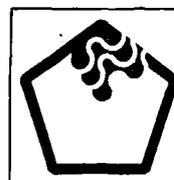


# SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE

DU  
NORD



AGENCE  
DE L'EAU  
ARTOIS  
-PICARDIE

## GÉOLOGIE ET AMÉNAGEMENT RÉGIONAL

### ANNALES

*Tome CIX (1989) 2<sup>e</sup> trimestre*

VOLUME PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS  
DE L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES LILLE FLANDRES-ARTOIS  
DE LA RÉGION NORD - PAS-DE-CALAIS  
DE L'AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE  
DU B.R.G.M.

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD  
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

Parution 1990

# SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

## Extraits des Statuts

### Article 2.

– Cette Société a pour objet de concourir à l'avancement de la géologie en général, et particulièrement de la géologie de la région du Nord de la France.

– La Société se réunit de droit une fois par mois, sauf pendant la période des vacances. Elle peut tenir des séances extraordinaires décidées par le Conseil d'Administration.

– La Société publie des Annales et des Mémoires. Ces publications sont mises en vente selon un tarif établi par le Conseil. Les Sociétaires bénéficient d'un tarif préférentiel (1).

### Article 5.

Le nombre des membres de la Société est illimité. Pour faire partie de la Société, il faut s'être fait présenter dans l'une de ses séances par deux membres de la Société qui auront signé la présentation, et avoir été proclamé membre au cours de la séance suivante.

## Extraits du Règlement Intérieur

§ 7. – Les Annales et leur supplément constituent le compte rendu des séances.

§ 13. – Seuls les membres ayant acquitté leurs cotisation et abonnement de l'année peuvent publier dans les Annales. L'ensemble des notes présentées au cours d'une même année, par un même auteur, ne peut dépasser le total de 10 pages, 1 planche simili étant comptée pour 2 p. 1/2 de texte.

Le Conseil peut, par décision spéciale, autoriser la publication de notes plus longues.

§ 17. – Les notes et mémoires originaux (texte et illustration) communiqués à la Société et destinés aux Annales doivent être remis au Secrétariat le jour même de leur présentation. A défaut de remise dans ce délai, ces communications prennent rang dans une publication postérieure.

§ 18. – Les mémoires sont publiés par fascicule après décision du Conseil.

## Avertissement

La Société Géologique du Nord ne peut en aucun cas être tenue pour responsable des actes ou des opinions de ses membres.

## Tirages à part

Conformément au paragraphe 14 du Règlement Intérieur (Tome LXXXI, p. 12), les tirages à part sont à la charge des auteurs qui doivent en faire par écrit la déclaration expresse en tête des épreuves du bon à tirer.

## Cotisations et Abonnements (à la date du 1<sup>er</sup>-1-1990)

	QUALITÉ	COTISATION	ABONNEMENT aux Annales	TOTAL
FRANCE et BÉNÉLUX	Personnes physiques (2) .....	35,00 F	150,00 F T.T.C.	185,00 F
	Personnes physiques .....	35,00 F	165,00 F T.T.C.	200,00 F
AUTRES PAYS	Personnes physiques .....	35,00 F	165,00 F T.T.C.	200,00 F

Abonnement des non-membres : FRANCE : 345,00 F H.T. – ÉTRANGER : 400,00 F

## ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

La vente des Annales s'effectue par tomes entiers aux prix suivants. Exceptionnellement, et jusqu'à épuisement du stock, certains fascicules sont en vente séparément. Leur liste figure en fin de fascicule.

Tomes I à LXXIX (manquent I, II, V à IX, XVI, XXII, XXXIV à XXXVI, XXXIX à XLIII, XLV, XLVII à LVIII) .....	200,00 F H.T.
Tomes LXXX à XCV (manque XCI) .....	270,00 F H.T.
Tomes XCVI à CV .....	330,00 F H.T.
Tome CVI .....	385,00 F H.T.

## TABLES GÉNÉRALES DES ANNALES

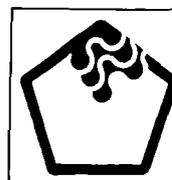
Table 1 (Tomes I à XX) - Table 2 (Tomes XX à XXX) - Table 3 (Tomes XXXI à XL) - Table 4 (Tomes XLJ à LXXIX)	50,00 F H.T.
Table 5 (Tomes LXXX à XCIX) .....	par table

Esquisse géologique du Nord de la France, par J. GOSSELET, Fascicule IV (Terrains quaternaires) .....	29,00 F H.T.
Ecorché géologique infra-mésozoïque (extrait de « Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France », présentée par C.F.P. (M), COPESEP et S.N.P.A.) .....	50,00 F H.T.

(1) Modification adoptée lors de l'Assemblée Générale du 10 janvier 1974.

(2) Les étudiants qui en font la demande annuelle peuvent, par décision du Conseil, bénéficier d

SOCIÉTÉ  
GÉOLOGIQUE  
DU  
NORD



AGENCE  
DE L'EAU  
ARTOIS  
-PICARDIE

GÉOLOGIE  
ET  
AMÉNAGEMENT RÉGIONAL

ANNALES

Tome CIX (1989) 2<sup>e</sup> trimestre

VOLUME PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS  
DE L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES LILLE FLANDRES-ARTOIS  
DE LA RÉGION NORD - PAS-DE-CALAIS  
DE L'AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE  
DU B.R.G.M.

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD  
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

Parution 1990

CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 1989 —

<i>Président</i> .....	M. F. THIÉBAULT
<i>Premier Vice-Président</i> .....	M. C. DUPUIS
<i>Seconds Vice-Présidents</i> .....	M. G. TIEGHEM
	M. F. AMEDRO
<i>Conseillers</i> .....	M. B. MISTIAEN
	M. A. BLIECK
	M. J. CHALARD
	M. M. WATERLOT
	M. J. FERRIÈRE
	M. F. MEILLIEZ
<i>Secrétaire</i> .....	M. F. GUILLOT
<i>Trésorier</i> .....	M. J.M. DÉGARDIN
<i>Secrétaire Adjoint</i> .....	M. O. GOFFETTE
<i>Délégué aux Publications</i> .....	M <sup>me</sup> Paule CORSIN
<i>Bibliothécaire</i> .....	M. J.F. DECONINCK

---

Le Comité d'organisation scientifique était composé de :

MM. D. BERNARD  
P. CELET  
H. CHAMLEY  
M<sup>me</sup> P. CORSIN  
MM. P. DHEM  
H. MAILLOT  
J. RICOUR  
F. THIÉBAULT

Se sont joints à eux dans la Commission de Lecture :

MM. J.Y. CAOUS, M. CAUDRON, P. CAULIER, J.M. CHARLET, N. CRAMPON,  
Y. DESPEYROUX, CH. DUPUIS, P. CH. LÉVÊQUE, J. MANIA, J.C. PINTE,  
J. SOMMÉ, J. TERRY et F. VAN LAETHEM.

## Vulnérabilité de la nappe de la craie dans le Nord de la France

### Groundwater vulnerability in the chalk aquifer of Northern France

par P. CELET (\*), D. BERNARD (\*\*), J. FIEVET (\*\*\*) et H. MAILLOT (\*\*\*\*)

*Résumé.* — L'aquifère crayeux du Nord de la France constitue la principale ressource en eau de cette région. Après avoir rappelé les principaux aspects hydrogéologiques concernant la localisation et la productivité des différents réservoirs, les problèmes de qualité et de vulnérabilité des eaux sont ici examinés. Des exemples de protection naturelle de la nappe dans le bassin minier soulignent l'intérêt du choix des sites d'implantation des nouveaux captages. Certaines mesures de prévention contre la pollution devant conduire à une restructuration de la distribution ou au traitement des eaux sont évoquées.

*Abstract.* — The chalk aquifer of northern France constitutes the main water supply in the area. After recalling the major hydrogeologic features concerning the location and productivity of the diverse reservoirs the questions of water quality and vulnerability are examined. Some examples of natural ground water protection in the mine basin emphasize the importance of the choice of the new water catchment sites. Some preventive measures against pollution that result in a service restructuration or a water treatment are also considered.

L'aquifère de la craie du Nord de la France est très sollicité et représente la principale ressource en eau potable de la région. De nombreuses études ont été réalisées ces dernières décennies et ont permis de mieux contrôler la gestion et la protection de cet aquifère.

Cet article se propose d'envisager succinctement :

- 1) la complexité des structures géologiques régionales dans lesquelles se rencontrent des craies productives ;
- 2) la localisation de l'aquifère du Sénonien et du Turolien supérieur, sa vulnérabilité ;
- 3) les moyens actuels de mesures et de contrôle de la qualité de l'eau de cet aquifère ;
- 4) quelques exemples : bien protégés naturellement, mal protégés naturellement, en position intermédiaire.

En conclusion, est proposée une amorce de stratégie qui s'appuie à la fois sur la prévention des pollutions, les traitements ou les restructurations et l'occupation foncière des zones favorables.

#### I. — NATURE GÉOLOGIQUE DES AQUIFÈRES CRAYEUX

La craie est une roche fortement carbonatée, épaisse et qui occupe une grande étendue de notre région (fig. 1). Sa composition lithologique est susceptible de se modifier, essentiellement suivant la composition en minéraux argileux.

Les nombreux travaux de Gosselet, G. Waterlot et plus récemment de Robazynski, décrivent ces faciès.

Lorsque couches plus carbonatées et plus marneuses alternent, il existe plusieurs horizons aquifères. On peut distin-

(\*) Laboratoire de géologie dynamique, U.F.R. des Sciences de la Terre USTLFA, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

(\*\*) Agence de l'Eau Artois Picardie, 764, boulevard Lahure, 59500 Douai.

(\*\*\*) Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt, Cité Administrative, 59048 Lille Cedex.

(\*\*\*\*) Cycle urbain et pollution des eaux, E.U.D.I.L., USTLFA, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

guer ceux de la craie du Sénonien-Turonien supérieur, parfois ceux du Turonien moyen (intercalation crayeuse) ou du Cénomanién (1).

Outre les changements verticaux de faciès, les changements pétrologiques latéraux s'observent peu dans la craie du Sénonien et du Turonien supérieur, excepté l'abondance de silex. Au contraire, les assises du Turonien moyen et du Turonien inférieur sont susceptibles de nombreux changements de faciès comme en témoigne la craie noduleuse du Turonien inférieur du Boulonnais qui passe à des marnes crayeuses et des marnes Dièves vers le Sud-Est (Avesnois).

De même, la craie cénonamiénienne peut être plus ou moins marneuse (1) et peut renfermer des bancs calcaires aquifères (Ternois).

## II. — LE RÉSEAU AQUIFÈRE DE LA CRAIE DU SÉNONIEN ET TURONIEN SUPÉRIEUR

### 1) Localisation

« Quand on examine une carte géologique du Nord de la France, on s'aperçoit que le pays se trouve divisé en secteurs de très inégale richesse en eau souterraine. Tout à fait vers

le Nord, c'est la Flandre maritime, pays de dunes et de sables récents. En arrière, vient la Flandre continentale, au sous-sol argileux et sableux, dans la partie supérieure, mais constitué parfois de calcaire très dur et fissuré, dit "calcaire carbonifère" dans la partie profonde ».

« Ce même calcaire dur sera retrouvé dans certaines zones de l'Avesnois.

Dans le Mélantois, l'Ostrevent, le Cambrésis, la Gohelle, la Plaine d'Arras, la région de Béthune à Aire-sur-la-Lys, en Picardie, c'est-à-dire dans les environs de Lille, Douai, Valenciennes, Cambrai, Lens, Arras et Amiens, c'est la craie qui compose le sous-sol et qui renferme les ressources aquifères les plus abondantes et les plus utilisées du pays » (G. Waterlot).

### 2) Productivité

Ce même auteur (2) faisait remarquer que « la nappe de la craie n'est pas une véritable nappe, s'écoulant grâce à la porosité de la roche, mais plutôt un réseau aquifère qui peut être irrégulier ».

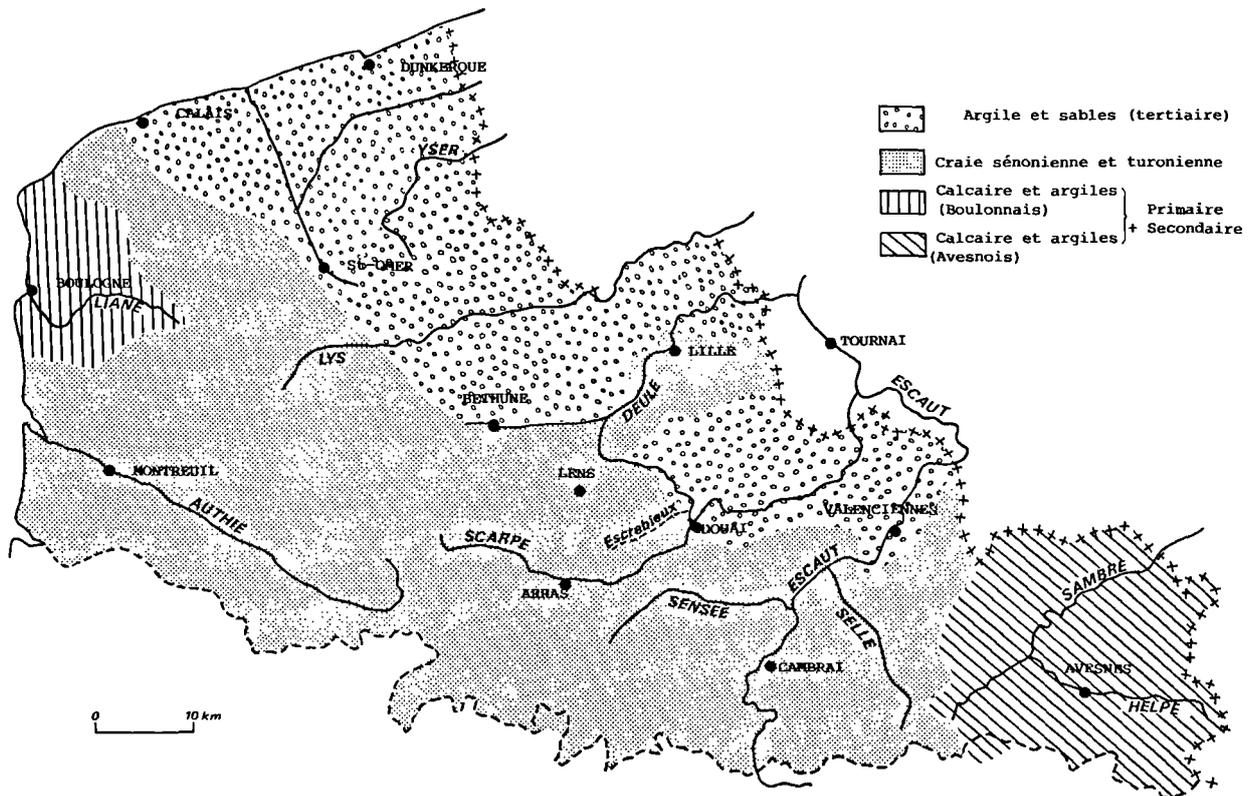


Fig. 1. — Ecorché géologique simplifié. Carte des principaux faciès.

Fig. 1. — Sketch map of the main geological facies.

Il soulignait encore que les zones les plus aquifères de la craie sont de deux types :

— Zone fendillée “des marnettes” qui correspond à une zone d’altération superficielle productive lorsqu’elle se situe sous le niveau statique de la nappe.

Lorsque les couches crayeuses descendent en profondeur sous l’Argile de Louvil qui maintient la nappe à l’état captif, les quantités d’eau obtenues peuvent être très importantes.

Dès 1927, L. Dollé (3) faisait remarquer que cette captivité ne devrait généralement pas dépasser 2 km à l’aval du début de recouvrement tertiaire.

— Zone de la “craie congloméroïde” (4) c’est-à-dire d’une craie disposée en blocs, nettement séparés les uns des autres par suite d’une forte fissuration de la roche largement agrandie par dissolution. Cette craie s’observe essentiellement sous les vallons même secs et les vallées.

Au total, dès le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, l’importante expérience acquise au moyen d’investigation de terrain, d’essais le plus souvent empiriques conduisaient nos prédécesseurs à conclure : « que le problème de l’eau est moins celui de la recherche des zones aquifères, dont la position est à peu près complètement déterminée, qu’un problème d’organisation dans l’exploitation des ressources ».

Si ces conclusions s’appliquaient à petite échelle, la multiplication des essais de débit, la réalisation quasi systématique des diagraphies par micromoulinet, la prospection géophysique appliquée à l’hydrogéologie régionale ont largement contribué au cours de ces dernières décennies à améliorer régionalement la connaissance précise des horizons aquifères de la nappe et à permettre la réalisation de cartes de transmissivité (5, 6, 7).

Il faut cependant remarquer que les connaissances nouvelles acquises ont davantage intéressé la qualité que la quantité de l’eau de la nappe de la craie (8, 9).

### III. — QUALITÉ DE L’EAU DE LA NAPPE, MESURES

Envisagée dès la création de la plupart des captages d’eau, la qualité de l’eau pompée dans la nappe préoccupe de plus en plus les responsables. La dégradation de cette qualité — mesurée pour l’essentiel à travers l’évolution des concentrations en nitrates — faisait apparaître fin 1985 que sur les 1 300 forages d’alimentation en eau potable que compte le Bassin Artois Picardie, 12 % environ présentent une teneur supérieure à 50 mg/l (10).

Schématiquement, on peut distinguer parmi les secteurs particulièrement touchés :

- les régions minières et lilloise, urbaines et industrielles ;
- l’Arrageois et le Cambrésis, ruraux et agricoles.

Le décret 61.859 du 1<sup>er</sup> août 1961 déclarait que « toute eau livrée à la consommation humaine doit être potable. Elle

remplit cette condition lorsqu’elle n’est pas susceptible de porter atteinte à la santé de ceux qui la consomment ».

Le récent décret (89.03) du Ministère de la Solidarité, de la Santé et de la Protection Sociale (Journal Officiel du 4 janvier 1989) reprenant les normes de potabilité fixées par la C.E.E. établit deux familles de limites. Sont résumées ci-dessous un certain nombre de ces concentrations.

	Limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine	Limite de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d’eau destinée à la consommation humaine
Chlorures	250 mg/l	250 mg/l
Sulfates	250 mg/l	250 mg/l
Potassium	12 mg/l	
Nitrates	50 mg/l	100 mg/l
Nitrites	0,1 mg/l	
Ammonium	0,5 mg/l	4 mg/l
Fer	200 µg/l	
Manganèse	50 µg/l	
Cuivre	1 mg/l	
Zinc	5 mg/l	5 mg/l
Phosphore	5 mg/l	
Fluor	1,5 mg/l	
Argent	10 µg/l	
Arsenic	50 µg/l	100 µg/l
Cadmium	5 µg/l	5 µg/l
Cyanures	50 µg/l	50 µg/l
Chrome total	50 µg/l	50 µg/l
Mercuré	1 µg/l	1 µg/l
Nickel	50 µg/l	
Plomb	50 µg/l	50 µg/l
Antimoine	10 µg/l	
Sélénium	10 µg/l	10 µg/l

On constatera que lorsque l’exploitation le permet (maillage des réseaux et mélange), traitement, la concentration exprimée pour les nitrates est de 100 mg/l sur l’eau brute, mais que l’eau distribuée doit présenter une Concentration Maximale Admissible (C.M.A.) de 50 mg/l.

#### Vulnérabilité de la nappe

Une eau est polluée lorsque, sous l’effet de l’activité humaine, elle ne répond plus aux normes de potabilité résumées plus haut.

Le nombre des polluants est très important. D’après Castany (11), la Société américaine de chimie en dénombrait 4 millions, dont 70 000 suspects d’action cancérigène en 1977.

CARTE DES FLUX AZOTES ET DE L'OCCUPATION DU SOL

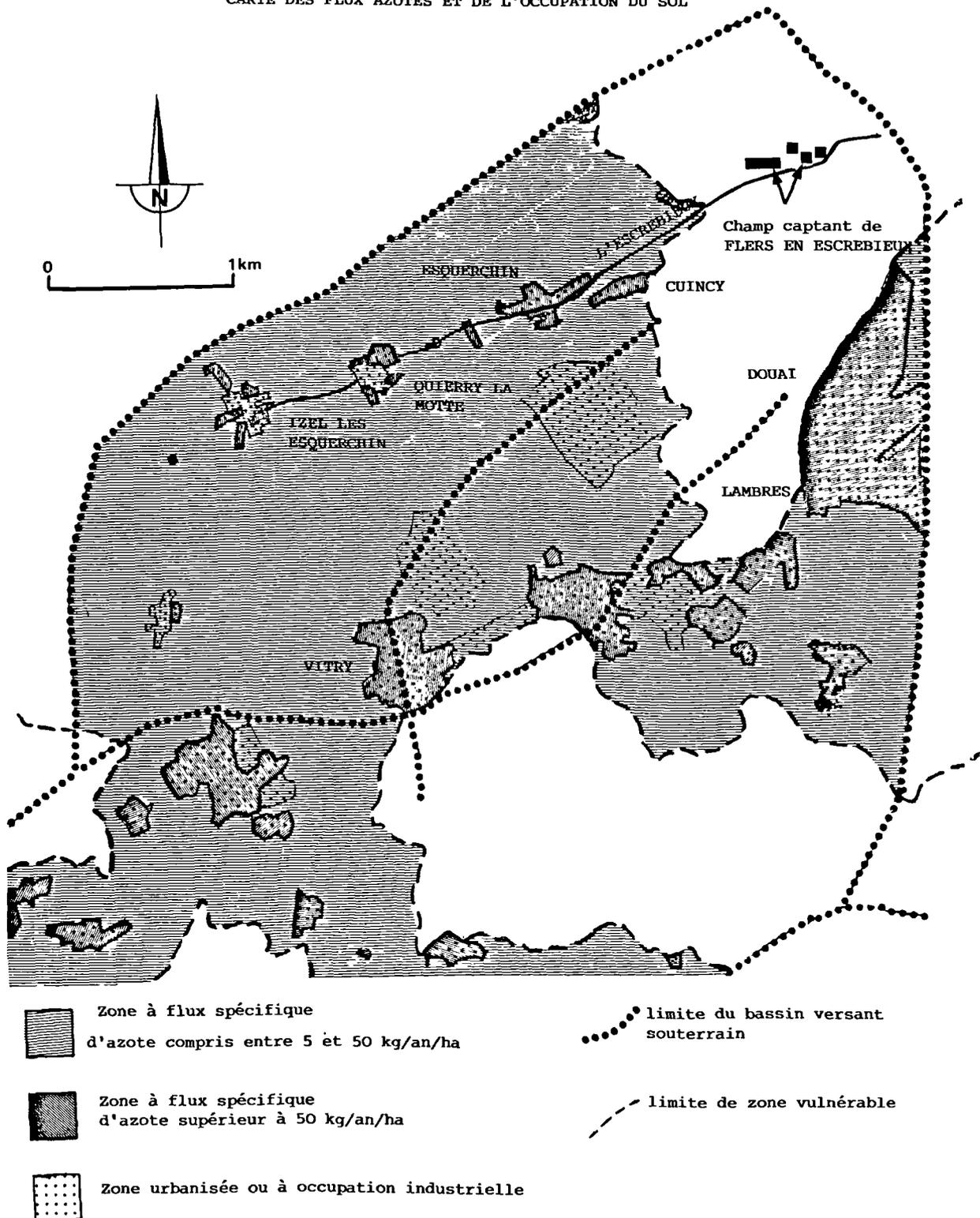


Fig. 2. — Risques majeurs de pollution. Champ captant de Flers-en-Escrebieux.

