DU NORD DE LA FRANCE (G. WATERLOT)
 AXE SITUÉ SUR LA FIGURE 3

DOCUMENT 6
PORES ET FISSURES DANS LES ROCHES (D. BERNARD)

←--- POROSITE EN PETIT --->

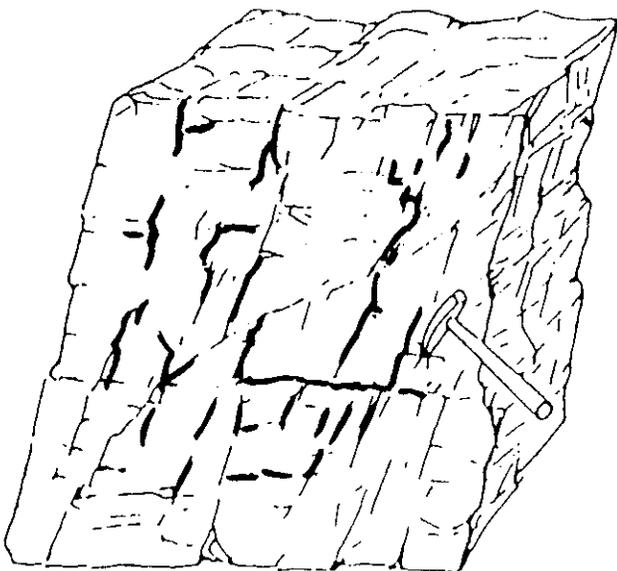


← 10 cm →

1 litre

Rochie poreuse

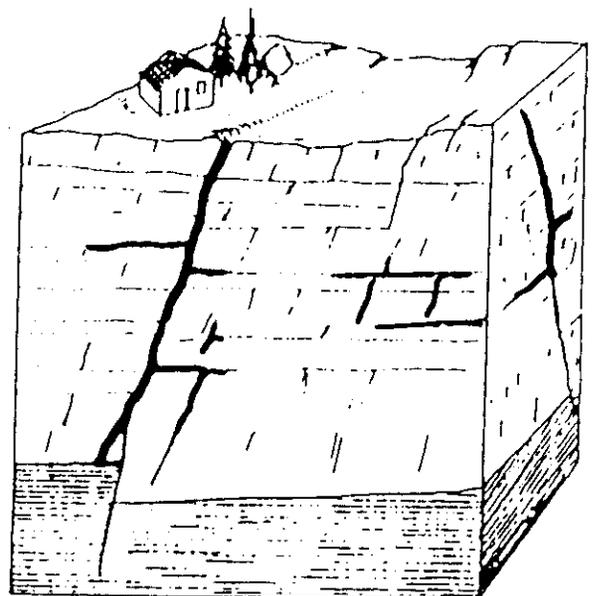
←--- POROSITE EN GRAND --->



← 1 m →

1 m³

Rochie fissurée



← 100 m →

1 million de m³

Roche fracturée

La transgression marine s'est ensuite produite et a été marquée par un dépôt de sables et d'argiles noires souvent ligniteuses. appartenant à l'étage aptien (0 à 35 m dans le Boulonnais) auquel font suite les terrains albiens composés de sables verts argileux avec grès verts (10 m) et d'argile marneuse noire ou gris bleu (20 à 30 m).

Le Cénomaniens appartient déjà au Crétacé Supérieur. Dans la région de Valenciennes. il débute par une marne sableuse très chargée de grains verts de glauconie avec, a la base, des galets de quartz, de roches anciennes et de nodules phosphatés. La roche est souvent consolidée en un conglomérat que les mineurs appellent " le tourtia " ; elle représente le cordon littoral de la mer cénomaniens en transgression. M a g e se poursuit par des marnes plus calcaires (5 à 10 m) et des marnes crayeuses (20 m) appelées " dièves blanches" par les mineurs (Cénomaniens supérieur). Dans le Boulonnais, le " tourtia " (0.30 m) est surmonté d'une couche de craie verte, glauconieuse (3 m) sur laquelle repose une masse importante de craie marneuse, gris blanc, dure (40 à 50 m).

Cette craie marneuse se décompose en deux parties sensiblement égales ; la partie inférieure est plus marneuse et relativement imperméable, la partie supérieure est une craie qui localement peut être aquifère.

En dehors du Cénomaniens, le Crétacé Supérieur comprend deux étages : le Turonien et le Sénonien.

Les marnes crayeuses du Turonien Moyen et Inférieur ont une puissance de 60 à **85** m. Le Turonien Inférieur présente, en général, le faciès de marne argileuse (66 % d'argile contre 34 % de craie), blanc verdâtre, totalement imperméable, c'est le niveau des " dièves vertes " presque plastiques (30 m à Douai et Denain, 15 m à Raismes, 5 m à Château l'Abbaye). Le Turonien Moyen est plus complexe : c'est une marne tendre, d'un blanc bleuâtre ou crème par altération, que les mineurs appelaient les " dièves bleues " ; il s'y intercale souvent, mais pas toujours, des bancs de craie dure, lourde, marneuse, blanche et ne contenant pas de silex que les mineurs désignent sous le terme de " durs bancs ". Ce niveau a 20 m d'épaisseur à Anzin et 40 m à Douai et Boulogne.

Le Turonien Supérieur est une craie blanchâtre contenant de nombreux et volumineux silex cornus, noirs, enveloppés d'une épaisse croûte blanchâtre due à l'altération. La craie du sommet de l'assise est généralement plus grise, glauconieuse, parfois chargée de grains de phosphate de chaux et souvent assez résistante. Dans le pays minier, la craie grise contient des bancs durcis par de la calcite qui a cristallisé dans les pores de la roche, ce qui l'a rendue imperméable ; c'est la " meule ". Dans la région lilloise, ces bancs sont faits de nodules de craie durcie, recouverts d'un vernis de phosphate de chaux ou de glauconie et cimentés par de la craie plus ordinaire : ils sont désignés sous le nom de " tun ". L'ensemble est épais de 10 m à Arras, Montreuil et Calais, de 20 m à Douai.

Le Sénonien contient une craie blanche fine, homogène, aquifère, avec ou sans silex (50 m de puissance à Béthune, Boulogne ; 65 m près de Calais) ; la base est parfois une craie grise (3 m). Cette craie blanche peut être surmontée d'une craie phosphatée qui donne lieu à des exploitations de phosphate de chaux.

Dans son étude des faciès de la craie, P. CAULIER (1974) a distingué cinq faciès différents répartis dans les couches des étages du Cénomaniens au Sénonien. Il a confirmé son découpage par une corrélation avec une campagne de résistivité et une étude calcimétrique.

C - TERRAINS TERTIAIRES

ils ne sont représentés que par des terrains éocènes du Landénien et de l'Yprésien.

Le Landénien, épais de 40 à 50 m, est constitué dans sa partie inférieure par une argile sableuse, noire, plastique et imperméable, dite "argile de Louvil", pouvant contenir des lits de sable vert, glauconieux, plus ou moins aggloméré, soit par un sable vert rendu parfois cohérent par un ciment d'opale en un grès tendre, souvent friable, dit "tuffeau"; un passage latéral s'opère aisément entre ces deux formations.

La partie supérieure du Landénien est formée de sables quartzeux, verts, glauconieux, à grain très fin, souvent désignés sous l'appellation de "sables d'Ostricourt".

Au dessus de cette partie marine, on conserve parfois une partie d'origine continentale (lagunaire ou fluviatile) constituée par des sables quartzeux blancs, parfois ligniteux, disposés en couches minces ou en poches parfois profondes (10 à 15 m) creusées à la surface de la craie : ces sables peuvent contenir des lentilles ou de petits lits d'argile plastique noire et de grosses concrétions de grès blanc mamelonné.

L'Yprésien est caractérisé par l'Argile d'Ypres ou Argile des Flandres, épaisse de 100 m à Bailleul. C'est une argile plastique bleue noire qui peut contenir des cristaux de gypse (sulfate de calcium hydrate ou pierre à plâtre). C'est elle qui forme le sous-sol de la Flandre continentale et le socle des dépôts quaternaires de la plaine maritime flamande.

D - TERRAINS QUATERNAIRES

Un limon rouge à silex de la craie brisés, éclatés, plus ou moins roulés et patinés, recouvre les sommets et les pentes de quelques collines de l'Artois, de Béthune à Saint Omer. On estime que sa formation a dû débuter à la fin de l'Éocène et se poursuivre pendant le reste de l'ère tertiaire et l'ère quaternaire

Un limon argilo-sableux, brun à jaune clair, recouvre le sommet des plateaux et leurs pentes (en moyenne : 6 m d'épaisseur en Flandre).

Les alluvions fluviatiles argilo-sableuses et graveleuses des grandes vallées se sont déposées à l'époque quaternaire. Elles peuvent contenir localement des bancs de tourbe qui furent anciennement exploités dans les vallées de l'Aa, de la Lys, de la Haute Deûle, de la Marque, de la Scarpe, de la Sensée.

Les alluvions de l'Escaut sont faites d'argile calcaire blanche dans la partie crayeuse de la vallée ; elles sont localement caillouteuses, de Denain à Valenciennes. Les vallées marneuses de la Sambre et de la Selle possèdent des alluvions argileuses bleues.

3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

3.1 GENERALITES

L'eau, en remplissant les vides présents dans les roches (pores) forme des réseaux appelés nappes. Il existe deux types de circulation de l'eau dans ces réseaux en fonction de la structure de ces vides.

Si la roche est dure et compacte (comme le calcaire par exemple) la circulation se fait à travers des fissures ou des fractures de la roche, c'est ce que l'on appelle la porosité en grand (doc.6).

Si la roche est caractérisée par une matrice (assemblage des grains) poreuse, on est alors dans le cas d'une porosité en petit (comme les sables, les grès, les graviers alluvionnaires par exemple).

Pour l'aquifère qui nous intéresse : la craie séno-turonienne, les deux types de porosité jouent un rôle [16].

On mesure la capacité de l'eau à circuler dans la roche par la perméabilité (K en $m s^{-1}$). C'est une caractéristique de la roche qui va régir le temps de contact entre l'eau et son réservoir qui, comme nous le verrons, a son importance pour le déroulement des transformations chimiques.

Mais la grandeur qui permet d'évaluer la production d'un pompage est la transmissivité (T en $m^2 s^{-1}$) qui est le produit de la perméabilité par l'épaisseur mouillée.

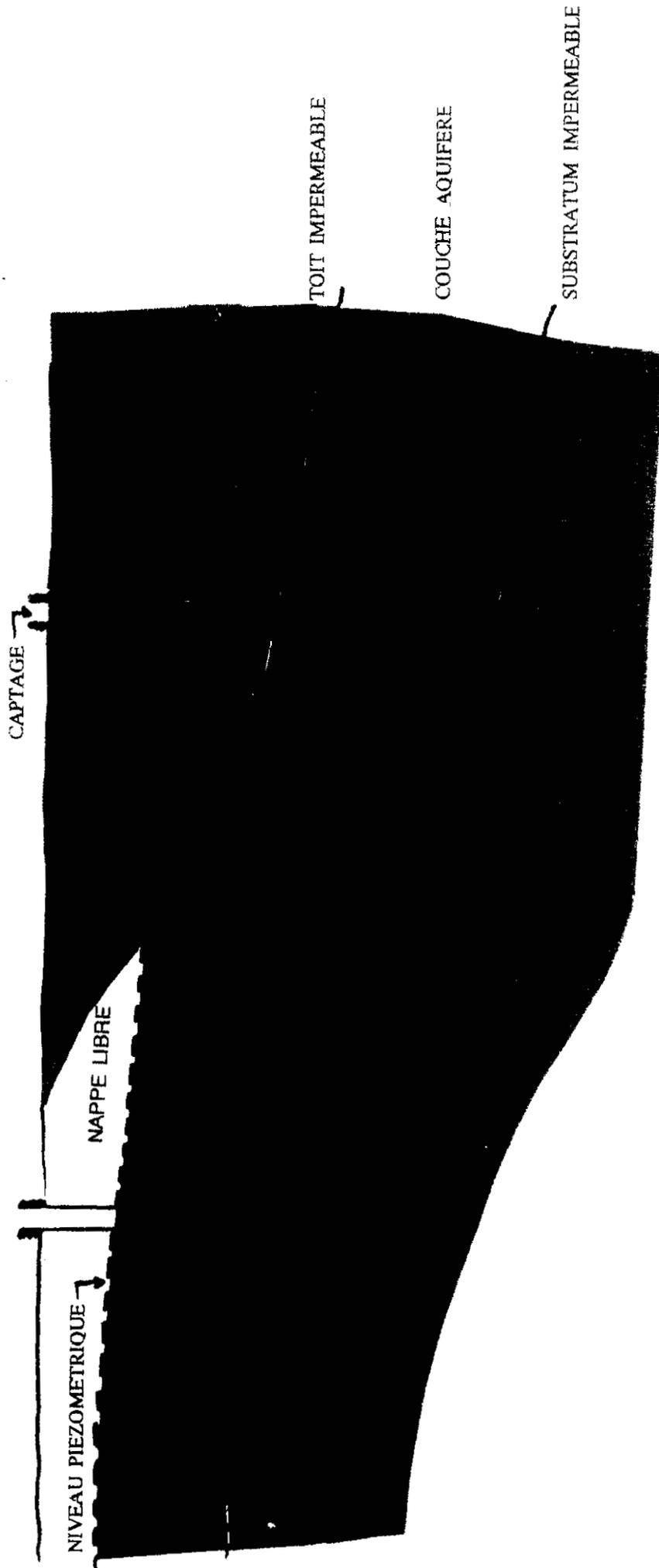
Il existe deux types d'état pour une nappe : libre et captif [29].

Dans la nappe libre, l'eau souterraine n'occupe qu'une partie de l'aquifère comprise entre un substratum imperméable et une surface qui varie librement (doc.7). La surface libre est partout en équilibre avec la pression atmosphérique. c'est la surface piézométrique.

Dans la nappe captive, l'eau souterraine occupe tout l'espace compris entre un mur et un toit imperméables. Sa cote est donc toujours inférieure au potentiel,

La surface piézométrique n'a pas la même pente que les couches géologiques pour des raisons de circulation hydraulique [43],[45].

DOCUMENT 7
REGIMÉS LIBRE ET CAPTIF DE LA NAPPE (B.FERRY)



3.2. PRINCIPAUX AQUIFERES

Nous allons maintenant décrire les aquifères principalement exploités dans le Nord de la France (excepté ceux du Boulonnais qui n'ont pas de conséquence pour notre étude)(doc.8).

- La nappe de la craie :

Sa roche réservoir est la craie des étages du Turonien Supérieur et du Sénonien. Elle repose sur les marnes crayeuses ("dièves") imperméables (doc.9). Au sud d'une courbe reliant Guines à Valenciennes en passant par Béthune et Lille, la nappe est libre et directement rechargée par les précipitations. Au nord de cette courbe, la craie s'enfonce sous une couverture argilo-sableuse de plus en plus épaisse qui rend la nappe captive.

La nappe de la craie est le principal aquifère du Nord de la France. elle regroupe pratiquement 90 % des forages d'adduction d'eau potable (doc.10). La raison de cette forte exploitation est due à la forte productivité de la craie dans certaines régions favorablement situées.

Toute la couche de la craie n'est pas aquifère, il faut certaines conditions pour que la nappe soit exploitable.

Tout d'abord, pour obtenir une bonne transmissivité (Annexe IIa), il faut que la craie soit fissurée, pour permettre une bonne recharge de la nappe.

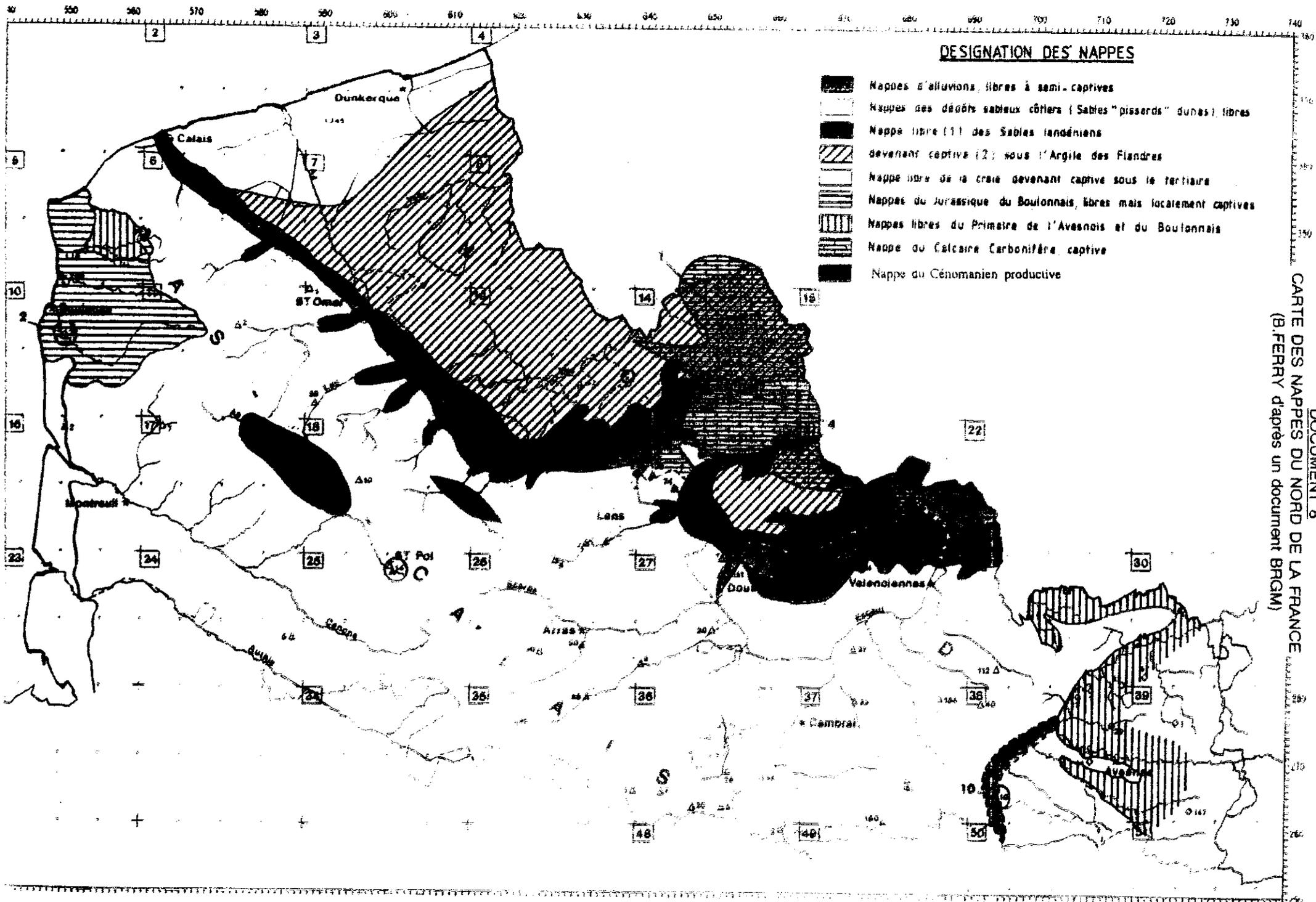
La fissuration n'est pas homogène au sein de la craie [78]. La première zone très fissurée est sa partie supérieure (doc.9). On y trouve une craie très fendillée appelée aussi marnette. C'est le résultat de l'altération superficielle de la roche durant la période où elle se trouvait émergée. Quand elle est directement exposée aux agents atmosphériques, la craie qui est une roche tendre et calcaire, réagit aux attaques mécaniques (vents, marées) ainsi qu'aux attaques chimiques (infiltrations des pluies).

Les eaux atmosphériques sont acides par le gaz carbonique emprunté à l'atmosphère et à la terre végétale traversée. elles vont alors dissoudre la roche et agrandir les fissures.

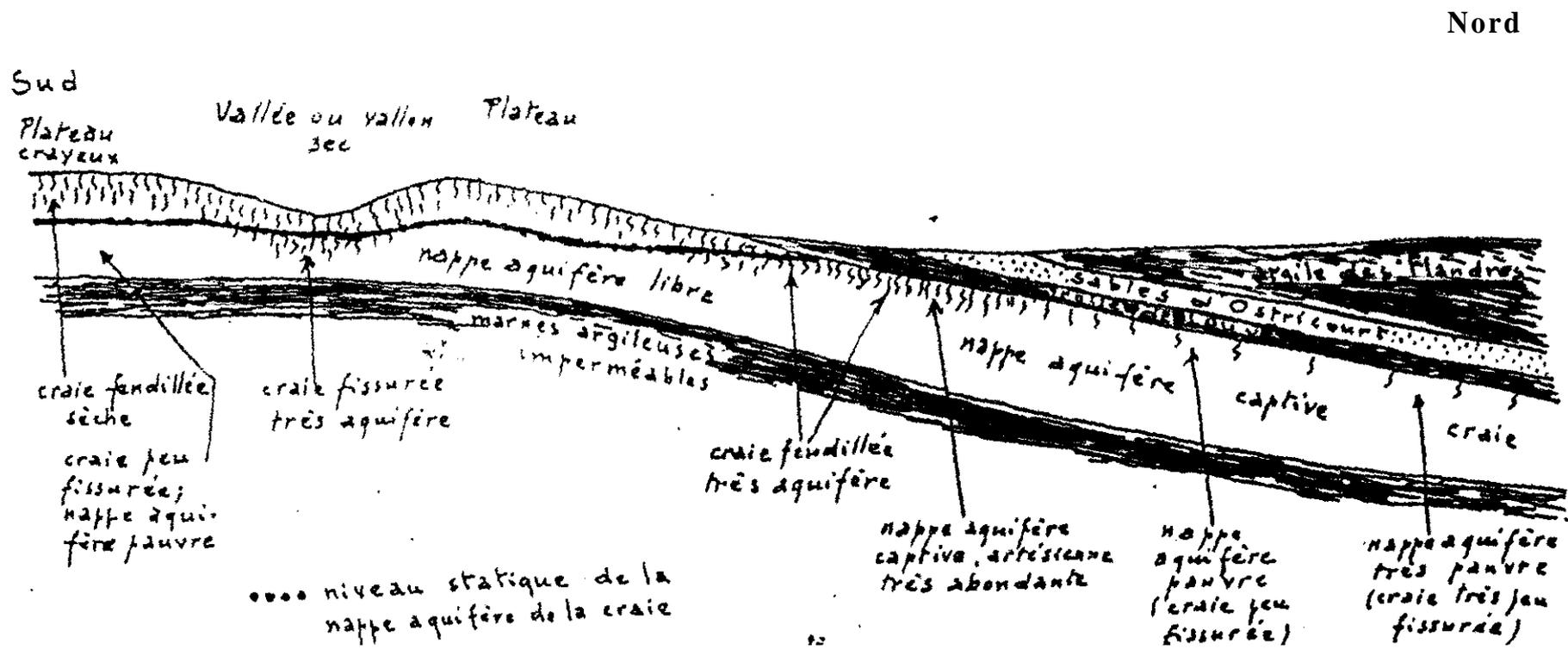
Dans les régions où l'argile de Louvil et les sables d'Ostricourt ont recouvert une partie de la craie, celle-ci est alors protégée des infiltrations directes des pluies et l'alimentation doit se faire latéralement. Pendant le cheminement qu'elle doit suivre pour arriver en captivité, l'eau perd peu à peu de son acidité et devient neutre et incapable d'agrandir les fissures. De plus, le poids des terrains qui se sont déposés sur la craie, écrase celle-ci et referme les fissures (doc.9).

La seconde zone intéressante est constituée par ce que Gosselet appelait la "craie congloméroïde". C'est une craie très brisée et plus ou moins réagglomérée que l'on retrouve en fond de vallées ou de vallons. Ce sont des matériaux qui ont glissé des flancs des vallées. Ces points bas recueillent les ruissellements et les infiltrations d'eau y sont très importantes.

Ces zones fissurées sont donc très propices à des bonnes productivités, il faut encore cependant qu'elles soient situées au sein de la nappe.



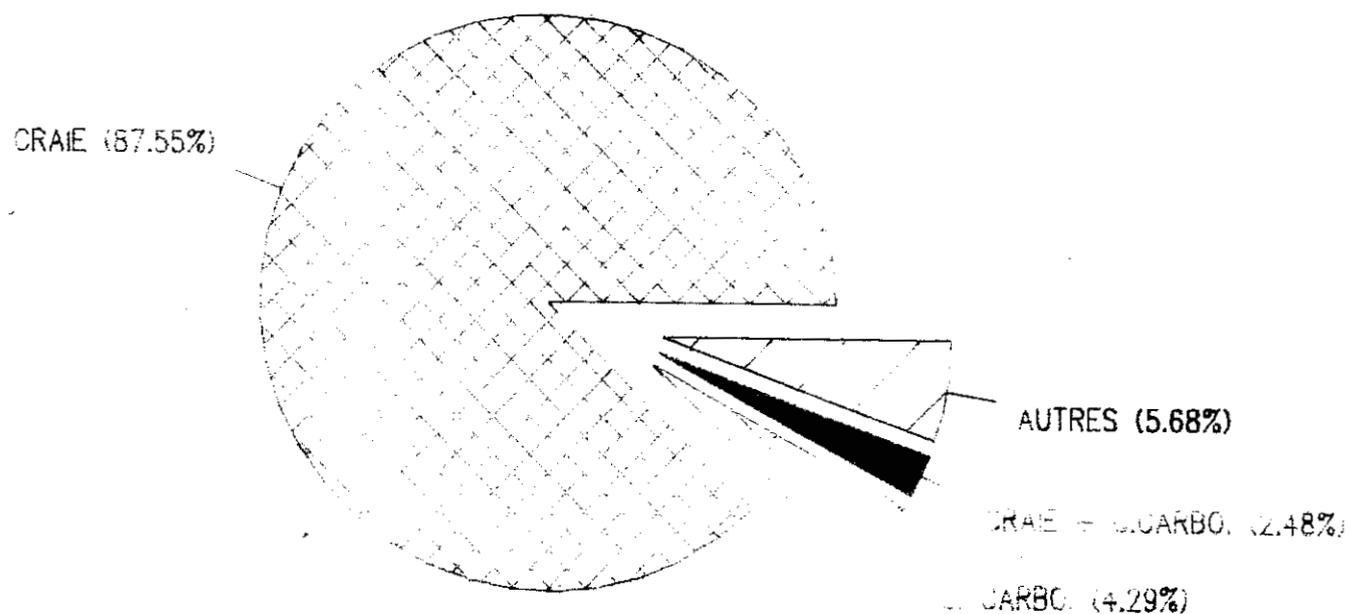
DOCUMENT 8
 CARTE DES NAPPES DU NORD DE LA FRANCE
 (B. FERRY d'après un document BRGM)



Zones aquifères de la craie en régime libre et en régime captif de la nappe

DEPARTEMENT DU NORD

FORAGES AEP REPARTITION PAR AQUIFERE



Nombre total d'ouvrages: 439

Etat 1987

Le 27/04/89

On voit bien sur le document 11 que ces zones sont **les** vallées alluviales et la bande de passage en captivité sous l'argile de Louvil.

Cette bande est très productive car la nappe libre vient butter contre l'argile imperméable. La craie en profondeur étant moins fissurée agit comme un barrage souterrain et l'eau reflue sous pression jusqu'à la surface pour former des marais. On a donc une zone de forts débits de quelques centaines de mètres de large qui s'étend parallèlement à la bordure du manteau imperméable de Calais à Sainghin en Weppes **et** de Lille à Valenciennes.

Cette hétérogénéité au niveau productif de la craie a bien été confirmée par P. CAULIER [32]. On peut nettement observer la partie supérieure fracturée de la craie sur les diagraphies par micromoulinet de forage (doc.12).

Ce type d'essai a pour but la mesure des vitesses de circulation verticale de l'eau, circulation provoquée soit par pompage, soit par injection. La vitesse de rotation de l'hélice étant proportionnelle au débit de l'ouvrage testé à la profondeur de mesure, il est alors possible de calculer la vitesse et le débit en chaque point de mesure, ce qui permet ainsi d'obtenir une courbe de répartition des débits cumulés selon la verticale.

Les diagraphies micromoulinet, les nombreux essais de débits, les prospections géophysiques réalisées ces dernières années, ont permis de connaître de manière assez précise les zones aquifères et d'établir des cartes de transmissivité de la craie ([32],[51],[53],[54]).

De plus, pour des raisons que nous verrons dans **les** chapitres suivants, ces zones sont relativement protégées chimiquement. On retrouve donc dans cette bande, la plupart **des** champs captants du Bassin Artois-Picardie (annexe IIb). C'est dans cette zone que vient s'alimenter la région des Flandres qui a peu de ressource.

- La nappe du calcaire carbonifère :

Le calcaire carbonifère affleure dans la région de Tournai où la nappe est alimentée par les précipitations et les rivières (doc.13).

Dans la région de Lille-Roubaix-Tourcoing, cette nappe profonde a longtemps été exploitée par les industries (surtout textiles).

Malgré l'épaisseur du recouvrement les fissures du calcaire ne se referment pas car la roche est très dure et résistante. Les fractures du calcaire peuvent être d'une épaisseur de quelques centimètres et même former des cavernes. Sous **St Amand**, on retrouve aussi la nappe du calcaire carbonifère dont l'alimentation par sa partie affleurant en Belgique a été démontrée [12],[64].

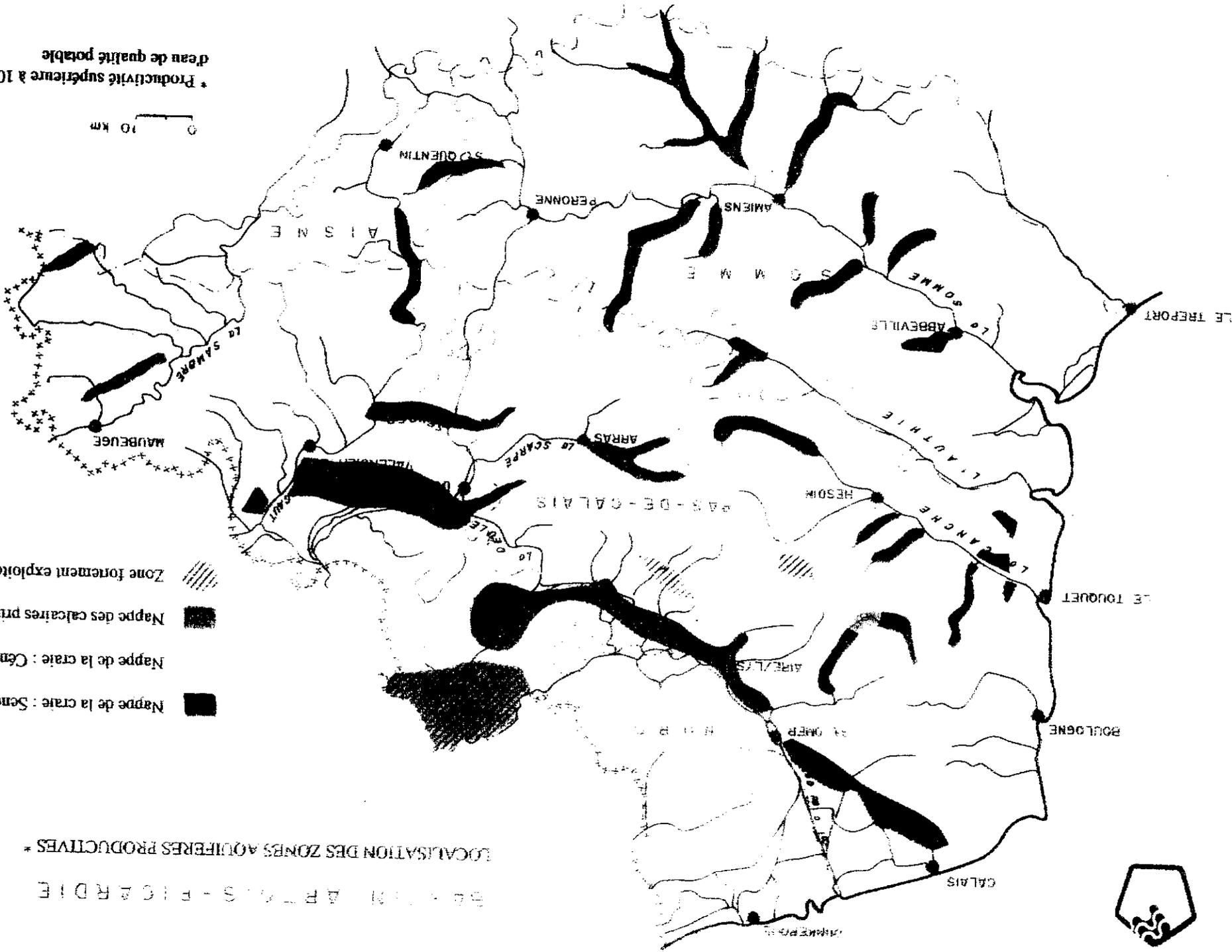
L'exploitation intensive de cette nappe peut provoquer une dépression qui permet une infiltration verticale descendante de la nappe de la craie vers la nappe du calcaire carbonifère. Cependant, le flux inverse peut s'opérer de manière naturelle par le jeu des différences de pression.