Fig. 2. — Major pollution risks. The Flers-en-Escrebieux groundwater capture zone.

Les principales sources de pollution sont occasionnées par les rejets des activités domestiques ou urbaines, agricoles et industrielles.

Les facteurs de la vulnérabilité d'un aquifère (6) sont fonction :

- de l'état et des caractéristiques physiques et chimiques du sol et du sous-sol : le principal facteur est la lithologie ;
- de la profondeur de la surface piézométrique, laquelle impose le temps de séjour en zone non saturée ;
- des paramètres de l'écoulement de l'eau souterraine : coefficient de perméabilité ou transmissivité, direction et vitesse de déplacement (à défaut vitesse effective) ;
- des conditions d'alimentation et d'écoulement, facteurs du renouvellement de la réserve totale moyenne.

La vulnérabilité peut s'exprimer par des cartes. Pour la région Nord - Pas-de-Calais, publié à l'échelle du 1/250 000<sup>e</sup> (12), un document coloré permet à ses auteurs de distinguer pour la nappe de la craie six niveaux de vulnérabilité fonction de la nature et de l'épaisseur du recouvrement. Ces niveaux colorés s'échelonnent pour la nappe de la craie de l'orangé (vulnérabilité importante) au vert (vulnérabilité faible). Les auteurs insistent sur l'importance de la fracturation, surtout ouverte, qui peut jouer le rôle de drains et être le siège de vitesse de circulation importante alors que la microporosité favorise au contraire une rétention des fluides et freinent les écoulements.

#### IV. — EXEMPLES

Seront successivement envisagés ci-dessous des exemples d'aquifères crayeux bien protégés naturellement, d'autres vulnérables à la fois situés en zone agricole ou fortement urbanisée et industrialisée, enfin un aquifère en position intermédiaire. Seul sera détaillé ce dernier exemple, les autres cas font l'objet de communications de certains d'entre nous (13) ou d'autres auteurs (cf. actes du Colloque). Seuls seront soulignés les points essentiels de ces autres exemples.

##### 1) Exemple d'aquifère bien protégé naturellement des pollutions de surface

Déjà signalée dans la première moitié du siècle (3) lorsque la craie est à la fois fortement fissurée et recouverte par des argiles, elle peut constituer un aquifère bien protégé naturellement et généralement productif.

En outre, lorsque le milieu est suffisamment réducteur, l'activité biologique favorise les transformations chimiques et permet une dénitrification naturelle (14).

La lisière de passage en captivité qui s'étend de Guines (à l'WNW du Nord - Pas-de-Calais) à Bruay-sur-Escaut (à l'ESE) est donc une zone *a priori* favorable à l'implantation d'importants champs captants. Y sont déjà réalisés nombre d'entre eux parmi lesquels on peut citer celui de Guines pour l'alimentation de Calais, celui de Houle et Moule pour

celle de l'Agglomération dunkerquoise. Des essais récents effectués à l'Ouest de Lille (13, 15) se sont révélés particulièrement intéressants.

##### 2) Exemples d'aquifères mal protégés naturellement des pollutions de surface

###### a) *Situé en zone à vocation essentiellement agricole : exemple du Cambrésis*

Dans un travail exhaustif, réalisé sur l'ensemble de cet arrondissement (16, 17, 18), C. Préaux démontre l'importance et la complexité des arrivées à la nappe des nitrates d'origine agricole (14). Dans cet arrondissement où les pollutions nitratées ont essentiellement pour causes les épandages agricoles et les rejets urbains, cet auteur insiste sur l'importance des temps de transit à la verticale des terres agricoles régies par "l'effet piston". Par analogie avec les résultats de modèles réalisés pour un bassin versant de Seine-et-Marne, et si aucune action n'est entreprise, il prévoit une aggravation nette des concentrations rencontrées dans l'eau de la craie au cours de ces prochaines décennies.

###### b) *Situé en zone à vocation essentiellement urbaine et industrielle : exemple du bassin minier*

Un bilan déjà très pessimiste effectué dès 1976 par l'un d'entre nous (8) conduisait à préconiser une restructuration de la ressource en eau d'une partie du bassin minier après une meilleure acquisition des données sur les types polluants (enquêtes de terrain et analyse isotopique des éléments dissous dans l'eau).

Réalisée depuis au cours d'une étude approfondie, les conclusions de cette étude de synthèse (19) doivent prochainement aboutir à la fois à une restructuration éclatée de la ressource pour les secteurs où la nappe est la plus polluée, à une épuration plus complète des rejets (eaux usées et effluent industriel), à la mise en place de procédé de traitement des eaux (cycle de l'azote, sulfates et micropolluants).

##### 3) Exemple d'aquifère dont l'amont est mal protégé des pollutions de surface, mais dont le champ captant bénéficie d'une bonne protection naturelle

Le champ captant de la Société des Eaux du Nord (S.E.N.) et de la Société des Eaux de Douai (S.E.D.) implanté à Flers-en-Escrebieux illustre bien un tel cas de figure. Implanté suite aux conseils du Professeur G. Waterlot, les neuf captages qui constituent le champ captant bénéficient à leur périphérie d'une protection naturelle formée à la fois de formations tertiaires et alluvionnaires (13).

Les importantes études réalisées pour le compte du Syndicat Intercommunal d'Assainissement de Douai Ouest (S.I.A.D.O.) et de la S.E.N. (20) et (21) démontrent que les écoulements de la nappe s'effectuent selon deux orientations préférentielles :

— du Sud-Ouest vers le Nord-Est, principalement sous l'axe de la vallée de l'Escrebieux qui joue le rôle de drain ;

— du Sud vers le Nord, sous des formations crayeuses en grande partie recouvertes de sables et argiles tertiaires.

Une analyse fine de la répartition des flux spécifiques polluants permet d'établir une zonation. Dans le sous-bassin versant Sud-Ouest, c'est-à-dire le plus vulnérable, 2/3 des pollutions potentielles en nitrates résulteraient d'après cette étude (21) des activités agricoles alors qu'1/3 serait la conséquence des rejets d'effluents urbains sous les localités d'Izel-lès-Esquerchin, Quiéry-la-Motte et Esquerchin. La carte des risques majeurs de pollution (21) fait ressortir l'importance du rôle de drain de l'Escrebieux. Une illustration récente de la vulnérabilité de cette partie d'aquifère, en particulier de celle localisée entre Izel et Lauwin-Planque, encore accentuée par la récente remontée de la nappe pendant l'hiver 1987-88 résulte de l'analyse de la carte des risques majeurs de pollution.

Au total, la figure 3 montre le quasi-synchronisme (décalage d'une quarantaine de jours) entre la remontée de la nappe mesurée au forage amont du champ captant de Flers-en-Escrebieux et l'élévation de la concentration en nitrates.

Celle-ci peut être attribuée à deux phénomènes distincts :

- lessivage de la zone non saturée de la craie ;
- ruissellement provenant des terres agricoles après épandage automnal d'engrais.

## CONCLUSION

La forte vulnérabilité de la nappe de la craie dans de nombreux secteurs de la région Nord - Pas-de-Calais (Sénonien et Turonien supérieur) occasionne une dégradation progressive de la qualité de l'eau pompée. Cette évolution préoccupante conduit à la mise en place d'une stratégie d'ensemble s'orientant vers la PRÉVENTION, la RESTRUCTURATION et le TRAITEMENT.

### 1) Prévention

Nécessitant une meilleure maîtrise préventive des pollutions avant leur rejet ou leur épandage dans le milieu naturel, on peut insister succinctement sur :

- le choix de l'épuration (type, niveau) et du lieu de rejet des eaux usées ou pluviales après traitement (22, 23) ;
- la nécessité d'un traitement spécifique des effluents industriels adapté à chaque type d'industrie (éléments toxiques, métaux lourds, solvants chlorés...) malgré les fortes contraintes socio-économiques ;
- l'utilité des analyses agronomiques, l'information des agriculteurs devant permettre à terme une stabilisation des pollutions diffuses et une adaptation des cultures, mais aussi des modes d'épandages, à la préservation de la qualité de la nappe.

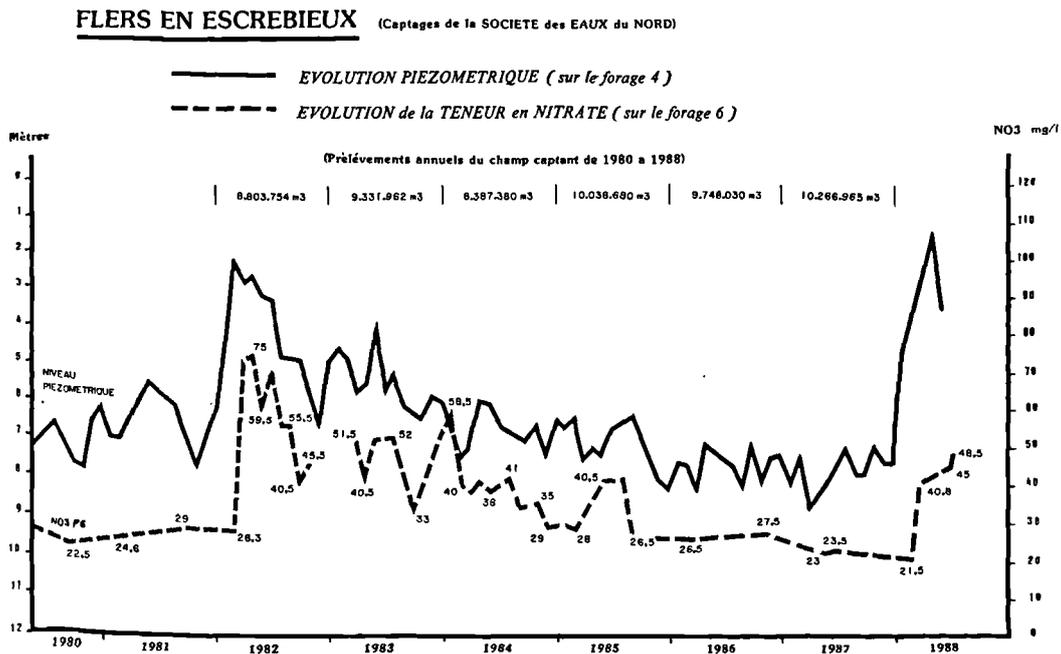


Fig. 3. — Evolution de la piézométrie et des concentrations en nitrates de l'eau de la nappe de la craie.

Fig. 3. — Evolution of the piezometry and nitrates concentrations in the water of the chalk aquifer.

Au total, cette prévention doit, outre les quelques mesures énoncées ci-dessus, permettre l'inscription dans les documents d'urbanismes (P.O.S., Cartes communales, P.I.G....) de recommandations et contraintes participant à une stabilisation de la pollution.

## 2) Restructuration et occupation foncière

Certains secteurs particulièrement pollués (Bassin minier par exemple) doivent conduire à un abandon à court terme de l'alimentation en eau des habitants à partir des ouvrages pollués et à une restructuration de la distribution. L'action est en cours.

De plus, les secteurs localisés en liseré de captivité et suffisamment productifs devraient être systématiquement

occupés. La dénitrification naturelle qui s'y opère est en effet particulièrement favorable à l'obtention d'une eau de bonne qualité, si d'autres types de polluants ne viennent pas contaminer la nappe à l'amont de la limite de captivité (24, 13).

## 3) Traitements

Enfin, dans les secteurs où la pollution est exclusivement nitratée, des unités de traitement — adaptées à la fois techniquement et financièrement à la structure de prélèvement — devront vraisemblablement être installées.

Ainsi, c'est à la fois la mise en place de mesures préventives et lorsqu'elles ne sont plus suffisantes de restructuration et de traitement qui permettront d'améliorer la qualité de l'eau distribuée.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1) CAULIER P. (1974). — Etude des faciès de la craie et leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Sciences et Techniques de Lille, 156 p.
- 2) WATERLOT G. (1957). — Les ressources hydrogéologiques du Nord de la France. *Le monde industriel*, 83<sup>e</sup> année, vol. 532, p. 5-27.
- 3) DOLLE P. (1927). — Hydrogéologie de la craie. *C. R. Acad. Sciences*, t. 184, p. 973-974.
- 4) GOSSELET J. (1904, 1905, 1911, 1913, 1922). — Les assises crétaciques et tertiaires du Nord de la France. *Mémoires SGN*, fascicules I, II, III, IV, V et VI. Carte à 1/25 000<sup>e</sup> de la vulnérabilité de la nappe de la craie.
- 5) MANIA J. (1978). — Gestion des systèmes aquifères. Application au Nord de la France. *Mém. XV, Soc. géol. Nord*.
- 6) DEGALLIER G. et MANIA J. (1978). — Analyse quantitative des variations de la surface piézométrique en pays crayeux. Colloq. hydrogéologie de la craie du bassin de Paris, Rouen. *Doc. BRGM*, p. 171-185, 5 fig., 3 tab.
- 7) BRAILLON J.-M. (1976). — Contribution à l'étude des caractères hydrogéologiques des régions minières et lilloise (Nord - P.-de-C.) en vue de leur synthèse cartographique. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Sciences et Techniques de Lille, 86 p., 9 fig., 30 pl.
- 8) BERNARD D. (1979). — Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Etat et acquisition du chimisme de l'eau. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Sciences et Techniques de Lille, 179 p., 99 fig., 12 ann.
- 9) TILLIE B. (1980). — Nappe de la craie du bassin minier du Nord - Pas-de-Calais (zone médiane et occidentale). Acquisition et traitement des données, modélisation des écoulements souterrains. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Sciences et Techniques de Lille, 130 p., 55 fig., 6 tabl., 14 ann.
- 10) CREMILLE L. (1985). — Etude sur l'origine des nitrates et les mesures curatives à prendre sur les bassins hydrogéologiques alimentant quelques champs captants du Nord de la France. Actes du congrès "Nitrates dans les Eaux", Paris.
- 11) CASTANY G. (1982). — Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edit. Dunod, Univ. Paris, 238 p.
- 12) BECKELYNCK J., KLESZCZ J.-P., CAULIER P. et TALBOT A. (1980). — Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la région Nord - Pas-de-Calais. Echelle 1/250 000<sup>e</sup>. Publication du BRGM.
- 13) BERNARD D. et CAULIER P. (1989). — Exploitation d'eau souterraine potable dans la nappe de la craie en position captive dans le Nord - Pas-de-Calais. *Ann. Soc. géol. Nord* (ce fascicule).
- 14) SIMON B. (1986). — Apport de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Paris VI, vol. ronéot., 148 p.
- 15) GUERIN B., CAOUS J.-Y. (1989). — Expérience de dénitrification par bassin d'infiltration près du champ captant de la communauté urbaine de Lille à Emmerin (Nord). *Ann. Soc. géol. Nord* (ce fascicule).
- 16) PREAUX C. (1986). — Arrondissement de Cambrai, Atlas des Eaux souterraines. BRGM 86 SGN 435 NPC, 19 p., publication du Conseil général du Nord.
- 17) PREAUX C. (1986). — Arrondissement de Cambrai. Dossier communal. BRGM 86 SGN 435 NPC.
- 18) PREAUX C. (1986). — Arrondissement de Cambrai. Rapport technique. BRGM 86 SGN 435 NPC, 156 p.

- 19) OLLAGNON B. (1988). — Alimentation en eau potable du Bassin minier du Pas-de-Calais. Situation et Perspective. Étude Confidentielle CGE, AEAP, vol. ronéot., 89 p., 24 annexes.
- 20) BRGM (1982). — S.I.A.D.O. Projet de recalibrage du cours de l'Escrebieux, analyse du contexte hydrogéologique et hydrochimique par J. BECKELYNCK. Rapport 82 SGN 908 NPC, vol. ronéot., 47 p., 17 fig., 8 tab., 12 annexes.
- 21) BRGM et SAFEGE (1984). — S.E.N. Champs captants d'Esquerchin et Flers-en-Escrebieux. Propositions d'amélioration de la qualité de l'eau. Mesures à entreprendre, rapport de deuxième phase. Rapport 84 SGN 266 NPC et 75.10.94, vol. ronéot., 42 p., 5 planches, 9 tab., 2 annexes.
- 22) MAILLOT H. (1989). — Assainissement, épuration et ressources en eau potable. Apport des recherches de géophysique appliquées dans la région Nord - Pas-de-Calais. *Ann. Soc. géol. Nord* (ce fascicule).
- 23) JOURNEZ M. et MAILLOT H. (1989). — Protection des nappes, évacuation des eaux pluviales d'une nouvelle zone urbaine par infiltration : y a-t-il systématiquement antagonisme ? *Ann. Soc. géol. Nord* (ce fascicule).
- 24) CAULIER P., MAILLOT H. et PREAUX C. (1989). — Application de la photogéologie et de la géophysique à la recherche de ressource en eau dans la craie à la limite Avesnois-Cambrésis. *Ann. Soc. géol. Nord* (ce fascicule).

## Expérience de dénitrification par bassin d'infiltration près du champ captant de la Communauté Urbaine de Lille à Emmerin (Nord)

### An experiment in denitrification through a percolation basin near the Lille urban well-field at Emmerin

par B. GUERIN (\*) et J.Y. CAOUS (\*\*)

**Résumé.** — Comme dans beaucoup d'autres secteurs déjà, la nappe libre de la craie présente, au Sud de l'agglomération lilloise, des teneurs en nitrates voisines de 100 mg/l, nettement supérieures à la norme de potabilité des eaux destinées à la consommation humaine fixée à 50 mg/l.

Dans le but de mettre en œuvre tous les moyens susceptibles de contribuer à réhabiliter le champ captant d'Emmerin, fermé pour cette raison depuis plusieurs années, une expérience de dénitrification par bassin d'infiltration y a été tentée en 1987.

Basée sur la réduction des nitrates, en milieu anoxique, par l'activité de la flore bactérienne naturelle exaltée par un apport de matière organique fermentescible, cette expérience a nécessité la création d'un bassin de 1800 m<sup>2</sup>, alimenté automatiquement en eau de nappe et suivi par l'intermédiaire d'un dispositif de contrôle (piézomètres, bougies poreuses...).

Malgré diverses difficultés mineures de mise au point, l'expérimentation, qui a duré trois mois, a abouti à des résultats très concluants quant à l'efficacité de la dénitrification puisque la quasi-totalité des nitrates de l'eau infiltrée avait disparu à l'aplomb du bassin.

**Abstract.** — *The unconfined chalk aquifer of the Lille conurbation, like many others at the present time, shows nitrate contents of about 100 mg/l, well above the standard 50 mg/l limit for potability of water for human consumption.*

*In an attempt to contribute by any means possible to the rehabilitation of the Emmerin well-field, which has been closed for several years because this pollution, an experiment in denitrification through a percolation basin was made in 1987.*

*The experiment was based on the reduction of nitrates in an anoxic environment, taking advantage of the activity of the natural bacterial flora, enhanced by the addition of fermentible organic material. This necessitated the construction of a 1800 m<sup>2</sup> basin, automatically fed with water from the aquifer and monitored by means of observation wells, porous candles, etc.*

*After overcoming a few minor teething problems, the experiment, which lasted three months, gave very positive results, with the disappearance of virtually all nitrate from the water below the basin.*

#### I. — INTRODUCTION

Comme chacun le sait, les nappes d'eau souterraines libres sont très vulnérables à la pollution en général et à la pollution nitratée en particulier. C'est ainsi que la nappe de la craie, au Sud de l'agglomération lilloise, n'a pas été épargnée puisque les teneurs en nitrates y dépassent actuellement les 100 mg/l ce qui a nécessité, il y a déjà plusieurs années, l'arrêt des dix forages du champ captant d'Emmerin, exploité par la communauté urbaine.

D'importantes études réalisées en 1983 et 1984 par le groupement BRGM-BURGEAP ont montré que l'origine de cette contamination était à la fois urbaine (60 %) et agricole (40 %).

Elles concluaient entre autres à la possibilité de réhabiliter le champ captant à partir d'un certain nombre d'actions à entreprendre à la fois sur l'ensemble du bassin versant souterrain et sur les zones de captages proprement dites ; il était notamment proposé de mettre en œuvre, à titre expérimental, un processus de dénitrification "in situ" par bassin d'infil-

(\*) BURGEAP, 70, rue Mademoiselle, 75015 Paris.

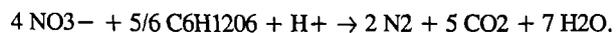
(\*\*) BRGM, Service Géologique Régional Nord - Pas-de-Calais, Fort de Lezennes, Lezennes 59260 Hellemmes-Lille.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

tration contrôlée permettant de traiter directement l'eau de la nappe de façon relativement simple et économique.

## II. — LE PROCÉDÉ

Le principe du procédé mis au point par le BURGEAP repose sur la *réduction des nitrates en milieu anoxique*, par l'activité métabolique de la flore microbienne naturelle (dont les bactéries dénitrifiantes), en présence de carbone organique soluble (réaction hétérotrophe), selon une réaction du type :



Ce procédé consiste donc d'abord à envoyer un bassin dont le fond comporte une couche filtrante non saturée constituée d'un matériau perméable capable de fixer une microflore épuratrice convenable, avec un volume contrôlé d'eau nitratée à laquelle on ajoute de la matière organique soluble qui exalte l'activité métabolique de la microflore.

Ensuite, on laisse le bassin reposer tandis que l'eau injectée s'infiltré progressivement vers la nappe, puis une fois vide, on le laisse en chômage afin de provoquer une aération du matériau filtrant qui permette à certaines bactéries spécifiques de se développer et d'assurer, d'une part une épuration du carbone résiduel, d'autre part une nitrification des

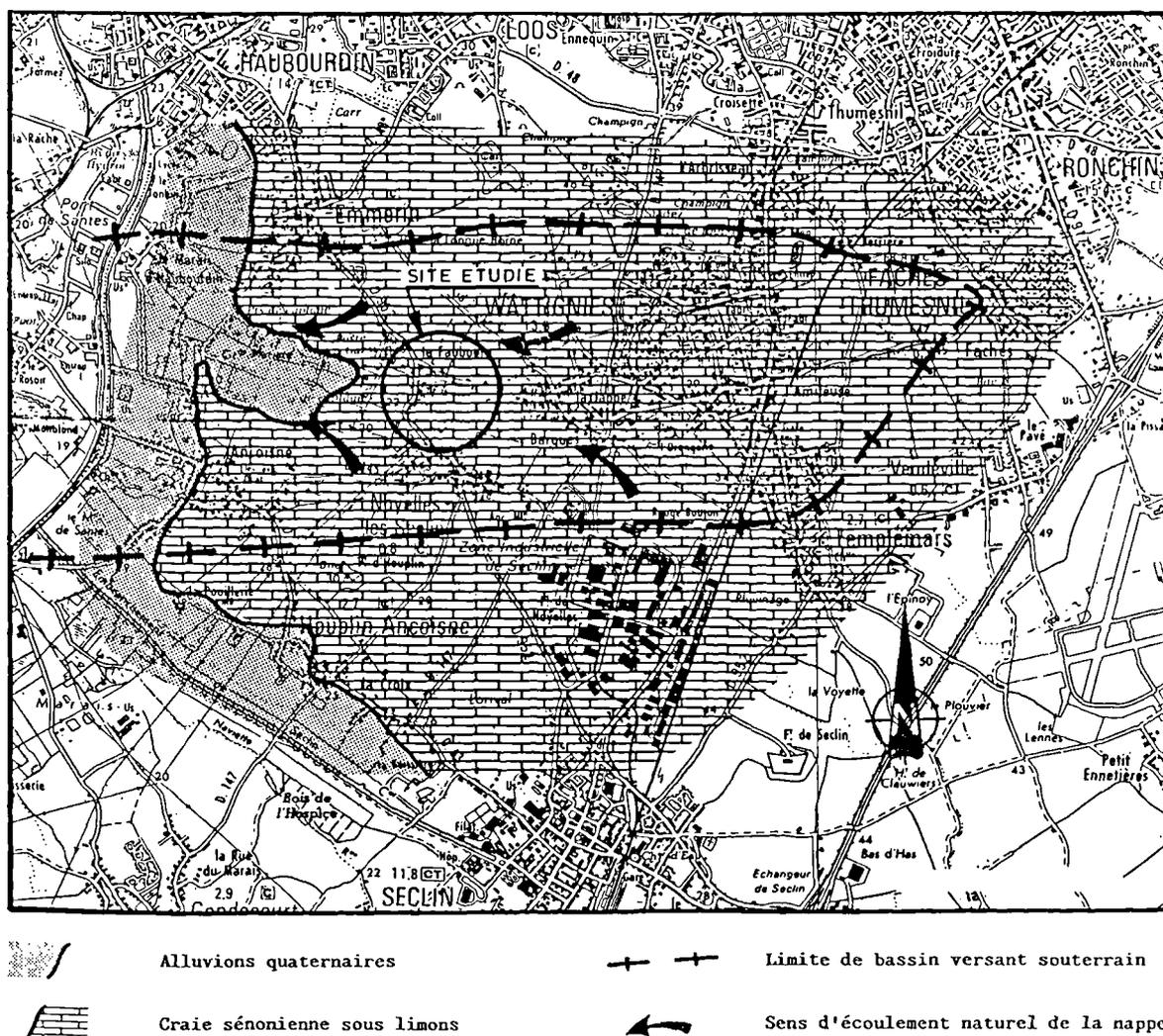


Fig. 1. — Plan de situation générale.

composés azotés les moins oxydés que peut apporter la matière organique soluble (NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>...).

Un nouveau cycle peut à nouveau être lancé et ainsi de suite. La traversée des terrains naturels situés entre le fond du bassin et la nappe permet de parfaire la filtration et l'épuration de l'eau infiltrée.

Au bout de plusieurs cycles, un décolmatage de la couche filtrante par simple ratissage doit normalement être pratiqué.

### III. — LE CHAMP CAPTANT

L'aquifère crayeux, recouvert par quelques mètres de limons, s'ennove progressivement vers l'ouest, sous les alluvions de la Deûle. Il contient une nappe libre peu profonde qui s'écoule globalement dans la même direction (fig. 1).

Le champ captant comporte une dizaine de forages alignés perpendiculairement aux courbes izopièzes.

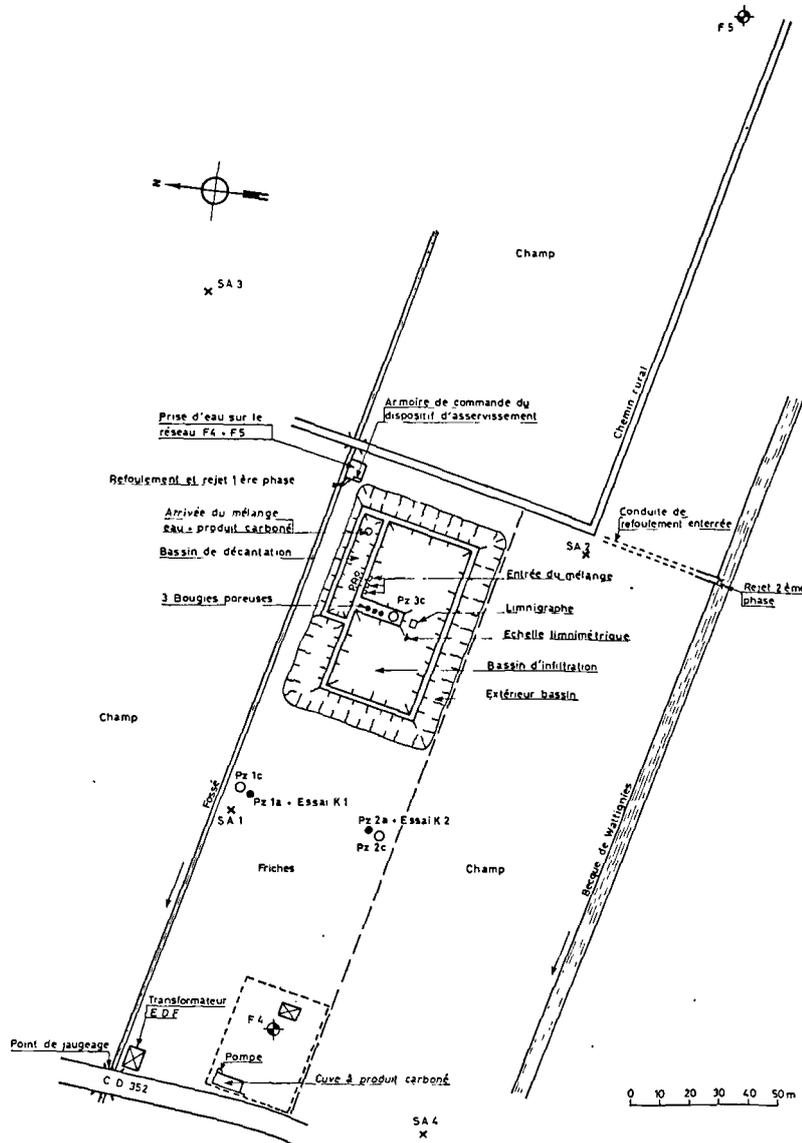


Fig. 2. — Plan de situation.

Au cours de l'expérience, seuls les forages F4 et F5 ont fonctionné afin, d'une part de fournir l'eau nitratée nécessaire pour alimenter le bassin, d'autre part de rabattre le plus possible le niveau piézométrique à l'aplomb de ce bassin pour augmenter l'épaisseur de la zone non saturée.

#### IV. — LE DISPOSITIF

Venons-en au dispositif de l'expérience (fig. 2) qui a consisté en :

- un bassin d'infiltration muni d'un pré-bassin de décantation et situé entre les forages F4 et F5,
- un stockage de produit carboné avec une conduite d'alimentation en direction du pré-bassin,
- un piquage d'eau de nappe sur la conduite de refoulement commune des forages,
- un système d'asservissement pour la régulation automatique des injections dans le bassin et des périodes de chômage,
- enfin, des points de contrôle de la qualité de la nappe (piézomètres) et des eaux infiltrées (bougies poreuses).

Le bassin, long de 60 m et large de 30 m (1800 m<sup>2</sup>) a été confectionné comme le montre le schéma de la figure 3 :

- diguettes de 0,60 m de haut sur 3 m de large en pied et 1 m en tête,
- digue centrale pour accès au piézomètre et aux bougies,
- lit de sable 0-2 mm de 0,15 m d'épaisseur, en fond de bassin, sur le terrain naturel non remanié.

Le décanteur, quant à lui, a été réalisé en déblai-remblai.

Le produit carboné a été stocké dans une cuve de 40 m<sup>3</sup> placée près du forage F4, approvisionnée par une citerne mobile de 12 m<sup>3</sup>. Il s'agissait d'un effluent provenant de l'usine des Produits du Maïs d'Haubourdin (située à 3,5 km) et résultant de l'hydrolyse de laits d'amidon.

Le système de régulation automatique équipé d'une horloge programmable, permettait entre autres de régler la durée et de déclencher les cycles d'injection par ouverture ou fermeture des vannes d'eau et de produit.

#### V. — FONCTIONNEMENT DU BASSIN

L'essai a eu lieu entre septembre et décembre 1987. L'alimentation en eau nitratée + produit carboné du bassin a été programmée sur 6 cycles de 4 heures (ennoyage + vidange) par 24 heures, le remplissage proprement dit se faisant durant une vingtaine de minutes au cours de chaque cycle.

Compte tenu des difficultés rencontrées pour régler au mieux le dispositif, surtout à cause des colmatages provoqués par les matières en suspension (MES) dans le produit carboné, la hauteur d'eau maximale infiltrée, fixée au départ à plus de 0,50 m/jour, a rapidement décrû pour se stabiliser autour de 0,22 à 0,23 m/jour (fig. 4).

#### VI. — RÉSULTATS

Globalement, 32 600 m<sup>3</sup> d'eau additionnée de produit ont été infiltrés, soit seulement 5 % du volume pompé dans les deux captages au cours de la même période. La quantité de produit utilisée a été de 390 m<sup>3</sup>, soit entre 1 et 2 % du mélange.

Les analyses effectuées au piézomètre PZ3 ont accusé une baisse notable des teneurs en nitrates puisqu'elles sont passées de 100 à 40 mg/l en un peu plus d'un mois (fig. 5), tandis que dans les bougies poreuses la dénitrification était totale.

L'eau prélevée au PZ3 représentait donc un mélange de 45 à 50 % d'eau de nappe et d'eau de bassin entièrement dénitrifiée.

Aucune influence n'a par contre été observée au forage F4, trop éloigné. Cependant, au PZ1C, placé en position intermédiaire entre F4 et le bassin, une forte baisse des teneurs (17 mg/l) a pu être enregistrée, comme si la réaction de dénitrification s'était poursuivie au sein de la nappe, à l'aval du bassin.

#### CONCLUSIONS

Les résultats de l'expérience, quant à la dénitrification proprement dite, se sont avérés *concluants*.

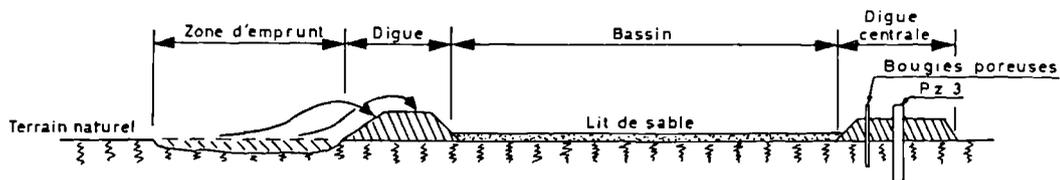


Fig. 3

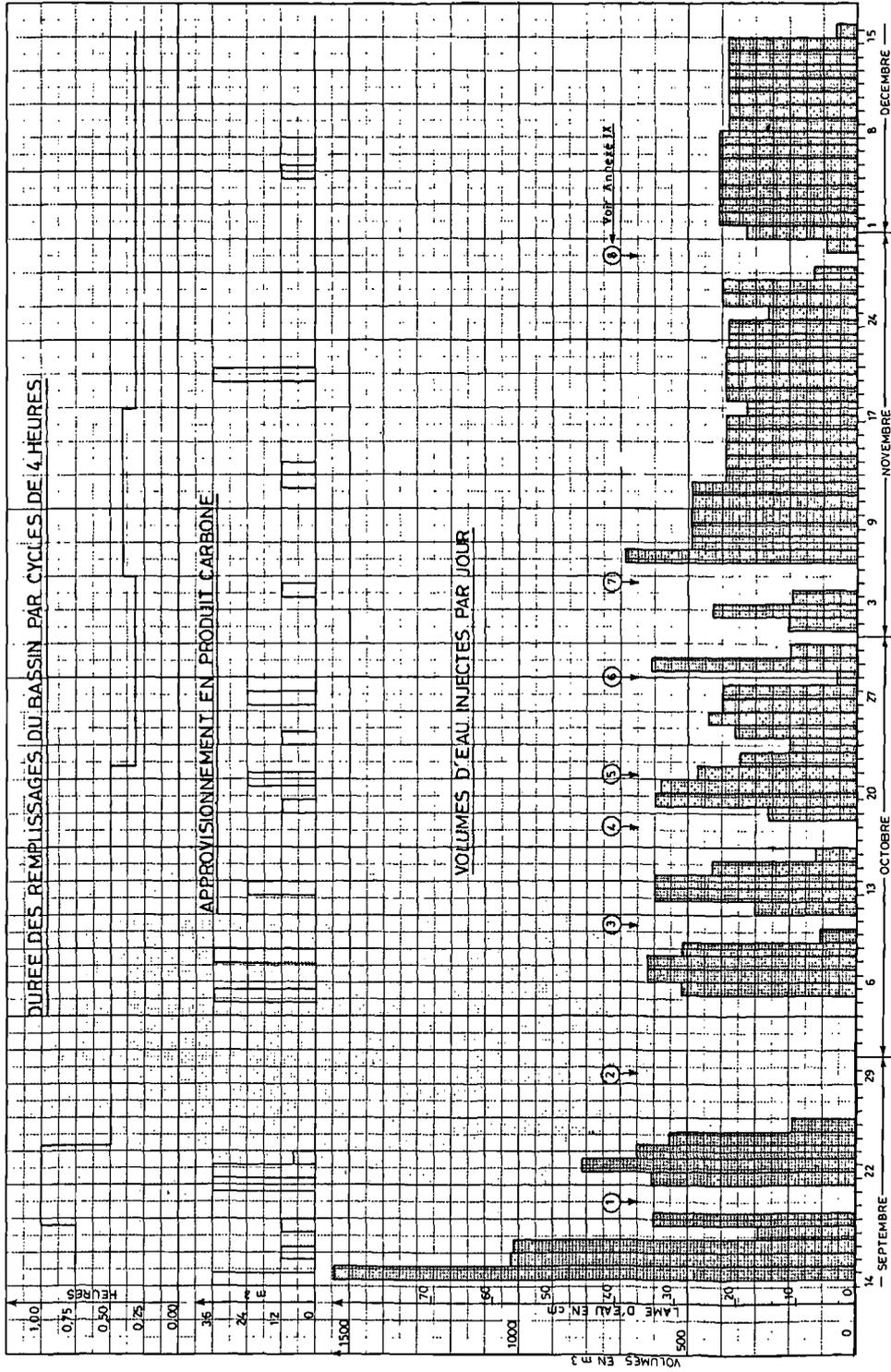


Fig. 4

Toutefois, avant d'envisager de développer l'exploitation du procédé qui peut représenter un réel espoir pour des petites et moyennes unités de distribution d'eau potable, il resterait à examiner des *améliorations* qui devraient porter principalement sur :

— le choix proprement dit des sites, afin d'éviter les points bas topographiques et les sols trop peu perméables,

— la source de produit carboné qui devrait être à la fois plus pur et plus concentré,

— enfin, l'analyse détaillée de l'impact du procédé sur la qualité de la nappe, notamment en ce qui concerne l'aspect "potabilité".

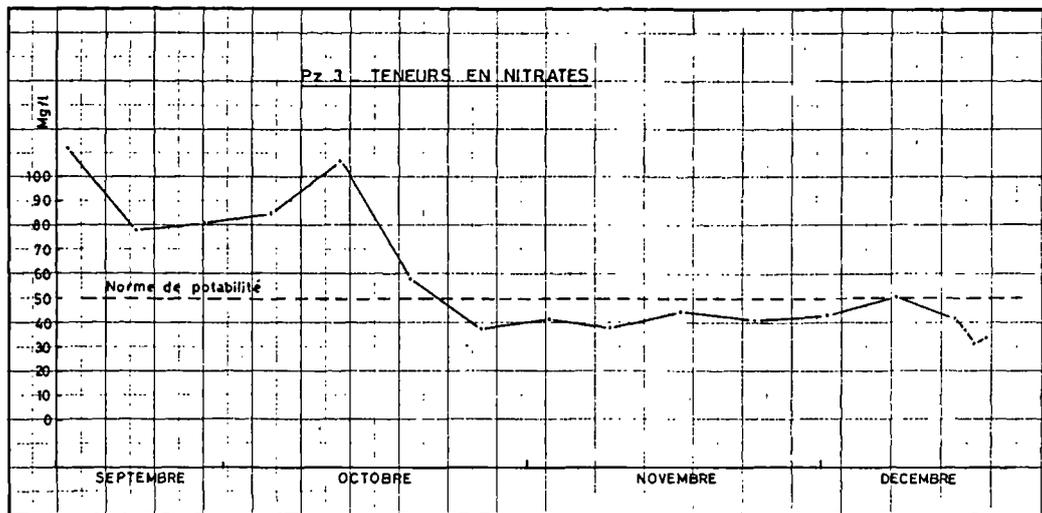


Fig. 5

#### BIBLIOGRAPHIE

- 1) BRGM-BURGEAP (1983). — Champs captants d'Emmerin et Houplin-Ancoisne. Etude des phénomènes liés à la présence de nitrates dans l'eau et propositions d'amélioration de la qualité de l'eau. Rapport 1<sup>re</sup> phase. BRGM rapport 83 NPC 17. BURGEAP R 571 E 1223.
- 2) BRGM-BURGEAP (1984). — Champs captants d'Emmerin et Houplin-Ancoisne. Propositions d'amélioration de la qualité de l'eau. Rapport 2<sup>e</sup> phase. BRGM rapport 84 AGI 190 NPC. BURGEAP R 571 E 1439.
- 3) LANDREAU A., TALBO H., CAILLIBOTTE A. (1984). — Dénitrification provoquée des eaux souterraines. BRGM note technique 84/02.
- 4) LANDREAU A., SEGUIN J.-J. (1987). — Investigation sur la dénitrification naturelle dans l'aquifère captif de la nappe de la craie du Nord de la France. BRGM rapport 87 SGN 486 EAU.
- 5) LANDREAU A., LAVERTY J., MARTIN G. (1988). — Expérimentation sur un procédé de dénitrification des eaux souterraines en vue de la production d'eau potable à l'usage des petites collectivités. *L'eau, Association générale des hygiénistes et techniciens municipaux* n° 4, pp. 247-251.
- 6) SIMON B. (1986). — Apports de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines. Thèse 3<sup>e</sup> cycle Univ. P.M. Curie, Paris, 163 pp.

## Pollution des eaux souterraines par les nitrates d'origines agricoles et urbaines. Bilan sur l'arrondissement de Cambrai (Nord - France)

### Groundwater pollution by nitrates agricultural and urban derived. Balance to the district of Cambrai (North of France)

par Christian PRÉAUX (\*)

*Résumé.* — La quantification de l'ensemble des éléments relatifs aux cycles de l'eau et de l'azote au droit de l'arrondissement de Cambrai fournit les enseignements suivants :

— environ 65 % de l'azote lessivable est d'origine agricole, induit par la fertilisation artificielle, l'épandage des résidus de l'élevage et le retournement de prairies permanentes ;

— environ 25 % de l'azote émis provient des eaux usées suite à un assainissement incomplet, défectueux et aux effluents rejetés en écoulement superficiel alimentant la nappe.

La réalisation d'une carte de synthèse des teneurs en nitrates des eaux souterraines nécessitant la prise en compte de sept facteurs aboutit à un bilan préoccupant.

*Abstract.* — *Results from quantification of whole elements relating water and nitrogen cycles are :*

— *about 65 % of potential nitrogen leaching are agricultural derived, induced by inorganic fertiliser, animal waste disposal and ploughing of permanent grass ;*

— *about 25 % of nitrogen emission come from wastewater because lack of sanitation and effluent disposal in perched streams recharging aquifer.*

*Realisation of a nitrate content of groundwater synthesis map is based on seven parameters, the result is alarming.*

#### I. — INTRODUCTION

Deux raisons principales rendent préoccupante la présence de nitrates dans les eaux souterraines destinées à l'alimentation humaine.

En premier lieu, il s'agit de l'aspect nocif de l'ingestion d'une quantité importante de nitrates, en particulier pour les nourrissons et les femmes enceintes. Cet effet est connu depuis 1945 sous le nom de la méthémoglobinémie. Depuis lors, de nombreuses études soupçonnent les nitrates d'être à l'origine ou de jouer un rôle dans le cancer de l'estomac, l'hypertension artérielle, des problèmes de fertilité, de grossesse, du système nerveux, de la thyroïde, de la synthèse des vitamines A et E... (Awad, 1982 - Scrève, 1984).

Suite à ces risques réels et potentiels, des normes ont été mises en place. En France, la Concentration Maximale Admissible (C.M.A.) est fixée à 50 mg de nitrates/l par le décret 89-3 du 3-1-1989. Cette valeur est en conformité avec la directive européenne CEE 778 du 15-7-1980 (Godet *et al.*, 1982).