Il reste que la productivité d'un forage dans le calcaire carbonifère est très aléatoire. Si le forage se trouve dans le calcaire "sain", le débit sera nul, par contre, si on fore dans une fissure, le débit peut être de plus de 100 m³/h. On peut rencontrer de tels variations de productivité à quelques mètres de distance.



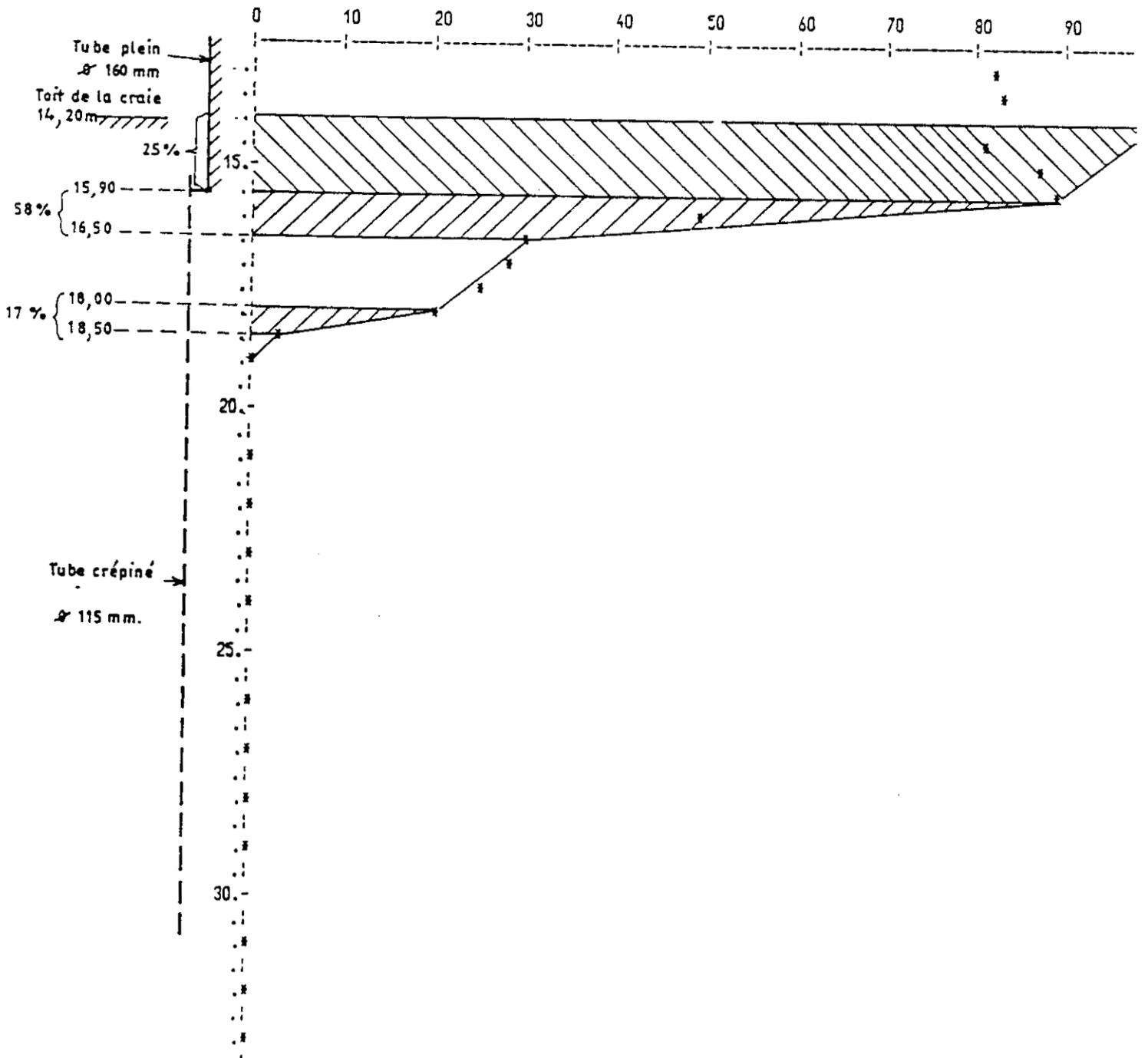
BASSIN ARTAIS-FIARDIE
LOCALISATION DES ZONES AQUIFERES PRODUCTIVES *

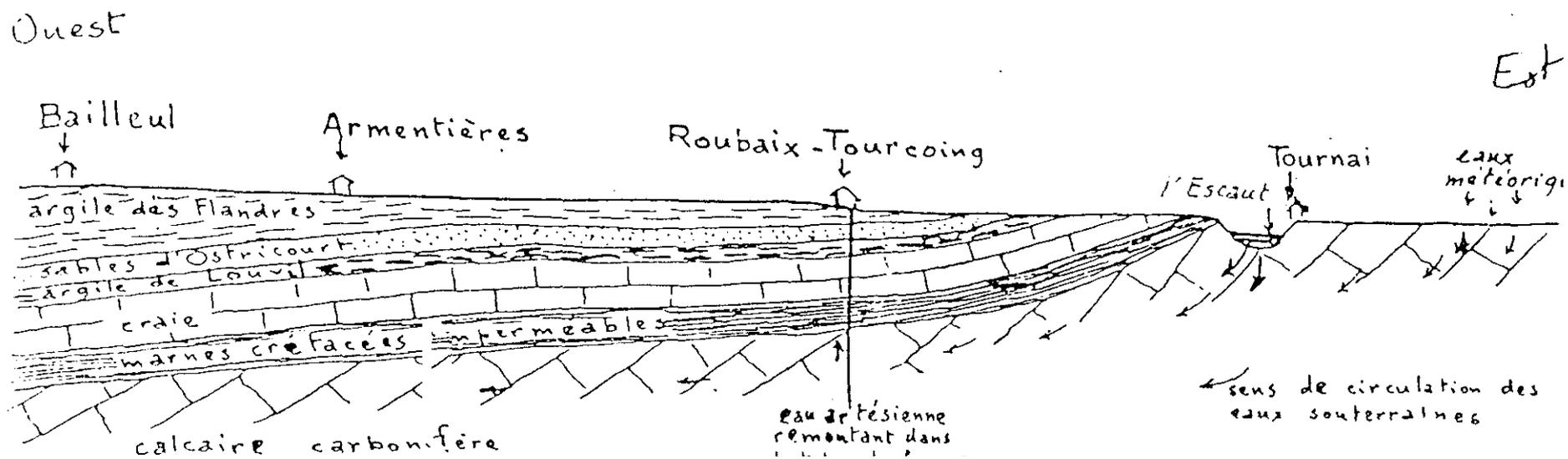
-  Nappe de la craie : Seno-Turonien
-  Nappe de la craie : Cenomanien
-  Nappe des calcaires primaires
-  Zone fortement exploitée



DOCUMENT 12
 DIAGRAPHIE CE MOULINET CE FORAGE (BRGM)

COMMUNE.....
 DATE DE L'ESSAI.. 08/10/87
 INDICE NATIONAL 21-EX-365
 DEBIT POMPE (M3/H) ... 13.9





- La nappe du Cénomanién :

La lithologie du Cénomanién met en évidence une nette séparation entre sa partie inférieure marneuse et considérée comme imperméable et sa partie supérieure constituée d'une craie plus ou moins marneuse qui peut être aquifère.

L'étude de résistivité menée par P.CAULIER (1974) montre bien l'évolution du Cénomanién supérieur, qui crayeux dans le Boulonnais devient de plus en plus marneux vers l'Est [25],[26].

Même si le Cénomanién est présent pratiquement dans toute la région (excepté l'Avesnois), il n'est aquifère que dans la bordure Sud-Ouest du Pas de Calais (Région de Houdain à Fruges).

Dans cette région, le Cénomanién Supérieur affleure dans de nombreuses vallées et notamment le long de la Faille de Pernes. Donc outre son alimentation directe par les précipitations, la nappe cénomaniénne est en relation avec les rivières [3],[57],[73]. Mais elle devient rapidement captive sous le Turonien Inférieur.

Cette nappe ne peut finalement fournir que d'assez faibles quantités d'eau car les discontinuités géologiques (réseau de failles NW-SE) très nombreuses empêchent la formation et l'écoulement de la nappe (doc.5).

De plus la structure très cassée des couches ne facilite pas l'infiltration des pluies.

La matrice du Cénomanién dans sa partie Ouest semble assez proche au niveau hydraulique de la craie séno-turonienne. Pour obtenir de bons débits, il faut donc qu'elle soit fracturée, la porosité en grand semblant avoir un rôle prépondérant. Et plus on va vers l'Est, plus la matrice est argileuse et plus la remarque est vraie.

- La nappe des sables tertiaires :

Sa couche la plus représentée est celle des sables d'Ostricourt. Il s'agit d'une nappe captive comprise entre les argiles de Louvill et les argiles des Flandres. Son exploitation est principalement à des fins d'irrigation. En effet, les débits de pompage sont faibles car on risque d'ensabler le forage par des grains quartzueux. De plus, ceux-ci provoquent une abrasion des pompes.

- Les nappes alluviales :

Elles se situent dans les alluvions (sables et graviers) des lits des rivières. On les retrouve donc en fond de vallée. Non protégées par une couverture argileuse, elles sont très sensibles aux pollutions. Cependant, des phénomènes chimiques intéressants s'y opèrent (voir chapitre 3).

- La nappe des sables quaternaires :

La circulation de l'eau n'y est pas importante car ces sables sont argileux. De plus, ils affleurent et sont touchés directement par les polluants. Ils ne sont donc pas exploités pour d'importants volumes.

3.3. LA RECHARGE DE NAPPE

" La connaissance du niveau des nappes et de son évolution dans le temps et l'espace est une donnée fondamentale dans la gestion des eaux souterraines ([29], doc.14) que ce soit pour :

- . évaluer les ressources renouvelables des aquifères et quantifier les volumes exploitables,
- implanter et dimensionner tout ouvrage souterrain (bâtiment, parking, tunnel, captage, etc ..),
- détecter et comprendre toute modification du régime des écoulements souterrains : surexploitation des aquifères ou au contraire réalimentation induite (fuites de canaux, plans d'eau, etc) et les phénomènes physico-chimiques qui leur sont associés."

Les nappes d'eau sont principalement alimentées par les précipitations. Le niveau statique (en absence de pompage) des nappes varie avec le climat. Par temps de sécheresse, le niveau baisse alors que pendant la saison humide (novembre à avril généralement) celui-ci remonte.

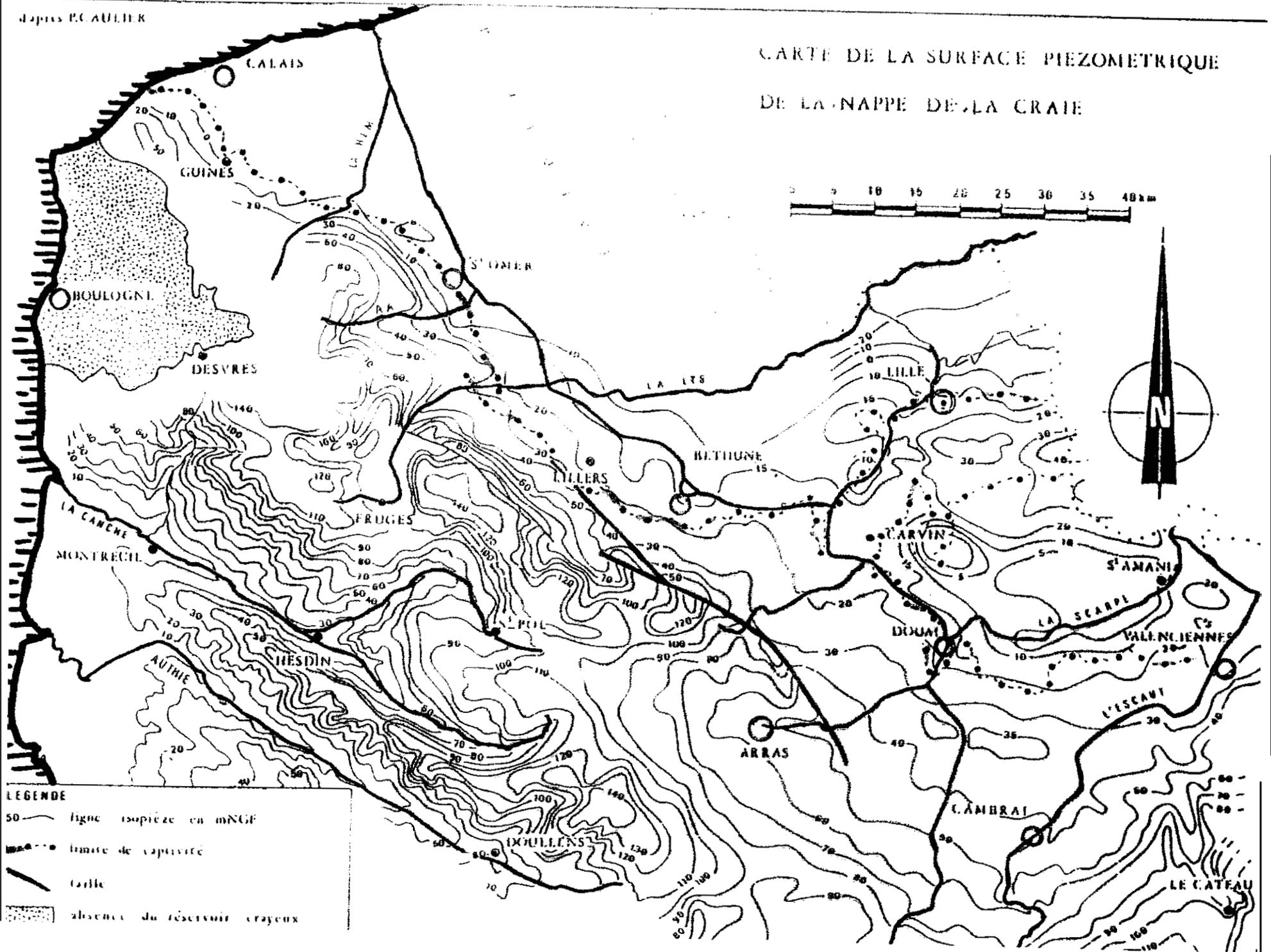
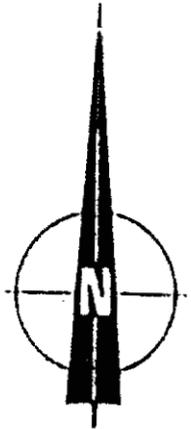
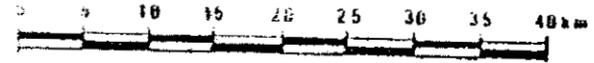
La corrélation niveau statique-précipitation efficace (part qui échappe à l'évapotranspiration) est étroite (annexes III, IV, V).

Les nappes qui réagissent le plus rapidement sont évidemment celles qui sont les plus proches du sol (nappes alluviales), les nappes plus profondes ne sont atteintes qu'après un temps de latence.

L'eau qui s'infiltre crée une pression sur les lames d'eau en suspension dans la zone non saturée. Cette eau rejoint alors la nappe dont le niveau piézométrique monte. Il est donc à noter que si la piézométrie suit assez rapidement les précipitations, par contre les modifications apportées par ces pluies à la composition chimique de la nappe ne se feront sentir qu'après le temps nécessaire à la traversée de la zone non saturée qui peut être de plusieurs dizaines d'années.

d'après P. CAULIER

CARTE DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DE LA CRAIE



LEGENDE

- 50 — ligne isopièze en mNGF
- limite de captivité
- grille
- ▒ absence du réservoir craieux

Sur l'annexe III, on peut observer deux périodes bien différenciées. La première de 1957 à 1974 nettement déficitaire et la seconde de 1974 à 1988 excédentaire. De 1988 à 1992, la tendance générale montre une amorce de période déficitaire [29].

Quand les périodes déficitaires se succèdent, le niveau piézométrique et la pression d'eau dans la zone non saturée baissent. Le temps de recharge d'une nappe après une telle période est donc plus long. En effet, il faut tout d'abord que les pluies infiltrées rétablissent dans la zone non saturée une pression suffisante pour pousser les lames les plus profondes.

Si on regarde les annexes IV et V, on s'aperçoit que les basses eaux de 1973 suivent une période pluviométrique déficitaire et que les hautes eaux de 1983 et 1988 viennent après des périodes excédentaires. De même l'année 1991 succède à deux années déficitaires et on observe des niveaux très bas.

Quand on se situe en limite de recouvrement, la nappe peut même changer de régime (captif à libre) avec ces variations de piézométrie. On verra les conséquences sur la composition chimique de l'eau que cela peut avoir.

Dans les zones très exploitées, le niveau n'est plus statique, il est le plus souvent dynamique. Les pompages créent des cônes de **dépression** centres sur les captages. Dans les régions de Béthune à Lille et de Flers à Pecquencourt, on est obligé de s'éloigner des captages pour connaître le niveau statique de la nappe car les cônes se succèdent. Par exemple on utilise le piézomètre installé à Rieulay pour le champ captant de Pecquencourt.

Dans le Bassin Minier, par le jeu des affaissements, la nappe de la craie se situe en plaine entre 20 et 40 m. de profondeur et affleure en vallée.

4. LES TRANSFORMATIONS CHIMIQUES NATURELLES EN NAPPE

Au cours du temps, l'eau acquiert une composition chimique équilibrée en fonction de son environnement géologique. L'eau de la craie dispose en solution de bicarbonate de calcium, représentant 50 % de la charge minérale, d'ions majeurs (sodium, potassium, sulfate, chlorure) pour 25%. le restant étant composé de silice colloïdale et de métaux en solution (fer, aluminium, zinc, cuivre, nickel) en faible concentration (quelques microgrammes par litre). Elle a une température d'environ 11° Celsius et un pH compris entre 6.5 et 7 pour un résidu sec de 400 mg/l.

Nous allons dans ce chapitre expliciter des phénomènes connus qui font varier cette composition chimique. Cependant, ils peuvent se superposer et il devient alors difficile de connaître l'origine des éléments.

4.1 LES ECHANGES DE BASES

Ces phénomènes observés depuis le début du siècle ont été synthétisés par G. WATERLOT dans les années 1950. Il a alors observé un même phénomène pour la nappe de la craie en passage de captivité sous le Bassin d'Orchies [79],[80] et pour la nappe du calcaire carbonifère au passage en captivité à l'Est de Lille [76],[77]. Avec cependant des rapports de distances doubles dans le cas du calcaire par rapport à la craie car l'eau n'y circule pas à la même vitesse. C'est le temps de contact entre l'eau et la couverture argileuse qui joue sur le degré d'avancement de la transformation.

Tout d'abord commençons par quelques définitions chimiques :

- * \underline{T} = concentration en milliéquivalent = $\frac{\text{teneur en milligramme} \times \text{Valence}}{\text{masse moléculaire}}$
- \underline{T}_h = titre hydrotimétrique total = $5 \times r(\text{Ca} + \text{Mg})$
Il exprime la dureté d'une eau.
- \underline{T}_a = titre alcalimétrique = $5 \times r(\text{CO}_2)$
A remarquer que
si $T_a < T_h$, on a plutôt des chlorures et des sulfates de calcium ou de Magnésium
et si $T_a > T_h$, on aura des bicarbonates de soude ou de potassium
- * \underline{T}_{ac} = titre alcalimétrique complet = teneur en hydrogénocarbonates
- Bases alcalines : sodium (Na⁺) et potassium (K⁺)
- * Bases alcalino-terreuses : Calcium (Ca²⁺) et Magnésium (Mg²⁺)
- Rapport de bases = $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) , r(\text{Ca}^{2+}) + r(\text{Mg}^{2+})$

- Degré d'oxydation : le degré d'oxydation d'un élément est obtenu en faisant la différence entre la charge totale de la molécule et la somme des charges des autres éléments.

Exemple : Dans NH_4^+ , la charge de la molécule est de +1, la charge d'un atome d'hydrogène est de +1, donc le degré d'oxydation de l'azote est de :

$$I - (4 \times (+1)) = -III$$

Dans NO_3^- , la charge d'un oxygène est -II, le degré d'oxydation de l'azote est de : $(-I) - (3 \times (-II)) = +V$

Dans N_2 le degré d'oxydation est nul = 0

Le phénomène d'echaes de bases (G. WATERLOT)

"Au fur et à mesure qu'une nappe aquifère captive, s'éloigne davantage de son bassin d'alimentation, les propriétés chimiques de ses eaux varient progressivement. Le degré hydrotimétrique et la teneur en calcium et magnésium diminue tandis que la teneur en sodium, sulfates et chlorures augmente. Progressivement, la concentration en sels s'accroît et l'eau perd ainsi peu à peu sa **potabilité**.

Il peut paraître surprenant, a première vue, d'une part, qu'une eau a faible degré hydrotimétrique ne soit pas potable, d'autre part, qu'une eau provenant d'un terrain **essentiellement calcaire** soit pauvre en calcium".

On peut découper le phénomène en 4 zones :

1) Zone d'alimentation : (nappe libre) : eaux dures et bicarbonatées calciques dont l'eau a les caractéristiques suivantes :

- riche en calcium et magnésium
- rapport de base < 0.20
- **28" < Th < 49"** ce sont donc des eaux "dures"
- résidu sec < 500 mg/l en général
- carbonatée

2) Zone proximale de captivité : enrichissement en soude (**NaOH**) et magnésie.

Dans le cas du Bassin d'Orchies cette zone s'étend de 0 à 8 kilomètres du recouvrement en allant vers son centre.

- Baisse de la teneur en calcium et donc du Th
- Début des échanges avec un rapport de bases qui tend vers 1
- Augmentation des bases alcalines (Na^+ , K^+)
- Résidu sec stable entre 400 et 500 mg/l
- Les chlorures sont inchangés et on observe une légère baisse en sulfates

3) Zone intermédiaire et des échanges de bases : eaux dures et nettement sodiques

Zone de 8 à 12 km du recouvrement dans le Bassin d'Orchies.

- Augmentation du résidu sec qui devient > à 500 mg/l
- Celle-ci est due à un apport en Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}
- On a un rapport de base de 1 dû à une augmentation des bases alcalines et à une baisse des bases alcalino-terreuses.

4) Zone éloignée de captivité : eaux douces et alcalines

De 12 a 15 km du recouvrement du Bassin d'Orchies

- Baisse du calcium et du magnésium donc Th très faible (**8"**) d'où une eau douce
- Les teneurs en Na* et K' continuent à augmenter
- On observe aussi une baisse des carbonates et une augmentation des chlorures et des sulfates.
- Plus on s'éloigne du recouvrement plus les eaux deviennent chlorurées.

Voici quelques analyses types de ces zones c'après G. WATERLDT (1958).

Remarque : Na' symbolise les teneurs en alcalins (Na++ K')

- Nappe libre (Blendecques - Pas-de-Calais)

Th = 29"	CO ₃ ⁻ = 186 mg/l ⁻¹	Ca ²⁺ = 88 mg/l ⁻¹
Tac = 25°	SO ₄ ²⁻ = 18 mg/l ⁻¹	Mg ²⁺ = 3 mg/l ⁻¹
Résidu sec = 342 mg/l ⁻¹	Cl ⁻ = 22 mg/l ⁻¹	Na' = 33 mg/l ⁻¹
Rapport de base = 0,31	NO ₃ ⁻ = 9 mg/l ⁻¹	

Pour G. WATERLOT c'est l'analyse type d'une eau de la nappe libre de la craie d'un captage éloigné des rejets d'eaux usées (habitations, usines). Cette analyse a été effectuée avant 1958. il n'y avait donc pas de traces des diverses pollutions récentes. Il faut cependant relativiser la précision des mesures car la technique a beaucoup évolué depuis, l'ordre de grandeur reste tout de même intéressant.

- Nappe semi-captive (Thumeries - Nord - Bassin d'Orchies) a 6.8 km des affleurements

Th = 22"	CO ₃ ⁻ = 186 mg/l ⁻¹	Ca ²⁺ = 44 mg/l ⁻¹
Ta = 31"	SO ₄ ²⁻ = 72 mg/l ⁻¹	Mg ²⁺ = 26 mg/l ⁻¹
Résidu sec = 500 mg/l ⁻¹	Cl ⁻ = 42 mg/l ⁻¹	Na* = 104 mg/l ⁻¹
Rapport de base = 1,03		

Analyse type d'une eau entre la zone proximale de captivité et la zone des échanges de bases.

- Nappe captive (Orchies - Nord) à 10.5 km du recouvrement

Th = 8,1°	CO ₃ ⁻ = 186 mg/l ⁻¹	Ca ²⁺ = 19 mg/l ⁻¹
Ta = 31"	SO ₄ ²⁻ = 78 mg/l ⁻¹	Mg ²⁺ = 9 mg/l ⁻¹
Résidu sec = 540 mg/l ⁻¹	Cl ⁻ = 46 mg/l ⁻¹	Na' = 173 mg/l ⁻¹
Rapport de base = 4,6		

Avec les normes actuelles (Annexe VIII), le sodium est en quantité trop importante car la limite est de 150 mg/l⁻¹. C'est une eau type de la zone des échanges de bases.

- Nappe très captive (Armentières - Nord) à 12 km du recouvrement

Th = 9.6"	CO ₃ ⁻ = 141 mg/l ⁻¹	Ca ²⁺ = 23.6 mg/l ⁻¹
Ta = 23.5"	SO ₄ ²⁻ = 97 mg/l ⁻¹	Mg ²⁺ = 9 mg/l ⁻¹
Rapport de base = 11.68	Cl ⁻ = 401 mg/l ⁻¹	Na' = 516 mg/l ⁻¹
Résidu sec = 1514 mg/l ⁻¹	NO ₃ ⁻ = 1,2 mg/l ⁻¹	

Les fortes augmentations du résidu sec, des sulfates, du sodium et des chlorures rendent cette eau non exploitable.

Ces transformations chimiques sont dues d'après G. WATERLOT aux échanges de bases [76] et [77] qui se passeraient entre les ions alcalino-terreux en dissolution dans l'eau et les ions alcalins des couches d'argile au passage en captivité.

Donc de fortes valeurs en sodium et potassium peuvent s'expliquer par une origine naturelle pour une nappe en captivité sous des sédiments argileux. Il en est de même pour les chlorures qui accompagnent le sodium. Par contre pour les sulfates, le lien ne paraît pas évident.

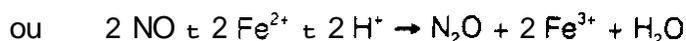
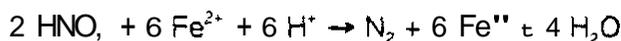
Des études plus récentes ([42], [61], [70]) montrent un phénomène semblable pour l'élément fluor. La première remarque a été que les teneurs en fluor des nappes captives étaient plus importantes que celles des nappes libres et dépassaient même les normes de potabilité fixée à 1,5 mg/l. On a relevé, par exemple, des valeurs de 3 mg/l à St Venant, 2,5 à Lestrem dans le Pas de Calais et de 6 mg/l à Comines, 2,4 mg/l à Auchy les Orchies et 2,1 mg/l à Orchies dans le Nord. Puis, il a été mis en évidence une augmentation des teneurs avec une augmentation du degré de captivité. Une étude statistique a permis d'étudier les corrélations entre le fluor et d'autres éléments. Il en ressort une forte relation entre le fluor et les minéraux argileux. De plus, on a vu que la teneur du fluor s'accroît avec le temps de séjour de l'eau dans le réservoir. Il s'opère des échanges entre le fluor (F^{2-}) présent entre les feuillets silicatés des argiles et les ponts hydroxyles OH-.

4.2 LA DENITRIFICATION

C'est un processus d'oxydo-réduction qui entraîne la transformation de l'ion nitrate (NO_3^-) en forme gazeuse (NO, ou N_2). Ces éléments rentrent dans le cycle de l'azote (annexe VI et VII), ce qui rend difficile la connaissance de leurs origines. De plus, les végétaux et les bactéries jouent un rôle dans ce cycle qu'il ne faut pas négliger [56]. On connaît deux types de dénitrification, l'une est chimique l'autre est biologique ([62], [72]).

4.2.1 LA DENITRIFICATION CHIMIQUE

Elle s'opère sans participation de microorganismes spécifiques. L'ion nitrate est alors réduit par des réducteurs tels que le fer, le manganèse ou le soufre et ce conformément à des réactions du type :



Le milieu doit être anoxique et contenir des réducteurs à potentiel bas. Des propriétés de catalyseurs de Cu^{2+} et Ag^{2+} ont été remarquées.

Dans le milieu naturel, des minéraux se composant de fer ferreux, de manganèse ou de soufre peuvent créer dans ces conditions une dénitrification. La pyrite (FeS_2), par exemple, peut très bien remplir ce rôle. Or dans les couches crétacées, la pyrite est souvent présente (chapitre 2).

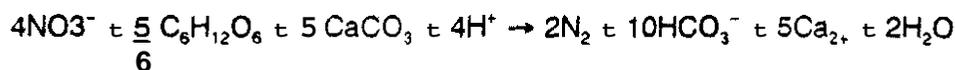
On retrouve alors une eau dans laquelle les nitrates sont absents mais contenant de l'ammonium quand celui-ci n'est pas repris par le cycle de l'azote. Cette eau sera aussi plus chargée en éléments réduits (Fe^{2+} , Mn^{2+}) qu'en éléments oxydés car ces derniers sont réduits par d'autres transformations.

4.2.2 LA DENITRIFICATION BIOLOGIQUE

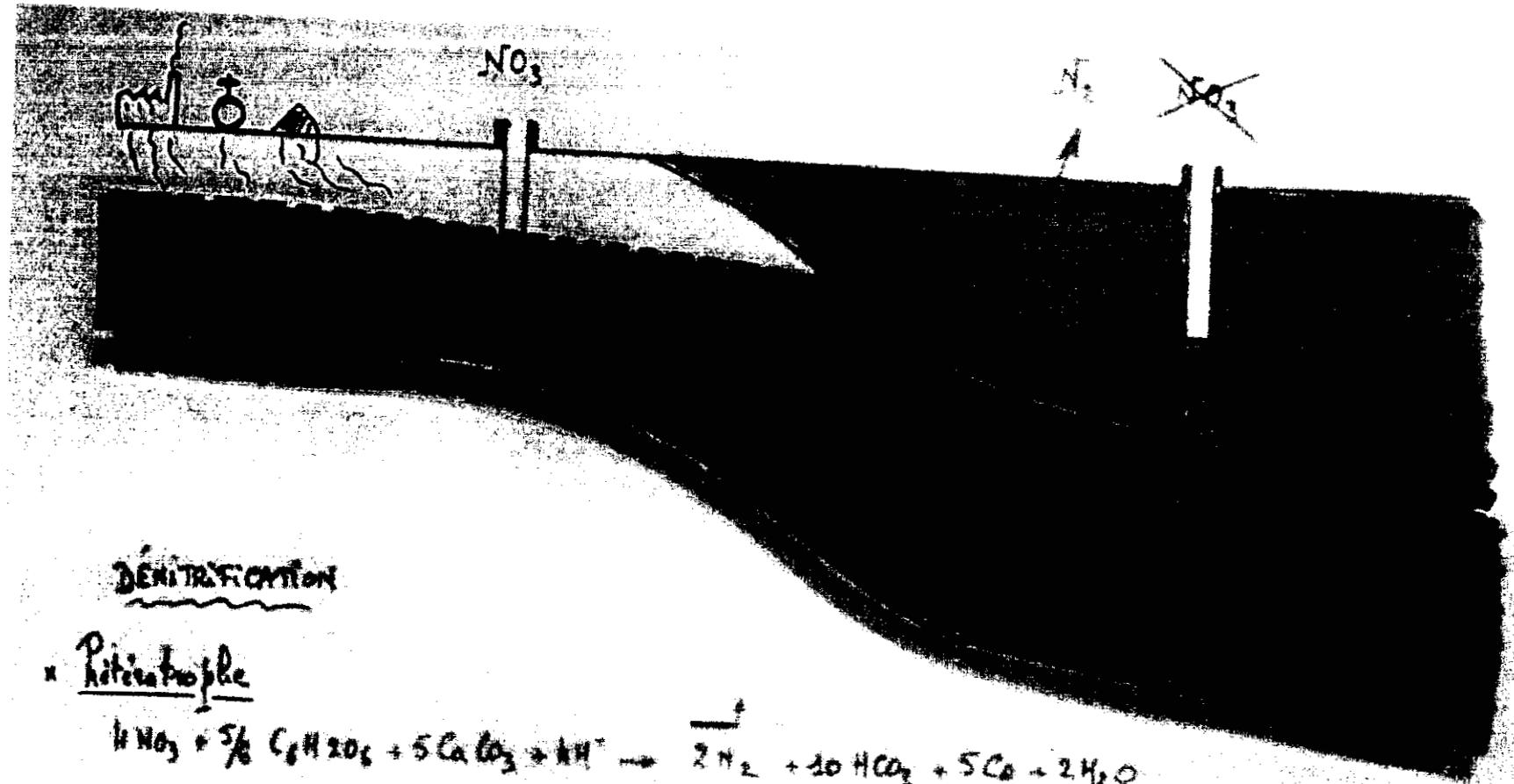
C'est un phénomène respiratoire dans lequel les nitrates (NO_3^-) en anaérobiose (absence d'oxygène dissous) au moins partielle fournissent l'oxygène dans le processus d'oxydation de la matière organique ou de minéraux. Le premier processus est dit hétérotrophe, le second est autotrophe (doc.15).