Le second facteur concerne l'augmentation des teneurs constatée suite à la surveillance systématique engagée, dans le département du Nord, depuis le milieu des années 1970. Cette croissance se marque davantage lorsque sont disponibles des données antérieures à 1960. La figure 1 illustre la concentration en nitrates de l'eau prélevée par un champ captant de la vallée de l'Escaut, cet aspect concerne un vaste bassin versant où domine une influence essentiellement agricole

(\*) Cycle Urbain de l'Eau et Pollution des Eaux, Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille (E.U.D.I.L.), Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois (U.S.T.L.F.A.), 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex ; et Service Géologique Régional Nord - Pas-de-Calais du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (S.G.R. N.P.C. du B.R.G.M.), Fort de Lezennes, Lezennes, 59260 Hellemmes - Lille.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

et modérée. A l'inverse, la qualité de l'eau captée par l'ouvrage de la vallée de l'Erclin cumule divers impacts comme une forte densité de villages partiellement assainis, l'infiltration vers la nappe des eaux usées ou épurées rejetées dans les cours d'eau superficiels ainsi qu'une influence agricole plus marquée.

La cause d'un tel constat ne peut provenir d'un phénomène naturel, mais semble donc imputable aux multiples activités humaines génératrices de pertes d'azote.

Cet article concerne l'étude entreprise sur la totalité de l'arrondissement de Cambrai (Préaux, 1988 - Préaux, 1989). Deux éléments sont à l'origine d'une telle focalisation :

— le fait que 20 % de la population ait été, au moins une fois, alimenté par une eau présentant une concentration en nitrates supérieure à la norme de potabilité ;

— le grand nombre (80 pour 115 communes), la dispersion des sites de captage et l'absence d'interconnexion entre les réseaux.

Cette étude a été réalisée au sein du Service Géologique Régional du B.R.G.M. pour le compte du Conseil Général du Département du Nord ; ce dernier en assurait le financement avec l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (A.E.A.P.). La maîtrise d'œuvre était confiée à un groupe de travail qui, outre les trois organismes cités ci-dessus comprenait :

— la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (D.D.A.F.) ;

— la Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (D.D.A.S.S.) ;

— la Direction Départementale de l'Équipement (D.D.E.) ;

— l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois (U.S.T.L.F.A.).

## II. — ORIGINES DE L'AZOTE ET QUANTIFICATION DES FLUX

Les sources d'azote dans les eaux souterraines sont multiples (Martin, 1979) et peuvent être divisées en trois grandes classes.

### 1) Impacts agricoles

1) L'arrondissement de Cambrai est le grenier du Nord, 60 % de sa superficie est occupée par des terres labourables.

En comparant les apports d'azote sous forme d'engrais artificiels et les exportations par les cultures, les statistiques locales révèlent une surfertilisation. Celle-ci est de (Bur. Gé. Ap. et B.R.G.M., 1983-1984) :

— 10 kg de N/ha/an pour la grande culture (céréales, plantes sarclées, cultures fourragères et industrielles) qui intéresse 58 % de la surface de l'arrondissement. Cette valeur minore probablement la réalité, une émission d'azote provient également de la minéralisation (chaumes, racines, biomasse, matière organique stable) ;

— 50 kg de N/ha/an pour les légumes frais, secs, les cultures ornementales et les vergers suite à une fertilisation et/ou

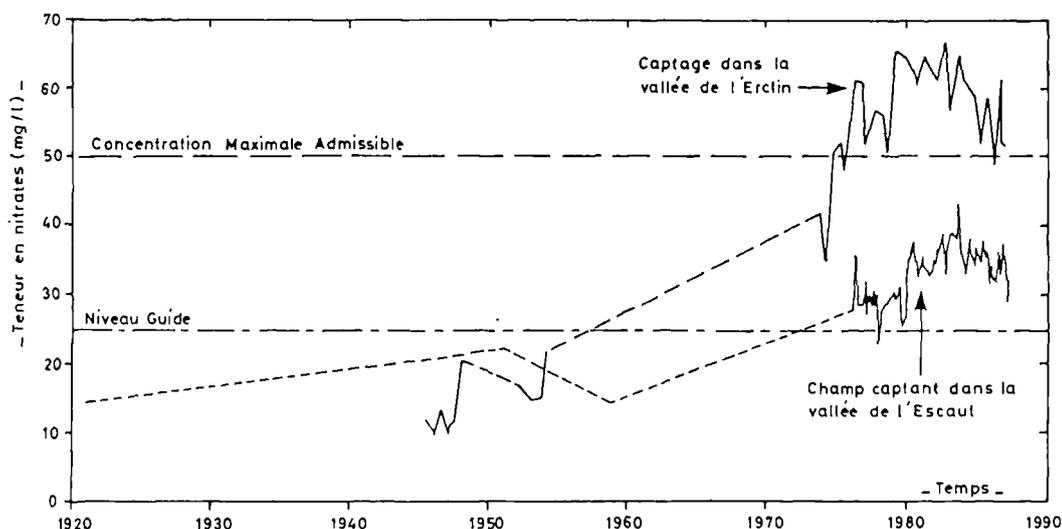


Fig. 1. — Exemples d'évolution de la teneur en nitrates des eaux souterraines.

Fig. 1. — Evolution examples of nitrate content of groundwater.

un arrosage plus important ou encore des récoltes précoces qui favorisent une minéralisation estivale et un lessivage par les pluies automnales et hivernales. Cet ensemble ainsi que les terres laissées en jachères regroupent 2 % de la superficie du secteur d'étude.

Le lessivage potentiel d'azote induit principalement par la surfertilisation provenant des engrais artificiels représente 32 % du bilan global sur l'arrondissement.

2) L'adjonction de résidus de l'élevage comme fertilisant naturel accroît le risque de perte d'azote. La quantité à prendre en compte se calcule à partir :

- du type d'animaux (lapins, volailles, ovins, porcins, bovins...);
- des modalités d'élevage :
  - industriel : la totalité des résidus produits annuellement est stockée puis épandue ;
  - traditionnel : seuls les déchets recueillis en période de stabulation sont utilisés ;
- du lieu d'épandage car la fraction lessivable ne provient que de la fertilisation au droit des terres labourables.

Les pertes potentielles issues des résidus de l'élevage totalisent 26 % de l'ensemble.

3) Les prairies permanentes occupent près de 20 % de la superficie de l'arrondissement. La présence d'un tapis racinaire dense et permanent empêche le lessivage au droit de la Surface Toujours en Herbe (S.T.H.).

De ce fait, les apports provenant des engrais (artificiels ou naturels) ou du séjour des animaux ne sont pas à prendre en compte. Le retournement de pâtures induit des pertes d'azote considérables avec la minéralisation de la matière organique. Le lessivage potentiel est de 80 kg de N/ha/an la première année ; la décroissance annuelle est de 20 %.

L'azote produit par le retournement des pâtures représente 7 % du total.

4) D'autres émissions peuvent être à l'origine de pertes d'azote, leur aspect limité n'a pas entraîné de quantification. Il s'agit :

- du lessivage artificiel des sols de serre (100 kg de N/ha/an) ;
- des fuites au niveau des élevages hors sol (fosse, aire de stockage) ;
- du ruissellement sur les terres labourables, suivi d'une infiltration.

Il résulte de cette présentation que les activités agricoles regroupent environ 65 % du flux potentiel d'azote.

## 2) Impacts urbains

La superficie urbaine totalise 7 % de la surface de l'arrondissement ; la quasi-totalité de l'émission d'azote émane des eaux usées (eaux ménagères et eaux vannes) à raison de 15 g de N/habitant/jour (Inter-agences, 1980). Ce chiffre est admis comme valeur de base pour les petites et moyennes collectivités en incluant un coefficient de sécurité. Trois grandes divisions sont réalisées.

1) L'absence de liaison à un dispositif d'assainissement collectif entraîne l'évacuation des effluents suivant diverses modalités dont les puits perdus, pertes ; l'épandage souterrain ou sur les potagers ou encore sur les terres agricoles ; les fossés, caniveaux sans oublier les fuites des fosses.

Ces moyens induisent 15 % de l'azote émis au droit de l'arrondissement.

2) Le raccordement à un réseau d'assainissement ne résout que partiellement le problème et occasionne des pertes d'azote par les fuites sur les conduites et l'infiltration des eaux rejetées, sans ou après épuration, dans le milieu naturel (bassin, écoulement superficiel).

L'azote libéré à l'issue du passage dans un réseau d'assainissement représente 9 % (\*) du total.

3) Au droit des zones urbaines se produit un lessivage potentiel de l'azote du sol du fait de la surfertilisation et de la "surirrigation" des jardins (en particulier les potagers), ou encore de l'urbanisation des terres labourables qui transforme les sols en jachère et induit la formation de nitrates à partir de l'humus en stock.

Ce type d'émission constitue 3 % du bilan.

L'ensemble des émissions d'azote provenant de zones urbaines regroupent donc de l'ordre de 27 % du flux potentiel total.

## 3) Impact de la pluie

L'eau de pluie contient de l'azote dont l'origine est triple (Bedin, 1976) :

- naturelle, suite à la fixation chimique de l'azote gazeux atmosphérique. La réaction s'effectue par l'action de l'énergie électrique libérée lors des orages ;
- agricole du fait de la dissolution de l'ammoniac volatilisé au-dessus des terres ;
- urbaine et industrielle avec les retombées d'oxydes d'azote contenus dans les fumées rejetées (chauffage, pot d'échappement...).

---

(\*) Cette valeur comprend la majeure partie de l'impact des eaux résiduaires industrielles provenant des quelques activités émettrices (bois, papier, engrais, produits chimiques, textile, agro-alimentaire) de l'arrondissement.

Dans le cas de l'arrondissement de Cambrai, la dernière cause est mineure. Seul l'équivalent de l'impact pluvial est pris en compte pour le lessivage au droit des pâtures et des zones boisées.

L'azote des précipitations induit 8 % du lessivage potentiel.

#### 4) Bilan

Le tableau I regroupe les différentes sources (directes et / ou indirectes) d'azote recensées et quantifiées au droit de l'arrondissement de Cambrai en 1985/1986.

SOURCES D'AZOTE		PART (%)	SOUS-TOTAL (%)
AGRICOLAS	Engrais artificiels	32	65
	Résidus de l'élevage	26	
	Retournement de pâtures	7	
URBAINES	Puits perdus, pertes Epanchages (souterrain, sur potagers, terres agricoles)	15	27
	Fuites des fosses Infiltration fossés, caniveaux	9	
	Fuites des conduites Infiltration bassins, écoulement superficiel		
	Surfertilisation des potagers	3	
	Urbanisation des terres labourables		
PLUIE		8	8
TOTAL		100	

Tabl. I. — Bilan des émissions d'azote au droit de l'arrondissement de Cambrai (1985/1986).

Tabl. I. — Nitrogen emission balance for the district of Cambrai (1985/1986).

### III. — FACTEURS A PRENDRE EN COMPTE DANS L'ÉLABORATION D'UNE CARTE DES TENEURS EN NITRATES DES EAUX SOUTERRAINES

Le premier facteur est relatif aux flux spécifiques d'azote émis à la surface du sol. Ils résultent de la prise en considération de l'ensemble des origines présentées au paragraphe II. Les valeurs s'étagent de 6 kg de N/ha/an (forte proportion de bois et prairies) à 125 kg de N/ha/an (zone urbaine où domine l'évacuation des eaux usées dans des puits perdus) puis de 500 à 50 000 kg de N/ha/an pour les pertes issues de l'écoulement superficiel en fonction du taux de dilution des effluents par les eaux pluviales.

Le second facteur concerne la nature des formations superficielles. Les terrains argileux sur certains plateaux de l'Est et du Sud forment un écran imperméable à la propagation de l'eau et de l'azote véhiculé. A l'opposé, les flancs de vallées et vallons secs montrent la craie (aquifère) à l'affleurement.

Le troisième facteur consiste en la dilution par la pluie efficace. Celle-ci varie de 108 mm/an au nord-ouest à 195 mm/an au sud-est (Beckelynck, 1981). Ce constat signifie que pour un même flux émis à la surface du sol la concentration en infiltration sera double au nord-ouest.

Le quatrième facteur a trait au retard induit par l'épaisseur des terrains non saturés (entre le sol et la nappe) ; celle-ci s'étage de l'affleurement dans les principales vallées à 50/70 m au droit de certains plateaux (Beckelynck *et al.*, 1985). Cette distinction est importante compte tenu de la vitesse moyenne de transfert de l'ordre de 50 cm/an par la porosité matricielle où s'effectue la majeure partie de l'écoulement (Brossier *et al.*, 1980 - Landreau *et al.*, 1981 - Seguin, 1984 - Seguin et Moreau, 1986). De plus, ce n'est que depuis une quarantaine d'années que l'activité agricole est devenue intensive et forte consommatrice de fertilisants artificiels. L'eau qui atteint la nappe dans les secteurs où elle est profonde de plus de 20 m n'a pas encore été touchée par les effets des pratiques agricoles modernes. Cette discrimination n'est pas à retenir en ce qui concerne les eaux usées, la permanence de l'infiltration (comparativement à la pluviométrie efficace) assure un transfert rapide, et même instantané pour les puits perdus.

Le cinquième facteur intéresse l'épaisseur de la nappe. Celle-ci varie de 0 à 45 m (Caulier, 1974) ; les effets produits par l'arrivée d'une eau de caractéristique géochimique identique ou voisine sont différents du fait de la dilution au sein de l'aquifère.

Le sixième facteur est le sens d'écoulement. Pour une émission non ponctuelle sa prise en compte entraîne, par dilution de l'eau qui atteint la nappe, un décalage vers l'aval entre le lieu du début de l'impact de l'infiltration et l'endroit de la manifestation tangible sur la teneur en nitrates des eaux souterraines. A l'inverse, un effet peut se propager au-delà de la zone d'infiltration et former un panache.

Le septième facteur est relatif aux concentrations en nitrates ponctuellement mesurées. Leur signification est différente selon le débit d'exploitation de l'ouvrage concerné. Dans le cas d'un faible prélèvement, la signification est ponctuelle et caractérise une situation donnée et cumulée des six facteurs précédemment évoqués. A partir de ce constat, il est possible de travailler par analogie avec des sites distants de plusieurs kilomètres mais dépourvus de renseignements sur la qualité de l'eau. En cas de prélèvement plus important, la signification n'est plus locale, mais représentative d'un bassin versant d'alimentation plus vaste.

### IV. — CONCLUSION

Le croisement de l'ensemble des facteurs énumérés au paragraphe III permet de réaliser une carte des teneurs en nitrates sur l'ensemble de l'arrondissement. La situation est

encore favorable car de vastes secteurs de nappe présentent une teneur en nitrates inférieure à 35 mg/l. Toutefois, les lieux très touchés sont également les zones les plus productrices.

De plus, à terme, dans l'hypothèse où la situation demeure inchangée, parviendra en nappe une eau de concentration en nitrates d'origine agricole supérieure à 50 mg/l. Ceci au droit de 82 des 115 communes que compte l'arrondissement de Cambrai. La teneur moyenne de la lame d'eau qui arrive à la nappe au droit de la zone d'étude atteindra la Concentration Maximale Admissible vers 2010. La suppression de la totalité des émissions d'azote provenant des zones urbaines ne fera que retarder cette échéance d'une trentaine d'années.

A l'issue de cette prospective sommaire, il apparaît absolument nécessaire de mettre immédiatement en œuvre des mesures permettant de réduire les pertes d'azote d'origine agricole. C'est à cette seule condition que pourra être captée

une eau dont la concentration en nitrates restera inférieure à 50 mg/l.

Dans le cas où ces solutions ne peuvent être envisageables (difficultés techniques, coût excessif, effet tardif...), trois possibilités subsistent :

- l'interconnexion des réseaux d'adduction ;
- la recherche d'une nouvelle ressource en privilégiant les sites favorables (recouvrement protecteur, dénitrification naturelle) ;
- la mise en place d'un réacteur de dénitrification.

Cette dernière solution montre que l'homme a pour les nitrates les moyens techniques de combattre les effets négatifs de son comportement mais il serait plus satisfaisant d'agir sur les causes.

#### BIBLIOGRAPHIE

- 1) AWAD L. (1982). — Les nitrates dans l'eau et la santé. 44 p., 2 tabl.
- 2) BECKELYNCK J. (1981). — Traitement régionalisé des paramètres contribuant à la gestion des nappes. Application à la modélisation de la nappe dans le bassin de l'Aa et de la moyenne Lys (Région Nord - Pas-de-Calais). *Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Sci. Tech. Lille*, n° 902, 140 p., 9 tabl., 38 fig., 12 ann. (31 p., 7 pl. h.t. dont une carte couleurs 1/250 000).
- 3) BECKELYNCK J., BAILLY S. et CAULIER P. (1985). — Carte d'orientation à l'exploitation de la nappe de la craie pour les pompes à chaleur. *Document pour le Conseil Régional Nord - Pas-de-Calais et l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie par le Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Bur. Rech. Géol. Min. édit., Orléans*, 85 SGN 417 NPC, 15 p., une carte couleurs 1/250 000 h.t.
- 4) BEDIN J. (1976). — Origine des pollutions azotées dans les eaux superficielles et les eaux usées. — Développements récents des procédés permettant l'élimination de ces nuisances. *Tech. Sci. Méth. — L'eau, Ass. générale hygiénistes techniciens municipaux édit., Paris*, n° 8 - 9, pp. 347 - 362, 13 tabl., 11 fig.
- 5) BROSSIER G., KERBAUL A., LANDREAU A., MOREAUX P., OAKES D. et YOUNG C. (1980). — Impact des pratiques agricoles sur la minéralisation des eaux interstitielles des terrains sous-jacents. — Conséquences sur la qualité de l'eau de la nappe. *Rapport pour Minist. Ind. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans*, 79 SGN 768 HYD, 15 p., 2 tabl., 11 fig.
- 6) BUR. GE. AP. et B.R.G.M. (1983 - 1984). — Champs captants d'Emmerin et Houplin-Ancoisne. Etude des phénomènes liés à la présence de nitrates dans l'eau et propositions d'amélioration de la qualité de l'eau. *Rapports pour la Com. Urb. Lille par Bur. Géol. Applic., Paris*, R. 521-E. 1223 (phase 1), R. 571-E 1489 (phase 2) et *Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min. Lezennes*, 83 NPC 17 (phase 1), 84 AGI 190 NPC (phase 2), 23 p., 3 tabl., 3 fig., 5 ann. (249 p., 100 tabl., 24 fig., 5 pl., 3 pl. h.t. dont une en couleurs au 1/12500) (phase 1), 47 p., 3 tabl., 2 ann. (21 p., 13 tabl., 4 pl. h.t. couleurs) (phase 2).
- 7) CAULIER P. (1974). — Etude des faciès de la craie et leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. *Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Sci. Tech. Lille*, 156 p., 37 fig., 7 ann. (94 p., 32 pl. et 126 tabl. h.t.).
- 8) GODET J.-L., GUENIFFEY A. et TRICARD D. (1982). — Qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Direction Générale de la Santé, Promotion de la Santé, *Comité Français d'Education pour la Santé, Paris*, cahier n° 3, 43 p., 26 tabl., 10 graphes, 4 ann. (16 p., 7 tabl.).
- 9) Inter-agences (1980). — L'assainissement individuel, principes et techniques actuelles. *Document agence de bassin Loire-Bretagne, Orléans*, 126 p., 26 tabl., 62 fig.
- 10) LANDREAU A., MORFEAUX P., BROSSIER G. et KERBAUL A. (1981). — Etude sur site expérimental de la propagation des nitrates dans la craie de Champagne. *Rapport pour Minist. Ind. par Bur. Rech. Géol. Min., Reims et Orléans*, 81 SGN 640 CHA/EAU, 12 p., 3 fig.
- 11) MARTIN G. (1979). — Le problème de l'azote dans les eaux. *Technique et Documentation édit., Paris*, 273 p., 62 tabl., 109 fig. et 4 ann. (6 p., 5 fig., une pl.).
- 12) PRÉAUX C. (1988). — Alimentation en eau potable de l'arrondissement de Cambrai (département du Nord). — Constat de l'état actuel de la distribution publique et perspectives d'aménagements. *Documents pour le Conseil Général du Département du Nord par le Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min. Lezennes*, 86 SGN 435 NPC. Atlas des eaux souterraines de l'arrondissement de Cambrai. format 61,5×34,5 cm, 20 p., 6 tabl., 14 fig., 7 encarts (6 fig.), 6 pl. couleurs 1/100 000. Rapport technique : dossiers communaux. 671 p., 222 tabl., 116 plans, 88 graph. Rapport technique : synthèse. 170 p., 28 tabl., 3 fig. et 17 ann. (129 p., 20 tabl., 16 fig.).

- 13) PRÉAUX C. (1989). — Impact des pratiques agricoles et du défaut d'assainissement sur la teneur en nitrates des eaux souterraines : Application à l'arrondissement de Cambrai (Nord - France). *Document n° 1 Thèse doctorat, Univ. Sci. Tech. Lille*, n° 384, 131 p., 13 tabl., 24 fig. et 7 ann. (17 p., une fig.).
- 14) SCREVE A. (1984). — Dénitrification des eaux d'alimentation *Thèse Pharma., Univ. Lille II*, 116 p., 5 tabl., 17 fig.
- 15) SEGUIN J.-J. (1984). — Evolution des teneurs en nitrates de la nappe de la craie en région de Picardie. — Essai de prévision. *Partie du rapport réalisé pour l'Agence de l'Eau Artois - Picardie par le Serv. Géol. Rég. du Bur. Rech. Géol. Min., Amiens*, 84 AGI 329 NPC, 26 p., 12 tabl., 12 fig., 3 ann. (7 p., 1 tabl., 2 fig.).
- 16) SEGUIN J.-J. et MOREAU F. (1986). — Migration des nitrates dans la zone non saturée de la craie de Champagne. — Interprétation des résultats d'une campagne de carottages sous un champs d'épandage d'effluents agricoles - Connantre - Marne. *Rapport pour Minist. Env. par Bur. Rech. Géol. Min., Orléans*, 86 SGN 172 EAU, 28 p., 15 tabl., 7 fig. et 4 ann. (10 p., 2 tabl., une fig.).

## Assainissement, épuration et ressources en eau potable : apports des recherches de géophysique appliquée dans la région Nord - Pas-de-Calais (\*)

### Sewerage, treatment of water and groundwaters in North of France : results of applied geophysical prospection

par Henri MAILLOT (\*\*)

*Résumé.* — Il existe une opposition d'intérêt entre l'Assainisseur (s.str.) dont la principale préoccupation est d'infiltrer de grandes quantités d'eaux (usées et surtout pluviales) et le Distributeur d'Eau qui a pour but de prélever une eau abondante mais de bonne qualité.