Le processus hétérotrophe

Si on représente la matière organique par du glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) on peut schématiser la dénitrification dans un aquifère carbonaté par :



Cette réaction s'accompagne d'un dégagement d'azote gazeux, Elle passe par plusieurs étapes durant lesquelles sont produits des éléments intermédiaires que l'on peut retrouver si la dénitrification n'est pas complète. Cette dénitrification a été mise en évidence de manière certaine sur la bande de passage en captivité dans la craie du Nord et sous les alluvions tourbeuses ([65], [72], [23], [24], [13], [14]). Le même phénomène a aussi été remarqué dans la nappe de la craie de l'Est de l'Angleterre [20]. On observe alors une disparition totale des nitrates en quelques mètres seulement (doc.15).

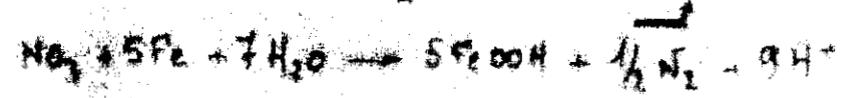


DENITRIFICATION

* hétérotrophe



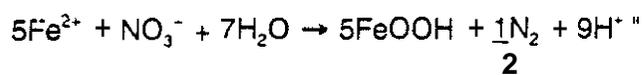
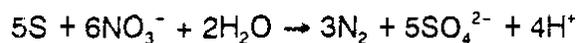
* autotrophe



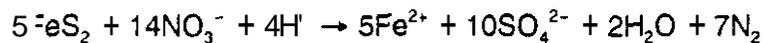
Ce phénomène a pu être reproduit de manière artificielle dans une expérience de bassin d'infiltration à Emmerin au sud de Lille [30]. D'après une méthodologie mise au point par le BURGEAP, il a été tenté de reproduire des conditions proches de celles favorables à la dénitrification naturelle sous les bassins de décantations des sucreries. Les résultats ont démontré une dénitrification locale sous le bassin d'infiltration, mais les volumes infiltrés restent à optimiser.

Le processus chimiotrophe (autotrophe non phototrophe) (B. SIMON, 1986)

"La dénitrification peut également fonctionner par voie autotrophique. Le composé oxydable pouvant être soit le soufre réduit, soit le fer. Les bactéries responsables de la réduction autotrophique du nitrate par le soufre sont du genre Thiobacillus et les ferrobactéries susceptibles de transformer le fer ferreux en ferrique sont du genre Gallionella, Leptothrix, Sphaerotilus et Ferrobacillus. Ces différentes bactéries oxydent le substrat (S ou Fe) et libèrent ainsi l'énergie nécessaire à leur activité métabolique, en utilisant l'oxygène du nitrate en anaérobiose, selon les réactions suivantes :



Par exemple, la pyrite (FeS_2) est réduite par Thiobacillus Denitrificans qui a besoin, pour respirer, de soufre moléculaire et de nitrate suivant la réaction :



On obtient donc une eau très sulfatée et du fer ferreux qui peut réduire à nouveau les nitrates. Ce processus reste cependant marginal par rapport au processus hétérotrophe.

" La dénitrification est un phénomène lié aux conditions rédox du milieu. La teneur en oxygène dissous, le potentiel rédox, le pH, la température, la concentration en éléments réducteurs potentiels tels que le carbone organique, le fer ferreux, les sulfures..., la présence de bactéries dénitrifiantes, sont autant de facteurs physico-chimiques et biologiques qui doivent être pris en compte dans toute étude visant la mise en évidence de ce phénomène."

Energétiquement, la dénitrification hétérotrophe est très compétitive vis à vis de la respiration. ce qui se traduit par le fait qu'elle peut débuter alors qu'il existe encore de l'oxygène dissous dans le milieu : en dessous d'une certaine pression partielle de ce gaz, il devient énergétiquement plus facile à des bactéries de "respirer" l'oxygène de l'ion nitrate.

De plus la zonation aérobie-anaérobie est spatiale mais aussi temporelle, en effet, une nappe peut suivant sa piézométrie être captive ou libre et donc avoir des pressions d'oxygène dissous très variables dans le temps.

4.2.3 METHODES D'IDENTIFICATION DE LA DENITRIFICATION

Une revue de ces méthodes a été dressée par MARIOTTI [65] ou il développe principalement trois d'entre elles.

- La méthode hydrogéochimique

Elle consiste à situer la dénitrification par un gradient de potentiel rédox. En considérant la présence ou l'absence de certains éléments chimiques (O_2 , NO_3^- , Fe^{2+} , Mn^{2+} ...). On définit ainsi des zones en fonction de leur degré d'oxydation (explication plus développée dans le chapitre suivant)

- La méthode basée sur la sursaturation en azote moléculaire dissous

La dénitrification conduit à la formation d'azote gazeux N_2 . En faisant une étude de l'évolution de la quantité de ce gaz présent dans l'eau on peut observer le phénomène de dénitrification [72].

- La méthode isotopique

La réaction de dénitrification par les bactéries qui voit la rupture d'une liaison N-O de l'ion nitrate entraîne un fractionnement des isotopes de l'azote. Les liaisons établies par l'isotope léger étant plus facilement et plus rapidement brisées par les bactéries que celles faisant intervenir l'isotope lourd, ceci provoque une très légère différence de vitesse de réaction des deux isotopes (plus rapide pour l'isotope léger).

Cependant comme les variations isotopiques en azote dans les composés naturels sont faibles en valeur absolue, on procède alors par mesure relative par rapport à un étalon international de référence (l'azote de l'air).

Les résultats sont exprimés en unités delta qui correspondent à l'expression suivante

$$\delta\text{‰} = \left(\frac{R \text{ échantillon}}{R \text{ étalon}} - 1 \right) \times 10^3$$

avec R = rapport de l'isotope lourd (^{15}N) sur l'isotope léger (^{14}N)

Lors de la dénitrification, l'azote moléculaire qui est produit est donc enrichi en isotope léger ($\delta < 0$) alors que le nitrate résiduel, lui, s'enrichit en isotope lourd ($\delta > 0$), il suffit alors de mesurer l'enrichissement isotopique dans les eaux.

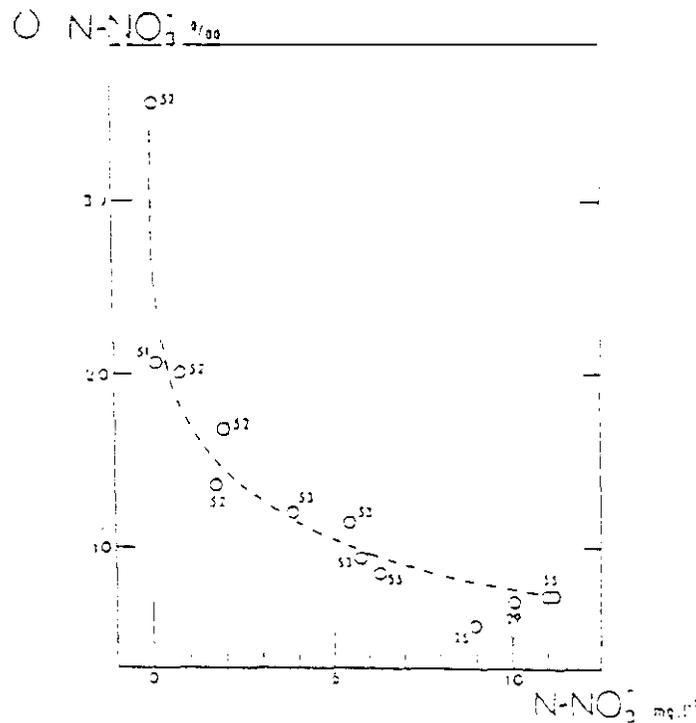
Cependant une diminution des teneurs en nitrates et une valeur positive de delta ne sont pas suffisantes pour justifier d'une dénitrification.

En effet, une dilution de la nappe par les eaux appauvries en nitrates (eau de rivière, nappe profonde et ancienne, ...) donne un même type d'évolution.

Il ne faut pas non plus occulter l'action du système racinaire de la végétation, quand la nappe est à faible profondeur, qui en assimilant les nitrates fait baisser leur teneur dans la nappe [56].

Pour connaître la cause réelle de la diminution des nitrates dans une nappe, il faut regarder la courbe d'évolution ($N-NO_3^-$; $\delta^{15}N-NO_3^-$)

- Si la courbe a une allure logarithmique on peut suspecter un phénomène de dénitrification (doc.16).
- Si l'allure de la courbe est hyperbolique on peut plutôt penser à une dilution avec des eaux à plus faible concentration en nitrates mais à $\delta^{15}N$ plus élevé.
- S'il n'y a pas de variation de delta et que l'on observe tout de même une baisse de la teneur en nitrate, on peut être en présence d'assimilation racinaire ou d'une dilution par une nappe à faible teneur en nitrate et de delta proche.



DOCUMENT 16
COMPOSITION ISOTOPIQUE DES NITRATES DE LA NAPPE DE LA CRAIE
SITE DE FLERS EN ESCREBIEUX
(A.MARIOTTI)

- Une autre méthode peut être utilisée en complément mais en aucun cas toute seule. Elle consiste à rechercher la présence de bactéries dénitrifiantes.

Mais les bactéries sont ubiquistes dans le sol et peuvent respirer comme les bactéries aérobies. Il ne faut donc pas voir de corrélation entre le nombre de bactéries et le taux de dénitrification.

De plus les bactéries sont fixées sur la matrice ce qui explique la déconvenue des chercheurs qui ont voulu les découvrir dans les échantillons d'eau.

4.3 D'AUTRES OXYDO-REDUCTIONS

On a déjà vu pour la dénitrification, l'importance de la présence de matière organique pour une respiration anaérobie de bactéries. Cependant, en absence de nitrates et dans des conditions précises (matière organique en excès, aquifère captif, milieu réducteur...). des bactéries peuvent utiliser d'autres éléments pour respirer.

B. SIMON [72] en a fait une synthèse :

"Les tableaux du document 17 d'après STUMM et MORGAN,CHAMP présentent la séquence des différents processus rédox intervenant dans un système clos vis à vis de l'entrée de nouvelles espèces oxydées, et dans lequel existe un excès de carbone organique (par exemple un aquifère souterrain confiné).

Il apparait dans un tel système que l'excès de carbone organique va réduire successivement **les** différentes espèces oxydées présentes dans le milieu dans l'ordre décroissant du caractère oxydant, à savoir O_2 (qui va disparaître), NO_3^- (réduit en N_2), Mn^{4+} et Fe^{3+} (réduits respectivement en Mn^{2+} et Fe^{2+} qui apparaissent en solution). SO_4^{2-} (réduit en sulfure). La dénitrification se situe juste après la respiration aérobie, processus entraînant la disparition de l'oxygène dissous et avant l'apparition du $Fe(II)$ et du $Mn(II)$ en solution (si **les** espèces oxydées existent dans l'aquifère)."

Ainsi, suivant **le** degré d'oxydation du milieu (ou de la nappe) on peut différencier trois zones (doc.18) :

Dans la première, la respiration se fait grâce à O_2 et NO_3^- on obtient alors des dégagements gazeux de CO_2 et de N_2

Dans la seconde, plus réductrice, la respiration se fait grâce à la réduction de Mn^{4+} et Fe^{3+} , on a alors une eau chargée en ions réduits Mn^{2+} et Fe^{2+} (souvent vrai pour des nappes captives).

Dans la troisième, encore plus réductrice, la respiration des bactéries sulfato-réductrices peut avoir lieu.

Cependant, **à** l'état naturel, on trouve les métaux et les sulfures souvent accompagnés par des métaux plus lourds (Co, Cr, Ni, Cu, As...) qui peuvent être libérés par les réductions.

Il existe un stade encore plus avancé de l'oxydo-réduction. c'est la fermentation **méthanique**. Celle-ci pourrait expliquer la présence de certains hydrocarbures dans les nappes très captives.

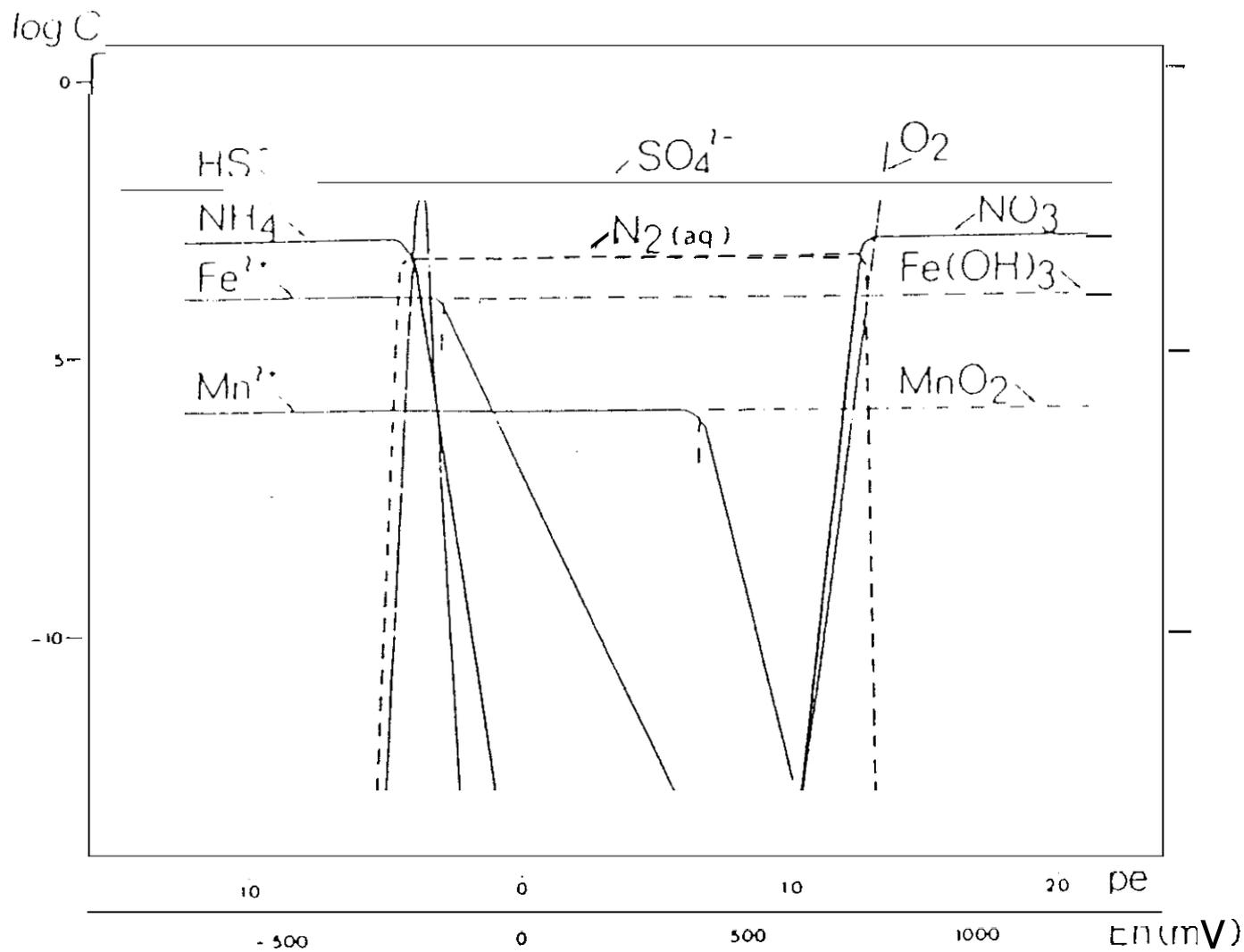
MARIOTTI [65] rapporte que dans les travaux de GILLHAM et CHERRY (1977) et de HENDRY (1983). il est fait mention, après une disparition rapide d'oxygène dissous et des nitrates, plus en profondeur et dans des conditions très réductrices, de l'apparition de **méthane** en concentration notable. Les relations hydrocarbures-dénitrification restent cependant encore peu connues [59].

REDUCTION	ΔG° (kcal.mole ⁻¹)	Eh(w) (mV)	pe ^o (w)
(A) $1/4O_2 + H^+ + e^- = 1/2H_2O$	- 23,35	313	13,75
(B) $1/5NO_3^- + 6/5H^+ + e^- = 1/10N_2 + 3/5H_2O$	- 28,73	746	12,65
(C) $1/2MnO_2 + 2H^+ + e^- = 1/2Mn^{2+} + H_2O$	- 28,24	396	6,71
(D) $1/8NO_3^- + 5/4H^+ + e^- = 1/8NH_4^+ + 3/8H_2O$	- 20,32	363	6,15
(E) $Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^- = Fe^{2+} + 3H_2O$	- 24,37	- 185	- 3,14
(F) $1/8 SO_4^{2-} + 9/8H^+ + e^- = 1/8HS^- + 1/2H_2O$	- 5,30	- 112	- 3,75
(G) $1/8CO_2 + H^+ + e^- = 1/8CH_4 + 1/4H_2O$	- 3,91	- 722	- 4,13
OXYDATION			
(2) $1/4CH_2O + 1/4H_2O = 1/4CO_2 + H^+ + e^-$	- 1,64	- 201	- 3,20

PROCESSUS REDOX	$\Delta G^\circ(w)^a$
Respiration aérobie (2)+(A) : $CH_2O + O_2 = CO_2 + H_2O$	- 120,0 (6)
Dénitrification (2)+(B) : $CH_2O + 4/5NO_3^- + 4/5H^+ = CO_2 + 2/5N_2 + 7/5H_2O$	- 113,9 (4)
Réduction de Mn(IV) (2)+(C) : $CH_2O + 2MnO_2 + 4H^+ = 2Mn^{2+} + 3H_2O + CO_2$	- 81,3 (7)
Réduction de Fe(III) (2)+(E) : $CH_2O + 4Fe(OH)_3 + 8H^+ = 4Fe^{2+} + 11H_2O + CO_2$	- 27,7 (3)
Réduction des sulfates (2)+(F) : $CH_2O + 1/2SO_4^{2-} + 1/2H^+ = 1/2HS^- + H_2O + CO_2$	- 25,0 (9)
Fermentation méthanique (2)+(G) : $CH_2O + 1/2CO_2 = 1/2CH_4 + CO_2$	- 22,2 (10)

^a $\Delta G^\circ(w) = \Delta G^\circ - RT \ln [H^+]^p$, avec $[H^+] = 10^{-7}$ mole.l⁻¹
et p = coefficient stoechiométrique de $[H^+]$

Séquence de processus rédox dans un aquifère clos, contenant initialement de la matière organique et diverses espèces oxydées, dissoutes ou minérales (d'après Stumm et Morgan, 1981 ; Champ et al., 1979)



Séquence de 1/2 réactions rédox: diagramme d'équilibre logarithme de la concentration — potentiel d'oxydo-réduction (Eh ou pe), dans une eau de pH 7. Le diagramme est établi pour les concentrations suivantes:

ΣN (concentration totale des diverses espèces azotées) = $10^{-3} M$, ΣS = $10^{-2} M$, Fe = $10^{-4} M$, Mn = $10^{-6} M$.

4.4 - LA DISSOLUTION

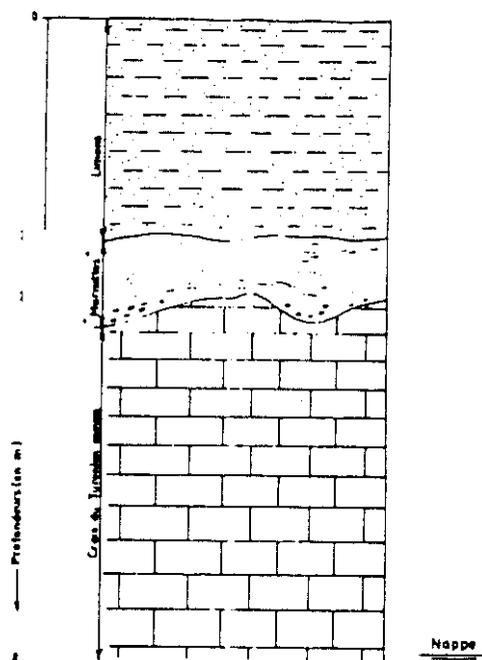
Nous avons déjà vu que l'eau de pluie, peu minéralisée, va se neutraliser **en** dissolvant les minéraux et les substances solubles qu'elle va rencontrer dans le sol et le sous-sol. Dans le cas de la craie c'est un facteur d'agrandissement des fissures. Les infiltrations vont aussi lessiver les sols des produits polluants qu'ils peuvent contenir (engrais, pesticides, déchets, métaux, etc...).

De plus, les pluies sont rendues encore plus acides par solubilisation de **gaz** émis par les combustions des industries.

KLESZCZ a remarqué que dans les régions proches des rivages, les eaux de pluie sont naturellement chargées **en** chlorures par la dispersion d'eau de mer dans l'atmosphère.

Nous voyons avec ces quelques exemples qu'il est difficile de calculer le pourcentage dû à une origine naturelle et celui dû à la pollution de la charge chimique d'une eau de pluie et donc de son caractère agressif.

D. BERNARD a étudié sur le site de Sainghin en Mélançois la dissolution d'un complexe limon sur craie, classique dans le Nord de la France. Il a pu alors mettre en évidence un front d'accumulation des minéraux insolubles de la craie et principalement des argiles qui séparent deux zones. La zone supérieure est lessivée de ses éléments pour les limons et très altérée pour la craie (marnette), alors que la zone inférieure retrouve progressivement son faciès normal. Cet horizon d'accumulation est fortement chargé en silice, aluminium, titane, sodium, manganèse, fer, ... (doc.19).



DOCUMENT 19
PROFIL DU Puits EXPERIMENTAL DE SAINGHIN-EN-MELANTOIS
(D. BERNARD, 1979)

L'explication donnée est que l'eau de pluie en traversant la terre végétale devient encore plus acide et en s'infiltrant, dégrade et transporte vers le bas les lessivats d'argile par dissolution de la craie. On peut aussi avoir dans cet horizon d'accumulation un phénomène d'échanges de bases.

L'accumulation de ces argiles provoque le ralentissement de la vitesse d'infiltration de l'eau et la précipitation de la plus grande partie des éléments en solution.

De plus, la craie (comme le calcaire) peut contenir des minéraux comme la calcite (CaCO_3), la dolomite ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$) et le gypse ($\text{CaSO}_4,2\text{H}_2\text{O}$). La dissolution de ces minéraux peut charger la nappe en Ca, Mg, SO_4 . On voit alors l'importance de la piézométrie.

Les périodes de faibles recharges permettent le stockage des solutions percolant dans la zone non saturée. Celles-ci seront remobilisées par la remontée du niveau piézométrique.

Pendant la nappe est plus neutre que les pluies, ce sera donc une réaction moins importante.

Les captages modifient les conditions hydrauliques du milieu et provoquent, eux aussi, une dissolution de la matrice crayeuse. Citons deux exemples de problèmes qui peuvent se rencontrer.

1°) En pompant, on passe d'un niveau statique à un niveau dynamique, la nappe prend la forme d'un cône autour du captage. Par l'abaissement du niveau piézométrique, on peut modifier les conditions physico-chimiques du milieu.

2°) Les pompages accélèrent la circulation de l'eau dans l'aquifère. D'une part, en écourtant le temps de contact entre la matrice et l'eau, on diminue les possibilités d'échange entre celles-ci. Mais d'autre part, le flux crée une force mécanique qui va attaquer la matrice, et augmenter sa dissolution.

Dans le cas du Bassin Minier, pour assécher les zones inondées par le jeu des affaissements miniers, on pompe l'eau de la nappe pour la rejeter dans les cours d'eau [19]. Mais ce faisant on accélère la dissolution de la craie. Tout ceci a pour répercussion en surface des tassements différentiels qui abaissent à nouveau le niveau du sol par rapport à la nappe. De plus, les eaux de dénoyage, qui sont de très mauvaise qualité, sont rejetées dans les rivières qui vont venir alimenter la nappe alluviale et la polluer.

4.5. L'EFFET FILTRE DES BERGES

Quand on veut élaborer une modélisation du comportement hydrodynamique d'une nappe ([64], [69], [12], [68], [39], [52]), il ne faut pas négliger la recharge de la nappe par les cours d'eau. Celle-ci peut en effet prendre une part importante en volume d'eau. Il n'est pas rare de voir un cours d'eau baisser de niveau et même s'assécher complètement quand un pompage s'effectue dans une nappe profonde mais en relation avec les réseaux de surface (cas des marais de Vicq). On peut imaginer les conséquences de l'alimentation par l'eau des rivières, souvent d'une qualité médiocre, sur les nappes aquifères exploitées,

Cependant des mécanismes naturels interfèrent sur le transfert des solutés au passage à travers une zone colmatée des alluvions. C'est ce que D.DARMENDRAIL appelle "l'effet filtre des berges" ([22], [40]). C'est un filtre mécanique mais aussi chimique. Les conditions biogéochimiques des berges vont permettre une dégradation de la matière organique ainsi qu'une fixation des polluants (principalement des métaux lourds). Néanmoins les réactions mises en jeu sont réversibles si les conditions physico-chimiques du milieu viennent à évoluer et au lieu d'un effet épurateur, la fraction colmatée peut rearguer tous les polluants qu'elle avait fixés.

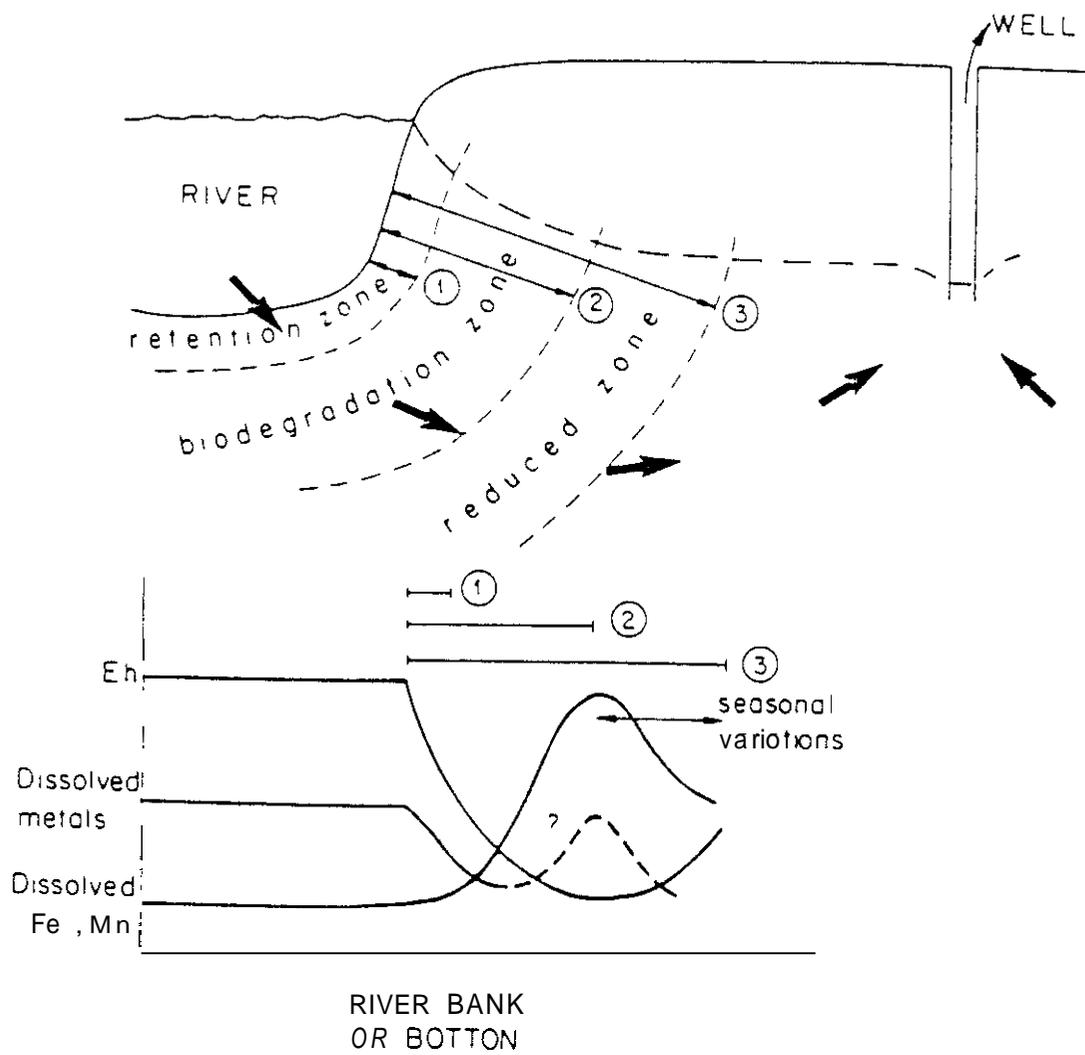
Les principaux mécanismes géochimiques susceptibles d'être impliqués dans l'effet filtre des berges sont développés par D.DARMENDRAIL [40].

La mobilité des polluants organiques ou métalliques est fonction de :

- * l'adsorption / désorption (échanges ioniques) sur des particules solides de nature variable (oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse, argiles, carbonates, silicates, matière organique).
- * la précipitation / dissolution de divers solutés plus ou moins solubles (ZnS, Pb(OH)₂,...)
- la dégradation : processus biologique ou abiotique affectant certains composés organiques.
- * la coprécipitation : avec des oxydes hydratés (fer, manganèse) et avec des carbonates (calcium, magnésium, fer, manganèse)
- * la complexation avec des molécules organiques ou des ions inorganiques (chlorure, sulfate)
- la diffusion : au sein d'un matériau solide
- la floculation / peptisation : association électrocinétique de particules colloïdales

Le transfert de l'oxygène, utilisé par les microorganismes pour minéraliser la matière organique, va provoquer le développement d'une zone réduite dans laquelle on va retrouver les différents stades de réduction décrits en 3.3.

DOCUMENT 20
DESCRIPTION SCHEMATIQUE DE LA BIOGEOCHIMIE D'UNE BERGE
(D DARMENDRAIL)



Dans l'exemple de l'étude de la Deûle aux Anserettes [22], qui fournit 20% de la recharge de la nappe de la craie, les auteurs identifient 5 zones entre la rivière et le captage (doc.20).

1") La rivière : très polluée et où cependant des phénomènes de dissolution ou d'adsorption avec des éléments en suspension peuvent se dérouler.

2") Une zone de rétention : les matières qui ont fixé des métaux lourds vont se déposer au fond de la rivière pour y former une couche de sédiments.

3") Une zone de biodégradation (1) : la matière organique est dégradée, les métaux qui lui étaient associés sont remobilisés.