Sont présentés ici les travaux régionaux de recherches appliquées réalisées depuis une dizaine d'années à l'E.U.D.I.L. Ils ont pour objectif de mieux caractériser la fracturation des roches, de modéliser des bassins versants superficiels et de mieux concevoir l'Assainissement/Epuration de secteurs critiques en préservant le milieu récepteur c'est-à-dire la ressource en eau potable.

La géophysique de subsurface fait appel à des méthodes essentiellement comparatives. Quelques possibilités d'applications sont rappelées succinctement ci-dessous. Cependant, appliquées de façon systématique, ces méthodes sont très répétitives. Afin de mieux les valoriser, une série de reconnaissance par moyens aéroportés divers est détaillée. Elle permet un premier repérage de discontinuités présumées du sous-sol. Dès lors, la prospection géophysique est surtout réalisée dans les secteurs hétérogènes.

*Abstract.* — *A conflict exist between who is in charge of infiltration of large quantities of water (sewage and pluvial) and who wants a large but first rate water.*

*Works made in E.U.D.I.L. during several years are presented. They were undertaken for better knowledge of fractures of rocks and for a pattern of basins in order to converge a better harmony between Sewerage/Treatment in critical sections with a preservation of the basin.*

*Comparatives methods of subsurface geophysic are used. Some application are briefly exposed, there are methodic and often they are recurrent. So a general air reconnaissance in detailed, it allows a first approach, leaving the geophysical prospection to the heterogenous areas.*

#### I. — RAPPEL DES POSSIBILITÉS DE LA PROSPECTION GÉOPHYSIQUE

1) **Sismique réfraction** : mise en évidence de fracturation, évaluation de l'altération des roches cohérentes.

a) *Principe*

Il a été précédemment détaillé (1) et nous renvoyons à cette publication.

Sont schématisés ci-dessous quelques exemples qui montrent un certain nombre d'applications possibles pour la mise en évidence de la fracturation, voire de l'altération des roches (en particulier calcaires et craies fréquemment rencontrés dans la région).

(\*) Cette note prend en compte les résultats des travaux réalisés par les élèves ingénieurs de l'E.U.D.I.L. dans le cadre de leurs stages et de leurs projets de fin d'études.

— DECRUYENAERE et WEPPE (1983), BARBRY et LE GUYNER (1985), BARTOLI et CLERC (1985), DE GOYON et SZYJKA (1986), COLLARD-BREDILLON et DIDIER (1986), CUENIN et DUPONT (1987), BOURGAIN (1987), DE VRIENDT et VAUTRIN (1988), GRANDPERRIN et LAMANDIN (1988), COLLART et LEROY (1988).

(\*\*) Cycle Urbain et Pollution des Eaux, E.U.D.I.L., Université des Sciences et Techniques, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

b) Schémas d'application

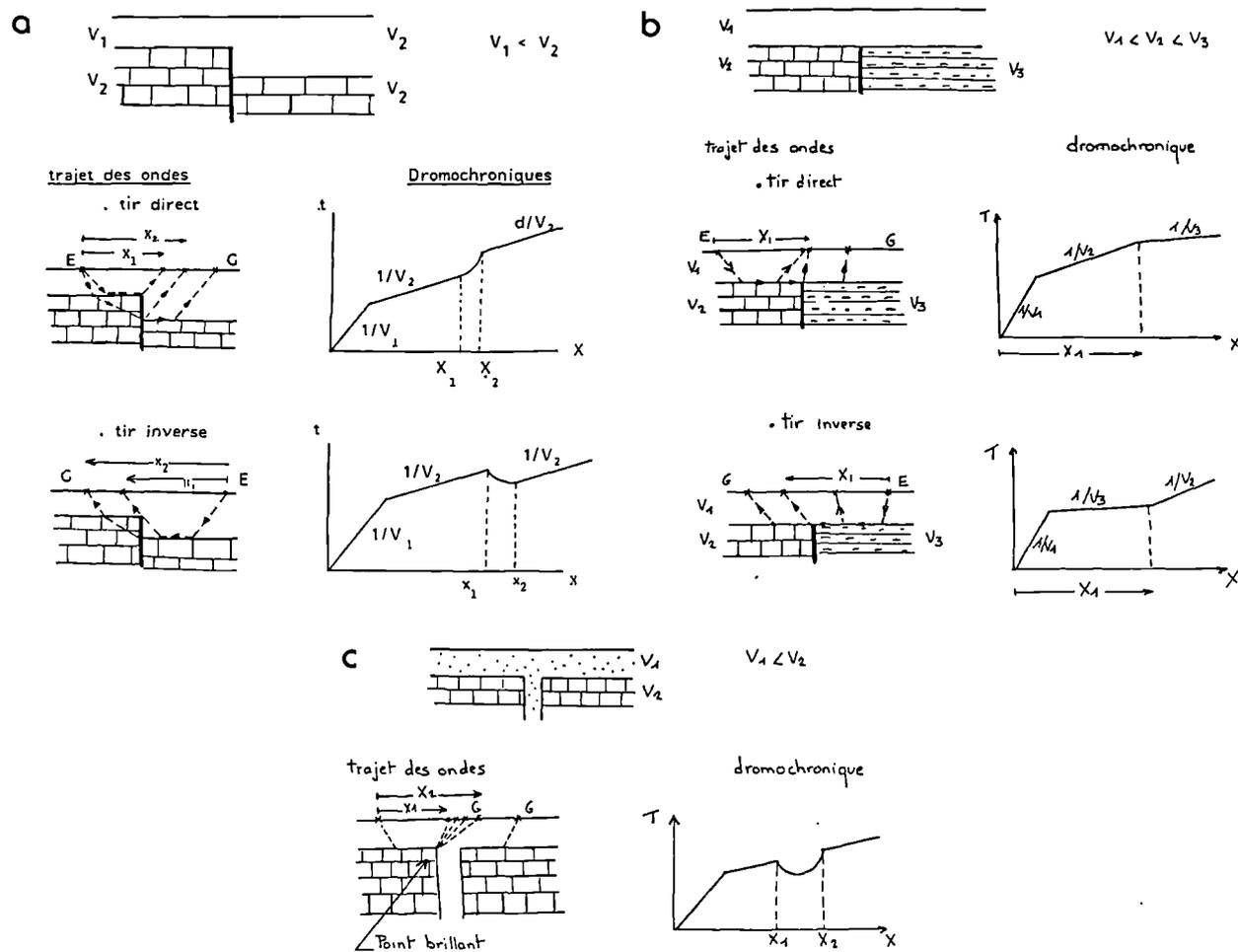


Fig. 1

- a) Type 1 : faille avec déplacement vertical d'un compartiment.  
 b) Type 2 : faille sous recouvrement sans gradin.  
 c) Type 3 : faille ouverte sans recouvrement.

Fig. 1

- a) Model 1 : fault with vertical displacement of one side.  
 b) Model 2 : fault under sedimentary cover without step.

2) Profils, traînés et sondages électriques : mise en évidence des couloirs d'altération et des contrastes lithologiques.

a) Principe

Nous renvoyons à (1) pour le détail des méthodes et de leur principe d'utilisation et à (2, 3 et 4) pour les généralités d'application.

b) Applications

Parmi les nombreuses applications possibles, toutes basées sur la recherche de contrastes de résistivité, nous retiendrons

celles permettant de mettre en évidence les couloirs d'altération ou encore celles qui autorisent la détermination de contrastes lithologiques.

La résistivité d'une roche est fonction de la teneur en eau, de la nature du fluide d'imprégnation, de la porosité, de la surface spécifique et de la lithologie.

— Une plus grande altération va donc conduire après une période pluvieuse à une plus forte teneur en eau qui déterminera une chute de résistivité.

— Une variation sensible de résistivité va permettre, en s'appuyant sur les limites géologiques présumées, de préciser des contacts masqués de formations géologiques.

Mais, si les apports de la géophysique de subsurface peuvent être intéressants après un étalonnage correct, systématiquement appliquées, les manipulations sont longues et fastidieuses, et, en partie aveugles.

Afin de mieux préciser les zones a priori favorables, une reconnaissance par d'autres moyens s'avérait nécessaire.

Outre l'interprétation des campagnes de photographies aériennes de l'I.G.N. (couples stéréoscopiques), furent successivement réalisés, un certain nombre d'essais sur des structures géologiques régionales.

## II. — MISSION AÉROPORTÉE SPÉCIFIQUE DE L'I.G.N.

Une campagne de prises de vues en fausses couleurs (20 clichés) à l'échelle du 1/12 000<sup>e</sup> a été réalisée dans l'Avesnois, le 15 mai 1982, sur le synclinal de Bachant/Ferrière-la-Petite, plus précisément cette campagne intéresse un secteur s'étendant de Berlaimont à l'Ouest - Sud-Ouest jusqu'à Colleret à l'Est - Nord-Est.

Cette campagne a été accompagnée, à la demande de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt, de la réalisation d'un orthophotoplan sur une partie de la zone prospectée.

L'étude des clichés (visuelle et par digitalisation) (5) a été confiée en 1982 à l'E.U.D.I.L. par la société Eau et Force et le S.I.D.E.N. aidés financièrement par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie.

### 1) Digitalisation et traitements sur unité de visualisation

L'étude d'un cliché repose sur une phase d'observation visuelle, et une autre de digitalisation réalisée au Centre de Dépouillement et de Synthèse des Images d'Orsay (C.D.S.I.) puis une phase de traitement sur une unité de visualisation d'images numérisées (Laboratoire de Physique Atmosphérique de Lille). Le détail en est donné dans le compte rendu de recherche (5).

### 2) Principaux résultats de cette étude

#### a) Cuvettes et effondrements

Dans le secteur d'étude, des effondrements avaient été reconnus sur le terrain (commune de Limont-Fontaine par exemple).

Les clichés en infrarouge couleurs ont permis la mise en évidence, par observation directe des clichés, de certains effondrements ; ils sont souvent caractérisés par des dépressions subcirculaires. Deux familles ont été reconnues : les cuvettes remplies d'eau (sombres en I.R.) et les effondrements laissant passer l'eau (clairs en I.R.).

#### b) Anciennes carrières ou ouvrages militaires transformés en décharges

Certains anciens ouvrages, ou d'anciennes carrières aujourd'hui transformées en décharges apparaissent nettement sur les clichés. Ils se caractérisent généralement par un contraste de couleur en fonction du type de végétation mais aussi de la teneur en eau. Le fort du Bourdiau, implanté sur la commune de Ferrière, est un exemple intéressant.

#### c) Linéaments

A la suite de J.P. Scanvic (journée G.T.D.A., 1978) nous retenons comme « linéament, une ligne significative du paysage qui peut révéler l'architecture cachée du soubassement géologique. Ce n'est pas seulement une faille, une fracture, mais aussi une limite géologique linéaire, un alignement de plus, un trait marquant le comportement différent d'une même roche ».

#### — Digitalisation

Il s'agit d'une opération qui consiste à transformer un document en un ensemble de chiffres. Pour être digitalisable, un document doit donc être transparent, ce sont les positifs de la campagne I.R.C. qui furent utilisés. Au terme de la digitalisation le document est numérisé et les données sont enregistrées sur bande magnétique.

#### — Visualisation des images numérisées

Les images numérisées furent étudiées sur une unité de visualisation et de traitement en couleur d'images numériques (Périor) permettant, à l'époque, la visualisation d'images de 256×256 pixels.

Cette quantité d'informations à traiter nécessite d'orienter l'étude sur des zones particulières.

Contrastes, histogrammes, convolutions et lissages sont ensuite envisagés.

#### — Application

La nécessité de limiter matériellement le traitement de digitalisation et visualisation à des zones de petite surface nous a conduits à faire un essai sur un secteur réputé concerné par une faille affectant le Viséen (6) et (7).

Le secteur retenu pour l'étude est constitué par un rectangle de 480 mètres d'Est en Ouest et de 360 mètres du Nord au Sud localisé immédiatement au Nord des anciennes carrières Boschetti à Bachant. La ou les failles de l'Horipette (6) (7) devai(en)t affecter cette parcelle.

Aucun contraste coloré n'a permis la mise en évidence d'un ou plusieurs linéaments attribuables à une ou plusieurs discontinuités tectoniques. Les seuls contrastes s'expliqueraient par l'effet d'anciennes limites parcellaires.

Les études structurales réalisées pendant la même période (8) tendraient d'ailleurs à infirmer la présence de failles dans le secteur étudié. Cette nouvelle interprétation a été confirmée depuis (9).

Si le choix du secteur d'étude n'avait pas été judicieux, il nous permettait cependant de conclure que l'importance du travail nécessaire au traitement d'une très petite surface du cliché (temps et coût du calcul) était disproportionné avec l'enjeu recherché. Aussi, ce premier essai nous a conduit à envisager l'élargissement des reconnaissances à des secteurs géographiques beaucoup plus vastes.

### III. — CLICHÉS SATELLITAIRES

#### 1) Spacelab

L'étude, réalisée dans le cadre d'une convention de recherche entre l'E.U.D.I.L. et l'I.G.N. (10) et (11) intéresse l'ensemble de la région. Elle est ensuite focalisée sur l'arrondissement de Cambrai. Les clichés Spacelab n<sup>os</sup> 277 et 278 réalisés par la navette spatiale le 2 décembre 1983 ont permis :

— une première approche des types d'occupation du sol (grandes cultures, agglomérations, zones industrielles, forêts, pâtures),

— l'établissement d'une nouvelle carte de linéaments (après élimination des artéfacts). Les résultats obtenus, comparés à la carte sismo-tectonique au 1/500 000<sup>e</sup> et aux cartes géologiques au 1/50 000<sup>e</sup> démontrent une complémentarité de ces linéaments.

#### 2) Spot

Un cliché Spot fut réalisé à notre demande (E.U.D.I.L.) le 1<sup>er</sup> février 1987 (13).

L'orbite, à 832 km d'altitude est héliosynchrone. Le mode multispectral permet une observation dans 3 bandes de fréquence : 500 à 590 nm, 610 à 680 nm et 790 à 890 nm.

Les données Spot sont disponibles sur 3 supports.

Nous avons opté pour un prétraitement de niveau 2 qui autorise les corrections radiométriques et géométriques par points d'appui. Le cliché est redressé et superposable à la projection de Lambert (zone 1).

La prise de vue réf. (K : 41, J = 248,321) concerne un quadrilatère centré sur Valenciennes dont les sommets sont : Lille au Nord-Ouest, Soignies au Nord-Est, Avesnes-sur-Helpe au Sud-Est et Bapaume au Sud-Ouest.

Si le cliché Spot apporte un maximum d'informations sur l'occupation du sol, il permet aussi de définir quelques linéaments qui, joints à ceux déduits de l'examen du cliché spacelab, apportent de nouvelles informations interprétables comme des fracturations d'assises proches de la surface.

En effet, ces linéaments ne correspondent pour la plupart à aucune discontinuité tectonique déjà reconnue par les auteurs (cartes géologiques, tectoniques, géophysique, documents divers).

### IV. — PROSPECTION GÉOPHYSIQUE

#### 1) Formations givésiennes et couviniennes de l'Avesnois

Deux études furent réalisées successivement (14) et (15).

Elles avaient toutes les deux pour but de mieux cerner les capacités aquifères du Couvinien et de marquer la limite sous recouvrement entre Couvinien et Givésien d'une bande comprise entre Wignehies et Wallers-Trélon.

L'ampleur des zones à prospecter et l'absence de renseignements émanant de traitement des documents satellitaires avaient conduit (14) à focaliser les premiers essais sur trois secteurs situés sur les communes d'Honain, Trélon et Wignehies.

L'association des mesures électriques et sismiques nous permet de distinguer :

— les secteurs prospectés sur la commune d'Honain et sur une partie de celle de Trélon qui paraissent exempts de fractures et donc de présence d'eau,

— le secteur des "Haies de Trélon" fracturé seulement à proximité du sondage de reconnaissance P<sub>4</sub> préalablement réalisé par le Laboratoire de l'Equipement à la demande du B.R.G.M.,

— le secteur prospecté de Wignehies paraissant à la fois fracturé et aquifère (chute de résistivité) mais sans doute à profondeur moindre.

La prospection réalisée à Wallers-Trélon (15) a bénéficié des études effectuées sur les documents de Spacelab (11).

En outre, ouverte en 1973 dans les calcaires givésiens, la carrière C.C.M. constitue pour les géologues, dans une région fortement couverte, une zone d'observations et de mesures qui permettait à J. Leplat (communication personnelle) de distinguer 3 grandes familles de fractures (165 à 190° N, 40 à 60°, 75 à 90°).

43 tirs sismiques et 11 sondages électriques ont permis (figure 2) :

— de localiser avec précision des failles de direction 350° N - 180° N et 40° N (déjà observée en carrière),

— de suivre sous la couverture la fracture 180° N fortement aquifère dans la carrière de la C.C.M.,

— de retrouver la faille de direction 263° N sur laquelle semble implanté en Belgique le captage du Moulin de Bourges,

— de marquer assez précisément la limite des deux formations (givésienne et couvinienne) grâce au contraste de vitesse et de résistivité.

#### 2) Formations du Dogger et du Malm dans le Boulonnais

Une étude fut réalisée sur les formations du Dogger et du Malm à l'Ouest de Colembert (16). Comme les précédentes (14, 15), elle avait pour but d'identifier les formations fran-

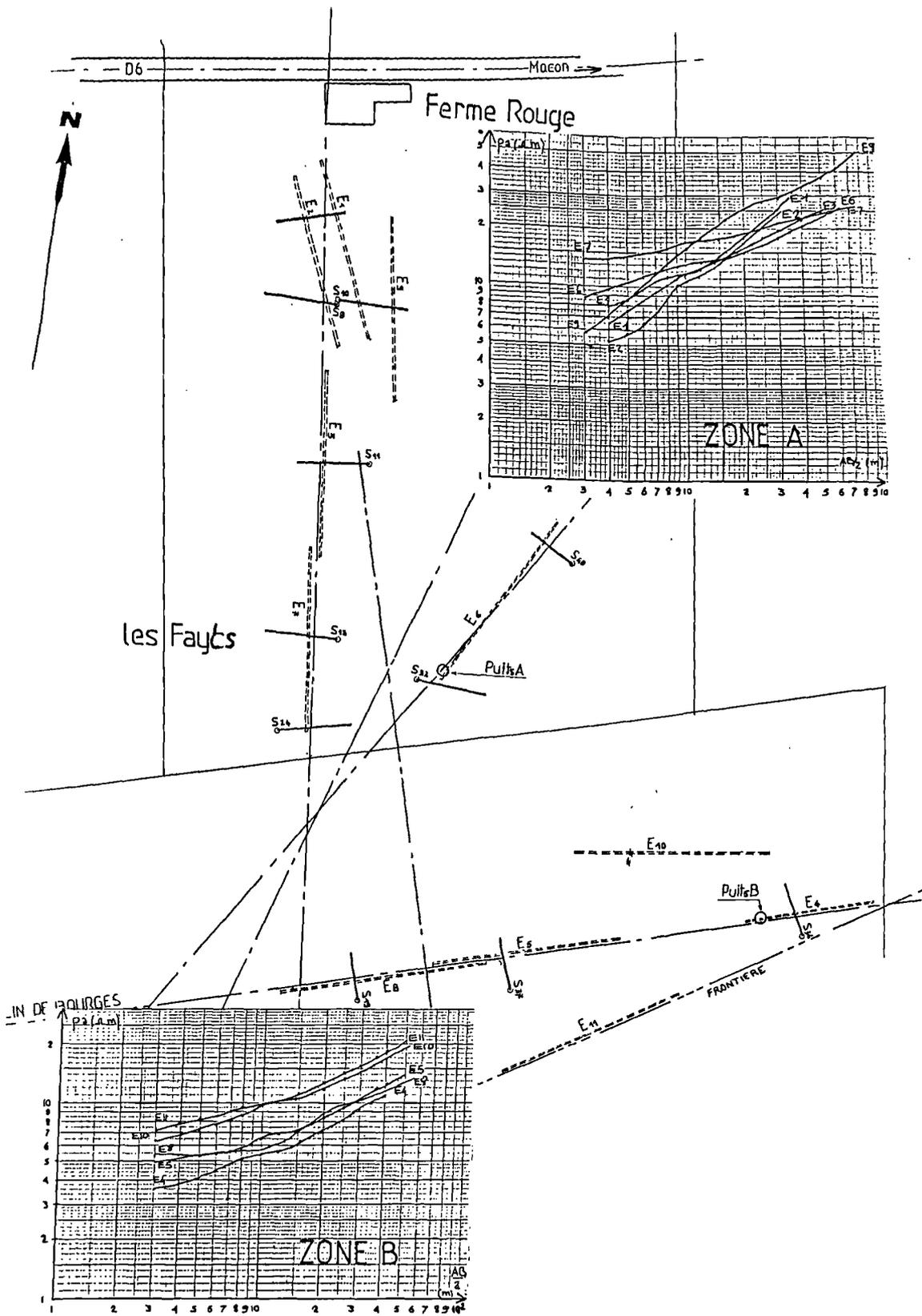


Fig. 2. — Résultats des prospectives en sismique réfraction et en géorésistivité près de Wallers-Trélon.

Fig. 2. — Seismic Refraction and georesistivity results around Wallers-Trélon.

chement calcaires, en particulier bathoniennes et séquanien-nes, et d'évaluer l'épaisseur du recouvrement limoneux, col-luvionnaire ou argileux.

En outre, cette recherche devait localiser avec la plus grande précision possible, les failles et diaclases affectant ces formations calcaires et permettant d'éventuelles circulations d'eau souterraine. Etalonnés d'après le log d'un sondage pétrolier voisin, les résultats de petite sismique couplés à ceux de la prospection électrique ont autorisé la localisation pré-cise de la fracturation et l'évaluation du degré d'altération des calcaires bathoniens.

### 3) Formations crayeuses à la limite Avesnois-Cambrésis

Trois études furent réalisées (17 à 19) dans un secteur où le biseautage et quelquefois la disparition des assises crayeuses sur le vieux socle primaire affecté de failles rendent difficile la localisation des secteurs aquifères. Le détail est présenté dans un autre article des actes de ce colloque (20).

## V. — MISSION AÉROPORTÉE SPÉCIFIQUE A MOYENNE ÉCHELLE SUR SITE

### 1) Définition et intérêt de l'infrarouge en photographie

Le rayonnement électromagnétique peut être décomposé en deux spectres, l'un visible (400 à 700 nm), l'autre pas. A chaque extrémité du spectre visible existent des radiations invisibles : ultra-violet (10 à 400 nm) et infrarouge (700 nm à 1 mm). Seules ces dernières sont détectables sur émulsions photographiques sous réserve de se limiter à des longueurs d'ondes inférieures à 900 nm, c'est-à-dire au proche infrarouge.