4") Une zone réduite (2) : il s'y développe une succession d'oxydo-réductions qui vont réduire les oxydes de fer et de manganèse.

Bien évidemment, ces équilibres sont fragiles et dépendent des conditions "bio-physico-chimiques" du milieu.

Ces transformations naturelles sont utilisées pour purifier artificiellement la nappe alluviale en la réalimentant à partir de l'eau de rivière [17].

La plupart des bactéries jouant un rôle important dans ces processus s'attachent à la surface des solides. Leur développement peut donc conduire à un colmatage en profondeur [30].

Ceci démontre aussi les précautions qu'il faut prendre lors du curage d'un cours d'eau et les conséquences que peut avoir le changement de gabarit d'un canal. Le curage d'un cours d'eau pose aussi le problème de l'élimination des boues extraites qui sont très chargées [41].

4.6. LES MELANGES DES NAPPES

Ce ne sont pas des transformations chimiques au sens de réaction chimique. Il s'agit des caractères diluant et oxydant d'une nappe. Dans le cas des pollutions humaines celles-ci restent assez circonscrites aux zones d'apport. Assez rapidement, si la source est ponctuelle et que le reste de la nappe est protégé, l'eau polluée est diluée dans l'ensemble de la nappe. La conséquence de la pollution initiale se retrouve à travers l'augmentation de la minéralisation de l'eau et la présence de complexes (dus à l'oxydation et la précipitation des ions non complexés dans ce nouveau milieu).

C'est aussi ce qui se passe mais dans des proportions beaucoup plus importantes quand il existe des relations entre les différentes nappes (alluviales, des sables landéniens, de la craie séno-turonienne, du calcaire carbonifère).

Dans le Bassin Minier, l'affaissement des terrains [19] a modifié localement le sens des flux entre les nappes.

* Relations nappe des sables-nappe de la craie

Lorsque le recouvrement tertiaire s'exprime sous forme de lentilles d'argile ou de sable plus ou moins argileux comme au Sud-Est du Bassin d'Orchies ou en limite de recouvrement, il peut y avoir déversement de la nappe des sables (très sulfatée par la présence de gypse) dans celle de la craie. Cette drainance a nettement été mise en évidence au Sud-Est de Valenciennes [51] et à Vicq où les marais ont été asséchés par les pompages de la nappe de la craie [58].

Il existe aussi une drainance verticale descendante à travers l'argile de Louvil qui n'est pas complètement imperméable. Lors de cette migration, l'eau peut aussi se charger en éléments présents dans les argiles.

* Relations nappe des alluvions-nappe de la craie

Dans les vallées comme celle de la Scarpe et de l'Escrebieux où les alluvions reposent sur la craie, il y a par drainance verticale descendante, des relations entre les deux nappes. Les nappes alluviales pouvant être très polluées car non protégées, cette relation peut être un vecteur de pollution de la nappe. Cependant nous avons vu que les alluvions constituaient un milieu privilégié pour certaines réactions d'auto-épuration,

• Relations nappe du calcaire carbonifère-nappe de la craie

Le calcaire carbonifère est alimenté en Belgique vers Tournai à des altitudes supérieures à celles de la nappe de la craie dans la région lilloise ou dans le bassin d'Orchies. Par un phénomène de vases communicants, il se crée une drainance ascendante qui a été mise en évidence par des méthodes isotopiques dans un rapport étudiant les possibilités de l'utilisation de la géothermie dans le bassin d'Orchies (B.BOSCH, D.BERNARD, P.CAULIER, 1980). La nappe du calcaire Carbonifère étant plus sulfatée que celle de la craie, il a été possible de remarquer le mélange de l'une dans l'autre.

Cependant, J.MANIA [64], a remarqué que lorsque les captages dans le calcaire carbonifère créent une forte dépression et rendent localement la nappe libre, on peut avoir une drainance verticale descendante de la nappe de la craie vers la nappe du calcaire carbonifère à travers le Turonien Inférieur et Moyen.

5. LES POLLUTIONS HUMAINES

Les pollutions sont très diverses, nous n'aborderons que les plus fréquentes.

Afin de rester homogène avec les chapitres précédents, il a été préféré une liste par type de pollution. Pour obtenir une synthèse des origines naturelles et humaines, par élément, on peut se référer au rapport de A.GALLEZOT (1992) ou à la thèse de D.BERNARD (1979).

La position de la nappe de la craie, assez proche du sol, la rend vulnérable aux infiltrations polluantes. Nous allons en examiner les causes les plus courantes.

* Les rejets industriels-

Le Nord-Pas de Calais, région très urbanisée et industrialisée, a longtemps vécu au rythme de l'exploitation de la houille. Mais la conjoncture a conduit la région à changer de secteurs d'industrialisation.

Il s'agit le plus souvent d'industries liées au caractère agricole de la région : conserveries, sucreries [23] [24], chimie des engrais, auxquelles s'ajoutent la construction mécanique, le matériel électrique, et le textile (implanté dans le Nord depuis longtemps).

La nature des rejets est fonction de celle de l'industrie. Par exemple, les usines d'acides phosphoriques ou d'engrais phosphatés, les cimenteries, les verreries rejettent beaucoup de fluor.

On peut différencier deux types de rejets: les liquides-solides et les gazeux.

Les phases gazeuses contiennent aussi les résidus des combustions (dioxyde de carbone, sulfates, métaux lourds...).

* Les terrils-

L'histoire économique de la région explique la formation de ces tas de déchets de la production de la houille (schistes amorphes, poussières ,...). Leur lessivage par les pluies est une origine non négligeable de minéralisation en sulfates et en métaux lourds. Leur utilisation en matériau de remblais n'est pas non plus sans poser de problème.

* Les voiries

D'après une étude du C.C.P.C.. une circulation de 1000 véhicules /jour, après une période sèche de 5 jours suivie d'une averse de 10 minutes, **les pluies emportent** :

- 270 kg/km de poussières
- * 30 kg/km de D.C.O.
- 0.5 kg/km de Pb
- * 0.2 kg/km de Zn
- * 2.9 kg/km d'hydrocarbures et graisses

Les lessivats des voiries sont recueillis pour la plupart par les fosses d'ou ils s'infiltrent dans le sol.

Les sels de dégel, surtout dans une région comme le Nord Pas de Calais, laissent aussi des pollutions sur les voiries qui seront reprises par les pluies (Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ ,...), [31], [38] .

* Les canaux et les rivières

Les cours d'eau reçoivent de nombreux types de rejets (industriels, eaux usées...) et les plus importants ont des teneurs fortes en Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , B ([15] [23] [24]) et métaux lourds (Pb, Ni, V, Sr, Cr).

• Assainissement défectueux

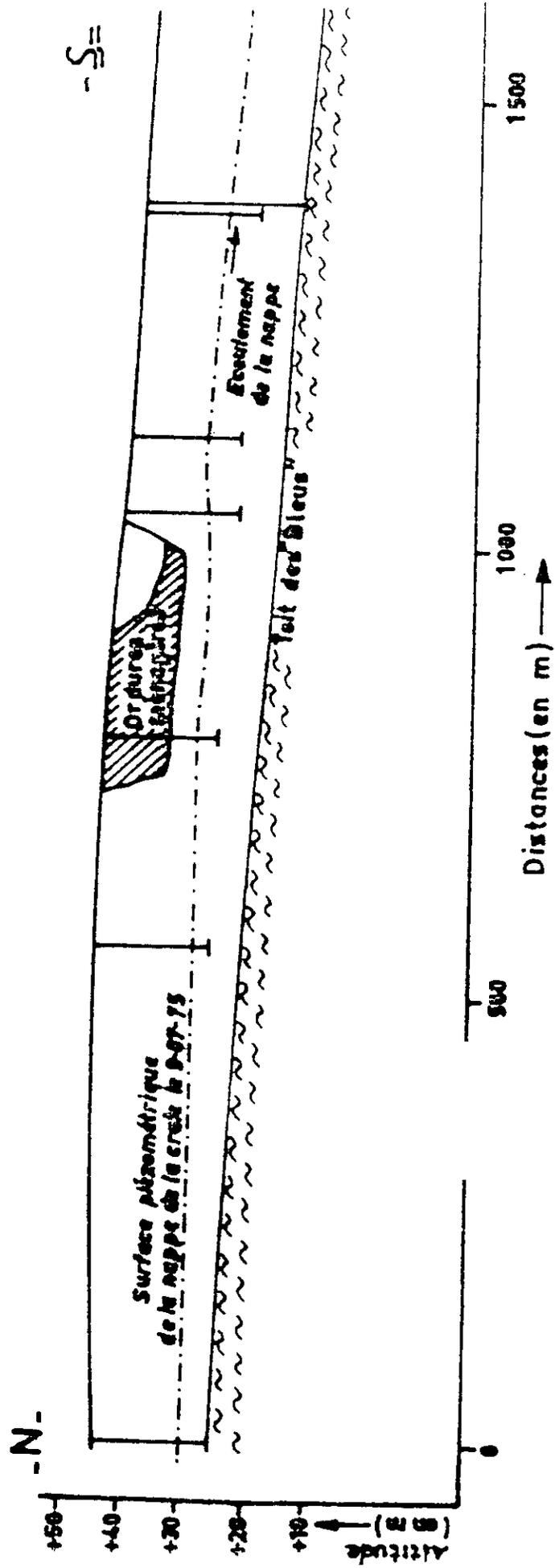
En 1992, on peut considérer que seul un tiers des habitations du bassin Artois Picardie est raccordé au réseau d'assainissement. Pour les autres, les rejets sont évacués dans le milieu naturel. De plus, les réseaux de canalisations ne sont pas totalement étanches [15]. Ces rejets et ces fuites contribuent à augmenter les teneurs en NO_3^- , Cl^- (souvent accompagnés de K^+ et Na^+), F^{2-} , B et métaux lourds.

Depuis 1990, le bore est suivi de près et **mesuré** par les DDASS du Nord et du Pas-de-Calais. En effet, le bore est un composant de certaines lessives solides et ne subit que peu de modification dans le milieu naturel. Il est un indicateur fiable des rejets urbains.

* L'agriculture

On oublie bien souvent qu'en dehors du Bassin Minier, le Nord de la France est très agricole. Les cultures céréalières, maraîchères, fermières et les pâturages occupent la majeure partie du sol.

Les engrais et les phytosanitaires (peu solubles) excédentaires sont lessivés par les précipitations et on les retrouve ensuite dans la nappe [36]. Leur apport augmente les teneurs en nitrates (dans des proportions qui peuvent être importantes [23]), en calcium, en sulfates, en potassium et en fluor .



Coupe tuée selon la ligne de courant passant par la décharge

6. LA METHODE ISOTOPIQUE : OUTIL DE RECHERCHE DE L'ORIGINE DE LA MINERALISATION DE L'EAU

Nous venons de voir que de nombreuses sources naturelles ou humaines peuvent expliquer la présence de certains éléments dans l'eau. Quand on se trouve devant une analyse chimique, il est bien difficile de connaître l'origine des teneurs. On doit alors utiliser d'autres méthodes complémentaires.

Nous avons déjà vu l'utilité de la méthode isotopique dans l'étude de la dénitrification, Mais les méthodes isotopiques sont aussi utilisées pour d'autres éléments.

Il existe deux types d'isotopes, les stables (azote, soufre ...) et les instables (tritium, carbone, oxygène...). [11]. Les premiers servent à connaître l'origine de la minéralisation de l'eau, les seconds permettent de dater la nappe.

6.1 LES ISOTOPES STABLES

La méthode générale a déjà été développée dans le chapitre dénitrification

* L'AZOTE : $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$

L'azote n'a pratiquement aucune origine géologique, il est surtout lié aux activités organiques. La méthode isotopique est utilisée en complément d'une analyse chimique classique et permet de différencier une dénitrification biologique, d'une dilution ou de l'assimilation par les végétaux. Mais cette méthode sert aussi à rechercher l'origine de l'azote quand il y a une pollution locale [18].

MARIOTTI, HALIMA et BERGER ont étudié dans la région agricole de la Brie les différentes sources d'apport nitraté [10].

Ils ont pu différencier:

- les nitrates de la minéralisation de la matière organique ($\delta^{15}\text{N} = +8.5\text{‰}$) mais très variables selon la pédologie.
- les engrais azotés lessivés ($\delta^{15}\text{N} = +3\text{‰}$)
- les nitrates de la minéralisation d'un sol forestier ($\delta^{15}\text{N} = +4$ à $+5\text{‰}$)
- les nitrates provenant de zones urbaines et industrielles ($\delta^{15}\text{N} = -10.5$ à $+12.5\text{‰}$)

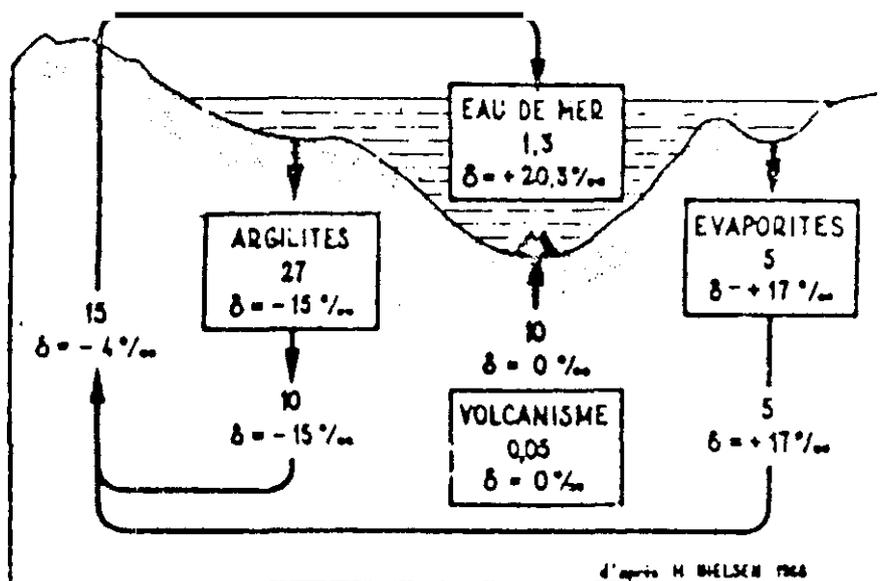
Il faut cependant relativiser les résultats qui ne sont valables que dans la région étudiée et pour une transformation récente. Et dans le cas de plusieurs sources, on obtient des valeurs intermédiaires.

D. BERNARD [11] a réalisé une échelle sur laquelle sont situées de nombreuses origines possibles pour une même valeur de delta. Ceci confirme que la méthode isotopique doit être utilisée en complément d'autres analyses.

• LE SOUFRE : $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$

Les sulfates sont présents à l'état naturel au sein des couches géologiques. Suivant la diagenèse des roches on obtient des valeurs de delta très variables (doc.22).

Cette méthode permet d'étudier l'origine des sulfates (SO_4) à partir des pourcentages des isotopes 32 et 34 du soufre de l'anhydride sulfureux (SO_2).



Cycle géochimique du soufre sédimentaire.

Les principaux réservoirs de soufre sont indiqués par des rectangles avec leur tonnage en S en 10^{13} tonnes, et leur teneur isotopique moyenne. Sur les différents circuits figurent les transferts annuels de S en 10^6 tonnes, ainsi que les teneurs isotopiques moyennes.

(d'après M. Nielsen ; 1968 dans Marcé ; 1978)

Elle a par exemple permis de prouver la parenté des eaux du calcaire carbonifère sous St AMAND et de celles du Karst de St GHISLAIN [12]. Elle a aussi mis en évidence les échanges qui existent entre la nappe du calcaire carbonifère et celle de la craie à l'Est de St AMAND-les-EAUX [21].

On a aussi pu chercher les origines des teneurs en sulfates importantes dans le Bassin Minier. Des échantillonnages sur les terrains tertiaires ont donné comme résultat:

- * $\delta^{34}\text{S}$ du gypse de l'argile d'Orchies = -42.5 ‰ (+/- 0.2)
- * $\delta^{34}\text{S}$ du soufre total des sables d'Ostricourt = -20 ‰ (+/- 0.2)
- * $\delta^{34}\text{S}$ du soufre total de l'argile de Louvil = -37.4 ‰ (+/-0.2)
- * $\delta^{34}\text{S}$ des sulfates lessivés de l'argile de Louvil = -40.4 ‰ (+/-0.2)

A ces sources naturelles possibles à delta très négatif, on peut confronter les pollutions par les eaux résiduaires industrielles $\delta^{34}\text{S}$ des sulfates = +0.5 ‰ [11].

6.2 LES ISOTOPES INSTABLES

Ils permettent de dater une eau par étude du rayonnement radioactif. On choisit un dateur en fonction de la durée de sa décroissance radioactive.

• LE TRITIUM : ^3_1H

Il est utilisé pour les eaux récentes (demi-vie de 12.26 ans). En fait cet élément était rare à l'état naturel avant les essais thermonucléaires (1956) qui en produisent une quantité importante.

Le tritium permet de suivre l'infiltration de la lame d'eau issue des précipitations en milieu non saturé. Il témoigne donc de la vulnérabilité de la nappe et se corrèle bien à la transmissivité et au temps de renouvellement de la nappe.

Pour ce qui est de dater un aquifère, il faut faire attention aux échanges entre nappes anciennes et récentes.

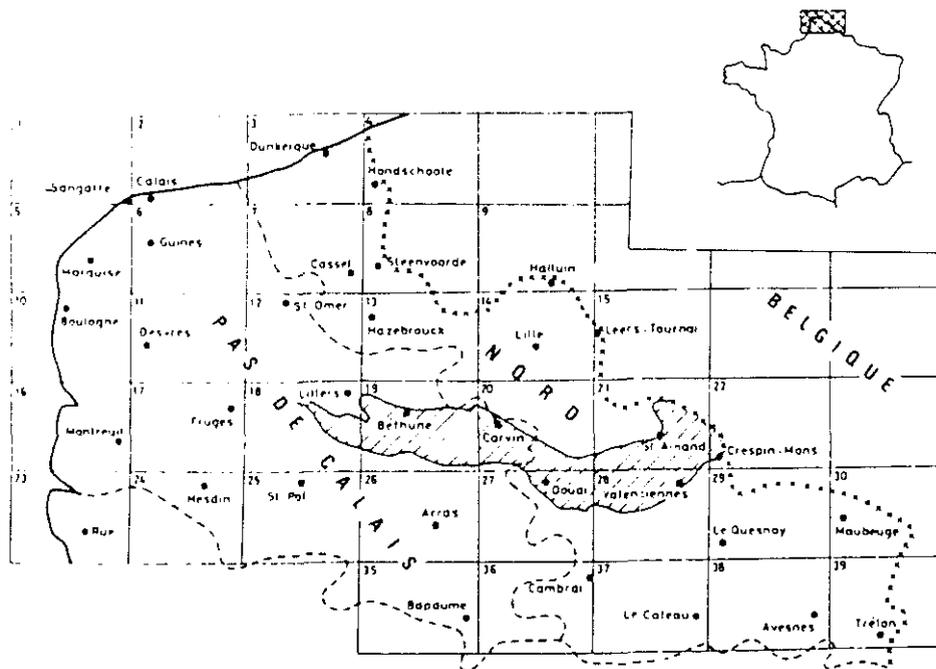
Les années 1950 marquent aussi le début de l'utilisation massive d'engrais chimiques. La méthode tritium peut ainsi aider à confirmer l'origine récente des nitrates dans une eau.

• LE CARBONE : $^{14}_6\text{C}$

Sa demi-vie de 5730 ans ne permet son utilisation que sur des eaux anciennes. Cet élément a été mesuré par exemple sur les eaux du calcaire carbonifère [12] ainsi que celles de la nappe de la craie sous le Bassin d'Orchies qui ont été datées à plusieurs milliers d'années.

7. ETUDE D'UN CAS : LE BASSIN MINIER

Nous allons maintenant voir les conséquences sur le terrain des transformations chimiques théoriques que nous avons étudiées.



DOCUMENT 24
SITUATION DU BASSIN MINIER (S.CARLIER)

L'histoire économique et le développement urbain et industriel du Bassin Minier du Pas de Calais ont conduit à la distribution actuelle d'eau souvent non potable dans la région. Les teneurs en sulfates et nitrates dépassent régulièrement les normes (doc.25).

La mauvaise qualité des ressources en eau souterraine a conduit à l'élaboration d'un programme de recherche de ressources nouvelles depuis 1974. Pour remplacer les captages pollués et subvenir aux besoins, il faudrait une capacité de production supplémentaire de 50000 m³ par jour.

La première nappe étudiée fut celle du Cénomanién. Mais sa productivité étant trop faible, on a prospecté la nappe de la craie séno-turonienne au Nord du Canal d'Aire entre Béthune et la Bassée. Cette zone paraît en effet propice à une production importante de bonne qualité car on se trouve en limite de captivité.

Cependant on se situe aussi en aval-nappe d'une région très industrialisée et à proximité du Canal à grand Gabarit qui sont des sources de pollution importantes.

Les recherches ont continué sur la zone Ouest de Béthune où les conditions naturelles sont bonnes (dénitrification chimique) et la protection par rapport à la pollution meilleure.

COMMUNES MINIÈRES DU PAS-DE-CALAIS VENEURS EN NITRATES DE L'EAU DISTRIBUÉE (1987)



	EXCELLENTE	$\text{NO}_3^- < 5$
	BONNE	$5 < \text{NO}_3^- < 20$
	ACCEPTABLE	$20 < \text{NO}_3^- < 35$
	MÉDIOCRE	$35 < \text{NO}_3^- < 50$
	MAUVAISE	$50 < \text{NO}_3^- < 100$
	TRÈS MAUVAISE	$\text{NO}_3^- > 100$
	DELIMITATION DES UNITÉS TECHNIQUES DE DISTRIBUTION	
	FORAGES PRINCIPAUX	

Il apparaît rapidement que l'on ne pourra obtenir plus de 20000 m³ par jour. On se dirige donc vers une association de champs captants. le complément étant recherché dans la vallée de l'Escrebieux.

Toutes ces phases ont été synthétisées en 1989 par B.OLLAGNON, document auquel on pourra se référer pour avoir plus de détails.

La vulnérabilité des terrains (doc.26) au sud du recouvrement Landénien explique la mauvaise qualité de la ressource dans le Bassin Minier (présence d'éléments toxiques, halométhanés, solvants chlorés, sulfates, chlorures, éléments azotés ...).

La carte du document 27 montre bien les deux faits importants concernant les nitrates.

* la pollution la plus forte est concentrée dans une bande allant de Eleu-dit-Leauwette à Noyelles-sous-Lens . Son origine urbaine ne fait aucun doute (fuites de réseau, rejets domestiques et industriels, lessivage des terrils ...).

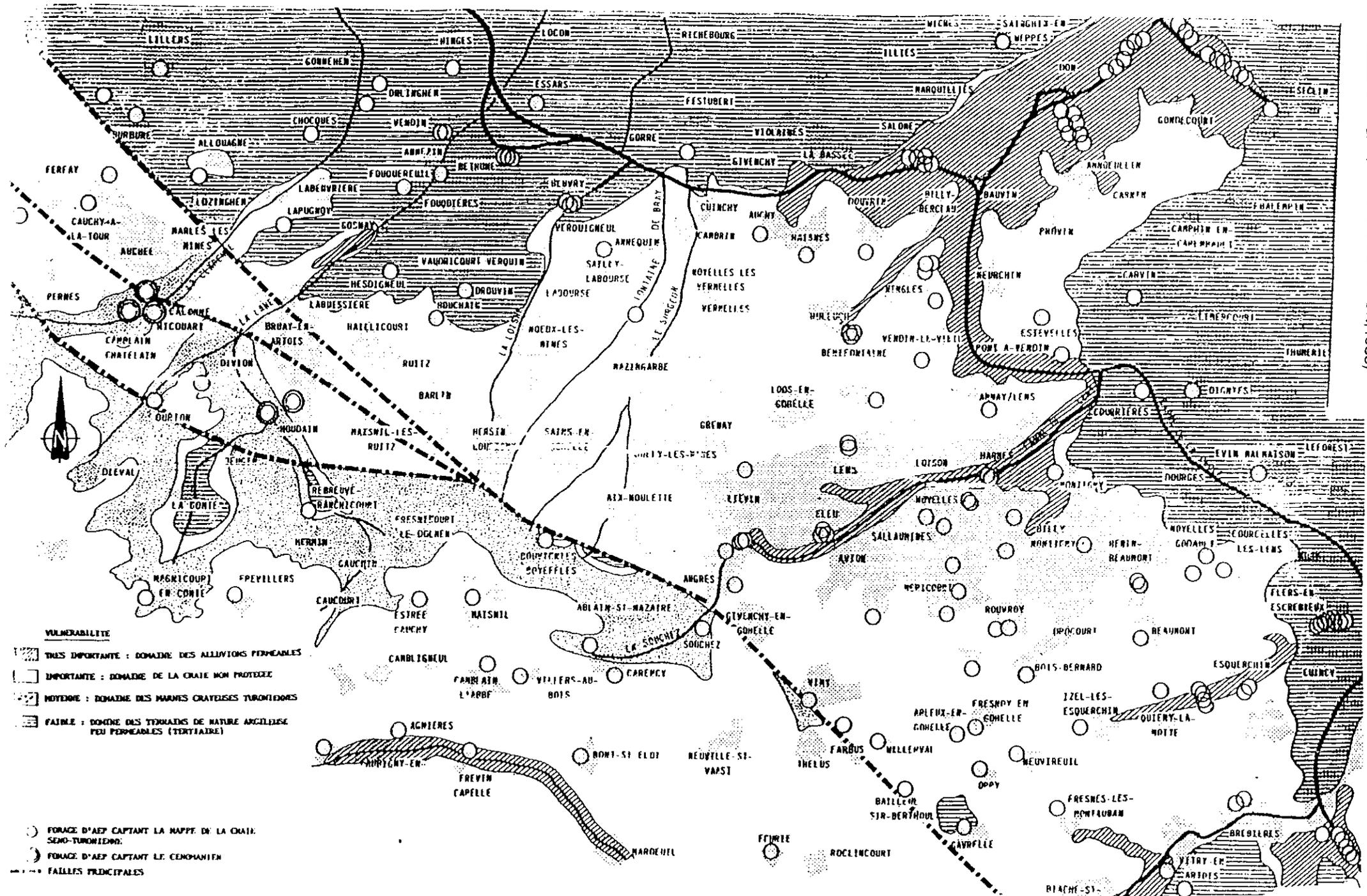
La pollution s'étend dans le sens d'écoulement général de la nappe pour disparaître très brutalement au passage en captivité.

* Une zone très saine au Nord du recouvrement tertiaire. Le passage très rapide de teneurs supérieures à 50 mg/l (norme de potabilité) à des teneurs inférieures à 5 mg/l dans ces conditions hydrogéologiques permettent de penser à une dénitrification naturelle.

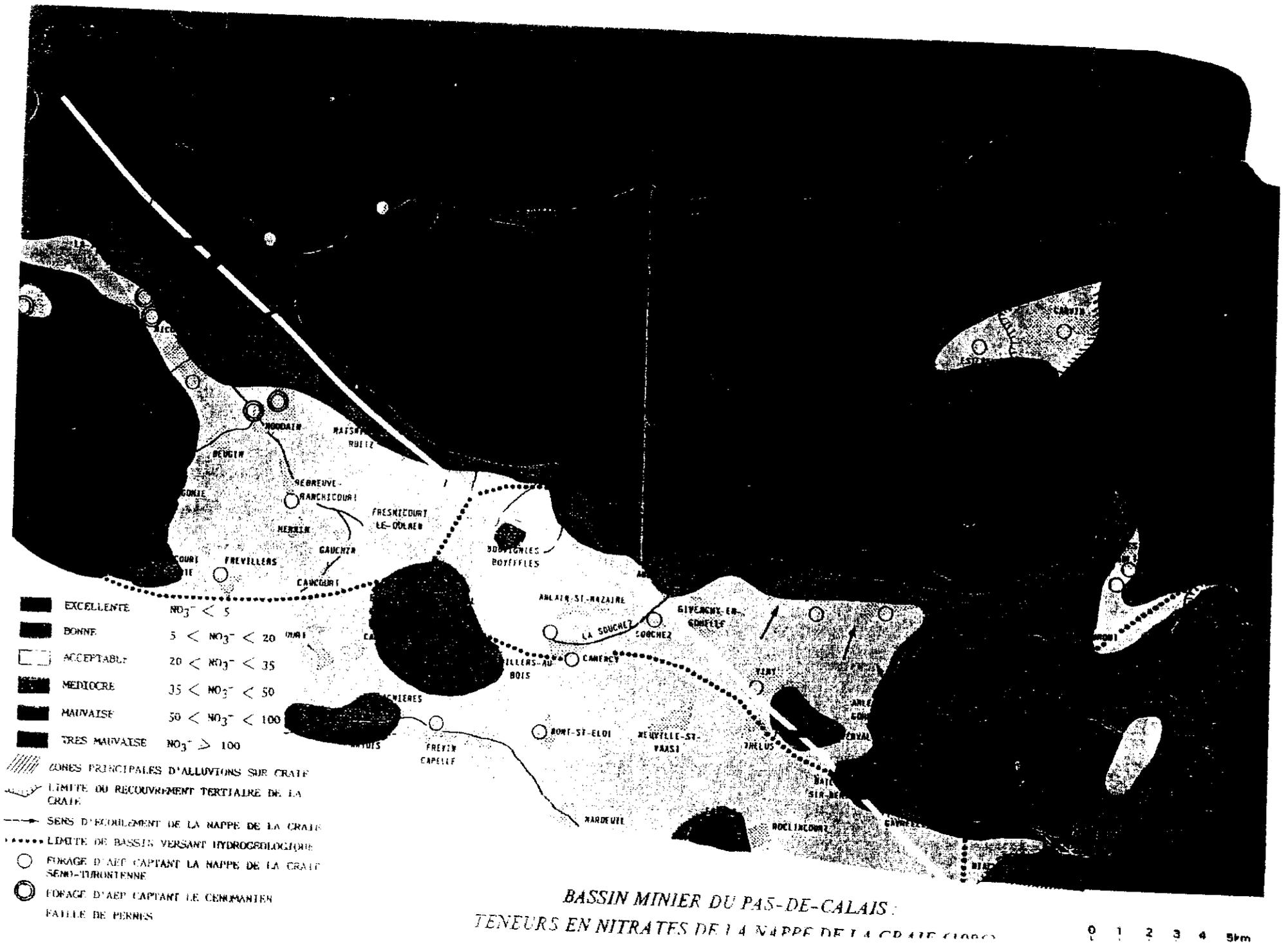
7.1 LA NAPPE CÉNOMANIENNE ([5],[25],[26],[57],[73],[3])

Les premières recherches au Nord de Pernes montrèrent la présence d'un aquifère faiblement réalimenté (écran de la faille de Pernes et barrage par l'anticlinal d'Aix-Noulette-Meurchin) et donc peu productif.

Les recherches au sud de la faille de Pernes ont établi la faible productivité (doc.28) du Cénomaniens à l'Est des captages déjà en place (Houdain et Calonne-Ricouart) et l'absence de possibilité d'implantation de nouveaux captages.



SOURCE: I.T.E. (DANS COLLECTIF, 1960)



7.2 LA NAPPE SENO-TUFIONNIENNE DANS LA REGION DE BETHUNE

La première zone étudiée était centrée sur Gorre à l'Est de Violaines ([4],[34],[39],[49],[75]), Illie ([63],[71]) et Salomé ([35],[74],[28],[68]), situées sur le document 29. La nappe de la craie y disparaît vers le Nord sous une épaisseur croissante de terrains landéniens et voit sa transmissivité baisser en conséquence.

Quatre phases d'études ont été menées pour connaître la productivité de la nappe et son comportement hydrochimique. 25 piézomètres et 3 forages ont été réalisés [6],[27],[37],[46],[47],[48],[69]. Les résultats de ces essais ont confirmé la bonne productivité de la nappe mais la piézométrie traduisait une réalimentation de l'aquifère par le canal (dôme piézométrique au droit de la zone dépourvue de recouvrement tertiaire, doc.30).

L'étude de analyses chimiques montre bien la présence d'une dénitrification (doc.31) mais avec pour conséquence des teneurs en fer importantes.

Des valeurs en sulfates supérieures à la norme (250 mg/l) ont été relevées au Nord du terroir de Teugreville (oxydation des pyrites) et entre Annequin et Festubert dont l'origine doit être reliée à la pollution du Surgeon et la Fontaine de Bray [46],[48].

Plus au Nord, les teneurs excessives en sulfates de la nappe captive peuvent avoir pour origine cette pollution à laquelle vient s'ajouter le phénomène de dénitrification.

La zone optimale d'implantation des captages se situe à proximité du canal (partie hachurée du doc.32). Les sédiments du canal semblent fixer les éléments toxiques que l'on ne retrouve pas plus au Nord.

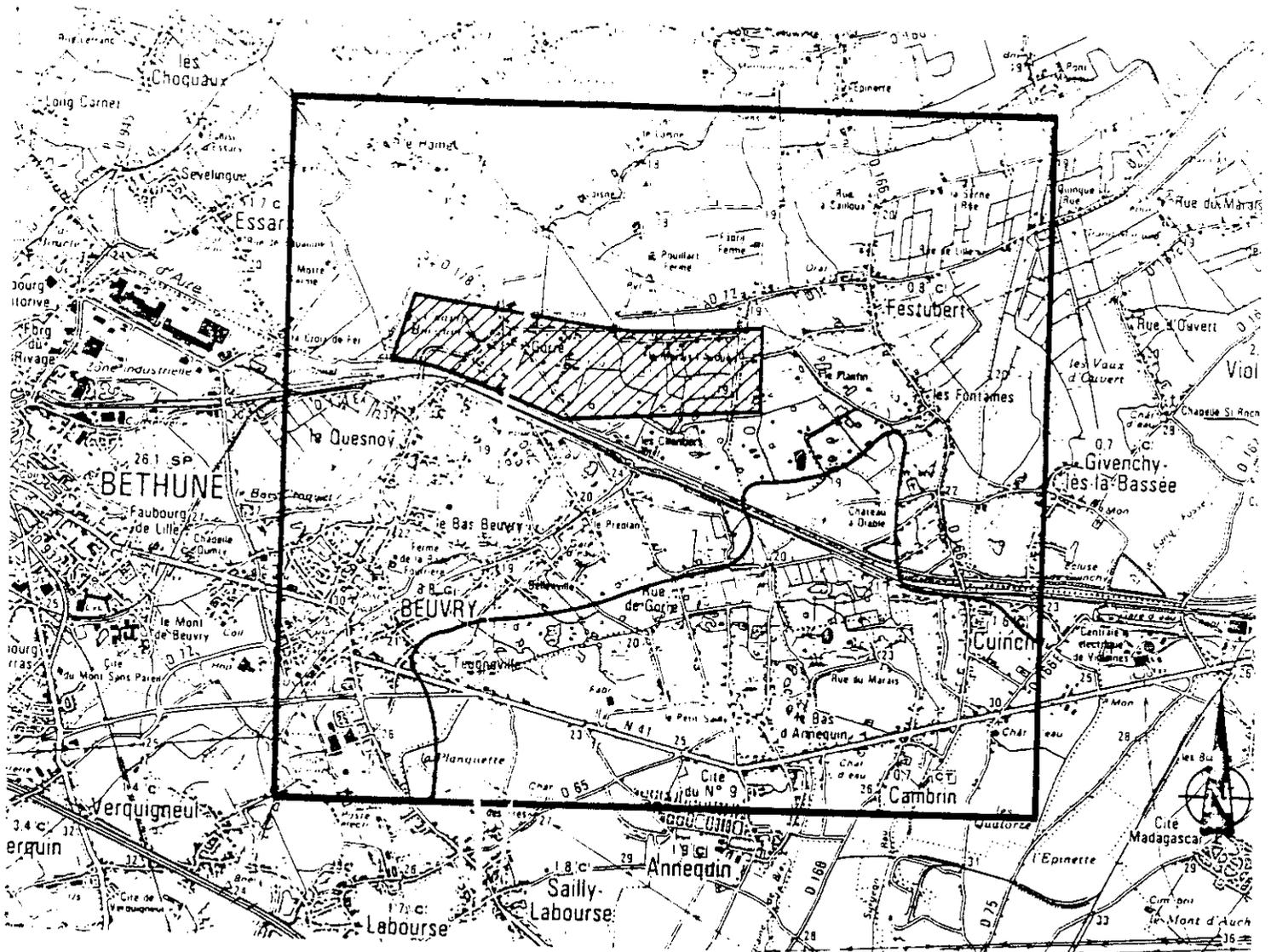
Mais l'étude de l'ammonium incite à rejeter totalement le choix de ce site. En effet, on constate une très forte pollution azotée des eaux du Surgeon (Annexe XIII) qui recueille les eaux usées en provenance de Mazingarbe et du complexe AZF. Or le Surgeon a pour exutoire le Canal à Grand Gabarit en amont de la zone prospectée.

L'alimentation de l'aquifère par le Canal ayant été mise en évidence, il se pose un problème pour l'ammonium qui ne peut être éliminé naturellement car très réducteur et un problème en cas de pollution accidentelle du Canal.

On voit bien sur les cartes des doc.32 et 33, l'importance que peut avoir le pompage dans la propagation de la pollution. La zone prévue pour l'implantation se rapproche dangereusement de la norme de potabilité de l'ammonium : 0.5mg/l. Si, au départ, on pouvait imputer une partie de l'ammonium au phénomène de dénitrification, les analyses et les essais ont montré que la source principale était le Canal.

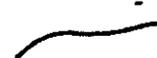
La zone à l'Ouest de Béthune semble réunir les avantages de la situation hydrogéologique et être assez éloignée du Canal pour donner une eau de bonne qualité [50].

DOCUMENT 29
SITLATION DU SITE DE GORRE
(BRGM 88 SGN 012 NPC)

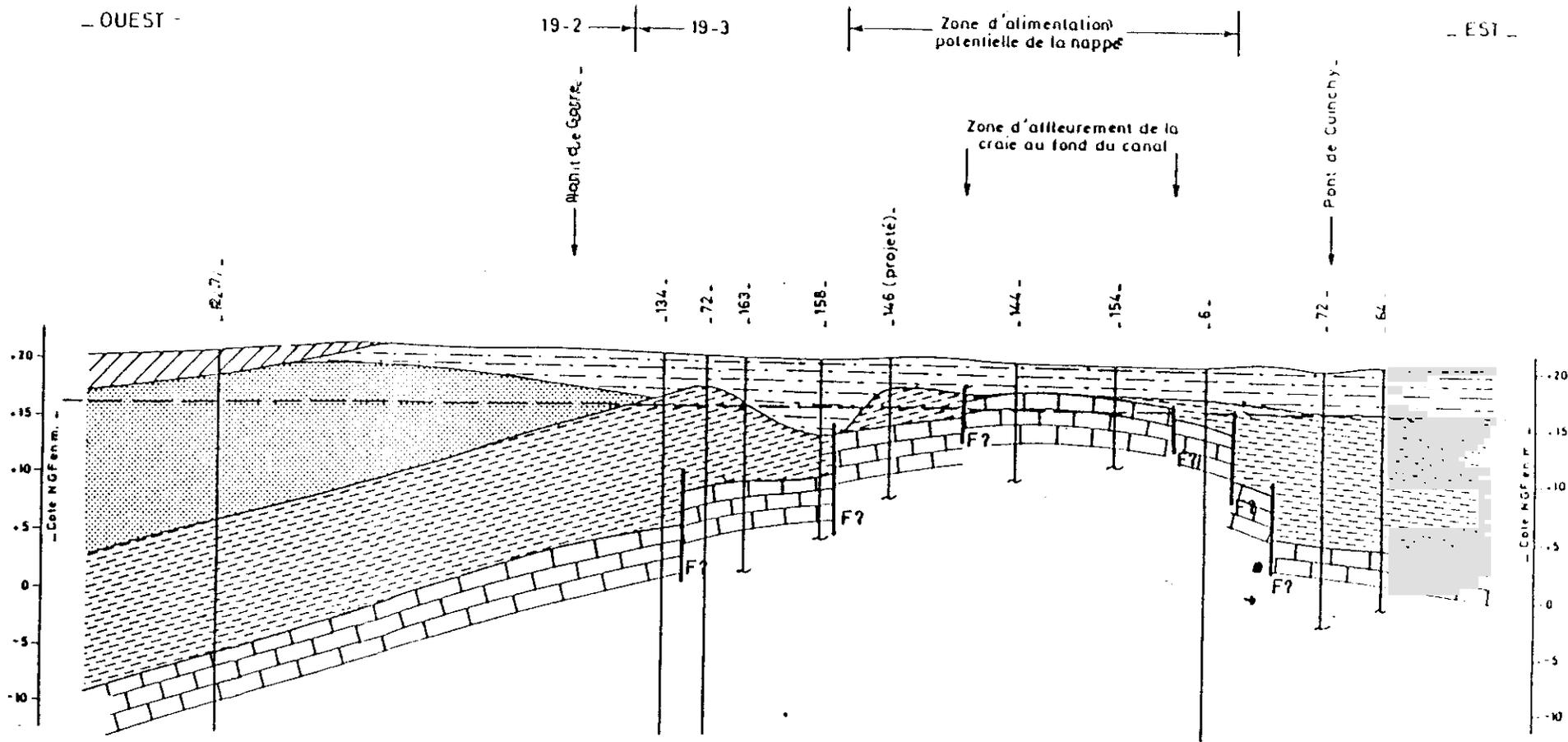


ECHELLE. 1/ 50 000

LÉGENDE

-  Limite du périmètre étudié _
-  Zone optimale d'implantation d'un champ captant _
-  Limite Sud du recouvrement tertiaire _

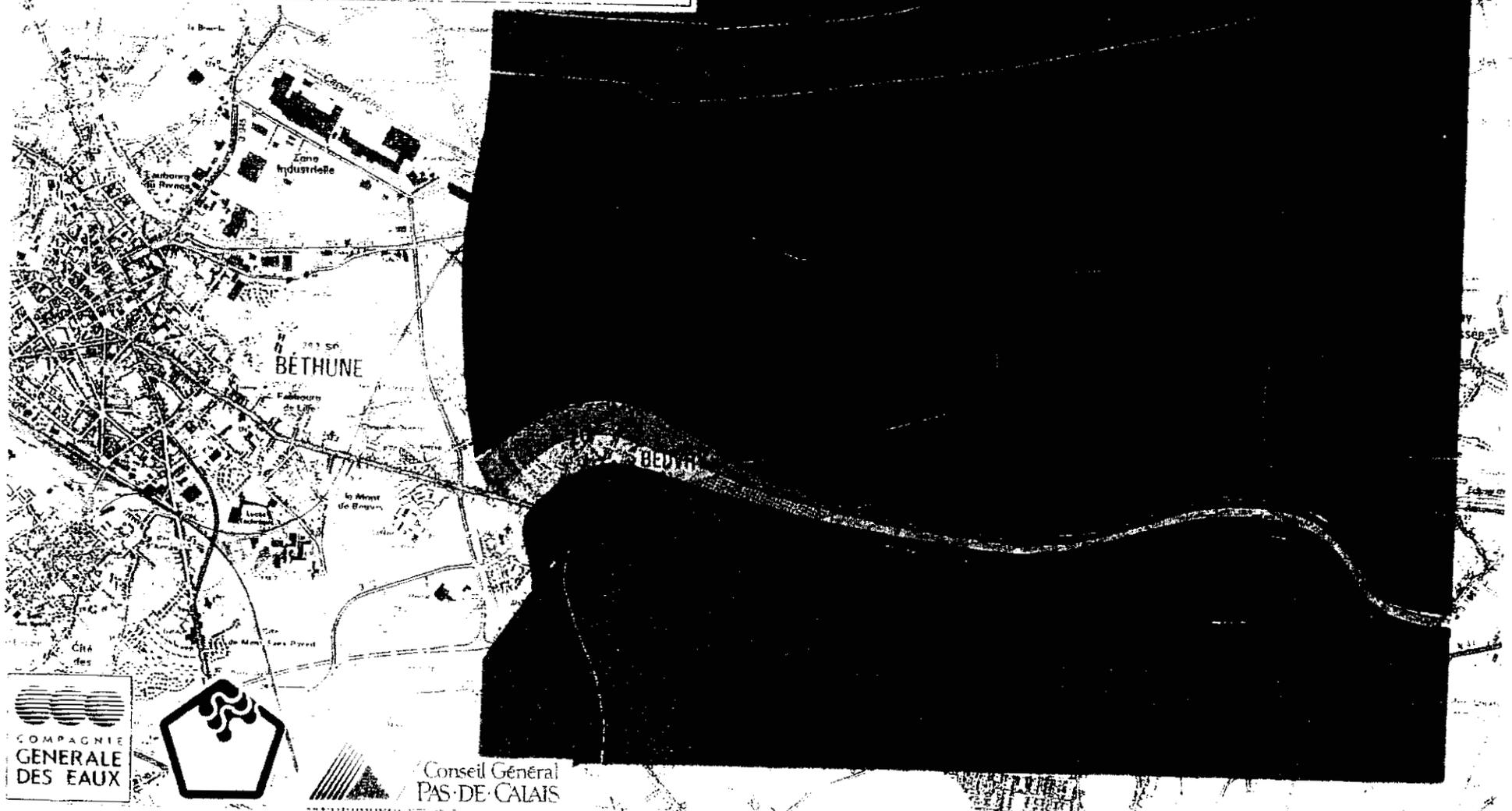
- COUPE GÉOLOGIQUE DU TRACÉ DU CANAL -



- LÉGENDE
- | | | | | | |
|---|----------------------------|---------------|---|--------------------|-------------|
| — — — — — | Fond du canal | | | | |
| F? | Faïlle supposée | | | | |
|  | Limons sablo-argileux | } QUATERNAIRE |  | Sable d'Ostricourt | } LANDENIEN |
|  | Alluvions silto-argileuses | |  | Argile de Louvil | |
| | | |  | Craie blanche | SENONIEN |

RECHERCHE EN EAU A L'EST DE BETHUNE

CARTE DES NITRATES



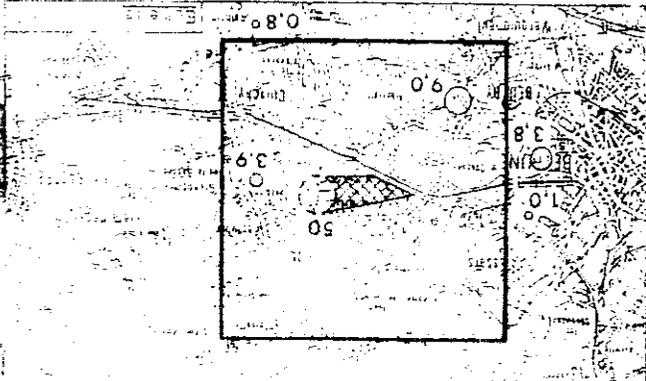
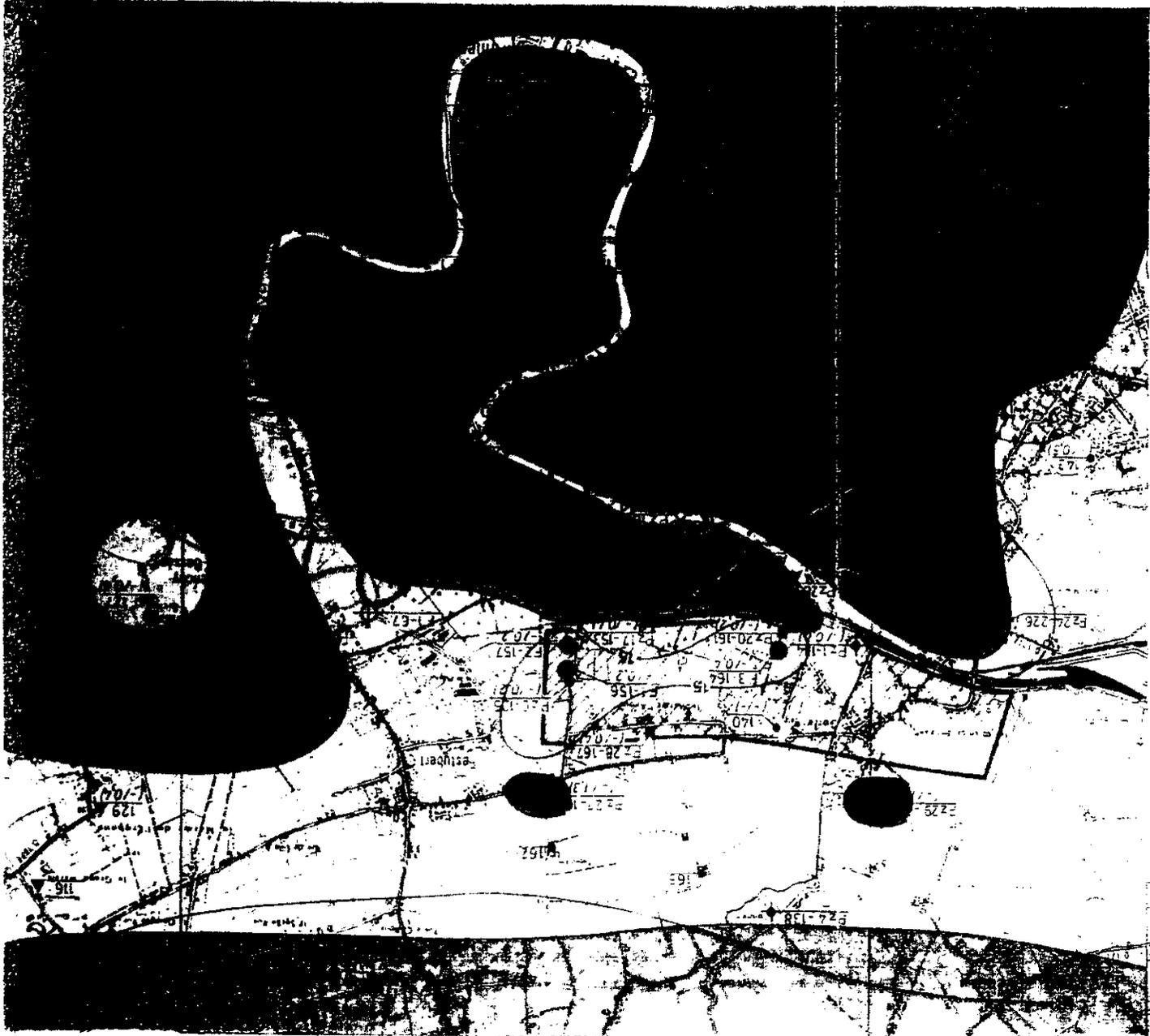
DOCUMENT 3



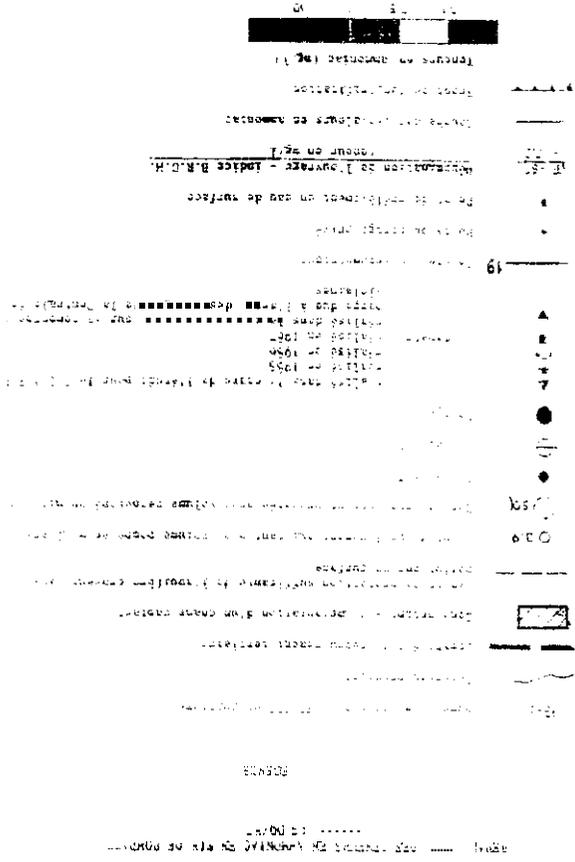
Conseil Général
PAS-DE-CALAIS

RÉPARTITION DES TENEURS EN AMMONIAC DANS LA NAPPE DE LA CRAIE

(en fin de pompage)



Les données ont été obtenues à partir de sondages effectués en 1985 et 1986. Les teneurs en ammoniac sont exprimées en mg/l. Les données sont relatives à la fin de pompage.



7.3 LE BASSIN VERSANT DE L'ESCREBIEUX :

L'intérêt de ce site est l'arrêt possible de la cokerie de Drocourt et donc de ses captages de Quiéry-la-Motte qui se situent dans le bassin versant souterrain d'Esquerchin et de Flers en Escrebieux (S.E.D.. S.E.N), (doc.34).

On ne peut cependant escompter des débits supérieurs à ceux obtenus actuellement (12000 m³/j).

De plus les concentrations en atrazine et en nitrates (doc.35) dépassent les normes de potabilité dans la vallée de l'Escrebieux.

Le bassin versant de l'Escrebieux en amont des captages de Quiéry-la-Motte comprend une zone essentiellement agricole. Il contient aussi les agglomérations d'Esquerchin, Quiéry-la-Motte, Fresnes-les-Montauban ainsi qu'une partie de Vitry et Artois.

Afin de mener une politique de traitement des nitrates, un recensement des différentes sources de pollution a été dressé (annexe XIV). Les principales sources d'origine domestique sont l'absence ou les fuites du réseau d'assainissement. Les flux d'azote d'origine agricole sont surtout situés sous les surfaces de grandes cultures.

Un plan de traitement des nitrates a été proposé et devrait permettre (si il est suivi) de baisser de 30% le flux d'azote et de ramener les teneurs en nitrates à 30 mg/l.

7.4 CONCLUSION

L'important développement urbain et industriel au droit d'une nappe non protégée géologiquement par une couverture argileuse a rendu impropre à la consommation une eau qui existait en quantité suffisante pour subvenir aux besoins.

Maintenant pour rechercher une eau de bonne qualité. on est obligé de prospecter des zones qui sont susceptibles d'épurer la nappe naturellement (dénitrification, effet filtre ...). Mais les possibilités naturelles ne sont pas illimitées et les excès des hommes ne peuvent pas toujours être réparés (ammonium à Gorre, nitrates à Quiéry-la-Motte...).

L'étude de cette région est intéressante par la diversité des sources de minéralisation naturelle ou provoquées, ce qui rend d'autant plus difficile son traitement.

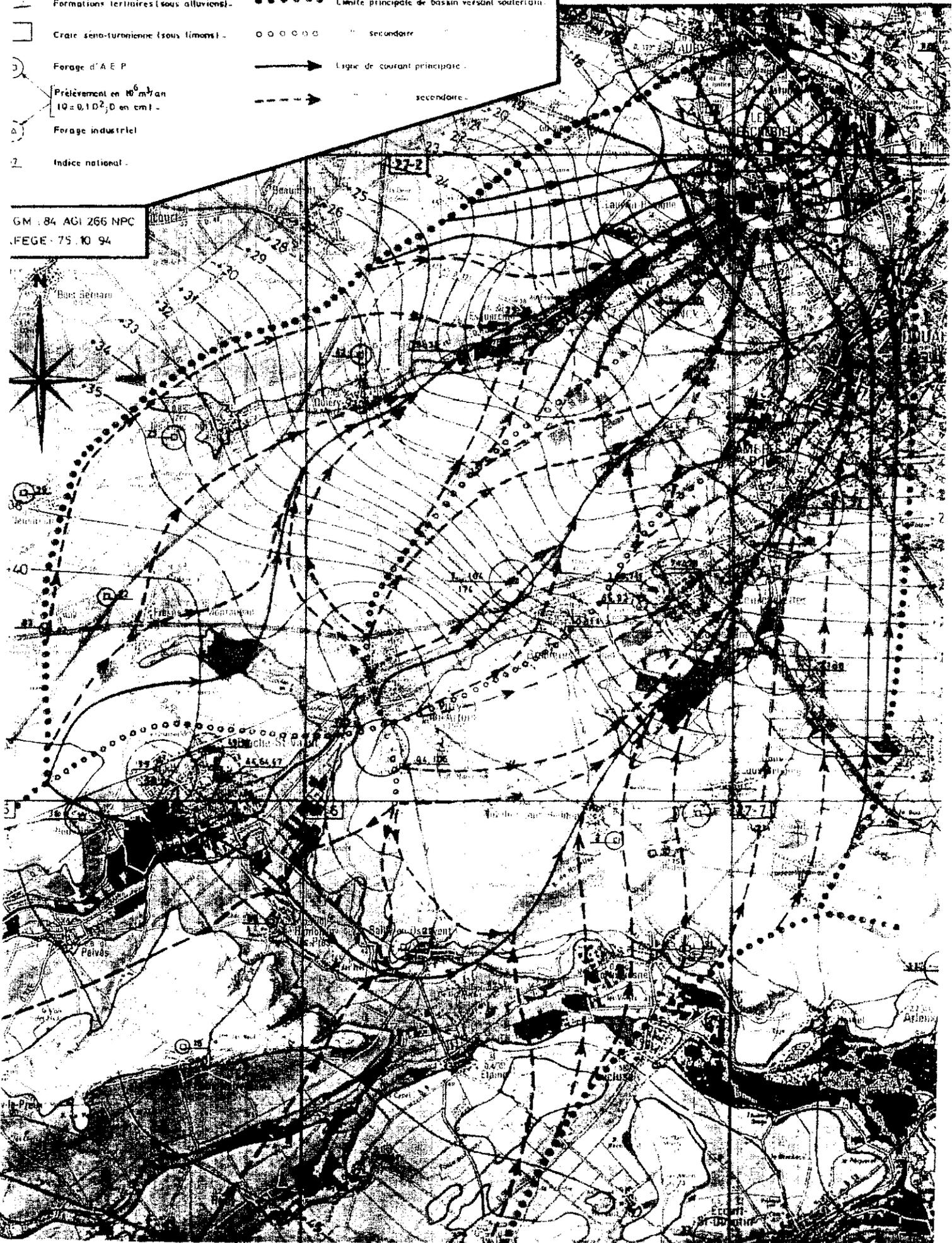
Société des Eaux du Nord
 CHAMPS CAPTANTS D'ESQUERCHIN
 ET FLERS-EN-ESCREBIEUX
 CARTE HYDROGÉOLOGIQUE

ECHELLE 1/50 000

LEGENDE

-  Alluvions quaternaires (sous limons) — — — — — Courbe isopizé principale de la nappe de la craie et son altitude en m (à la fin mars 1983) intercalaire
-  Formations tertiaire (sous limons) — — — — —
-  Formations tertiaires (sous alluvions) — — — — —
-  Craie sénio-turonienne (sous limons) ● ● ● ● ● Limite principale de bassin versant souterrain
-  Forage d'A.E.P. —————> Ligne de courant principale
-  Forage industriel - - - - -> secondaire
-  Indice national

GM 84 AGI 266 NPC
 FEFE 75 10 94



Société des Eaux du Nord

CHAMPS CAPTANTS D'ESQUERCHIN ET FLERS-EN-ESCREBIEUX

CARTE DES RISQUES MAJEURS DE POLLUTION

ECHELLE : 1/50000



LÉGENDE

Occupation du sol

- Agricole**
- V V Céréales et plantes sarclées
- Urbains**
- [Hatched pattern] Zone urbanisée ancienne assainie
 - [Diagonal lines] Zone urbanisée nouvelle assainie
 - [Vertical lines] Zone urbanisée à assainissement individuel
 - [Cross-hatched pattern] Zone industrielle ou industries

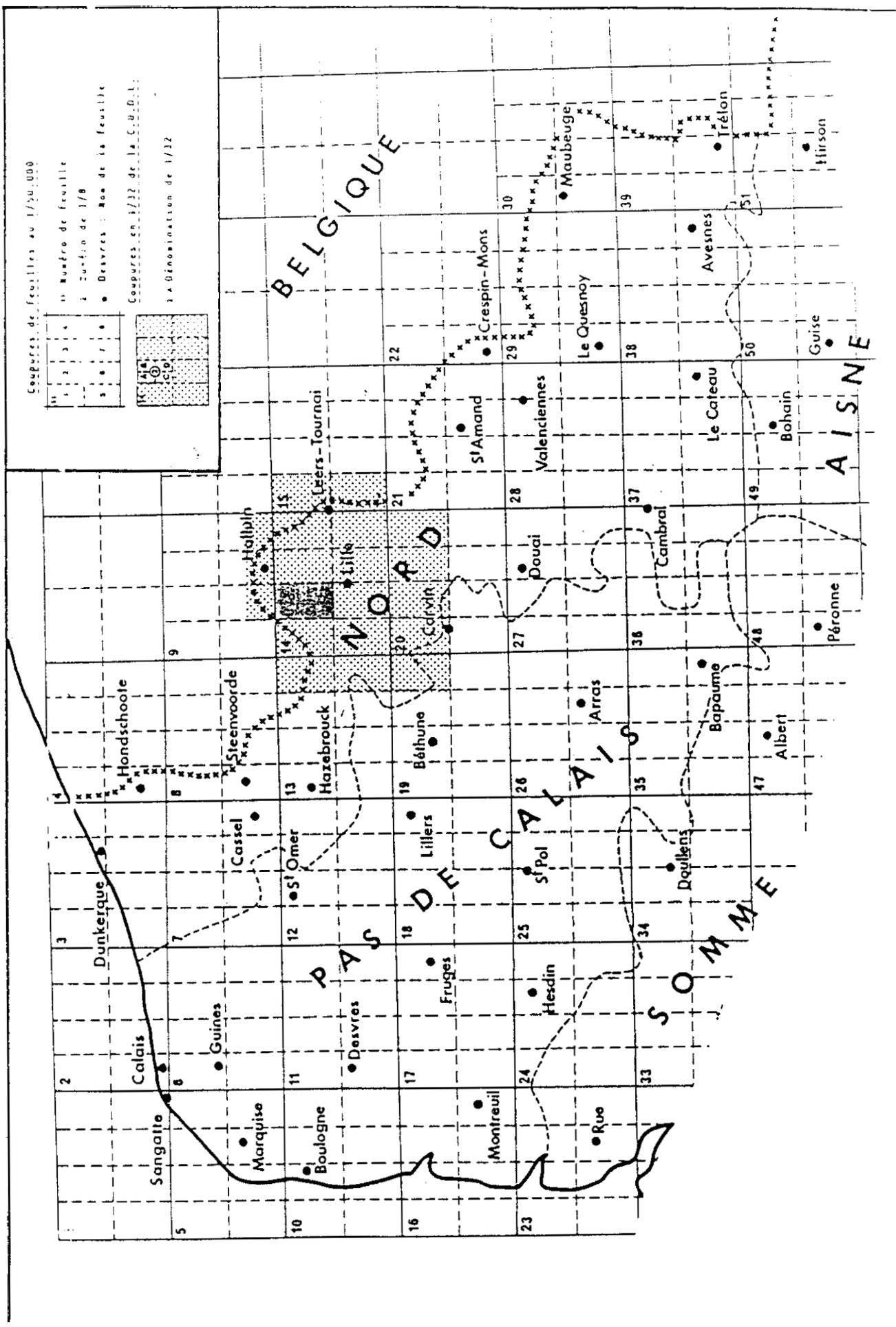
Teneurs en nitrates

- [White box] Intérieures à 25 mg/l
- [Light grey box] Comprises entre 25 et 50 mg/l
- [Dark grey box] Comprises entre 50 et 100 mg/l

- [Thick black line] Zone à flux pathologique important sur laquelle une intervention est nécessaire
 - [Table]
- | | |
|------------|--|
| Esquerchin | Origine du flux d'azote |
| 70 | Flux spécifique estimé sur la zone en kg/ha/ha de N |
| 170 | Valeur calculée en mg/l de NO ³ dans l'eau (70 x 2,43) |
| 40-70 | Valeur mesurée en mg/l de NO ³ dans la nappe de la zone |
| 1,82 | Flux apparus sur la zone en tonnes/an de N |

→ Ligne de courant

DOCUMENT 23
 CARTE DES COUPURES DE FEUILLES (BRGM)



Le décret de 1989 sur les eaux de distribution permet pour des champs captants homogènes et en fonction de leur débit, de réaliser des analyses sur des échantillons pris à l'entrée d'usine, c'est à dire après mélange. Comme ce décret prévoit aussi le paiement des analyses par les distributeurs, ils préfèrent, financièrement, réaliser une analyse sur le mélange plutôt que sur chaque captage. Comme très peu font des analyses d'auto-contrôle sur la ressource, on perd toute information sur son état.