La photographie infrarouge, contrairement à la photogra-phie noir et blanc classique, n'enregistre donc pas la réflexion de radiations lumineuses, mais bien l'absence de radiations dans une gamme précise de longueurs d'ondes.

Aussi, le spectre réfléchi et enregistré sur la pellicule met en valeur le contraste entre les corps réfléchissant ce rayonnement et ceux qui l'absorbent : ces derniers apparaissent donc sombres, comme par exemple l'eau.

### 2) Choix de l'infrarouge noir et blanc

Si l'infrarouge, absorbé par l'eau, présente un intérêt en hydrologie, un choix était possible entre deux émulsions :

- émulsion infrarouge noir et blanc,
- émulsion infrarouge couleur ou fausse couleur.

Notre choix s'est porté sur la première car sa sensibilité culmine aux environs de 800 nm, ce qui rend son utilisation particulièrement intéressante puisque cette valeur correspond au maximum de réflectance des sols et végétaux. La seconde émulsion rend l'interprétation relativement délicate car le rendu des couleurs est faussé par rapport à la réalité. Pour

l'essentiel, les contraintes techniques d'approvisionnement et de développement nous ont conduits actuellement à l'utilisa-tion exclusive de pellicules infrarouges noir et blanc.

### 3) Premiers résultats obtenus

Nous ne détaillerons pas ici les considérations techniques sur les filtres, l'organisation des levés photographiques, le chargement de l'appareil, la sensibilité choisie, la netteté, mais nous nous contenterons de signaler que ces différents points ont fait l'objet d'une attention particulière de la part des auteurs.

### 4) Analyse des traces claires

Nous avons souligné précédemment que les photographies infrarouges permettent de distinguer la présence ou l'absence d'eau de surface. Un contraste sombre caractérise générale-ment la présence d'eau, alors qu'au contraire un contraste clair témoigne de son absence.

En première approximation, les traces claires observées en secteur crayeux sur les nombreux clichés réalisés à la limite Avesnois-Cambrésis (21, 22) ou dans l'Audomarois, ont été assimilées à des secteurs mieux drainés. Elles pourraient, par exemple, caractériser des zones où la craie fortement altérée ou fracturée conduit à un essorage plus rapide des limons sus-jacents.

Cette interprétation semble confirmée dans la région de Jolimetz et de Gommegnies par les profils géorésistifs réa-lisés perpendiculairement à l'axe de la trace et conforme aux hypothèses de travail formulées (fig. 2).

### 5) Analyse des traces sombres

Les essais infrarouges conduisant à ce genre d'observa-tion sont essentiellement effectués dans un secteur de l'Audo-marais (Ecques, Herbelles, Marthes) souvent curvilignes et en plus ou moins forte coïncidence avec les limites tertiaires ou de limons ; ces traces sombres pourraient caractériser, après une intense période pluvieuse, des niveaux présentant des teneurs en eau plus élevées : contact sables d'Ostricourt / argiles de Louvil, par exemple.

## VI. — MODÉLISATION DES BASSINS VERSANTS SUPERFICIELS, CHOIX DU TYPE ET DU NIVEAU D'ÉPURATION OU DE TRAITEMENT

La modélisation mathématique des bassins versants super-ficiels est aujourd'hui couramment utilisée par les assainis-seurs. Le Ministère de l'Équipement (Service Technique de l'Urbanisme) conseille l'utilisation de logiciels R.E.R.A.M. et T.E.R.E.S.A. qui sont facilement implantables sur les micro-ordinateurs compatibles P.C. possédant un disque dur.

De nombreuses applications régionales sont actuellement réalisées. Si, pour l'essentiel, leur objectif est quantitatif (23 et études en cours), la prise en compte de données qualitati-ves sur les effluents rejetés conduit à prévoir les flux spéci-fiques et diffus de pollution et à dimensionner correctement les unités de traitement (24, 25).

## CONCLUSION

Cette approche par les moyens traditionnels de la géophysique appuyés sur ceux des campagnes aéroportées et satellitaires nous permet aujourd'hui de compléter certains levés géologiques.

Les linéaments peuvent être, dans certains cas, des reflets en surface d'accidents tectoniques, de fissurations ou d'altération de la roche. En outre, les reconnaissances entreprises autorisent actuellement une meilleure localisation des anciennes décharges et de certaines zones d'effondrements.

Cette approche régionale nouvelle, si elle ne dispense pas des mesures et essais hydrauliques, permet parfois de mieux localiser ces essais, qu'il s'agisse de tester des aquifères dans des secteurs tectoniquement complexes ou de mieux localiser la réinfiltration des eaux provenant de stations d'épuration.

Au total, même si les essais aéroportés doivent encore être testés plus précisément sur différents types de formations géologiques, on peut s'attendre à ce qu'accompagnés de reconnaissances géophysiques, ils participent à une meilleure implantation des captages d'eau potable, et à un meilleur choix de la localisation des rejets et des niveaux de traitement des eaux usées ou pluviales afin de maintenir la qualité du milieu récepteur.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1) MAILLOT H., NOUALI S. et TRIPLET B. (1981). — Prospection géophysique appliquée à la reconnaissance d'un contact faillé entre le Crétacé supérieur et le Tertiaire (Est de Lille, Nord de la France). *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. CI, pp. 123-132.
- 2) BERTRAND Y. (1967). — La prospection électrique appliquée aux problèmes des Ponts et Chaussées. *Bull. liaison Lab. routier*, n° spécial, I, 172 p.
- 3) LAFARGUES P. (1957). — Prospection électrique par courants continus. Massin édit., Paris, 290 p.
- 4) ASTIER J.L. (1971). — Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Masson édit., Paris, 278 p.
- 5) DECRUYENAERE A. et WEPPEB B. (1983). — Numérisation de photographies aériennes, application au Synclinal de Bachant - Ferrière-la-Petite, projet de fin d'études E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 72 p.
- 6) WATERLOT G. (1969). — Carte géologique à 1/50 000<sup>e</sup> d'Avesnes-sur-Helpe.
- 7) KARPOFF (1981). — Communication personnelle et rapport confidentiel S.A.F.E.G.E.
- 8) CARLIER E. (1983). Influence de la fracturation sur le comportement hydrodynamique et hydrodispensif des calcaires paléozoïques de l'Avesnois (Nord). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle Université Lille I, 224 p.
- 9) KHATIR A. - Communication personnelle.
- 10) PREAUX C. (1984). — Application de l'étude de deux clichés de Spacelab (01-277-07 et 01-278-07) à l'hydrogéologie de la région Nord - Pas-de-Calais. Résultats préliminaires. Compte rendu d'activité, *Bull. I.G.N.*, 19 p.
- 11) PREAUX C. (1985). — Etude linéamentaire de l'arrondissement de Cambrai en vue d'applications hydrogéologiques à partir d'une image Spacelab (01-277-07) agrandie au 1/100 000<sup>e</sup>. Compte rendu d'activité, *Bull. I.G.N.*, 8 p., 1 carte.
- 12) MAILLOT H., DECRUYENAERE A. et WEPPEB B. (1983). — Essais de numérisation de photographies aériennes, Synclinal de Bachant, Avesnois (Nord de la France). Compte rendu de contrat de recherche A.E.A.P. - E.U.D.I.L. Vol. ronéot., 52 p.
- 13) MAILLOT H., PREAUX C., BOURGAIN J.M., DE GOYON A., SZYJKA P., CUENIN J.L. et DUPONT G. (1988). — Recherche régionale sur la mise au point de mesures géophysiques et son application à l'hydrogéologie et à l'assainissement. Compte rendu de contrat de recherche Ministère de l'Environnement-S.I.D.E.N.-A.E.A.P.-E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 320 p.
- 14) BARBRY J.H. et LE GUINER H. (1985). — Prospection géophysique appliquée à la recherche d'aquifères dans la région d'Avesnes. Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 58 p.
- 15) COLLARD-BREDILLON G. et DIDIER B. (1986). — Prospection géophysique appliquée à la recherche de fractures en Avesnois. Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 100 p.
- 16) BARTOLI M. et CLERC F. (1985). — Géophysique appliquée à la recherche d'aquifères dans le Boulonnais. Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 93 p.
- 17) DE GOYON A. et SZYJKA P. (1986). — Prospection géophysique appliquée à la recherche d'aquifères à la limite Cambrésis-Avesnois (Phase I). Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 48 p.
- 18) CUENIN J.L. et DUPONT G. (1987). — Prospection géophysique appliquée à la recherche d'aquifères à la limite Cambrésis-Avesnois (Phase II). Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 67 p.
- 19) DE VRIENDT C. et VAUTRIN L. (1988). — Prospection géophysique appliquée à la recherche d'aquifères dans la région du Quesnoy. Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 73 p.
- 20) CAULIER P., MAILLOT H. et PREAUX C. (ce colloque). — Application de la photogéologie et de la géophysique à la recherche de ressources en eau dans la craie à la limite Avesnois-Cambrésis.
- 21) BOURGAIN J.M. (1987). — Exploitation de documents adaptés à une prospection hydrogéologique (photographie aérienne, logiciel pour bloc-diagramme, photographie satellitaire Spot). Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 35 p.

- 22) GRANDPERRIN C. et LAMANDIN P. (1988). — Intérêt des photographies aériennes pour la recherche géologique en Avesnois et Audomarois. Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 44 p.
- 23) COLLART et LEROY (1988). — Etude du réseau d'assainissement. Bassin de Cohem-Maufait. Projet de fin d'étude E.U.D.I.L., Vol. ronéot., 127 p.
- 24) S.T.U., Ministère de l'Urbanisme et du Logement (1983). — Méthodologie de dépouillement de concours de stations d'épuration. Edit. Equip<sup>t</sup> Urbain, C.E.T.E. Méditerranée, 135 p.
- 25) S.T.U. Ministère de l'Urbanisme et du Logement (1985). — Assainissement autonome, eaux usées, eaux pluviales, éléments pour un bilan technico-économique. Edit. Equip<sup>t</sup> Urbain, 110 p.

## Exploitation d'eau souterraine potable dans la nappe de la craie en position captive dans le Nord - Pas-de-Calais

### Drinking water exploitation in captive chalk aquifer in Northern of France

par D. BERNARD (\*) et P. CAULIER (\*\*)

*Résumé.* — Dans le Bassin Artois-Picardie, 75 % de l'eau potable provient de la nappe de la craie. Cet aquifère est très souvent sans protection naturelle, sauf dans une zone de près de cinq kilomètres de large s'étendant de Calais à Valenciennes, où existe un recouvrement argileux. Dans cette zone, la fissuration tectonique et les facultés d'autoépuration du milieu par dénitrification biologique naturelle permettent de considérer la nappe captive de la craie comme un aquifère "réserve" pour l'alimentation en eau potable.

*Abstract.* — In Artois-Picardie Basin, 75 % of drinking water is groundwater from chalk aquifer. Often without natural protection, this aquifer is only protected by a clay cover in a region extended from Calais to Valenciennes, in a five kilometers strip wide.

*In this zone, tectonic fissuration makes the chalk aquifer producing and others characteristics like biologic autoepuration against nitrate pollution : Isotopics analysis of both  $^{14}N$  -  $^{15}N$  isotope detected such reactions in restricted oxygen zone and occurrence of carbon material.*

*This paper describes the main characteristics of the chalk aquifer in captive position, and why this aquifer must be now considered as a protected storage tank.*

Près de 75 % de l'eau exploitée dans le sous-sol à des fins d'alimentation en eau potable dans la Région Nord - Pas-de-Calais provient de la nappe de la craie. Le plus souvent en position libre sans recouvrement protecteur, la nappe est vulnérable, comme l'atteste souvent sa minéralisation excessive.

L'aquifère n'étant économiquement exploitable que dans les zones fissurées en fond de vallons ou de vallées, il y a souvent conflit entre les activités humaines de surface et l'exploitant d'eau : en effet l'exploitation d'eau potable s'accompagne de règles strictes d'occupation des sols qui sont parfois très mal comprises par les aménageurs, voire même des responsables de la distribution d'eau potable. Il s'agit donc de trouver des ressources en eau souterraine offrant un bon débit et une qualité d'eau conforme à la réglementation tout en limitant les servitudes, actuellement insupportables dans certains cas par les collectivités locales.

La craie du Séno-Turonien répond à ces caractéristiques dans une bande de quelques centaines de mètres de large s'étendant de Calais à Sainghin-en-Weppes, et de Lille à Valenciennes ; recouverte par le manteau argilo-sableux du tertiaire, sa fissuration est élevée et l'eau le plus souvent de bonne qualité (fig. 1).

Connue de longue date par les spécialistes du sous-sol cette ressource, déjà exploitée par de nombreuses collectivités, reste fragile sous la menace de surexploitation locale et du contexte défavorable en matière de pollution de la zone amont-nappe.

Nous allons donc examiner à la lumière des recherches hydrogéologiques récentes, quelles sont les questions restant en suspens pour bien connaître cet aquifère dont la "survie" en tant que réserve d'eau potable, a représenté 49 millions de m<sup>3</sup> d'eau exploités en 1986 sur le secteur Calais - Sainghin-en-Weppes.

(\*) Agence de l'Eau Artois-Picardie - Douai.

(\*\*) Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord (SIDEN) Wasquehal.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

Les éléments cités ci-après proviennent des nombreuses études menées avec l'aide financière de l'Agence de l'Eau, par le BRGM, SAFEGE, le SIDEN, pour le compte des collectivités locales ou des distributeurs d'eau concessionnaires et SIMECSOL, ARMINES pour le compte d'Eurotunnel.

## I.— PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE L'AQUIFÈRE

### 1) Bref historique

Avant l'exploitation par puits ou forages, la nappe de la craie, mise en pression sous l'argile, émergeait suivant une ligne continue de sources de débordement, sources dont le débit et la régularité ont suscité une activité cressicole intense. Les cressiculteurs ont alors découvert qu'en perçant la couche d'argile, la basse topographie du sol permettait à l'eau de jaillir à la surface (puits artésiens).

Par la suite, de nombreux ouvrages de pompages ont annulé l'artésianisme de la nappe, mais celle-ci restant la plupart du temps captive, l'eau a toujours été d'excellente qualité, même récemment alors que les analyses et les normes de qualité deviennent de plus en plus exhaustives et précises. C'est ainsi qu'actuellement, des champs captants importants exploitent l'eau potable pour les besoins de collectivités n'ayant pas de ressources proches disponibles (Guines pour Calais, Houlle pour Dunkerque, Aire-sur-la-Lys pour Hazebrouck, Salomé pour les Flandres intérieures).

### 2) Particularités du contexte naturel

La tectonisation et la structure géologique du secteur jouent un double rôle dans l'existence de l'aquifère et son environnement humain.

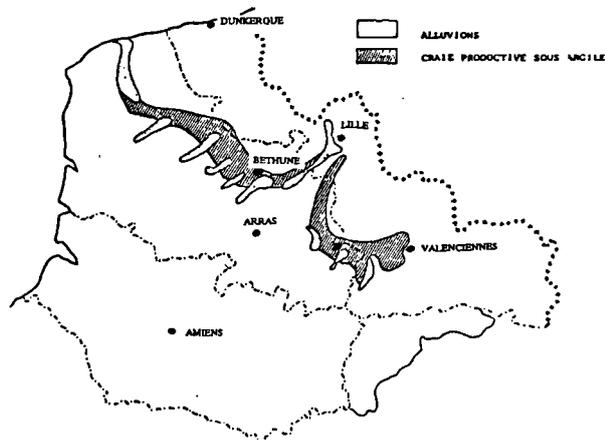


Fig. 1. — Nappe de la craie captive.

Fig. 1. — *Captive chalk aquifer zone.*

Ce sont en effet les plissements et les charriages d'âge hercynien et alpin qui ont induit la structure du Bassin Minier et donc l'activité industrielle qui en découle. Ce sont également les mouvements plus récents de même direction qui ont affecté la craie en la fissurant et en provoquant une structure en "graben" de la bordure Sud du Bassin de Mons. La conséquence de ces jeux et rejeux de failles en est le comblement de ce graben par les sédiments argilo-sableux du tertiaire, le rejeu continu et l'érosion faisant apparaître les collines crayeuses de l'Artois au Sud et la plaine de Flandre en contrebas au Nord.

On se trouve donc en présence d'un aquifère fissuré dont les diaclases se sont développées par dissolution lente de la craie par les eaux, et qui est protégé des infiltrations verticales par un recouvrement essentiellement argileux, mais dont la zone d'alimentation de la nappe se trouve souvent occupé par des aménagements peu compatibles avec la bonne qualité des eaux : le Bassin Minier du Pas-de-Calais, l'autoroute A 26, le canal d'Aire-sur-la-Lys, les activités industrielles de la zone de Saint-Omer.

Dès lors, deux problèmes se posent : comment éviter la minéralisation excessive de la nappe par cheminement latéral et éviter la surexploitation de la réserve avec les problèmes que cela comporte (arrêt de l'auto-épuration en écoulement libre, chute des niveaux dynamiques et nuisances d'exploitation).

Des éléments de réponse peuvent être apportés par des données récemment acquises de par les études citées au début de cet article.

## II. — LES DONNÉES RÉCENTES

### 1) Une structure faillée et fissurée

Il se confirme que l'aquifère est intensément fissuré, la zone de contact entre le pays argileux et la craie à l'affleurement se faisant par des accidents quasi verticaux en surface de direction W-NW E-SE c'est-à-dire parallèlement aux grands accidents affectant le Bassin Minier. Ces accidents ainsi qu'un faisceau de failles satellites de même direction constituent le réseau principal. Un réseau secondaire, orthogonal au premier, crée un véritable maillage dans lequel circule l'eau. L'orientation de ce réseau est en général repris en surface par des écoulements d'eau superficiels et des dépôts alluvionnaires importants, cette configuration se mettant en place à la faveur, semble-t-il, d'un rejeu actuel des contacts tectoniques et d'un effondrement lent de la Flandre (fig. 2).

A cette structure physique se surimpose l'action chimique de l'eau qui en attaquant progressivement la craie, agrandit les fissures, le phénomène diminuant d'intensité vers le Nord où la circulation de l'eau devient lente. Cette activité rend parfois l'eau très riche en bicarbonates, sa dureté imposant un traitement avant distribution (SIDEN à Salomé par exemple).

Comme nous l'avons précisé plus haut, le réseau fissuré continue probablement de bouger actuellement, provoquant de légers mouvements dans la topographie. Est-il possible de considérer ces mouvements comme des témoins d'une bonne fissuration et partant d'une bonne exploitabilité de la nappe ? Les prochaines recherches devraient nous apporter des éléments de conclusion sur ce sujet.

## 2) Un milieu physico-chimique particulier

La nappe en captivité n'est plus oxygénée et le milieu devient réducteur, provoquant en particulier la mise en solution du fer.

Récemment, il a été mis en évidence (2) que le fer pouvait provenir également de réactions de dénitrification utilisant la pyrite comme nutriment (réaction autotrophe). Cette forme de dénitrification est cependant mineure par rapport à la dénitrification hétérotrophe utilisant la matière organique comme nutriment et l'oxygène provenant des nitrates (fig. 3).

Les bactéries dénitrifiantes, fixées sur le substrat crayeux ont une activité dont on connaît mal la cinétique dans le milieu crayeux (vitesse de dénitrification, quantité de produits consommés en particulier).

Agissant dans des conditions particulières de potentiel Redox, dans un milieu semi-confiné, ces bactéries sont anaérobies facultatives et travaillent en "barrière de dénitrification" s'étendant au plus sur quelques mètres de large.

Un bon traceur naturel de ces réactions reste la composition isotopique de l'azote reprise sous la formulation :

$$\delta = [^{15}\text{N}] / [^{14}\text{N}] \text{ (en } \text{‰}\text{)}.$$

En effet, sous l'action bactérienne on constate un enrichissement en isotopes lourds de l'azote, les bactéries préférant "consommer" l'isotope léger  $^{14}\text{N}$  (1).

Lors du passage de la nappe en captivité, on constate donc un enrichissement en  $^{15}\text{N}$  avec une décroissance simultanée des nitrates (2).

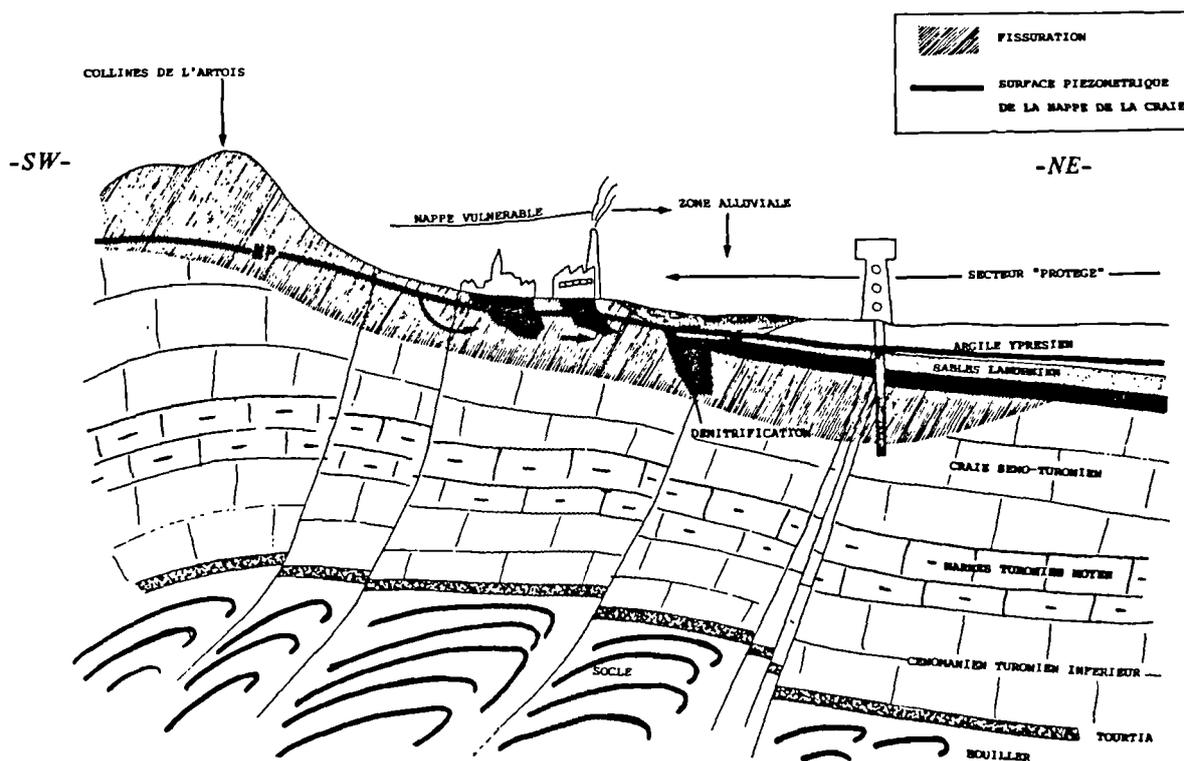


Fig. 2. — Coupe schématique SW-NE du contexte aquifère de la craie dans le Nord - Pas-de-Calais.