Pour les captages sur lesquels nous avons travaillé, nous manquons bien souvent de valeurs depuis 1990, les analyses ayant été effectuées sur des eaux de mélange.

On est en présence d'un problème important car si un captage n'est pas "sain" et qu'il n'est pas en fonctionnement le jour du prélèvement, on ne pourra pas le détecter. Et cela peut durer pendant plusieurs années en fonction des cycles de fonctionnement et de contrôle.

A partir de 1974, les D.D.A.S.S. du Nord et du Pas de Calais ont mis en place une surveillance chimique et bactériologique de tous les captages d'A.E.P. connus. Cet effort deviendrait inutile si on ne se donne pas les moyens de le poursuivre. Ce qui est important, c'est de pouvoir connaître l'évolution d'un captage dans le temps. Si on veut améliorer la ressource dans le Nord-Pas de Calais, on a besoin de valeurs sur celle-ci [7]. C'est tout autant l'intérêt des distributeurs que des consommateurs.

Il est évident qu'il est difficile de demander aux distributeurs de prendre en charge le financement des analyses de l'ensemble des captages. Mais doit-on pour cette raison accepter la distribution d'une eau dont on ne peut contrôler la composition en permanence ?

Nous avons aussi remarqué qu'en présence d'une valeur anormale dans une analyse, et avant toute conclusion hâtive, il faut s'interroger sur sa représentativité.

En effet, les analyses sont sujet à plusieurs types d'erreur :

- * Erreur de précision des appareils (surtout pour des analyses chimiques)
- Erreur de mesure en laboratoire (souvent repérée par le distributeur)
- * Erreur de frappe sur le bulletin d'analyse
- La saisie informatique des analyses chimiques est un travail répétitif souvent réalisé par des personnes qui n'ont pas l'expérience nécessaire pour s'apercevoir d'une erreur de frappe.
- * **Prélèvement** non in situ : par la méthode d'échantillonnage actuelle on fait des mesures sur une eau qui a suivi un cheminement à travers l'installation de pompage (réoxygénation, apport de fer en cas de corrosion du tubage), la valeur mesurée n'est donc pas celle de l'eau de la nappe.
- * Non respect des règles de prélèvement (mise en service du captage à l'avance, utilisation de matériel spécifique ...)

9. REALISATION D'UNE CARTE DE SYNTHÈSE DES TRANSFORMATIONS NATURELLES

Après avoir conclu à l'impossibilité technique de réaliser une carte à partir des analyses chimiques, nous avons décidé d'établir une carte de synthèse qui donne les teneurs attendues de manière naturelle sur un site. On pourra ensuite comparer cette carte à celles d'isoteneurs réalisées par le BRGM [9].

9.1 LES TRANSFORMATIONS PRISES EN COMPTE

Toutes les transformations ne sont pas connues avec la même précision.

Nous avons pris comme base de départ l'eau de pluie brute (annexe XV). Nous avons accepté l'erreur due à la pollution des pluies, par les fumées par exemple. Car dans la première transformation que nous avons retenue, qui est la dissolution, il est difficile de différencier la partie due à une agressivité naturelle de l'eau et la part due à une pollution de celle-ci. Avec cette transformation, nous obtenons une analyse de l'eau en nappe libre.

Nous avons ensuite examiné les échanges de bases. Les documents de G.WATERLOT étant très fournis en analyses, il nous a été possible d'être assez précis sur les éléments $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- .

Pour l'étude de la dénitrification, la connaissance de celle-ci au niveau de sa localisation et de son évolution, est plus qualitative que quantitative. De plus, ce phénomène est très local : il se déroule dans des zones très particulières et s'exprime sur une courte distance (quelques centaines de mètres). Il est difficile d'en faire une synthèse régionale. Nous nous contenterons donc de situer les zones où l'on peut s'attendre à cette transformation et les conséquences que l'on peut expliquer pour des éléments comme NO_3^- , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , SO_4^{2-} .

Par contre, l'évolution quantitative des autres transformations rédox étant peu connue, nous ne les utiliserons pas.

Nous ne tiendrons pas compte non plus des mélanges de nappes car il ne nous est pas possible dans le temps de cette étude de faire une synthèse complète des échanges qui s'opèrent sur le Nord Pas-de-Calais.

L'effet filtre des berges ne peut être retenu car cette transformation ne fait qu'épurer l'eau des canaux qui a une origine humaine évidente.

En conséquence, des teneurs peuvent dépasser celles que l'on va indiquer sur la carte et avoir tout de même une origine naturelle (exemple les sulfates du Bassin d'Orchies). De même, des valeurs proches de celles que l'on va indiquer peuvent avoir une origine non naturelle. Cette carte n'est qu'une aide pour situer les transformations chimiques naturelles susceptibles d'être à l'origine de la minéralisation de l'eau. L'origine naturelle ou polluée de la minéralisation de l'eau reste toujours à être confirmée quelque soit l'indication donnée par la carte.

9.2 LES APPORTS DE CHAQUE TRANSFORMATION

* La dissolution :

On a considéré comme résultat naturel l'analyse chimique de l'eau de Blendecques (cf 3.1) D'après la synthèse des documents étudiés, nous avons évalué le fond géochimique naturel en nappe libre autour de :

NO ₃ ⁻	: 10 à 15 mg/l ([11], [39], [9])
SO ₄ ²⁻	: 20 à 30 mg/l ([9], [11], [39])
Cl ⁻	: 20 à 25 mg/l ([7], [11], [39])
F ²⁻	: 0,2 mg/l (P.CAULIER, [70])
NH ₄ ⁺	: 0,1 mg/l ([11])
Ca ²⁺	: 100 mg/l
Mg ²⁺	: 10 mg/l
Na ⁺ +K ⁺	: 20 mg/l
Fe ²⁺	: 0 mg/l ([11])
Mn ²⁺	: 0 mg/l ([11])

} pour une dolomitisation moyenne

Il serait tentant de prendre des analyses anciennes en nappe libre pour obtenir des valeurs avant les pollutions récentes. Mais les captages anciens étaient pour la plupart situés au coeur des agglomérations et donc très vulnérables. De plus, les méthodes des analyses ont changé et on ne mesure plus les éléments sous la même forme.

• L'échange de base :

Nous avons repris la zonation que G.WATERLOT indique dans ses publications.

I Zone d'alimentation : nappe libre

II Zone proximale de captivité (de 0 à 7 km du recouvrement)

exemple d'analyse : Thurneries

Ca ²⁺	: 45 mg/l	Cl ⁻	: 42 mg/l
Mg ²⁺	: 25 mg/l	Na ⁺	: 105 mg/l

Les valeurs des sulfates et des nitrates ne sont pas justifiables par l'échange de bases.

III Zone d'échanges de bases (de 7 à 12 km du recouvrement)

exemple d'analyse moyenne : Orchies

Ca ²⁺	: 20 mg/l	Cl ⁻	: 46 mg/l
Mg ²⁺	: 10 mg/l	Na ⁺	: 175 mg/l

IV Zone éloignée (> de 12 km du recouvrement)

ex : valeurs inférieures/supérieures à celle d'Armentières

Ca ²⁺	: 20 mg/l	Cl ⁻	: 400 mg/l
Mg ²⁺	: 10 mg/l	Na ⁺	: 500 mg/l
		F ²⁻	: 5 à 6 mg/l

Plus on s'éloigne du recouvrement, plus l'eau est chlorurée sodique

La synthèse a été faite à partir des données sur le Bassin d'Orchies et sur les Flandres. Comme nous l'avons vu, les structures sont très différentes et il faut être prudent avant d'essayer d'homogénéiser les valeurs.

* La dénitrification..:

Son développement demande des conditions bio-physico-chimiques particulières, Nous avons donc supposé comme possible cette transformation sous sa forme hétérotrophe dans les alluvions et sous sa forme chimiotrophe et chimique en passage en captivité sous les argiles de Louvil.

Nous insistons sur le fait que la totalité des conditions n'est pas toujours rassemblée dans ces zones pour qu'une dénitrification s'opère (cas de la région de Saint-Omer). Et même si les analyses chimiques évoluent dans le sens décrit, il faut prouver leur origine (méthodes isotopiques sursaturation en azote moléculaire....). Nous ne faisons que cerner les zones où l'on peut sérieusement s'attendre à voir cette transformation.

Expression chimique :

- NO_3^- : 0 mg/l
- Fe^{2+} : 100mg/l
- Mn^{2+} : fortes teneurs
- SO_4^{2-} : 200 à 500 mg/l
- NH_4^+ : en fonction de la teneur des nitrates traités.

Si l'on se base sur une eau de nappe libre de bonne qualité, on obtient des valeurs inférieures à 0,5 mg/l.

9.3. LES CARTES SOUTERRAINES

Pour réaliser notre carte, nous avons étudié :

- 1) Carte de la nappe de la craie captive (D.BERNARD)
- 2) Carte d'orientation à l'exploitation de la nappe de la craie pour les pompes à chaleur (BAILLY, BECKELYNCK, 1980)
- 3) Carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (BECKELYNCK, KLESZCZ. 1980)
- 4) Carte de la surface piézométrique de la nappe de la craie (COTTEZ, CASSONVILLE. 1965)

Grace a la carte 1, nous avons pu situer les zones d'alluvions et de craie captive pour les phénomènes de dénitrification .

Les caries 2 et 3 nous ont indiqué le sens d'écoulement de la nappe, ce qui est important pour mesurer la distance au recouvrement. Elles indiquent aussi les types de terrains a l'affleurement, ce qui est intéressant pour la dissolution et les échanges de bases.

La carte 4 donne la situation du passage en captivité qui marque une première limite pour la dénitrification et les échanges de bases.

Bien souvent, la captivité correspond a la limite du recouvrement argileux. Mais dans les zones où les pompages sont importants, cette limite est repoussée de plusieurs centaines de mètres.

9.4. LE CHOIX DU FORMAT

Le but recherché était d'obtenir une carte de synthèse plutôt qualitative que quantitative et à l'échelle régionale afin de la comparer à des cartes réalisées par le BRGM à l'échelle 1/85000^{ème}.

Nous avons donc décidé de travailler avec le fond de carte des nappes du Nord de la France (doc.8).

9.5. LES CLASSES DE QUALITE (doc. 36)

Rappel : Les valeurs données sont des ordres de grandeur.

(N) indique la valeur la plus proche ou qui dépasse la norme de potabilité CEE

CLASSE 1 : Eau libre (dissolution)

NO₃⁻ : 0 à 15 mg/l
SO₄²⁻ : 0 à 30 mg/l
Cl⁻ : 0 à 25 mg/l
F²⁻ : 0 à 2 mg/l (N)

Ca²⁺ : autour de 100 mg/l (N)
Mg²⁺ : autour de 10 mg/l (N)
Na⁺ et K⁺ : autour de 20 mg/l (N)
Fe²⁺ : 0 mg/l
Mn²⁺ : 0 mg/l
NH₄⁺ : 0 à 0.1 mg/l

CLASSE 2 : Eau dénitrifiée, sans échanges de bases (alluvions)

NO₃⁻ : 0 mg/l
SO₄²⁻ : 30 à 70 mg/l
Cl⁻ : 0 à 25 mg/l
F²⁻ : 0 à 2 mg/l

Ca²⁺ : autour de 100 mg/l
Mg²⁺ : autour de 10 mg/l
Na⁺ et K⁺ : autour de 20 mg/l
Fe²⁺ : 0 à 120 mg/l (N)
Mn²⁺ : valeur notable (N)
NH₄⁺ : 0.1 à 0,5 mg/l (N)

CLASSE 3 : Eau de la zone proximale de captivité (échange de bases)

NO_3^- : 0 mg/l	Ca^{2+} : 100 à 45 mg/l
SO_4^{2-} : 30 à 70 mg/l	Mg^{2+} : 10 mg/l
Cl^- : 40 mg/l	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$: 20 a 100 mg/l
F^{2-} : 1 a 2 mg/l	Fe^{2+} : 0 a 150 mg/l
	Mn^{2+} : valeur notable
	NH_4^+ : 0.1 a 0,5 mg/l

CLASSE 4 : Eau de la zone d'échange de base

NO_3^- : 0 mg/l	Ca^{2+} : 45 a 20 mg/l
SO_4^{2-} : autour de 70 mg/l	Mg^{2+} : 10 mg/l
Cl^- : 45 à 400 mg/l	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$: 10 à 175 mg/l (N)
F^{2-} : 1 à 2 mg/l	Fe^{2+} : autour de 150 mg/l
	Mn^{2+} : valeur notable
	NH_4^+ : 0.1 à 0,5 mg/l

CLASSE 5 : Eau de la zone éloignée

NO_3^- : 0 mg/l	Ca^{2+} : 20 mg/l et moins
SO_4^{2-} : 100 a 400 mg/l	Mg^{2+} : 5 à 10 mg/l et moins
Cl^- : 400 mg/l et plus	$\text{Na}^{++} + \text{K}^+$: 175 à 500 mg/l et plus
F^{2-} : 2 à 6 mg/l et plus	Fe^{2+} : 150 mg/l et plus
	Mn^{2+} : valeur importante
	NH_4^+ : 0.1 à 0,5 mg/l

9.6. COMPARAISON AVEC LES DOCUMENTS EXISTANTS

Ces cartes sont tirées du rapport 89 SGN 544 NPC. Elles ont été réalisées à partir de données de 1983 à 1984. Elles sont d'une précision relative car il existe des mailles où il n'y a qu'une valeur. et les mailles plus fournies n'ont suivi qu'un traitement statistique simple, mais elles suffisent pour l'usage régional et qualitatif que l'on veut en faire.

En superposant notre carte de classification à ces cartes d'isoteneurs, on obtient par différence les régions d'anomalies.

1) La carte de qualité en nitrates (doc 37)

Si on ne s'intéresse qu'au Nord Pas-de-Calais, on remarque deux gros anomalies : le Bassin Minier (Arras, Lens, Douai) et la Communauté Urbaine de Lille, qui dépassent les concentrations maximales admissibles de la norme européenne pour l'alimentation en eau potable de 50 mg/l. Les fortes valeurs notées ici sont surtout dues aux défauts du réseau d'assainissement.

CARTE DE QUALITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE EN NITRATES (BRGM)

18-1017-80



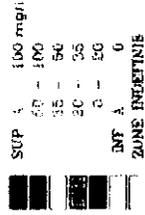
QUALITE
DE LA NAPPE
DE LA CRAIE



NITRATES 1985-1987

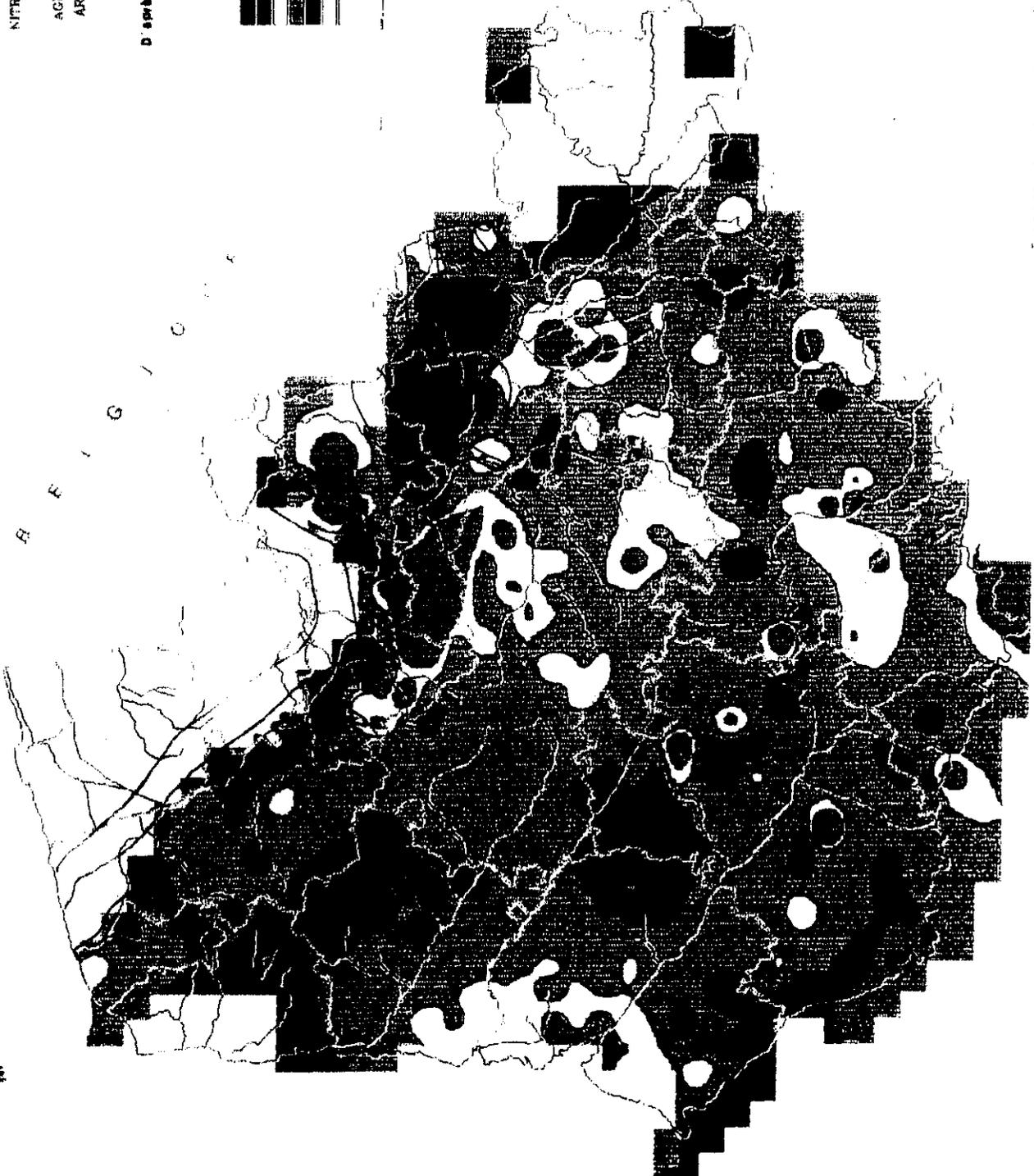
AGENCE DE L'EAU
ARTOIS PICARDIE

D'après Analyses DDASS



M A N C H E

R E G I O N



Echelle : 1/850 000

Financé par le Ministère de l'Environnement et
l'Agence de l'Eau Artois Picardie

Par contre, on remarque aussi qu'au passage en captivité et le long des cours d'eau, on obtient des valeurs très faibles (Flandres, Bassin d'Orchies, rivières, ...) résultat de la dénitrification. Cependant, au nord du Bassin Minier et à l'ouest de la région lilloise, les valeurs restent importantes même sous recouvrement. On peut l'expliquer par le pompage intensif dans ces zones, qui recule le passage en captivité et par l'apport possible de nappes supérieures qui se déversent à la limite du recouvrement.

2) La carte de qualité en sulfates (doc 38)

On voit sur cette carte quatre zones à fortes teneurs : Bassin Minier, région lilloise, Bassin d'Orchies et une zone très captive au nord ouest de Lille (Comines).

En superposant notre classification, nous voyons que seules les deux premières zones sont anormales. Les zones captives (Flandres et Bassin d'Orchies) ont des teneurs importantes mais explicables par la dénitrification et les échanges de bases.

Cependant, la partie sud et sud-est du Bassin d'Orchies présente des teneurs un peu fortes qui peuvent avoir pour origine un déversement de la nappe des sables d'Ostricourt dans la craie à la limite de recouvrement.

Les échanges verticaux avec le calcaire carbonifère apportent eux aussi certainement une charge sulfatée importante.

Par contre les valeurs observées dans la région lilloise et le Bassin Minier sont elles dues à la pollution urbaine et industrielle.

3) La carte de qualité en chlorures (doc 39)

On peut faire les mêmes remarques que celles faites pour les sulfates avec cependant des valeurs moins fortes sous le Bassin d'Orchies.

9.7 CONCLUSIONS

Les connaissances actuelles de la dissolution, de l'échange de bases et de la dénitrification ont pu être synthétisées sur une carte relativement facile à lire et d'une utilisation simple (superposition).

Les résultats obtenus valident la méthodologie suivie pour réaliser cette carte régionale. Il en ressort la mise en évidence des deux principaux pôles de pollution du Nord Pas de Calais (Bassin Minier et région lilloise), mais surtout confirme l'origine naturelle possible des teneurs en sulfates dans une nappe captive et la régionalisation du phénomène de dénitrification. L'utilisation de ce type de carte est donc utile pour faire la part des transformations chimiques naturelles et des pollutions dans la minéralisation de l'eau de la nappe de la craie.

On peut penser pouvoir suivre la même méthodologie pour des études plus locales.

Les résultats pourraient être affinés par une prise en compte des mélanges de nappes mais ils paraissent difficiles à quantifier.

DOCUMENT 38
CARTE DE QUALITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE EN SULFATES (BRGM)

18-AUT-82



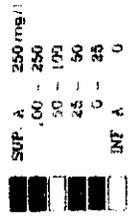
QUALITE
 DE LA NAPPE
 DE LA CRAIE



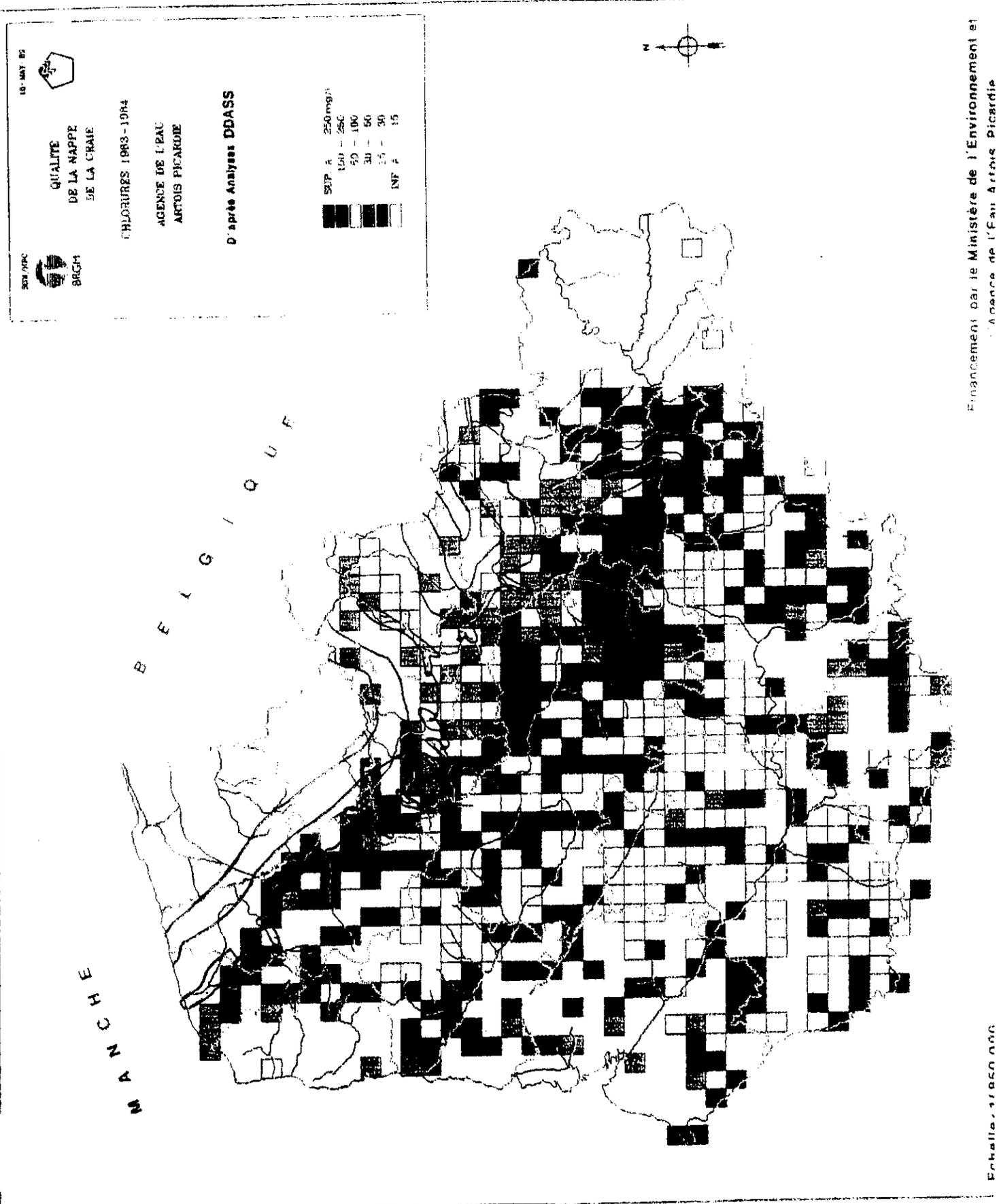
SULFATES 1963-1984

AGENCE DE L'EAU
 ARTOIS PICARDIE

D'après Analyses DDASS



DOCUMENT 39
CARTE DE QUALITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE EN CHLORURES (BRGM)



CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mieux appréhender les transformations chimiques qui s'opèrent dans la nappe de la craie du Nord de la France.

Après une recherche bibliographique importante, nous nous sommes efforcés de réaliser des cartes d'isoteneurs d'éléments chimiques par informatique. Mais l'état actuel des choses ne permet pas de disposer d'un fichier unique et facilement exploitable. Cependant, nous avons vu l'intérêt qu'il y a à centraliser informatiquement les analyses chimiques si on ne veut pas perdre d'informations sur la ressource.

Nous avons ensuite pu réaliser une carte régionale à petite échelle qui synthétise les principales sources naturelles de minéralisation (dissolution, dénitrification, échange de bases) de l'eau de la nappe de la craie. Les échanges de bases n'ont pas pu être pris en compte par manque de temps.

La méthodologie est validée par la confrontation avec des cartes d'isoteneurs régionales en sulfates, chlorures et nitrates, réalisées par le B.R.G.M.. Nous avons ainsi pu mettre en évidence les deux principaux pôles de pollution de la nappe de la craie dans le Nord Pas de Calais (Bassin Minier et Région lilloise) et soumettre une explication naturelle à la minéralisation importante de l'eau captive sous les Flandres et le Bassin d'Orchies.

Les classes de qualités réalisées font apparaître des valeurs naturellement fortes pour ces mêmes eaux, en sodium, potassium, sulfates et fluor.

Ce travail paraît cependant incomplet car il laisse en suspend :

- La prise en compte des phénomènes comme les mélanges de nappes et les fluctuations piézométriques ([7],[9]).
 - La validation de la carte réalisée en la superposant à des cartes d'isoteneurs en calcium, potassium, sodium, fluor.
 - Une étude du bore qui devrait permettre de mieux situer les zones de pollution. cependant on ne dispose pas encore de nombreuses données sur cet élément.
- * L'application de la méthodologie dressée pour une étude régionale à l'étude de cas plus ponctuels (champs captants).

Cette étude a également démontré l'utilité de faire travailler ensemble des personnes ayant des spécialités différentes. Dans cet ordre d'idée, d'autres secteurs de recherche (biologie, physique, informatique,...) peuvent être associés à l'étude complexe des transformations chimiques dans les nappes d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AGHTM (Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux) -1990-
Les lixiviats de décharges. Le point des connaissances en 1990 - T.S.M. - L'eau.
- [2] AUBOIN (J.), BROUSSE (R.), LEHMAN (J. P.) -1968-
Précis de géologie : tome 1 - Pétrologie - DUNOD
- [3] BAILLY (S.), KLESZCZ (J.P.) -1977-
Etude hydrogéologique des rivières drainant le Cenomanien dans le Nord de la France.
77 NPA 70.
- [4] BAILLY (S.), CAULIER (P.), JOURDAIN (E.) -1986-
Syndicat Intercommunal du Bas-Pays de Béthune - Violaines (Pas de Calais) , Etude
hydrogéologique pour la recherche d'un nouveau point de captage - Etude
complémentaire en vue de la réalisation ultérieure d'un deuxième forage
BRGM 86 NPC 15
- [5] BECKELYNCK (J.), CAULIER (P.), TALBOT (A.) -1984-
Recherche de ressources nouvelles en eau potable pour le Bassin Minier -
Reconnaissance du réservoir Cenomanien. BRGM 84 AGI-276 NPC
- [6] BECKELYNCK (J.) -1985-
Remontée de la nappe de la craie dans le Bassin Minier du Nord Pas de Calais. Etude
Globale et zones sensibles. BRGM 85 SGN 653 NPC
- [7] BECKELYNCK (J.), CAULIER (P.), JOURDAIN (E.) -1986-
Réseau de contrôle de la qualité des eaux souterraines. Analyse et évolution de la
qualité du début des observations à fin 1985 - BRGM 86 SGN 729 NPC
- [8] BECKELYNCK (J.) -1987-
Base de données technico-administratives des forages d'eau du Nord - Pas de
Calais. Création et exemples d'exploitation. Rapport BRGM 87 SGN 542 NPC
- [9] BECKELYNCK (J.), DARMENDRAIL (D.) -1989-
Interprétation graphique et cartographique des données de qualité physico-chimique
de la nappe de la craie dans le Bassin Artois Picardie. 89 SGN 544 NPC.
- [10] BERGER (G.), HALIMA (A.Ben), MARIOTTI (A.) -1976-
Apport de l'étude isotopique de l'azote à la connaissance de la pollution des aquifères
souterrains par les nitrates. en milieu agricole (Brie. Beauce-France). Revue de
géographie physique et de géologie dynamique (2). Volume XVIII, fascicule 4,
p. 375-384.
- [11] BERNARD (D.) -1979-
Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la
France. Thèse de troisième cycle en sciences naturelles (Lille).