Fig. 2. — Schematic representation of chalk aquifer in Nord - Pas-de-Calais.

L'élément important de la dénitrification est donc l'existence de matières organiques naturellement présentes dans les alluvions tourbeuses se trouvant souvent, pour des raisons expliquées plus haut, à la limite des pays crayeux et argileux. C'est ainsi qu'à l'Ouest de Béthune où les alluvions sont absentes à la césure craie-argile, la dénitrification n'intervient

qu'à la hauteur de Chocques, alors que la mise en captivité de la nappe intervient quelques kilomètres en amont. On peut dire qu'il s'agit plutôt ici d'une dénitrification autotrophe, ce qui est corroboré par la présence de sulfates provenant de l'oxydation des sulfures contenus dans la craie (pyrites).

On note donc l'intérêt des petites vallées alluviales présentes dans tout ce secteur, et l'impact d'éléments, potentiellement polluant en nitrates, situés en dehors de ce contexte.

En ce qui concerne d'autres types de pollutions, de tels types de dégradation n'ont pas encore été mis en évidence, mais il n'est pas exclu que certaines molécules carbonées soient détruites selon des mécanismes similaires.

### CONCLUSION : Une réserve d'eau potable ?

Les caractéristiques qui viennent d'être énoncées laissent entrevoir que l'on dispose d'une excellente ressource en eau, qui plus est située à proximité du lieu de distribution d'eau potable. La logique impose donc de considérer cet aquifère comme un patrimoine qu'il convient de protéger contre les excès d'exploitation et de pollution.

Cette réflexion est confirmée quand on s'aperçoit des grandes difficultés qu'ont ou que vont avoir, certaines collectivités pour s'approvisionner en eau en répondant aux normes de qualité du décret du 3 janvier 1989, du fait de la dégradation de nombreux secteurs de la nappe de la craie.

Il importe donc que certaines précautions, à définir au cas par cas, soient prises en concertation avec les collectivités locales, afin que des efforts d'assainissement, de traitement des rejets nuisibles ou de fertilisation raisonnée soient pratiqués dans la zone d'alimentation de l'aquifère, au même titre que dans les périmètres de protection éloignée des captages d'eau potable. On pourrait par exemple apporter un soin particulier aux axes principaux de circulation de l'eau (type vallée de l'Aa, de l'Escrebieux).

Sans pouvoir dire que ces mesures soient définitives, il convient de s'assurer de ressources en eau de qualité pour le long terme, tout en essayant de limiter les mesures de réglementation autoritaire.

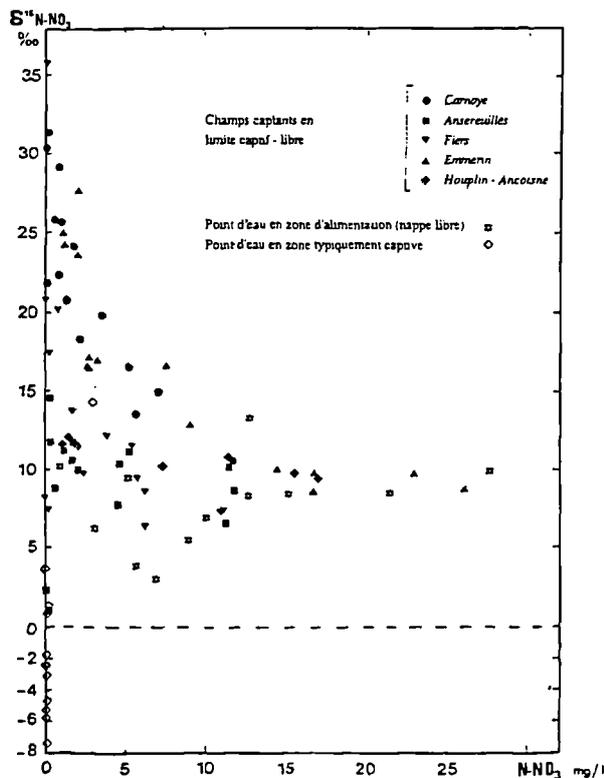


Fig. 3. — Composition isotopique des nitrates de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Thèse B. SIMON (1986).

Fig. 3. — Isotopic composition of nitrates from chalk aquifer in Northern of France.

### BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- 1) MARIOTTI A., HALIMA A. et BERGER G. (1976). — Apport de l'étude isotopique de l'azote à la connaissance de la pollution des aquifères souterrains par les nitrates en milieu agricole. *Rev. de géo. phys. et de géo. dyn.* (2), Vol. XVIII, fasc. 4, p. 97-107, Paris.
- 2) SIMON B. (1986). — Apport de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines. Thèse du 3<sup>e</sup> cycle. U. Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- 3) CAULIER P. et PREAUX C. (1983). — Recherches sur l'origine et le devenir des composés azotés détectés dans certains aquifères captifs. BRGM - Rapport inédit 83 NPC 38.

## Etude sommaire d'ouvrages de défense contre la mer de la baie de l'Authie

### Short study about shore protection in the Authie bay

par Thierry DUBREUCQ (\*)

*Sommaire.* — Cette étude s'inscrit dans le cadre de la protection du littoral en baie d'Authie. L'hydrodynamique sédimentaire dans l'estuaire et le fonctionnement des ouvrages de défense existants sont d'abord examinés. Suivent alors des éléments de solution visant à prévenir la plage et la dune au Sud de Berck d'une érosion encore trop agressive, comme le renforcement de l'action des ouvrages et la fixation de la dune.

*Abstract.* — *This report deals with the shore protection in the Authie bay. The sedimentary hydrodynamic in the estuary and the defense system working are examined in short. Then, some solutions are proposed to prevent this site from an erosion which still remains, by improving the real systems and by fixing the sand hills.*

#### I. — INTRODUCTION

L'estuaire de l'Authie, orienté ESE-WNW, partage la plaine picarde. L'estran sableux dans la baie d'Authie est très large par suite de la faible pente des fonds et du marnage important. Cette orientation ESE-WNW est liée au transport résultant des sédiments vers le Nord : la rive Sud progresse vers le Nord. A pleine mer, l'estuaire est entièrement rempli ; à basse mer, s'écoule l'Authie en un mince chenal.

La bordure littorale est constituée de dunes, parfois importantes sur la rive Sud de l'estuaire. La dune au Sud est dite d'accumulation, car le rivage s'avance vers le large. La dune au Nord est dite de remaniement, car les côtes reculent vers l'intérieur (2).

Les premiers ouvrages de protection du littoral en baie d'Authie remontent au XIX<sup>e</sup> siècle. Ils devaient déjà prévenir de l'érosion la rive Nord de l'estuaire. Certaines solutions dites définitives ont même été proposées au début des années soixante. Depuis 1970, d'autres ouvrages ont été établis sur la plage et devant la dune bordière au Sud de Berck. Cependant, les effets de l'érosion restent encore sensibles (fig. 1). Tels ont été les points examinés dans mon travail de fin d'études.

(\*) Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat.

Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement Nord - Picardie, Laboratoire Régional Nord - Pas-de-Calais, 42 bis, rue Marais, Sequedin, B.P. 99, 59482 Haubourdin Cedex.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

#### II. — LES FACTEURS HYDRODYNAMIQUES RESPONSABLES DE L'ÉROSION OU/ET DE LA SÉDIMENTATION

##### 1) Le facteur météorologique : les vents côtiers

Le vent est responsable de la formation des houles au large. Il agit par frottement à la surface de l'eau. Sur le littoral, le vent est aussi à l'origine de la formation des dunes. Il transporte les sables de plage vers l'intérieur des terres. Aussi, sa connaissance en direction et en intensité est-elle importante.

##### 2) Les facteurs océanographiques

###### a) La marée au large et dans la baie

Au large de l'estuaire, le courant de flot est orienté au Nord. A l'embouchure, s'amorce une rotation des courants lors du remplissage. Il en résulte un mouvement tourbillonnaire centré sur la pointe de Routhianville au Sud, dont la périphérie vient lécher la rive Nord entre la pointe du Haut Banc et la pointe de La Rochelle. Les matériaux arrachés à

cette rive iront se déposer au centre du mouvement, là où les vitesses sont moins importantes. Peu après la pleine mer, à la fin du remplissage ou du montant, débute la renverse des courants à l'intérieur de l'estuaire. Ils s'orientent progressivement au Nord-Ouest, c'est le perdant (fig.2).

b) *Les courants de marée généraux à la côte et dans l'estuaire*

Les courants de marée côtiers sont de même période que celle de la marée qui leur a donné naissance. En vive eau moyenne, le flot approche 1 m/s devant la baie d'Authie. Le jusant est légèrement plus faible. Les courants sont tournants avec la marée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Plus on remonte vers le Nord, plus ils deviennent alternatifs, la renverse se faisant par annulation des courants.

c) *La houle au large*

La houle a une grande importance sédimentologique. Elle est à l'origine du transit littoral, qui contribue à l'alimentation de la flèche sableuse pour une large part. Son effet est renforcé par les courants de marée généraux. Il faut savoir que dans le transport littoral par la houle, le débit moyen solide est proportionnel au cube de la hauteur sur la période. Enfin, il faut retenir que les houles moyennes (2 m) et fortes (5 m) ont toutes deux leur importance dans le transport litto-

ral. La première, plus fréquente, a une longue durée d'action. La deuxième est brève, mais intense, car elle remanie les fonds à grandes profondeurs.

III. — LES MOUVEMENTS DES SÉDIMENTS SUR LE SITE

Les mouvements sédimentaires induisent des érosions ou des engraisements ponctuels du milieu côtier. Les principaux facteurs de ces mouvements sont les courants de marée, et dans une moindre proportion la houle et le vent.

Les modes de transport des sédiments peuvent être la suspension, le charriage ou la saltation. Le fluide dans lequel évolue le sédiment peut être l'eau ou l'air. La suspension suppose une turbulence du fluide importante. Le charriage par roulement ou la saltation s'effectuent sur le site par suite de la collision des grains entre eux.

IV. — ÉTUDE DES OUVRAGES EXISTANTS

Les ouvrages réalisés depuis 1950 comme la digue submersible ou les épis transversaux sur le site, ne sont que des protections indirectes du rivage à l'exception des ouvrages au pied de la dune Nord, en planches et cailloux.

1) *L'incidence minime de la brèche dans la digue submersible dans le transport des sédiments*

Une brèche dans la digue submersible existe depuis 1979. Cette année correspond en effet à la fermeture de la plage devant la dune par la digue. On a créé ainsi un bassin de retenue à marée basse. Seulement, la pression de l'eau sur la digue devenue barrage, a fait exploser celle-ci dans sa partie centrale. Elle est colmatée désormais par un entassement de blocs de pierre (fig. 3).

Or, à partir de la vitesse critique de frottement nécessaire pour provoquer l'entraînement d'un sable de 0,25 mm représentatif du site, on peut déterminer la vitesse moyenne d'écoulement au-dessus des fonds pour laquelle les grains sont arrachés et mis en mouvement. En effet, d'après les graphiques

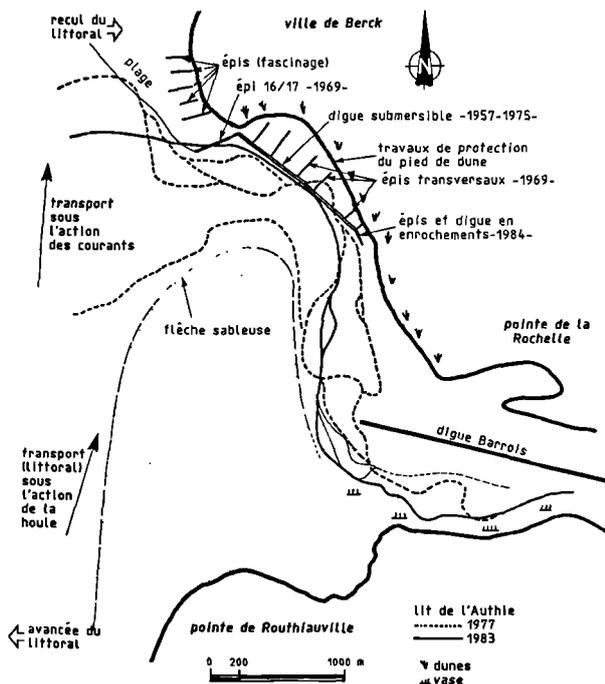


Fig. 1. — Evolution du lit de l'Authie  
Fig. 1. — Evolution of the Authie bottom

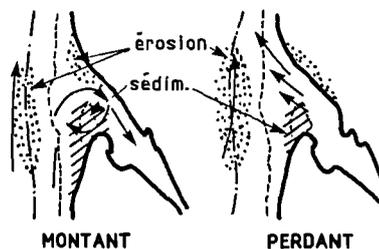


Fig. 2. — Tendances érosion - Sédimentation  
Fig. 2. — Erosion - sedimentation tendencies

de l'U.S. corp of engineers, la vitesse critique de frottement ( $u^*$ ) nécessaire pour provoquer l'entraînement des sables de 0,25 mm vaut :  $u^*_c = 1,8 \text{ cm/s}$  [fig. 3 ; (10)]. On peut rattacher cette valeur à la vitesse moyenne ( $U_c$ ) d'écoulement au-dessus des fonds ( $y = 15 \text{ cm}$ , ici) par :

$$\frac{U_c}{u^*} = 5,75 \log \frac{y u^*}{0,108 V} + 0,033 Kr$$

où  $V$  est la viscosité du fluide ( $1,15 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) et  $Kr$  le coefficient de rugosité des fonds (70).

Le calcul théorique donne alors une vitesse de l'ordre de 50 cm/s. Par ailleurs, les vitesses de courants enregistrées au niveau de la brèche n'excèdent pas 20 cm/s. On peut donc penser que ce colmatage sommaire suffit à retenir les sables en arrière de la digue malgré quelques départs possibles aux abords immédiats. De plus, un colmatage définitivement étanche en cet endroit provoquerait sans doute une autre brèche dans la digue un peu malade.

**2) La faible atténuation de la houle par la digue submersible**

En l'état actuel et dès le début de la submersion, la hauteur de la houle transmise derrière la digue est égale au mieux à la moitié de la hauteur de houle incidente. Au-delà d'une hauteur d'eau de 1,50 m au-dessus de l'ouvrage, l'atténuation est nulle d'après les abaques du S.T.C. (6) (fig. 4 et 5). Par ailleurs, la hauteur transmise ne commence à décroître que pour des hauteurs de houles incidentes supérieures à 1 m. Or, d'après nos observations, ces hauteurs sont rarement atteintes, même par vents forts de Sud-Ouest. La digue actuelle, lorsqu'elle est recouverte par la marée, atténue donc peu les houles à cause de sa cote d'aras trop basse. Elle ne prévient pas de l'agression du pied de dune par les houles. Elle serait plutôt un ouvrage de guidage de la rivière et de rétention des sables de la plage située en arrière.

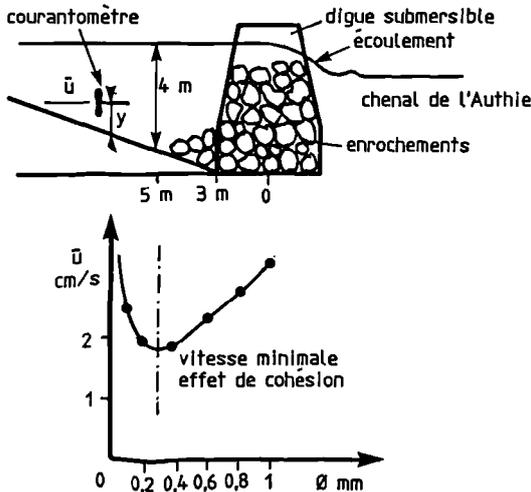


Fig. 3. — Ecoulement à travers la brèche  
Fig. 3. — Flow through the break

**V. — LE BILAN SÉDIMENTOLOGIQUE SUR LE SITE**

Grâce à des cartes bathymétriques et altimétriques du site levées avant et après construction des ouvrages, le bilan est certes toujours négatif, mais ils ont favorisé, d'une part, l'engraissement qui a presque quadruplé, et diminué, d'autre part, l'érosion de moitié dans certaines zones.

En raisonnant sur une unité sédimentologique, et en appréciant l'action des facteurs érosifs en intensité et en direction, on se rend compte que les courants de marée sont de loin les agents de transport les plus importants (fig. 6). Ils sont très érosifs notamment en pied de dune, aidés en cela par la houle.

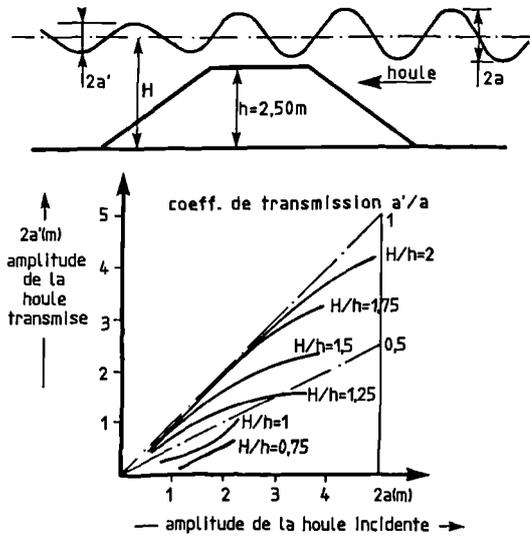


Fig. 4 et 5. — Transmission de la houle par une digue submersible  
Fig. 4 and 5. — Swell transmission by a submersible embankment

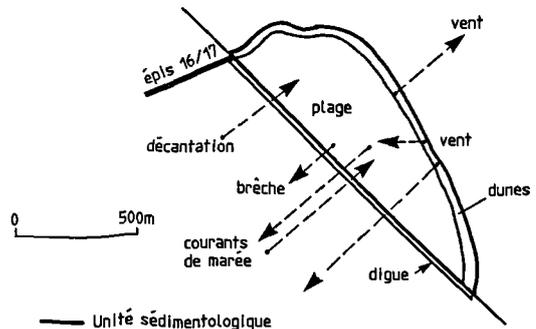


Fig. 6. — Bilan sédimentologique  
Fig. 6. — Sedimentary evaluation

Vient ensuite le vent qui contribue pour 10 % environ dans l'érosion globale. Il ne faut donc plus le négliger (tableau I). Le lecteur pourra se reporter à l'ouvrage cité dans l'introduction pour connaître les hypothèses et les méthodes de calcul retenues.

## VI. — LES RENFORCEMENTS DES PROTECTIONS EXISTANTES

### 1) La fixation de la dune

D'une manière générale, les sentiers d'accès à la plage et les brèches de la dune bordière sont autant de couloirs de déflation pour le vent, et fragilisent la dune. Il en va de même du profil de la dune qui a une incidence certaine sur la vitesse des vents la franchissant. Pour y remédier, on propose des protections surfaciques (plantation d'oyats, rideaux de fascines, filets) et des protections directes du pied de dune. Ces dernières protections consistent à poser des enrochements au bas de la dune sur toute sa longueur côté mer, et aussi à prolonger la partie supérieure des épis transversaux sur la plage avec le recul inexorable de la dune, afin qu'ils ne soient plus contournés par les courants de marée à haute mer.

### 2) Le décollement du chenal du pied de la digue par des épis

La protection directe de la dune doit s'accompagner d'une confortation de la digue existante. Cette digue souffre beaucoup des vitesses excessives de la rivière qui affouille son pied, comme en témoigne la destruction partielle de l'extrémité en palplanches. Il s'agit alors de repousser la rivière grâce à des épis implantés devant la digue. On escompte aussi une sédimentation entre ces épis de matériaux en suspension ou en transit sur les fonds, de manière à créer une zone d'atténuation des houles encore plus large.

## VII. — CONCLUSION

Toute compréhension des mécanismes et des lois qui régissent un estuaire comme l'Authie nécessite une bonne connaissance de l'hydrodynamique sédimentaire. Malgré cela, des erreurs sont possibles. On ne pourra jamais dire qu'un ouvrage de protection du rivage résoud de manière définitive le problème de l'érosion. Une fois réalisé, le milieu naturel évoluera vers un nouvel état d'équilibre dans un avenir plus ou moins lointain, mais il n'y aura pas d'état stationnaire. Constatant, les ouvrages de protection devront s'adapter.

BILAN en m <sup>3</sup> / an	VENT	HOULE + COURANTS DE MARÉE	SÉDIMENTATION PAR DÉCANTATION	ÉROSION CONSÉCUTIVE A LA BRÈCHE	TOTAUX D'APRÈS LES LEVÉES BATHYMÉTRIQUES
	— 4 900	— 43 290	+ 390	— 500	— 48 300

Tableau I. — Estimation du volume de sable déplacé sur le site dans le bilan érosion / sédimentation selon les agents de transport

## BIBLIOGRAPHIE

- 1) E.D.F. — Direction des Etudes et des Recherches (1967). — « Etude de la baie de l'Authie et les moyens de défense contre la mer », par R. BONNEFILLE et H. ALLEN, p. 26-45.
- 2) Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France (1986). — « Catalogue sédimentologique des Côtes Françaises ». Côtes de la Mer du Nord et de la Manche A. De la frontière belge à la baie de la Somme, 132 p.
- 3) Photographies aériennes de l'Institut Géographique National au 2000<sup>e</sup>. La Baie d'Authie : — 1977 clichés n<sup>os</sup> 160, 162, 229. — 1983 clichés n<sup>os</sup> 1769, 1875. — 1965 (échelle 1/25.000).
- 4) Schéma des ouvrages réalisés depuis le début du siècle (1982). — Service Technique Maritime de Boulogne.
- 5) Laboratoire Central d'Hydraulique de France - Note interne (1986). — « Transport des sables sous l'action des courants ». Application formule Engelund, 10 p.
- 6) Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Equipement, du Logement et du Tourisme - Service Technique Central - Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables (1974). — « Dignes submersibles », Compiègne, 12 p.
- 7) BERTHOIS L. (1975). — « Les roches sédimentaires ». Edition Doin, 1. Etude sédimentologique des roches meubles. Chap. I. — Les Sables, p. 123-149.
- 8) BONNEFILLE R. (1980). — « Cours d'hydraulique maritime ». Collection de l'Ecole Nationale des Techniques Avancées, 2<sup>e</sup> Edition, Masson, Paris, 171 p.
- 9) DESPEYROUX Y. (1985). — Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de la Canche. Thèse présentée à l'Université de Lille.
- 10) FILLIAT G. (1981). — « La pratique des sols et des fondations ». Edition du Moniteur, Paris. Chap. 16. — « Erosion et sédimentation en rivière », par MIGNIOT C.
- 11) LERIBAULT L. (1981). — « L'exoscopie des quartz ». Edition Masson. Chap. I. — Les principales méthodes d'étude morphologique des quartz détritiques.
- 12) PASKOFF R. (1985). — « Les littoraux : Impact des aménagements sur leur évolution » - Collection Géographie. Masson, Paris, 185 p.