- [12] BERNARD (D.), BOSCH (B.), CAULIER (P.) -1980-
Acquisition et rassemblement des données géothermiques disponibles et nouvelles dans la zone franco-belge de Saint-Ghislain à Saint-Amand-les-Eaux (Nord)
Rapport BRGM 80 SGN 406 NPCIMGAIGTH
- [13] BERNARD (D.), CAULIER (P.) -1989-
Exploitation d'eau souterraine potable dans la nappe de la craie en position captive dans le Nord Pas-de-Calais. Col. Soc. Géol. du Nord - Avril 1989
- [14] BERNARD (D.), CELET (P.), FIEVET (J.), MAILLOT (H.)-1989-
Vulnérabilité de la craie dans le Nord de la France - Ann. Soc. Géol. Nord. T.CIX, séances des 26 et 27 avril 1989. p. 93-100
- [15] BERNARD (D.), MAILLOT (H.) -1991-
Perspectives de l'exploitation des champs captants à la nappe de la craie de la communauté urbaine de Lille. prospection et restauration - Soc. Hydr. de France, XXI journée de l'hydraulique Sophia Antipolis
- [16] BERNARD (D.) -1992-
"Les aquifères du bassin Artois Picardie" et "la minéralisation de l'eau, une histoire d'agression!" Agence de l'Eau - Non publié.
- [17] BIZE (J.), BOURBIGOT (M.), DEMOCRATE (C.), CALMEL (R.) -1985-
Alimentation artificielle de la nappe alluviale de la Garonne pour la production d'eau potable. Water Supply. volume 3, n°2, 1985. p.79-87.
- [18] BLAISON (N.), DASSONVILLE (G.), LETOLLE (R.) -1985-
Les nitrates dans le champ captant d'Aubergenville : recherche de leur origine et de leur évolution. Water Supply. volume 3, n°2, 1985. p 187-193.
- [19] BONTE (A.) -1979-
Affaissements miniers et géologie - Industrie minérale - Octobre 1979 , 11 p.
- [20] BOOTH (S. K.), FUSTER (S. S. J.), PARKER (J. M.) -1987-
Penetration of nitrate from agricultural soils into the groundwater of the Norfolk Chalk - Proc. Instn. Civ. Engrs. - Part 2 - 1987-83 Mar., p. 15-32, Paper 9010 Water Engineering Group
- [21] BOSCH (B.), CAULIER (P.), LEPLAT (J.), TALBOT (A.) -1980-
Un objectif géothermique : le calcaire carbonifère sous le bassin houiller à l'Est de St Amand-les-Eaux Ann. Soc. Géol. Nord T. C, séance du 2 avril 1980, p.167-174
- [22] BOURG (A.), DARMENDRAIL (D.), RICOUR (J.) -1989-
Geochemical filtration of riverbank and migration of heavy metals between the Deûle River and the Ansereuilles, Alluvion Chalk Aquifer (Nord, France). Geoderma. 44 (1989) p.229-244 - Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam
- [23] BRGM. BURGEAP - 1983-
Champs Captants d'Ermerin et Houplin Ancoisne - 1° phase - Note BRGM 83 NPC 17

- [24] BRGM, BURGEAP -1984-
Champs captants d'Emmerin et Houplin Ancoisne - 2^e phase - Rapport BRGM
84 AGI 190 NPC
- [25] BRGM -1984-
Recherche de ressources nouvelles en eau potable pour le Bassin Minier du
Pas-de-Calais. Reconnaissance du réservoir cénomaniens. 84 AGI 276 NPC.
- [26] BRGM -1984-
Reconnaissance du réservoir cénomaniens entre Houdain et Vimy. S.G.R./N.P.C.1984.
- [27] CAOUS (J. Y.) -1988-
Recherche de nouvelles ressources en eau potable - Exécution d'un nouveau
forage d'essai (P3) 88 SGN 753 NPC
- [28] CAOUS (J. Y.) -1990-
Restructuration de la desserte en eau potable du Bassin Minier occidental -
Expertise technique sur les études effectuées de 1983 à 1990
BRGM Note 90 NPC 103
- [29] CAOUS (J. Y.) -1990-
Bulletin annuel d'information sur les eaux souterraines - Evolution du niveau
des nappes. 4^{ème} édition 1989/1990 . Rapport BRGM R 30919 NPC 4S 90
- [30] CAOUS (J. Y.), GUERIN (B.) -1990-
Expérience de dénitrification par bassin d'infiltration près du champ captant de la
Communauté Urbaine de Lille à Emmerin (Nord) - Ann. Soc. Géol. Nord CIX. p.101.
Juin 1990
- [31] CATHELAIN (M.), MARCHANDISE (P.) -1986-2
De la pollution des eaux - T.S.M. L'eau Fév. 1986 p.97-103
- [32] CAULIER (P.) -1974-
Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la Région
Nord - Thèse de 3^{ème} cycle - Lille
- [33] CAULIER (P.) -1976-
Dépôts de goudrons acides dans les carrières de Dury et Noyelles-sous-Bellone
(Pas-de-Calais). Rapport BRGM 76 SGN 275 NPA.
- 1341 CAULIER (P.) -1985-
Syndicat intercommunal du bas pays de Béthune-Violaines (Pas-de-
Calais). Etude hydrogéologique pour la recherche d'un nouveau point de
captage - BRGM 85 SGN 565 NPC
- [35] CAULIER (P.) -1985-
Recherche de sites de captage en vue de remplacer le forage de La Bassée
et de compléter le champ captant de Salomé - BRGM 85 NPC 21
- [36] CARLUCCI (T.), VALLE (S.) -1990-
Azote et Agriculture de A à Z. Chambre de l'Agriculture
du Nord. Pas-de-Calais et Agence de l'Eau Artois Picardie.

- [37] CAULIER (P.), DENUDT (H.), LEPLAT (J.), TALBOT (A.) -1985-
Recherche de ressources nouvelles en eau potable pour le Bassin Minier. Reconnaissance du réservoir captif Sénonien-Turonien entre Béthune et La Bassée - BRGM 85 SGN 464 NPC
- [38] CLAIR (A.) -1974-
Pollution de la nappe aquifère profonde par les chlorures à la suite de la mise en service de l'autoroute A6 dans l'arrière côte de la Côte d'Or. Ann. Agron. 1974, 25 (2-3). p. 483-497.
- [39] CREMILLE (L.), THRONION (J.Ch) -1974-
Plan d'exploitation de la nappe de la craie dans le Bassin Minier à l'intérieur du quadrilatère Maisnil-les-Ruitz, Gorre. Leforest. Fresnes-les-Montauban - BRGM 74 SGN 174 NPA
- [40] DARMENDRAIL (D.) -1988-
Processus biochimiques susceptibles d'être impliqués dans l'effet filtre des berges lors de l'alimentation des nappes par les cours d'eau - Hydrologie n°3, 1988, p.187-196.
- [41] DARMENDRAIL (D.), PREZ (P.), SIX (J.P.) -1990-
Aspects réglementaires et problèmes posés par l'élimination des produits de curage des cours d'eau. Extrait des ann. soc. géol. du Nord . T. CIX, 26 et 27 Avril 1989, p.169-174
- [42] D.D.A.S.S. NORD PAS-DE-CALAIS- -1983-
Fluor et eau d'alimentation.
- [43] DEBRABANT (P.) -1990 -
Cours d'hydrogéologie. 2^{ème} année GT-3C EUDIL - 1990.
- [44] DEGREMONT (Société) -1989-
Mémento technique de l'eau. 9^{ème} édition LAVOISIER - p.1-18 et 480-522.
- [45] DE MARSILY (G.) -1976-
Cours d'hydrogéologie -Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris - 1976.
- [46] DENUDT (H.) -1986-
Recherche de ressources nouvelles en eau potable pour le Bassin Minier. Reconnaissance du réservoir Sénonien-Turonien entre Béthune et La Bassée. BRGM 86 SGN 709 NPC
- [47] DENUDT (H.) -1988-
Recherche de ressources nouvelles en eau potable pour le Bassin Minier. Reconnaissance du réservoir Sénonien-Turonien entre Béthune et La Bassée. BRGM 88 SGN 012 NPC
- [48] DENUDT (H.) -1988-
Recherche de ressources nouvelles en eau potable pour le Bassin Minier. Reconnaissance du réservoir Sénonien-Turonien entre Béthune et La Bassée. BRGM 88 SGN 752 NPC

- [49] DENUDT (H.) -1988-
Arrêt des forages de la centrale thermique de Violaines (Pas-de-Calais). Evaluation des impacts hydrogéologiques. BRGM 88 SGN 301 NPC
- [50] DENUDT (H.) -1989-
Etude hydrogéologique du réservoir Séno-Turonien entre Bethune et la vallée de La Clarence. BRGM 30035 NPC 4S 89
- [51] DENUDT (H.) -1991-
Etude et synthèse hydrogéologiques du bassin d'Orchies.
BRGM R. 33097 NPC 4S 91
- [52] DROZ (B.) -1985-
Influence de la structure et de la nature des terrains du Valenciennois sur la qualité de la nappe de la craie (Nord de la France). Thèse de 3^{ème} cycle en géologie appliquée - Lille.
- [53] DUBOST (C.) -1991-
Recueil et saisie des données hydrogéologiques existantes dans la région Nord-Pas-de-Calais. BRGM R 32584 NPC 4S 91
- [54] DUBOST (C.) -1992-
Actualisation des caractéristiques hydrauliques de la nappe de la craie entre Calais et Valenciennes. BRGM R 34858 NPC 4S 92
- [55] FOUCAULT (A.), RAOULT (J.F.) -1984-
Dictionnaire de géologie - 2^{ème} édition- 1984- MASSON
- [56] FUSTEC (E.), GRILLO (X.), MARIOTTI (A.), SAJUS (J.) -1991-
Nitrate removal by denitrification in alluvial ground water : *role of a former channel*. Journal of hydrology, 1991, n° 123, p. 337-354, Elsevier. science publishers B.V, Amsterdam.
- [57] GAGEONNET (M.), TALBOT (A.) -1979-
Etude hydrogéologique préliminaire aux travaux de raccordement des réseaux d'adduction en eau potable sur les forages de Houdain (Pas-de-Calais). 79 SGN 633 NPC.
- [58] GALLEZOT (A.) -1992-
Transformations chimiques naturelles et provoquées de la nappe de la craie (Nord de la France). Recueil et synthèse des données. Rapport DESS Chimie des Eaux - Lille.
- [59] HUTCHINS (S.), KOVACS (D.), SEWELL (G.), SMITH (GJ) -1991-
Biodegradation of aromatic hydrocarbons by aquifer microorganismes under denitrifying conditions. Environ. sci. technol. volume 25, n°1, 1991, p.68-76.
- [60] JAMET (P.), LAREDO (C.), THOISY (J.C) -1984-
Etude et modélisation de la cinétique d'absorption des pesticides dans le sol. Comportements et effets secondaires des pesticides dans le sol, Versailles, 4-8 Juin 1984. Ed. INRA Publ., 1985. Les Colloques de l'INRA , n° 31.

- [61] KERGALL (Y.), TRAVI (Y.) -1991-
Fluorisk : un système expert pour évaluer le "risque fluorotique" lié aux eaux souterraines dans les pays en voie de développement. Soc. Hydrotec. de France, XXI^e journées de l'Hydraulique Sophia Antipolis. 29-30 Janvier 1991.
- [62] LANDREAU (A.), MARIOTTI (A.), SIMON -1988-
La dénitrification naturelle dans les eaux souterraines. Hydrogéologie, 1, 1988, p 35-43.
- [63] MAILLOT (H.) -1991-
Détermination des périmètres de protection de trois nouveaux captages du SIDEN à Illies. Expertise du 12 Octobre 1991.
- [64] MANIA (J.) -1978-
Gestion des systèmes aquifères. Application au Nord de la France. Thèse de doctorat, S.G.N. Mémoires, Tome XV.
- [65] MARIOTTI (A.) -1986-
La dénitrification dans les eaux souterraines. principes et méthodes de son identification. Une revue. Journal of Hydrology, 8f p.1-23
- [66] MINISTERE DES AFFAIRES SOCIALES ET DE LA SOLIDARITE -1991-
Eaux destinées à la consommation humaine. Code de la Santé Publique, DGS/PGE/1D/Mars 1991.
- [67] MONTIEL (A.), PENVERNE (Y.), RAUZY (S.), TRICARD (D.) -1985-
Enquête sur la teneur en solvants chlorés volatils à 1 ou 2 atomes de carbone dans les eaux souterraines. Water Supply, volume 3, n°2, 1985, p 157-164.
- [68] OLLAGNON (B.) -1988-
Alimentation en eau potable du Bassin Minier du Pas-de-Calais. Situation et perspectives. Mémoires de 3^{ème} année de l'École Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires.
- [69] PERNEL (F.) -1991-
Recherche d'une nouvelle ressource en eau potable pour le Bassin Minier du Pas-de-Calais- 3^{ème} phase. Modélisation hydrodynamique du secteur de Béthune. Document non public. BRGM 33626 NPC 4S 91
- [70] RAMON (S.), RICOUR (J.) -1978-
La présence du fluor dans les eaux souterraines d'après des exemples français. T.S.M. L'Eau. 73^{ème} année. n°1, Novembre 1978. p.571-574
- [71] S.I.D.E.N -1989-
Groupements des Flandres sud et de Salomé. Projet de renforcement de la ressource en eau par la création de deux forages et la mise en exploitation d'un forage à Illies (Nord)

- [72] SIMON (B.) -1986-
Apports de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines. Thèse de 3^{ème} cycle. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI - Géologie dynamique, mention Sciences de l'eau.
- [73] TALBOT (A.), TILLIE (B.) -1977-
Etude hydrogéologique préliminaires aux travaux de raccordement des réseaux d'A.E.P. sur les forages productifs de Callone et Comblain. 77 SGN 633 NPA.
- [74] TALBOT (A.), TILLIE (B.) -1978-
Ressources en eau dans la région de Salomé (Nord). Effet à long terme des prélèvements prévus. BRGM78 SGN 670 NPA
- [75] TALBOT (A.) -1984-
Syndicat intercommunal du bas pays de Béthune-Violaines (Pas-de-Calais). Etude hydrogéologique pour la recherche d'un nouveau point de captage. BRGM 84 AGI 180 NPC
- [76] WATERLOT (G.) -1950-
L'évolution du chimisme des eaux du calcaire carbonifère de Lille-Roubaix-Tourcoing et des régions limitrophes. Ann. Soc. Géol. Nord - T.LXX, p79-109.
- [77] WATERLOT (G.) -1955-
Remarque sur les phénomènes accompagnant les échanges de base dans le réseau aquifère captif du calcaire carbonifère à Cobrieux (Nord). Ann. Soc. Géol. Nord T - LXXV. p 174-181.
- [78] WATERLOT (G.) -1957-
Les ressources hydrogéologiques de la région du Nord de la France. Le Monde Industriel. 83^{ème} année. Volume 532, p 5-27.
- [79] WATERLOT (G.) -1959-
Remarques sur les variations du chimisme des eaux profondes de la craie. Ann. Soc. Géol. Nord T.LXXVIII, p 234-243.
- [80] WATERLOT (G.) -1960-
Sur les variations du chimisme de l'eau de la craie du Nord de la France dans les zones de recouvrement tertiaire. Ann. Soc. Géol. Nord T.LXXX, p 311-318
- [81] WATERLOT (G.) (révisé par H.MAILLOT)
Considérations géologiques sur la région Nord de la France.

ANNEXE Ia
DEFINITION DE QUELQUES MINERAUX ET ROCHES

- ALLUVION** : sédiment des cours d'eau à granulométrie liée au débit. et composé de galets, de graviers et de sable en dépôts souvent lenticulaires, la fraction fine correspondant à des argiles et des limons (c'est elle qui domine dans les zones inondables),
- ARGILE** : roche ou minéraux de phyllosilicates hydratés à base de couches de $[\text{Si}_4\text{O}^{10}(\text{OH})_2]^{6-}$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et $\text{Al}(\text{OH})_3$, entre lesquelles se placent divers cations K^+ , Na^+ , Ca^{++} .
- CALCAIRE** : roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50 % de calcite (CaCO_3) pouvant être accompagnée de dolomite ($\text{Ca, Mg} (\text{CO}_3)_2$), de sidérite (FeCO_3).
- CRAIE** : roche sédimentaire marine, calcaire (90 % ou plus de CaCO_3) à grain très fin, poreuse.
- GLAUCONIE** : association de minéraux argileux à fortes teneurs en Fer.
- GRES** : roche sédimentaire composée d'au moins 85 % de grains de quartz (Si O_2).
- GYPSE** : ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- UMON** : dépôt détritique meuble, argileux et silteux.
- MARNE** : Roche sédimentaire constituée d'un mélange de calcaire et d'argile (pour 35 à 65 %).
- PYRITE** : FeS_2 , souvent présente dans les roches sédimentaires riches en matières organiques.
- SABLE** : matériau meuble formé de grains de quartz de $62.5\mu\text{m}$ à 2 mm.
- SCHISTE** : roche ayant acquis un feuilletage (schistosité) sous l'influence de contraintes tectoniques.
- SILEX** : roche siliceuse (SiO_2).
- SILT** : sédiments détritiques meubles dont le grain est compris entre $3,9\ \mu\text{m}$ et $62,5\ \mu\text{m}$.

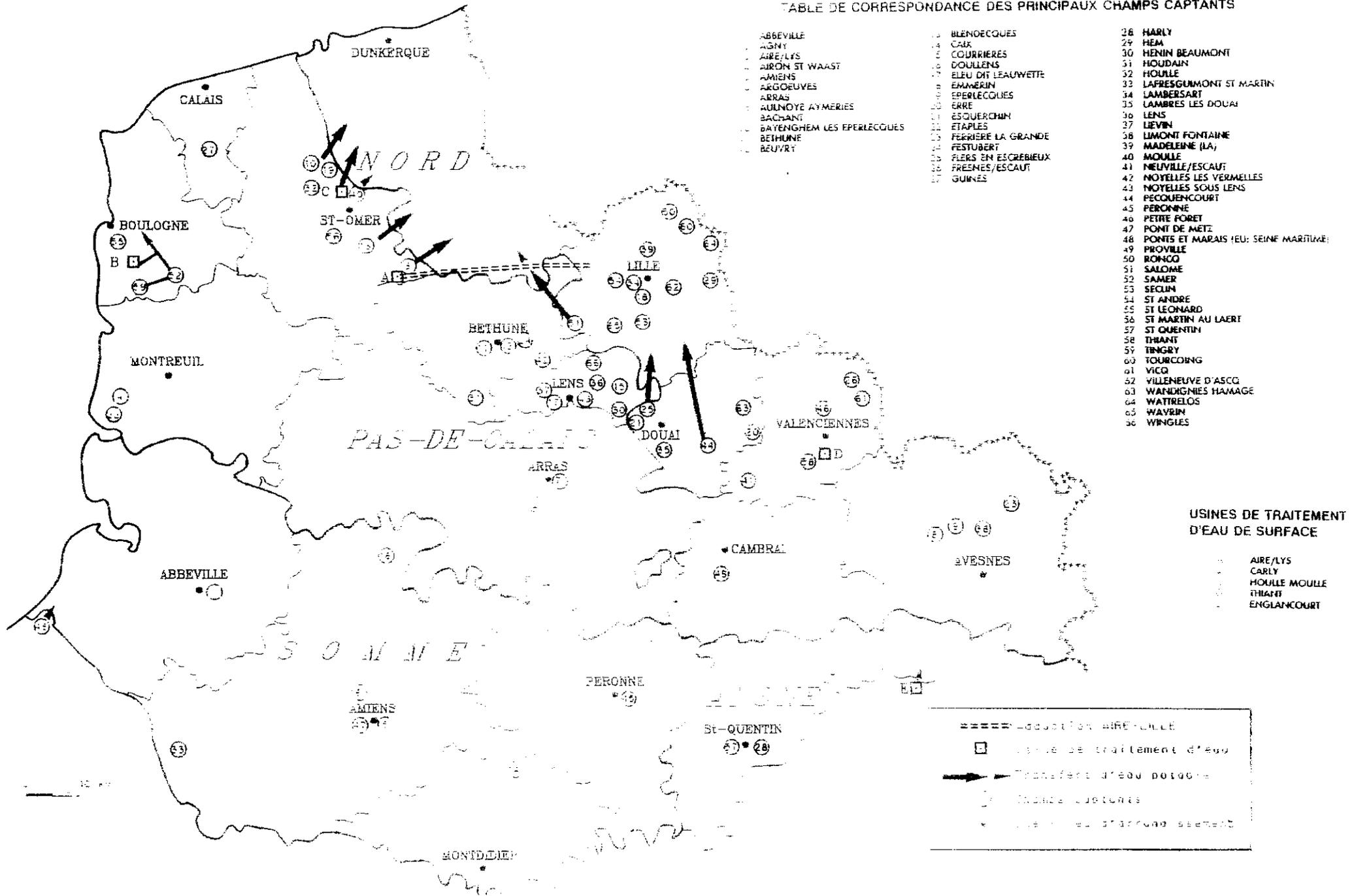
ANNEXE 1b
 ECHELLE STRATIGRAPHIQUE
 (dans FOUCAULT & RAOULT, 1984)

b	CENOZOÏQUE		SECONDAIRE & MESOZOÏQUE		PRÉCAMBRIEN		Étages	autres dénominations	autres dénominations	cycles géologiques
	QUATERNAIRE (voir tableau)	TERTIAIRE	CRÉTACE	JURASSIQUE	TRIASSIQUE	PERMIEN				
239										
238										
237										
236										
235										
234										
233										
232										
231										
230										
229										
228										
227										
226										
225										
224										
223										
222										
221										
220										
219										
218										
217										
216										
215										
214										
213										
212										
211										
210										
209										
208										
207										
206										
205										
204										
203										
202										
201										
200										
199										
198										
197										
196										
195										
194										
193										
192										
191										
190										
189										
188										
187										
186										
185										
184										
183										
182										
181										
180										
179										
178										
177										
176										
175										
174										
173										
172										
171										
170										
169										
168										
167										
166										
165										
164										
163										
162										
161										
160										
159										
158										
157										
156										
155										
154										
153										
152										
151										
150										
149										
148										
147										
146										
145										
144										
143										
142										
141										
140										
139										
138										
137										
136										
135										
134										
133										
132										
131										
130										
129										
128										
127										
126										
125										
124										
123										
122										
121										
120										
119										
118										
117										
116										
115										
114										
113										
112										
111										
110										
109										
108										
107										
106										
105										
104										
103										
102										
101										
100										
99										
98										
97										
96										
95										
94										
93										
92										
91										
90										
89										
88										
87										
86										
85										
84										
83										
82										
81										
80										
79										
78										
77										
76										
75										
74										
73										
72										
71										
70										
69										
68										
67										
66										
65										
64										
63										
62										
61										
60										
59										
58										
57										
56										

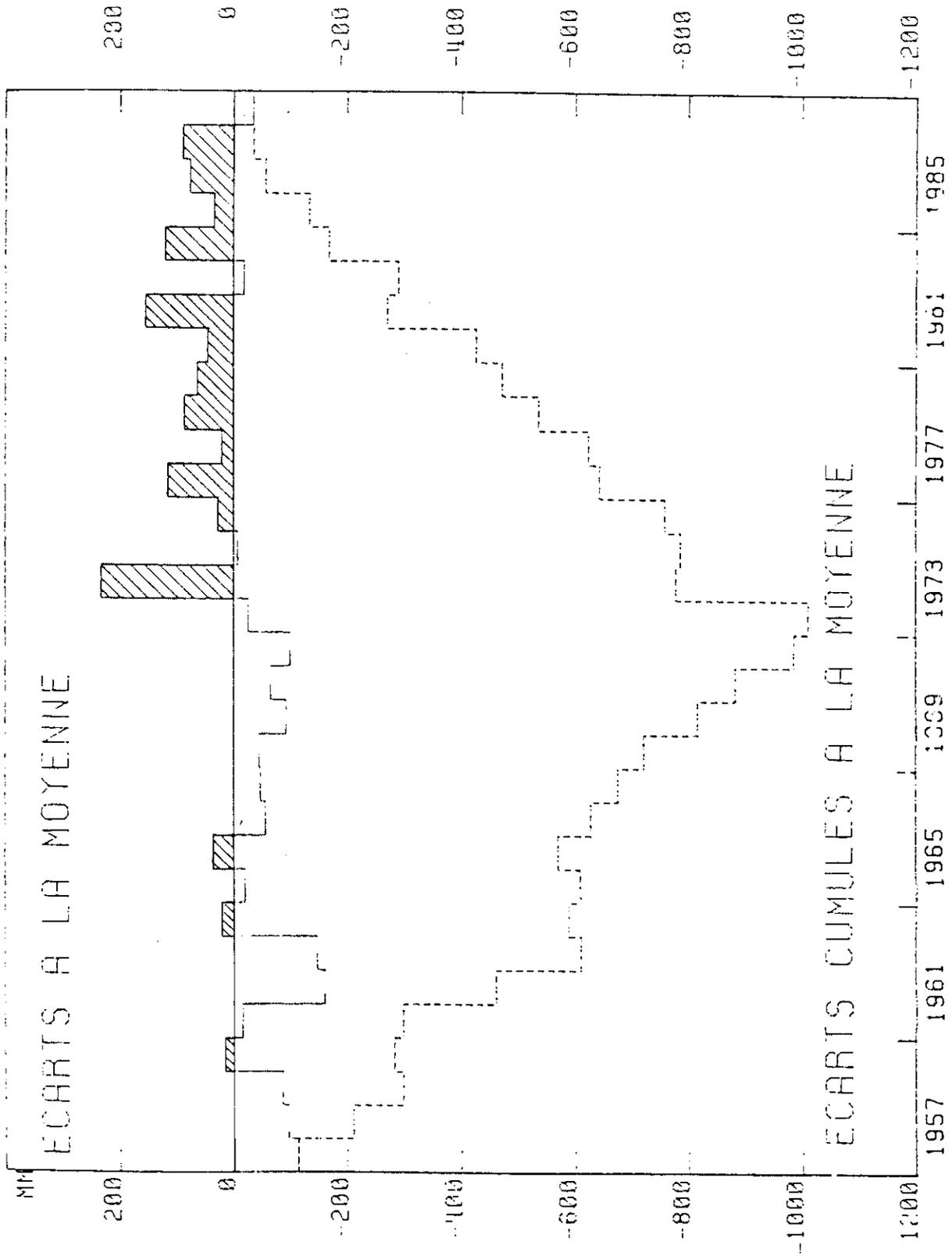
LES PRINCIPAUX CHAMPS CAPTANTS DU BASSIN ARTOIS-PICARDIE

TABLE DE CORRESPONDANCE DES PRINCIPAUX CHAMPS CAPTANTS

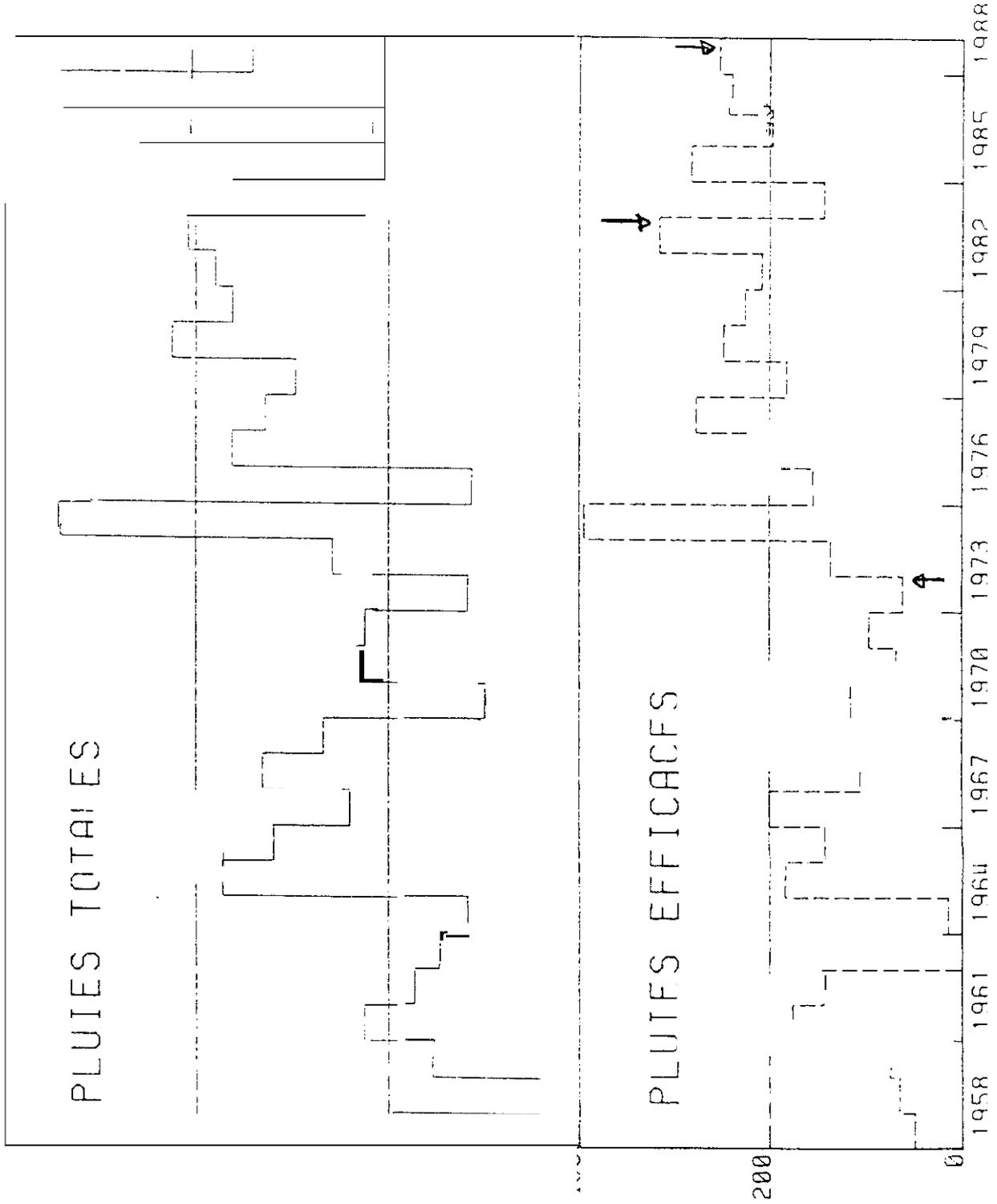
1	ABBEVILLE	28	HARLY
2	AGNY	29	HEM
3	AIRE/LYS	30	HENIN BEAUMONT
4	AIRON ST WAAST	31	HOUJAIN
5	AMIENS	32	HOUILLE
6	ARGOEUVES	33	LAFRESGUMONT ST MARTIN
7	ARRAS	34	LAMBERSART
8	AULNOYE AYMERIES	35	LAMBRES LES DOUAI
9	BACHANT	36	LENS
10	BATENHEM LES EPERLEQUES	37	LEVIN
11	BETHUNE	38	LIMONT FONTAINE
12	BEUVRY	39	MADELEINE (LA)
13	BLENOECQUES	40	MOUILLE
14	CAIX	41	NEUVILLE/ESCAUT
15	COURRIERES	42	NOVELLES LES VERMELLES
16	DOULLENS	43	NOVELLES SOUS LENS
17	ELEU DIT LEAUWETTE	44	PECOUENCOURT
18	EMMERIN	45	PERONNE
19	EPERLEQUES	46	PETRE FORET
20	ERRE	47	PONT DE METZ
21	ES QUERCHIN	48	PONTS ET MARAIS (EU: SEINE MARITIME)
22	ETAPLES	49	PROVILLE
23	FESTIBERT	50	RONCO
24	FLEPS EN ESCREBIEUX	51	SALOME
25	FRESNES/ESCAUT	52	SAMER
26	GUINES	53	SECUN
27		54	ST ANDRE
		55	ST LEONARD
		56	ST MARTIN AU LAERT
		57	ST QUENTIN
		58	THIANT
		59	TINGRY
		60	TOURCOING
		61	VICQ
		62	VILLENEUVE D'ASCC
		63	WANDIGNIES HAMAGE
		64	WATTRELOS
		65	WAVRIN
		66	WINGLES



Pluies efficaces à Lille-Lesquin (59)
(Septembre 1957-Septembre 1989)



PLUIES BRUTES ET EFFICACES A LILLE LESQUIN (SEPTEMBRE 1958 - SEPTEMBRE 1988)



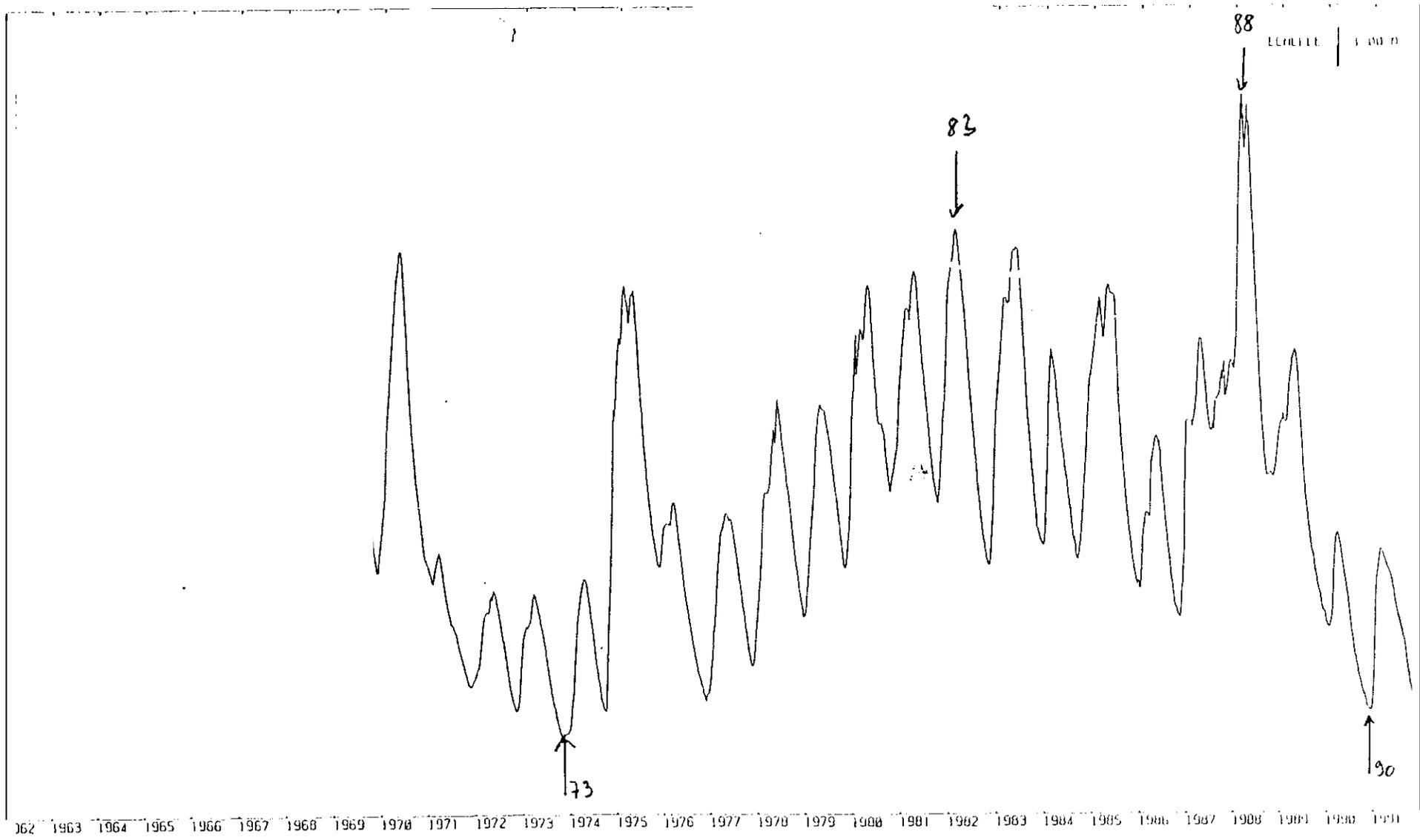
PIEZOMETRIE 1962-1991

{S} SGR/NPC

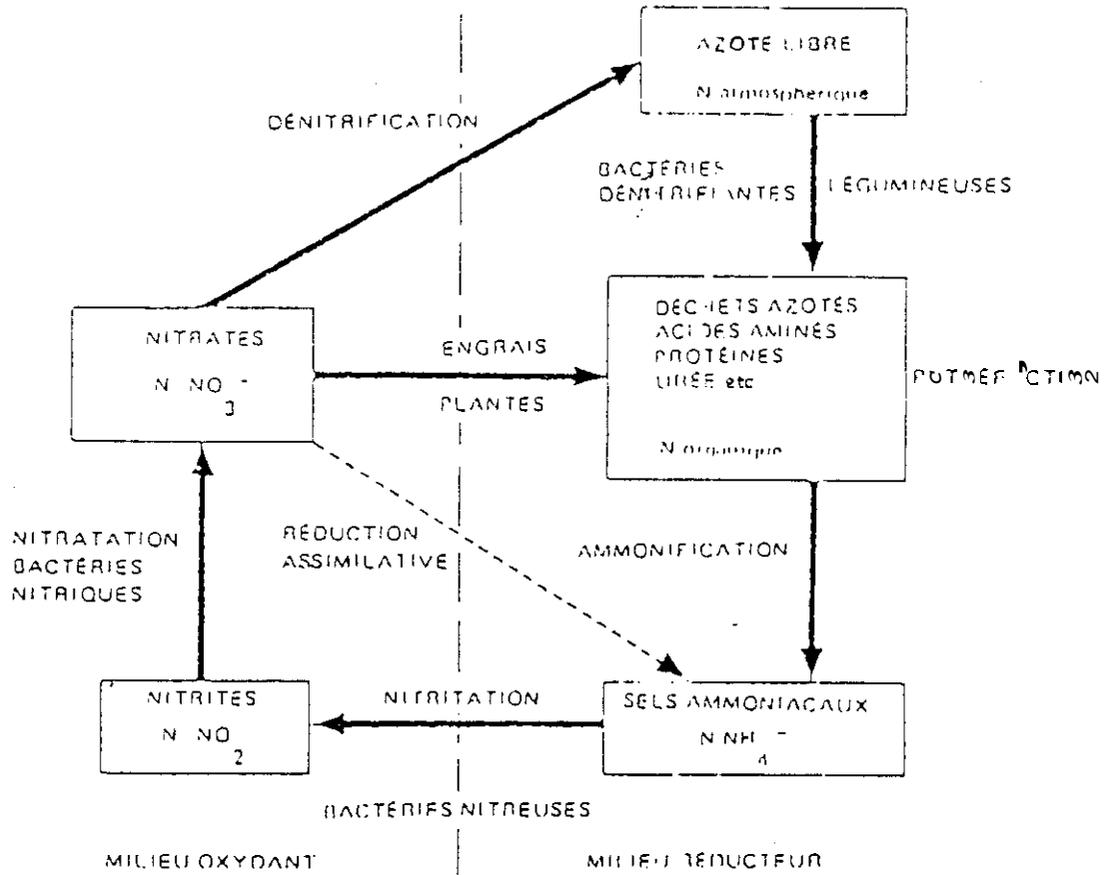
INDICE B.H.C.M. 0024-0X-0005

062 MARRASNES
TOUT DE LOUVEUX

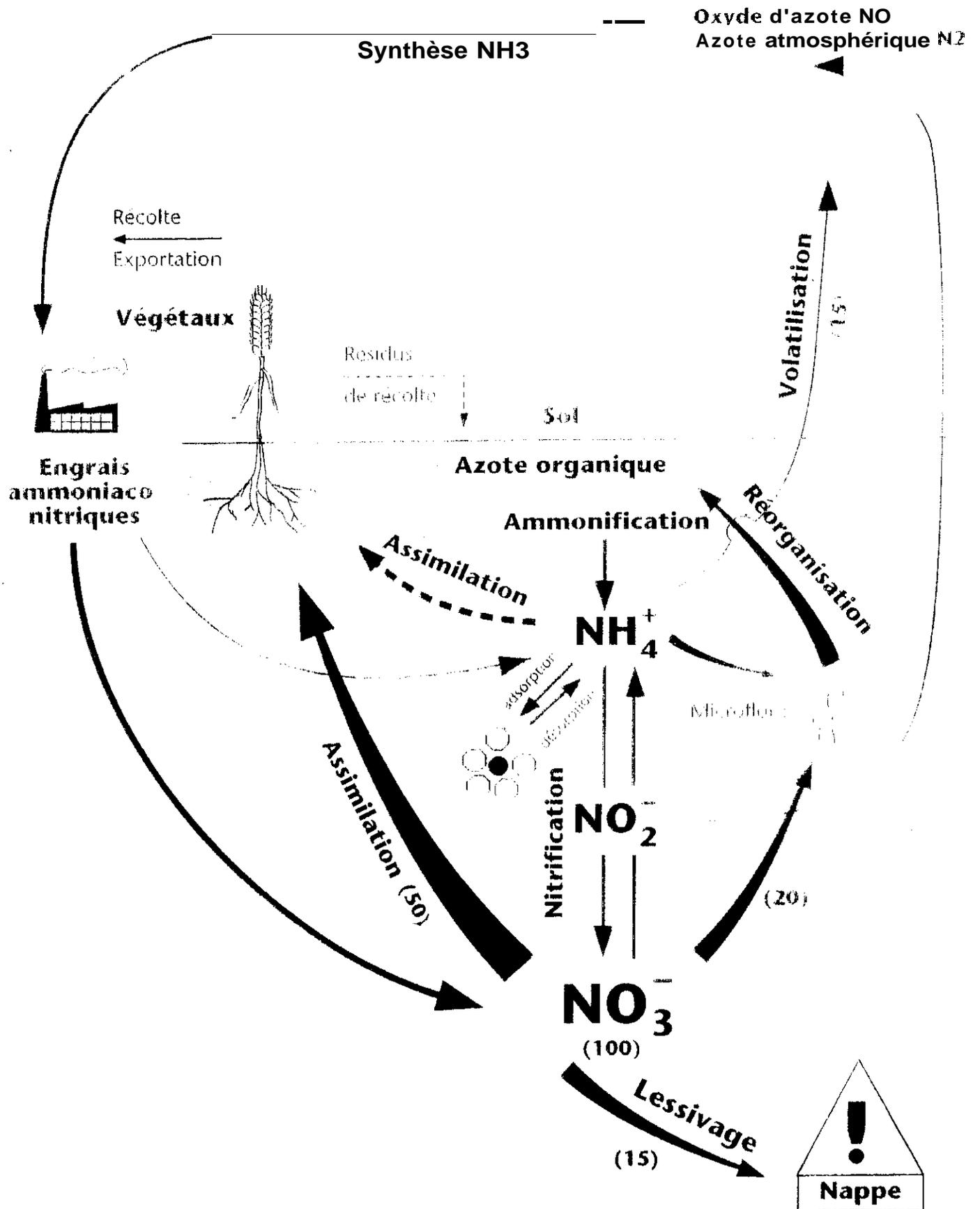
DESIGNATION P1



ANNEXE VI
CYCLE DE L'AZOTE
(MEMENTO TECHNIQUE DE L'EAU)



PROCESSUS DE TRANSFORMATION DE L'AZOTE DANS LE SOL



paramètres	unités	limites de qualité		paramètres	unités	limites de qualité	
		eaux potables	ressource			eaux potables	ressource
01 Couleur	mg/l Pt		200	35 Zinc	mg/l	5	5
02 Turbidité	NTU			37 Phosphore	mg/l P ₂ O ₅	5	
03 Odeur	lx Odeur	2 à 12	3 à 25	38 Fluorure	mg/l	1,5	
04 Saveur	lx Odeur	2 à 12	3 à 25	39 Cadmium			
05 Température	°C	15 à 20	25	40 Microbes en suspension (1)			
06 pH		6,5 à 8,5		41 Chlorure résiduel			
07 Conductivité (2)	µS/cm			42 Baryum (3)			
08 Chlorure	mg/l	250	250	43 Argent	µg/l	10	
09 Sulfates	mg/l	200	250	44 Arsenic	µg/l	50	100
10 Silice				45 Beryllium			
11 Calcium				46 Cadmium	µg/l	5	5
12 Magnésium	mg/l	30		47 Cyanure	µg/l	50	50
13 Sodium	mg/l	30		48 Chrome	µg/l	50	50
14 Potassium	mg/l			49 Mercure	µg/l		
15 Aluminium total	mg/l			50 Nickel	µg/l	50	
16 TAC (1)		3		51 Plomb	µg/l	50	50
17 Résidu sec	mg/l	500		52 Antimoine	µg/l	10	
18 Oxygène dissous (1)	mg/l	8		53 Sélénium	µg/l	10	10
19 Gaz carbonique libre	mg/l			54 Vanadium			
20 Nitrates	mg/l NO ₃	50	100	55 NAR (4) substances	µg/l	0,2	
21 Nitrites	mg/l NO ₂	10		pour Benzo (a, b) pyrene		0,01	
22 Ammonium	mg/l NH ₄	10		57 Coliformes totaux	N/100 ml	des analyses	
23 Azote Kjeldahl (1)	mg/l N	10		58 Coliformes thermotolérants	N/100 ml	0	20 000
24 Oxydabilité au KMnO ₄	mg/l O ₂	10		59 Streptocoques lactiques	N/100 ml	0	10 000
25 COI	mg/l			60 Clostridium	N/100 ml	0	
26 H ₂ S		non détectable à l'odeur		61 Bactéries revivables (20 à 24 h)	N/ml		
27 SEC (1)				62 Bactéries revivables (20 à 24 h)	N/ml		
28 Hydrocarbures dissous	µg/l		100	Staphylocoques pathogènes	N/100 ml	0	
29 Phénols	µg/l		100	Salmonelles	N/5	0	
30 Bore (1)				Enterovirus	N/10 l	0	
31 Détergents anioniques	µg/l	100	500	65 Total	µg/l	0,5	
32 Organochlorés (2)				Par substance		0	Parathion
33 Fer	µg/l	100		Souf Aldrine et Dieldrine		0,03	HCH
34 Manganèse	µg/l	100		hexachlorobenzène		0,01	Dieldrine
35 Cuivre	µg/l			PCB et PCB		0,5	

(1) Recommandations concernant le dosage dans les eaux de surface de 1971

(2) Valeurs limites recommandées établies en 1985

(3) Dichlorobenzène ou tétrachlorobenzène 10 µg/l
 Trichlorobenzène ou Chlorobenzène 10 µg/l

ANNEXE IX CONTENU DES ANALYSES

ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE		ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE		
RESULTAT		RESULTAT		
PARAMETRES CONCERNANT LES SUITES-TANCES TOXIQUES	ASPECTS (qualitatifs) : odeur, saveur, couleur, turbidité	ASPECTS (quantitatifs) : odeur, saveur, couleur, turbidité	ASPECTS (quantitatifs) : odeur, saveur, couleur, turbidité	
PARAMETRES CONCERNANT LES SUITES-TANCES TOXIQUES	pH CO d < 1 <	température pH conductivité	température pH conductivité chlorures sulfates silice calcium magnésium sodium potassium aluminium oxygène dissous résidus secs oxygène libre anhydride carbonique libre (essai au barbre) ou calcul de l'équilibre calcocarbonique carbonates hydrogénocarbonates	température pH conductivité chlorures sulfates silice calcium magnésium sodium potassium aluminium oxygène dissous résidus secs oxygène libre anhydride carbonique libre (essai au barbre) ou calcul de l'équilibre calcocarbonique carbonates hydrogénocarbonates
PARAMETRES CONCERNANT LES SUITES-TANCES TOXIQUES	nitrites nitrates ammonium paral. les para-actes suivants : chlorures, sulfates, oxydes, bilite ou KMnO4 ou CO2, titre alcalimétrique complet ou ducte, ténité	nitrites nitrates ammonium oxydabilité au KMnO4 ou CO2 hydrogène sulfure fer cuivre zinc manganèse phosphore fluor	azote Kjeldahl hydro-carbures dissous agents de surface indice phenol	azote Kjeldahl hydro-carbures dissous agents de surface indice phenol
PARAMETRES CONCERNANT LES SUITES-TANCES TOXIQUES	chlore résiduel ou tout autre paramètre représentatif du traitement de désinfection	chlore résiduel ou tout autre paramètre représentatif du traitement de désinfection	chlore résiduel ou tout autre paramètre représentatif du traitement de désinfection	chlore résiduel ou tout autre paramètre représentatif du traitement de désinfection
PARAMETRES CONCERNANT LES SUITES-TANCES TOXIQUES				arsenic cyanures chrome mercure sélénium
AUTRES PARAMETRES				pesticides composés organo-halogénés autres

ANALYSES BACTERIOLOGIQUES		
Résultat (a)	Sensitivité (b)	Commentaire (c)
Coliformes thermotolérants	Coliformes thermotolérants	Coliformes thermotolérants
Streptocoques fécaux	Streptocoques fécaux	Streptocoques fécaux
	Démarrément des bactéries aérobies fécales viables à 22°C et 37°C	Démarrément des bactéries aérobies fécales viables à 22°C et 37°C
		Soignée des b.c.

ANNEXE X
CODIFICATION DES AQUIFERES (BRGM)

Région naturelle : FLANDRES (FLA)

STRATIGRAPHIE			DESCRIPTION de L'Aquifère	CODE
RE	SYSTEME	ETAGE		
IV		Flandrien	Superficiel ou alluvial de faible intérêt	SS
			Alluvial particulier (La lys à un cours d'eau (L'Yser (La Deûle (L'Aa	AL AY AE BA
	Holocène)		Dunes ; sables pissards (wateringues)	
III	EOCENE	Yprésien (sup.)	Sables	07
		Landénien	Sables d'Ostricourt	02
II	CRETACE	Sénonien-Turonien	Craies et craies argileuses	03
		Cénomanién	Craies et craie argileuses	0A
I	CARBONIFERE	Dinantien	Calcaires	05
	DEVONIEN		Calcaires	06

Codification des Aquifère
Région naturelle : (ARTOI), (ART)

STRAT		GRAPHIE		DESCRIPTION de l'Aquifère	CODE		
RE	SYSTEME	ETAGE					
IV				Superficiel ou alluvial de faible intérêt	SS		
					Le Bléquin	AB	
					La Canche	AC	
					La Course	AO	
					Le Décours	AD	
					La Deûle	AE	
					L'Hem	AH	
					La Marque	AM	
					La Selle	AS	
					La Sensée	AN	
					Alluvial particulier à un cours d'eau	La Scarpe	AR
						La Ternoise	AT
						La Traxenne	AX
						La Trinquise	Ai
						L'Aa	BA
						Le Beaumont	BB
						L'Ecaillon	BE
		Le St George:	BG				
		Les Harpies	BH				
		L'Honelle	BO				
		La Rhonelle	BR				
		L'Authie	CK				
		L'Escaut	CJ				
II	EOCENE	Cuisien(Yprésien)	Sables de Mons-en-pévèle	14			
		Landénien	Sables d'Osricourt	01			
I	CRETACE	Sénonien-Turonien	Craies, crânes argileuses	02			
		Cénornanien	Craies, craies argileuses	03			
		Albien	Sables verts	05			
		Aptien	Calcaire	06			
		Kimméridgien	Sables, grès	07			
		Séquanien	Calcaire argileux, sables et grès calcaireux	08			
I	PERMO-TRIAS	Rauracien	Calcaire corraligène	09			
		Bathonien	Calcaire, calcaire oolithique)			
		Bajocien	Calcaire gréseux, sables) 10			
		Aalénien	Calcaire)			
		Hettangien-Rhétien	Calcaire gréseux	11			
I	CARBONIFERE		Grès, conglomérat	12			
		Dinantien	Calcaires	0A			
		Gédinnien	Grès de Pernes	13			

INDICE.BRGM	XLAMBERT	YLAMBERT	PROFONDEUR	CODE AQUIFERE	COMMUNE	EXPLOITANT	UTILISATION
00208X0006	663500	308320	011626	ART02....--C	ORCHIES	SIDEN D'ORCHIES	AEP
00208X0010	662540	309130	0100 20	ART02....-OC	AUCHY-LES-ORCHIES	SIDEN (PECOUENCOURT)	AEP
00208X0122	663560	308300	011726	ART02....--C	ORCHIES	SIDEN D'ORCHIES	AEP
00208X0123	663640	308280	011855	ART02....--C	ORCHIES	SIDEN D'ORCHIES	AEP
00208X0129	663150	309950	0096 50	ARTM....-OC	AUCHY-ES-ORCHIES	SIDEN (PECQUENCOURT)	AEP
00215X0003	667030	301910	0065 00	ART02....-OC	ORCHIES	SIDEN	AEP
00215X0044	666930	301900	0065 50	ART02....--C	ORCHIES	SIDEN	AEP
00216X0014	673350	302790	0060 30	ART@....-OC	SAINT-AMAND-LES-EAUX	S.E.F. ANZIN	AFP
00216X0015	670850	301150	0049 00	ART02....--C	RAISMES	S.E.F. ANZIN	AEP
00216X0019	676660	303910	0060.00	ART02....--C'	SAINT-AMAND-LES-EAUX	S.E.F. ANZIN	AEP
00216X0020	676540	303970	0061 86	ART02....--C	SAINT-AMAND-LES-EAUX	S.E.F. ANZIN	AEP
00216X0021	674110	304060	0062 00	ART02....--C	RAISMES	SIDEN	AEP
00216X0115	670740	301130	0049 00	ART02....--C	SAINT-AMAND-LES-EAUX	S.E.F. ANZIN	AEP
00216X0116	670680	301180	0049 00	ART02....--C	SAINT-AMAND-LES-EAUX	S.E.F. ANZIN	ACP
00216X0117	673400	302780	0060 50	ARTM....--C	SAINT-AMAND-LES-EAUX	S.E.F. ANZIN	AEP
00216X0118	674120	304030	0062 30	ARTM....--C	SAINT-AMAND-LES-EAUX	SIDEN	AEP
00217X0103	676830	303960	0058 00	ART02....--C	FRESNES-SUR-ESCAUT	S.E.F. ANZIN	AEP
00283X0101	679580	298880	0042 50	ARTM....--C	MAING	S.E.F. ANZIN	AEP
00283X0132	680280	298910	0050 60	ART02....--C	MAING	S.E.F. ANZIN	AEP
00283X0165	681770	291790		ARTCS....--C	MAING	S.E.F. ANZIN	AEP
00283X0236	679830	290800	0010 50	ARTCJ....--C	MAING	S.E.F. ANZIN	AEP
00283X0320	682220	291890	0009 30	ARTCJ....--C	THIANT	S.E.F. ANZIN	AEP
00283X0345	681230	291370	0017 00	ARTW....--C	PROUW	S.E.F. ANZIN	AEP
00283X0522	679780	290730	0010 50	ARTW....-OC	PROUW	S.E.F. ANZIN	AEP
00283X0690	679650	298880	0034 30	ART02....+~L	MARLY	S.E.F. ANZIN	AEP
00284X0150	685760	294050	0013 00	ART02....+0L	VALENCIENNES	S.E.F. ANZIN	AEP
00284X0151	685940	294550	0022 10	ART02....+0L	VALENCIENNES	S.E.F. ANZIN	AEP
00284X0152	685450	293750	0017.30	ART02....+0L	VALENCIENNES	S.E.F. ANZIN	AEP

ANALYSE TYPE PASTEUR

INSTITUT PASTEUR LILLE

Laboratoire de référence agréé pour l'analyse des eaux

Domaine du CERTIA

369, rue Jules Guesde

59650 VILLENEUVE D'ASCO

Tel. : 56.11.00

Télex : CERTIA-VILDA 160653

ANALYSE PHYSICO-CHEMIQUE D'EAU

TYPE I - ANALYSE COMPLETE

N° 27616

COMMUNE DE : COMINES

FORAGE N°1

Origine de l'eau : distribution publique, source, puits ou forage, surface (rivière, lac, barrage), eau de mélange. (*)

Eau non traitée — traitée : déferri-sation, déminéralisation, adoucissement, chloration, ozonation, u.v.

Echantillon prélevé le 13.10.77 Arrivé au laboratoire le 13.10.77

EXAMEN PHYSIQUE

Température : _____ °C
 pH : 8.45
 Turbidité : Limpide
 Résistivité : 950 ohms - cm
 Couleur : Incolore mg Pt/l
 Odeur : nulle
 Saveur : _____
 Pouvoir coagulant : _____ unités Baudrey

EXAMEN CHIMIQUE

Dureté totale (DHT) : 6
 T.A.C. : 34.2
 Oxydabilité au MnO₄K : 0.1 mg/l
 Résidu sec 105° C : 789
 Résidu sec 500° C : _____
 CO₂ libre équilibré : 1
 H₂S : RN
 O₂ dissous : _____
 Cl₂ libre : _____
 Silice SiO₂ : 10

BALANCE

CATIONS		mg/l	me/l
Calcium	Ca ++	8	0.40
Magnésium	Mg ++	10	0.80
Ammonium	NH ₄ +	0.4	0.02
Sodium	Na +	244	10.60
Potassium	K +	13	0.335
Fer	Fe ++	0.22	0.00
Manganèse	Mn ++	< 0.05	
Aluminium	Al +++	0.03	
Somme :			12.16

IONIQUE

ANIONS		mg/l	me/l
Chlorures	Cl -	50	1.41
Nitrites	NO ₂ -	< 0.05	0.00
Nitrates	NO ₃ -	< 0.5	0.00
Sulfates	SO ₄ =	168	3.50
Phosphates	PO ₄ =	< 0.1	0.00
Carbonates	CO ₃ =	0	0.12
Bicarbonates	HCO ₃ -	417	6.60
Somme :			11.63

ELEMENTS TOXIQUES

		mg/l	me/l
Plomb	Pb	< 0.1	
Arsenic	As	< 0.01	
Chrome hexavalent	Cr	< 0.005	
Cyanure	CN -	< 0.01	
Fluorures	F -	6.0	

ELEMENTS INDESIRABLES

		mg/l	me/l
Fer	Fe	0.22	
Manganèse	Mn	< 0.05	
Cuivre	Cu	< 0.1	
Zinc	Zn	< 0.1	
Composés phénoliques (en phénol)		< 0.01	

ESSAI AU MARBRE

pH

Alcalinité au Méthylorange en mg/L CaCO₃

CONCLUSIONS : Eau douce de minéralisation excessive caractérisée par la présence d'ammoniaque, un peu de fer et une teneur excessive en fluor.

Villeneuve d'Ascq, le

21 OCTOBRE 1977

Pour le Directeur,

J J M

DEMANDEUR : DDASS

ECHANTILLON : Forage n° 1

Origine de l'eau : distribution publique, source, puits ou forage, surface (rivière, lac, barrage), eau de mélange *

Eau non traitée — traitée : déferrisation, déminéralisation, adoucissement, chloration, ozonation, u.v. *

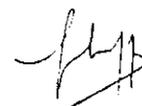
Echantillon prélevé le 14.4.77 Arrivé au laboratoire le 14.4.77

Couleur	Incolore	Odeur	Nulle	Saveur	
Turbidité			Limpide		
Résistivité en ohm-cm			1010		
pH à 20° C			8.45		
Dureté (en degré français)			3°8		° f
Titre alcalimétrique complet (TAC)			34°6		° f
					en mg/l
Oxydabilité à chaud (en O ₂)					0.2
Ammoniaque NH ₄ ⁺					0.36
Nitrites NO ₂ ⁻					< 0.05
Nitrates NO ₃ ⁻					< 0.5
Chlorures Cl ⁻					60
Sulfates SO ₄ ⁼					162
Fer Fe ⁺⁺					0.14

CONCLUSIONS : Eau douce de minéralisation importante caractérisée par la présence d'ammoniaque.

Villeneuve d'Ascq, le 21 AVRIL 1977

Pour le Directeur.



COMPAGNIE GENERALE DES EAUX

88 SGN 012 NPC

LABORATOIRE CENTRAL

Le 17/11/87

RAPPORT D'ANALYSE

Directeurs 1-3-3-4-5-6 du Ministère de l'Environnement.

BP 75 78600 Maisons Laffitte tél: 33-63-84-55

Pour le compte de : CENTRE REGIONAL ARTOIS BOULONNAIS

Affaire : ANALYSE A LA DEMANDE

N° DEMANDE : 8708330

EAU DU CANAL D'AIRE A LA BASSEE (AMONT ET AVAL)

Prélèvement 01 : CANAL EN AMONT DU SURGEON

Type eau : EB Date prélèvement : 05/11/87 Origine : ARRAS

AMONIUM	:	10,4	mg NH4/l
NITRES	:	1,9	mg NO2/l
NITATES	:	25	mg NO3/l
DE KJELDAHL	:	10,9	mg N/l

Prélèvement 02 : CANAL EN AVAL DU SURGEON

Type eau : EB Date prélèvement : 05/11/87 Origine : ARRAS

AMONIUM	:	24,1	mg NH4/l
NITRES	:	2,2	mg NO2/l
NITATES	:	76	mg NO3/l
DE KJELDAHL	:	19,7	mg N/l

Prélèvement 03 : SURGEON

Type eau : EB Date prélèvement : 05/11/87 Origine : ARRAS

AMONIUM	:	379	mg NH4/l
NITRES	:	9,75	mg NO2/l
NITATES	:	1.385	mg NO3/l
DE KJELDAHL	:	310	mg N/l

	FLUX NETS F EN T/AN						FLUX SPECIFIQUES KG/HA/AN		
	Domestique		Agricole		Indivi- duel et divers	Fuites canal	TOTAL	Surface concernée	
	diffus	ponctuel	diffus	ponctuel					
FRESNES LES MONTAUBAN	1	-	7,4	-	0,3	-	8,8	464	19,2
HENIN BEAUMONT	-	2,4	1,6	-	-	-	4	65	61,5
IZEL LES ESQUERCHIN	2,4	1	16,1	0,8	0,6	-	21,1	756	27,9
QUIERY LA MOTTE	2,0	1	17	1	1,2	-	22,3	860	25,9
VITRY EN ARTOIS	10,9	-	16,8	-	1,3	5	33,9	1.050	32,3
NEUVIREUIL	-	-	4,7	-	-	-	4,7	179	26,3
GAVRELLE	-	-	0,5	-	-	-	0,5	20	25
	16,3	4,4	64,1	1,8	3,4	5	95	3.414	27,8

ANNEXE XIV
 BILAN RECAPITULATIF DES APPORTS DIAZOTE
 PAR ACTIVITE ET COMMUNE
 DANS LA BASSIN VERSANT DE L'ESCREBIEUX

ANNEXE XV
ANALYSES DE PLUIES ET INFILTRATIONS EFFICACES
(dans D.BERNARD, 1979)

Composition chimique

de quelques eaux de pluie à Lezennes

(Nord) d'après JP. KLESZCZ ; 1978

(non publié)

	Dates			
	19-1-78	12-4-77	29-7-77	11-10-77
Hauteur de pluie (mm)	21	14,8	33	162
PH	4,2	6,05	4	4,4
Conductivité MOHS/cm	900		80	33
SO ₄ ⁻⁻	156	19	15	4
Cl ⁻	178	9	1,45	3
NO ₂ ⁻	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
NO ₃ ⁻	24,2	3,7	14,3	<0,5
NH ₄ ⁺	11,9	2,16	3,6	0,45
Na ⁺	96	5,01	0,6	1,38
K ⁺	4,3	0,49	0,3	0,27
Ca ⁺⁺	45	4,4	2,7	0,64
Mg ²⁺	16,1	0,96	0,12	0,16
F ⁻	1,8	0,09	0,06	
Cu		0,02	0,01	
Mn		<0,05	<0,05	
Pb		0,03	0,04	
Zn		1,9	0,23	
Fe		0,34	0,1	
Cd		0,012	0,0014	
Ni		<0,01		
Hg		<0,001		
Al		0,11	0,1	
I		<0,01		
Cr ⁶⁺		<0,005	<0,005	

	SO ₄ ⁻⁻	NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺
Avril 1977	141,5	76,5	83,4
Juillet 1977	13,8	18,3	2,7
Novembre 1977	56,7	1,3	19
Janvier 1977	163	4,8	11,4

Composition chimique calculée des solutions pénétrant effectivement dans le sol

8. ESSAI DE REALISATION DE CARTES D'ISOTENEURS

Il s'agit ici d'établir une méthodologie pour faire apparaître les parts de chacune dans la minéralisation de l'eau et notamment de mettre en évidence le phénomène d'échanges de bases et de dénitrification en réalisant des cartes d'isoteneurs pour les éléments concernés (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , F^{2-} , NO_3^- , SO_4^- , Fe^{2+} , Mn^{2+} ...).

Il s'agissait aussi d'étudier l'importance de la piézométrie dans ces transformations en réalisant des cartes pour les années marquantes. Après une étude de la piézométrie de la région [29], nous avons choisi les années 1982 et 1988 pour représenter les hautes eaux et les années 1973 et 1990 pour les basses eaux.

Etant donné la fréquence des analyses et la précision (type C3 ou C4, annexe IX) dont nous avons besoin, nous nous sommes restreints aux captages d'adduction d'eau potable (A.E.P.) qui sont les plus surveillés.

Nous avons ensuite fait un choix géographique. Après la lecture de la bibliographie, deux régions apparaissent intéressantes à étudier pour leurs caractéristiques physiques et chimiques (chapitre 2 et 3). La première zone est la bande de passage en captivité qui s'étale de Guines à Lille en passant par St-Omer et Béthune, la seconde est le pourtour du Bassin d'Orchies et la région de Valenciennes.

Tout ceci étant fixé, nous nous sommes adressés au B.R.G.M. pour qu'il nous fournisse une liste des captages qui nous intéressaient grâce à un logiciel installé à l'antenne de Lezennes [8]. Nous avons donc sélectionné la nappe de la craie (FLA(ndres) 03,04 et ART(ois) 02,03 ,voir Annexe X) ainsi que les huitièmes de cartes B.R.G.M. recoupées par les zones choisies (doc.23).

Après ces sélections, le B.R.G.M. nous a fourni une liste de plus de 1600 captages avec en indications l'indice B.R.G.M., les coordonnées Lambert (X,Y,Z), le code aquifère, la commune, l'exploitant et le code d'utilisation (Annexe XI).

Il nous restait à rechercher les analyses de ces captages.

Etant donnée la masse importante de données dont nous avons besoin et le traitement statistique qu'il faudra lui appliquer, nous avons prospectés les fichiers informatiques existants.

Malheureusement, les logiciels ne sont pas conçus pour l'exploitation dans un but régional. De plus, l'absence de compatibilité entre les divers fichiers ne permet pas leur rassemblement dans une banque de données unique.

L'autre problème auquel nous nous sommes confrontés est la représentation cartographique par informatique. Nous ne disposons pas de logiciel permettant de créer un fond de carte sur lequel on puisse ajouter les teneurs chimiques.

Ne pouvant réaliser de collecte des données informatiques, nous avons commencé à rassembler des analyses manuelles pour des captages que nous avons sélectionnés. Ce travail nous a confirmé l'intérêt qu'il y a à mettre en place une banque de données bien organisée. Outre le fait que le stockage des analyses sur papier demande beaucoup de temps et de place, il nous est apparu que l'on est en train de perdre des informations sur la ressource en eau.