## Stabilité et apports sédimentaires sur les bancs de Flandre

### Sediment stability and maintenance on the Flemish Banks

par G. De MOOR (\*) et J. LANCKNEUS (\*)

**Résumé.** — L'étude présente l'analyse d'une séquence de cartes de transits sédimentaires de la charge de fond sur un des Bancs de Flandre, le Kwintebank. Elle est basée sur des enregistrements successifs au sonar à balayage latéral au cours de la période 1982-88. Ces résultats sont comparés à une estimation de la tendance de changement des volumes unitaires le long d'une série de routes de référence recoupant transversalement le Kwintebank. Les estimations sont obtenues en appliquant une analyse de régression sur la série de volumes unitaires normalisés, calculés par site et déduits de profils bathymétriques enregistrés le long des routes de référence correspondantes, en utilisant une navigation et un positionnement de précision, et corrigés pour différents facteurs.

**Abstract.** — *The paper analyses a time series of maps of nett bed load transportation paths on one of the Flemish Banks, the Kwintebank. These maps are based on sequential side-scan sonar registrations taken during the period 1982-88. These results are compared with an assessment of the trend of the unit-volumetric changes for the same period along a series of reference transversals on the Kwintebank. These trends were obtained by accurate sailing, positioning and correcting a time series of bathymetric profiles along the transversals, by calculation of the corresponding unit-volumes and by application of regression analysis on each of the time series after normalization of the unit-volumetric data.*

#### I. — INTRODUCTION

Le plateau continental belge (fig. 1) comprend un ensemble de grands bancs de sable dont la longueur dépasse souvent 25 km et la largeur 1 à 3 km et dont la hauteur relative au-dessus des fonds environnants atteint 10 à 30 m. Ces bancs peuvent être groupés d'après leur orientation. C'est ainsi qu'on distingue les bancs côtiers, les Bancs de Flandre, les Hinderbanken et les Bancs de Zélande. Ils présentent des caractéristiques géomorphologiques assez semblables, notamment une asymétrie transversale et des déplacements latéraux, parfois associés à une inversion d'asymétrie. Ils sont couverts de champs de mégarides et de vagues de sable dont les caractéristiques diffèrent et varient, et qu'on retrouve d'ailleurs aussi dans les chenaux environnants (5).

Leur analyse et leur cartographie à diverses périodes sont importantes, surtout lorsqu'elles peuvent être liées à des conditions factorielles précises.

Les bancs se situent dans un milieu macrotidal à forts courants de marée. La vitesse de surface atteint jusqu'à 2 nœuds

lors des pointes de flot de vives eaux. Souvent ces bancs s'orientent légèrement en oblique par rapport à la direction des courants maximum.

Outre ces aspects morphologiques aux dimensions différentes, les bancs soulèvent deux questions principales.

D'une part, il y a le problème de leur genèse et de leur évolution géologique, et notamment la question du rôle des agents marins au cours de la remontée du niveau marin pendant l'Holocène, et celle de l'effet éventuel d'un héritage morphologique. Ce problème ne peut être résolu sans l'analyse des structures internes. Ainsi l'analyse montre que la face raide des Bancs de Flandre ne peut être considérée comme une surface de progradation résiduelle, ce qui est également important pour l'étude des processus actuels (3).

D'autre part, il y a le problème de la morpho-dynamique actuelle de ces corps sableux, c'est-à-dire celui de leur évolution, morphologique, altimétrique, volumétrique et positionnelle dans ce milieu hautement dynamique de courants de marée, de vagues et de houle. C'est également poser la question de leur stabilité et soulever le problème des processus de maintenance (4).

(\*) Université de Gand. Laboratoire de Géographie Physique. Renard Center of Marine Geology. Krijgslaan 281 - B-9000, Gent (Belgique).

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

Ce problème est fondamentalement lié à celui de la dynamique sédimentaire résiduelle actuelle. Dans un milieu où les variations dans la direction et dans l'intensité des déplacements sont très importantes et très fréquentes, et de plus accompagnées d'un classement continuellement changeant, c'est en premier lieu la dynamique résiduelle qui nous intéresse.

L'étude de cette dynamique résiduelle comprend deux aspects importants. D'une part, il y a celui du cheminement résiduel des sables (1) qui se fait essentiellement par déplacement de figures de courant. D'autre part, il y a celui de l'effet résiduel de ces déplacements de la charge de fond et éventuellement d'autres modes de transport sur la position, le volume et la morphologie des corps sédimentaires.

Ces deux aspects ont été étudiés sur le Kwintebank, en utilisant des campagnes répétées d'observation en mer étalées sur la période 1982-1988, en utilisant des techniques géomorphologiques. Les résultats ont été exprimés de façon cartographique et, au moins en partie, numérique. En vue d'une interprétation, l'élaboration des données a été axée sur une confrontation des résultats obtenus par les deux approches et sur l'évaluation des tendances d'évolution à courte durée le long d'un banc.

Le Kwintebank est un des Bancs de Flandre dont l'axe est orienté du SSO au NNE. Il se situe à une quarantaine de kilomètres au large de la côte. Vers l'ouest il domine le che-

nal du Kwinte avec une pente assez raide (5 à 7 %), vers l'est celui du Negenvaam avec une pente plus faible (2 à 3 %). Le Negenvaam a une profondeur moyenne de 15 m tandis que dans le Kwinte la profondeur atteint 25 m. Dans le Negenvaam le fond remonte plus nettement en direction de la côte. Le Kwintebank montre une subdivision morphologique en trois parties. En plus il présente tous les aspects morphologiques classiques des bancs de la Mer du Nord Méridionale. Les sédiments superficiels sont des sables moyens (moyenne granulométrique entre 325 et 403  $\mu\text{m}$ ) sur la partie nord-ouest et des sables plus fins (moyenne entre 186 et 233  $\mu\text{m}$ ) sur la partie sud-est. Une différenciation granulométrique se manifeste également entre le Kwinte et le Negenvaam (3).

## II. — LE TRANSIT SÉDIMENTAIRE RÉSIDUEL DE LA CHARGE DE FOND

L'étude des transits sédimentaires (fig. 2) a été basée sur la cartographie des formes de courant, plus spécialement les mégarides, et sur leurs caractéristiques géomorphologiques représentatives du cheminement résiduel de la charge de fond, notamment leur polarité et l'orientation des crêtes (6).

La cartographie a été faite à partir d'enregistrements au sonar à balayage latéral Klein (8) réalisés au cours de missions en mai 1983, en novembre 1986 et en novembre 1987 le long d'une série de mêmes routes de référence situées à 1 mille de distance et parcourues à une vitesse de 4 nœuds. Simultanément des profils bathymétriques ont été enregistrés à l'aide d'un échosondeur hydrographique Krupp Deso XX.

Vu la qualité des sonogrammes un modèle des transits sédimentaires a d'abord été établi à partir des enregistrements de novembre 1986 (10). Puis les résultats des enregistrements de novembre 1987 et de mai 1983 ont été comparés à ce modèle.

Des enregistrements en fonction des cycles de marée sont actuellement en cours.

### 1) Evolution des transits sédimentaires sur le Kwintebank

#### a) Structures sédimentaires en novembre 1986

Les sonogrammes de novembre 1986 montrent des vagues de sable qui s'étendent en champs bien définis sur les flancs et sur le sommet du banc. Elles ont une longueur de plusieurs centaines de mètres, une largeur de plusieurs dizaines de mètres, et une hauteur qui peut atteindre 8 mètres. La longueur d'onde varie entre 70 et 200 m en relation avec la hauteur des structures. Les vagues de sable ne s'observent ni dans la partie centrale du banc ni dans les chenaux adjacents, à l'exception de quelques structures en forme de barkhane.

Sur la partie septentrionale du Kwintebank la direction des crêtes de sable varie entre N10°O et N5°O, c'est-à-dire qu'elles se trouvent légèrement obliques à l'axe du banc, orienté vers le N30°E alors que le courant de pointe de flot est orienté vers le N74°E. Sur la partie centrale et méridionale, ces crêtes sont parallèles à l'axe du banc.

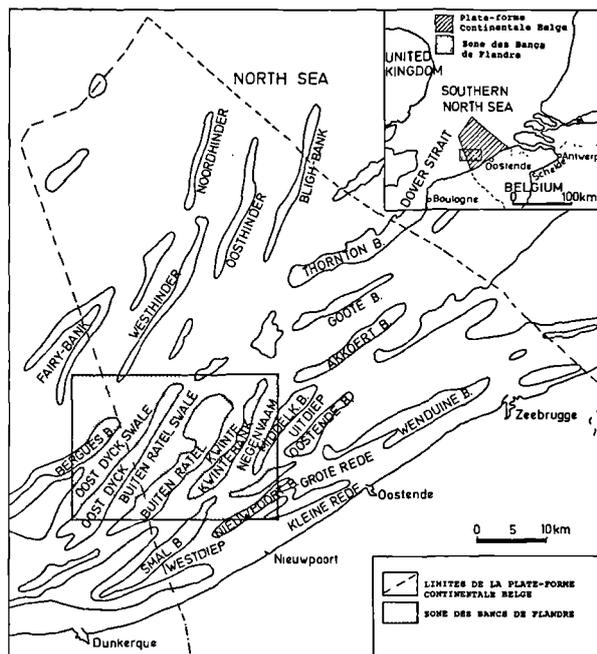


Fig. 1. — La plate-forme continentale belge.

Fig. 1. — The Belgian Continental Platform.

Les vagues de sable sont le plus souvent asymétriques. Sur la partie septentrionale du Kwintebank elles ont leur face raide exposée à l'est. Sur la partie méridionale, moins profonde, ces faces raides sont le plus souvent exposées à l'est sur le côté occidental et à l'ouest sur le côté oriental du banc. Des deux côtés du sommet on rencontre également quelques figures symétriques entre ces structures asymétriques.

D'autre part, des mégarides couvrent aussi bien les faces raides que les faces faiblement inclinées des vagues de sable. On les retrouve également dans les chenaux environnants. Dans les chenaux les mégarides sont principalement orientées du NO au SE. La polarité des mégarides longeant le pied du banc est toutefois opposée dans deux chenaux adjacents ainsi que sur les deux flancs du banc même. Dans le chenal

Kwinte, leur flanc raide est tourné vers le NE, faisant face au large, alors que dans le chenal Negenvaam, ces flancs sont exposés au SO en faisant face à la côte. Vers le haut des flancs du banc, les mégarides subissent une rotation et s'orientent parallèlement à l'axe du banc.

Les caractéristiques géométriques de ces diverses structures fournissent des indications sur le cheminement résiduel de la charge de fond. Une telle analyse peut être faite en s'appuyant soit sur les vagues de sable, soit sur les mégarides (12). Nous avons préféré utiliser les mégarides. En effet, les sonogrammes montrent une orientation de leurs crêtes perpendiculaire à la direction du courant de pointe de flot en surface, direction définie par le Service Hydrographique de la Côte (Hydrografische Kaart Vlaamse Banken). De plus, des sonogrammes couvrant des périodes d'inversion de marée montrent que la direction et la polarité des mégarides sont conservées.

Les résultats (fig. 3) suggèrent une accumulation de sable sur le banc à partir des chenaux adjacents. Les sédiments mus longitudinalement par un courant résiduel de flot d'un côté et de jusant de l'autre côté du banc, paraissent déportés au pied du banc pour remonter ses flancs des deux côtés.

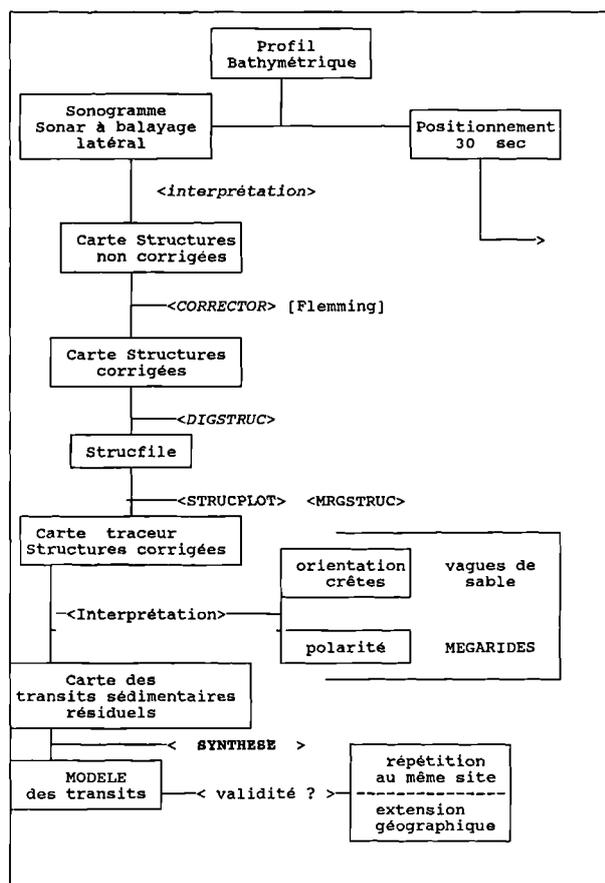


Fig. 2. — Organigramme du traitement des données des transits sédimentaires résiduels.

Fig. 2. — Flow chart of sediment transport paths processing.

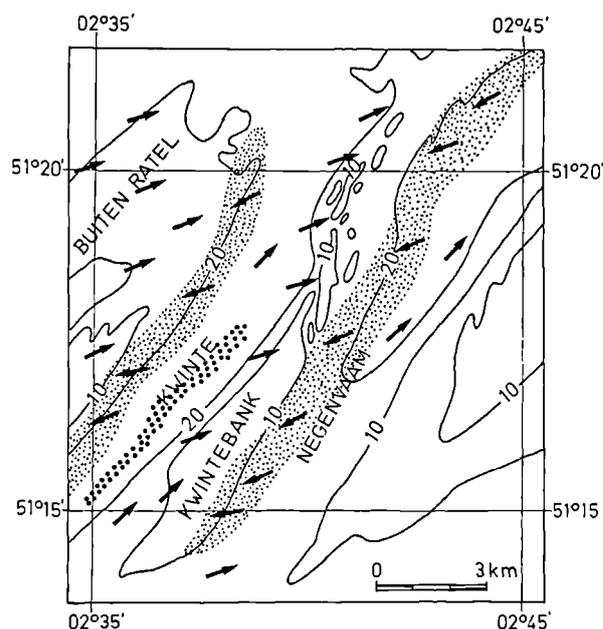


Fig. 3. — Dynamique sédimentaire résiduelle sur le Kwintebank en novembre 1986. Les flèches indiquent les directions du transport résiduel de sable (légende complémentaire : voir figure 6).

Fig. 3. — Residual sediment dynamics on the Kwintebank in November 1986. The arrows indicate the direction of residual sand transport (additional legend : see figure 6).

b) Structures sédimentaires en novembre 1987

La comparaison des sonogrammes enregistrés dans la même zone en novembre 1987 (fig. 4) avec les données de 1986 montre que le modèle de cheminement résiduel est comparable, quoique l'intensité des flux dans les deux directions dominantes ait quelque peu changé.

En plus, la présence de mégarides aux crêtes perpendiculaires à l'axe du banc, révèle l'existence d'un transport longitudinal, au moins sur le sommet du banc. Dans la partie septentrionale, ce transport est principalement orienté vers le SW. Dans la partie centrale et méridionale du banc le transport longitudinal de sable se fait vers le NE en suivant une bande longitudinale située sur le côté est du banc, et vers le SO dans une bande située à l'ouest.

c) Structures sédimentaires en mai 1983

Les sonogrammes obtenus en mai 1983 (fig. 5) montrent des mégarides présentant des caractéristiques similaires à ceux observés en novembre 1986.

Dans le chenal du Kwinte le transit sédimentaire de charge de fond demeure orienté vers le large sous l'effet du courant de pointe de flot. Dans le Negenvaam toutefois le transit est orienté vers le large, sauf dans sa partie centrale.

Les sonogrammes montrent des champs de mégarides couvrant les deux flancs et le sommet du Kwintebank. Ces mégarides ont leur face raide tournée vers le NE. Toutefois sur la partie centrale du flanc est du banc les mégarides en provenance du Negenvaam ont leur face raide tournée vers le sud, c'est-à-dire vers le sommet du banc.

L'image indique une migration essentiellement en provenance du Kwinte et un passage de sable par dessus le banc en direction du large, plus spécialement à ses deux extrémités. De ce fait, elle contraste avec la situation de novembre 1987 quand le flux dominant était orienté vers le SW. Elle diffère également d'avec celle de 1986. A ce moment des flux à direction opposée montraient une intensité comparable sur les deux flancs du banc et suggéraient un empilement plus prononcé à partir des deux chenaux. Ces variations suggèrent donc nettement des changements dans l'intensité et l'origine des apports de sable sur le banc.

2) Transits sédimentaires sur l'ensemble des Bancs de Flandre

Le modèle de cheminement résiduel, élaboré pour le Kwintebank, est applicable au Buiten-Ratel et au Oost-Dyck comme le montre la figure 6.

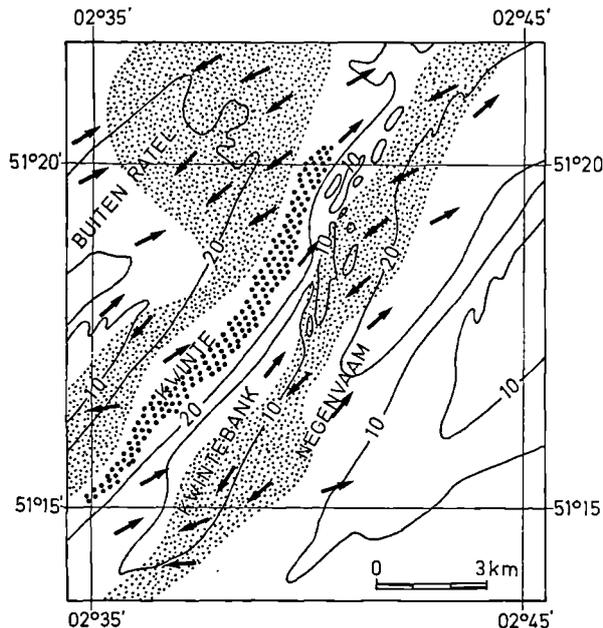


Fig. 4. — Dynamique sédimentaire résiduelle sur le Kwintebank en novembre 1987. Les flèches indiquent les directions du transport résiduel de sable (légende complémentaire : voir figure 6).

Fig. 4. — Residual sediment dynamics on the Kwintebank in November 1987. The arrows indicate the direction of residual sand transport (additional legend : see figure 6).

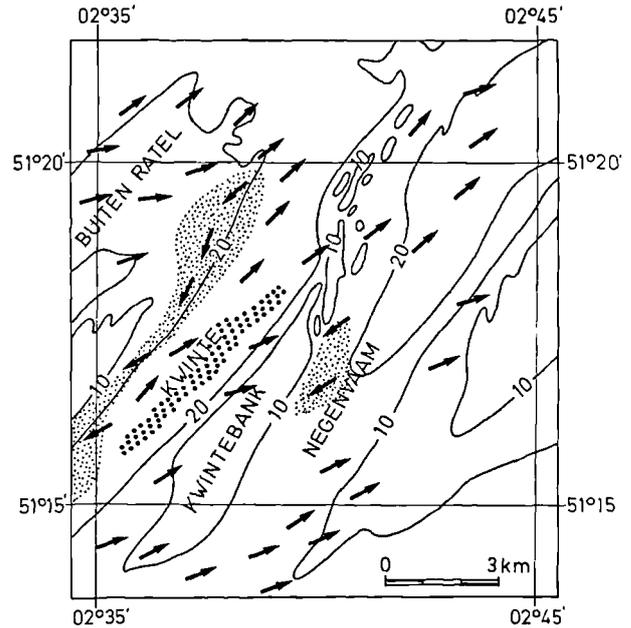


Fig. 5. — Dynamique sédimentaire résiduelle sur le Kwintebank en mai 1983. Les flèches indiquent les directions du transport résiduel de sable (légende complémentaire : voir figure 6).

Fig. 5. — Residual sediment dynamics on the Kwintebank in Mai 1983. The arrows indicate the direction of residual sand transport (additional legend : see figure 6).

### III. — ÉVOLUTION VOLUMÉTRIQUE DU KWINTEBANK

L'évolution morphologique d'un corps sédimentaire ou de ses éléments peut être suivie par comparaison visuelle de profils bathymétriques ou de levés hypsométriques consécutifs. Cette méthode pose toutefois des problèmes aussi bien lors des enregistrements que lors de l'analyse des données. De plus elle reste qualitative. La comparaison des états successifs devient plus maniable en utilisant des données volumétriques ou éventuellement altimétriques, valables soit pour la totalité du corps sédimentaire, soit pour des sites-essais linéaires, ponctuels ou superficiels.

En partant de séries de données numériques établies pour chaque site, il est possible d'utiliser des techniques de statistique pour étudier les tendances de l'évolution (7). Le point

fondamental est de pouvoir retourner exactement au même point de référence, ou de pouvoir refaire les mêmes routes de référence lors des enregistrements bathymétriques successifs. Il est également nécessaire de pouvoir éliminer l'effet des variations des références mêmes, comme par exemple le changement de la position verticale du navire vis-à-vis d'un niveau zéro de référence, ce qui exige en premier lieu de pouvoir effectuer une réduction de marée suffisamment précise.

Les méthodes de navigation et de positionnement devenues disponibles dans les dernières années permettent d'obtenir un positionnement avec une précision géographique (de l'ordre de quelques mètres) et une fréquence (de l'ordre d'une seconde) suffisantes pour utiliser les techniques géomorphologiques en vue d'un suivi précis des changements volumétriques.

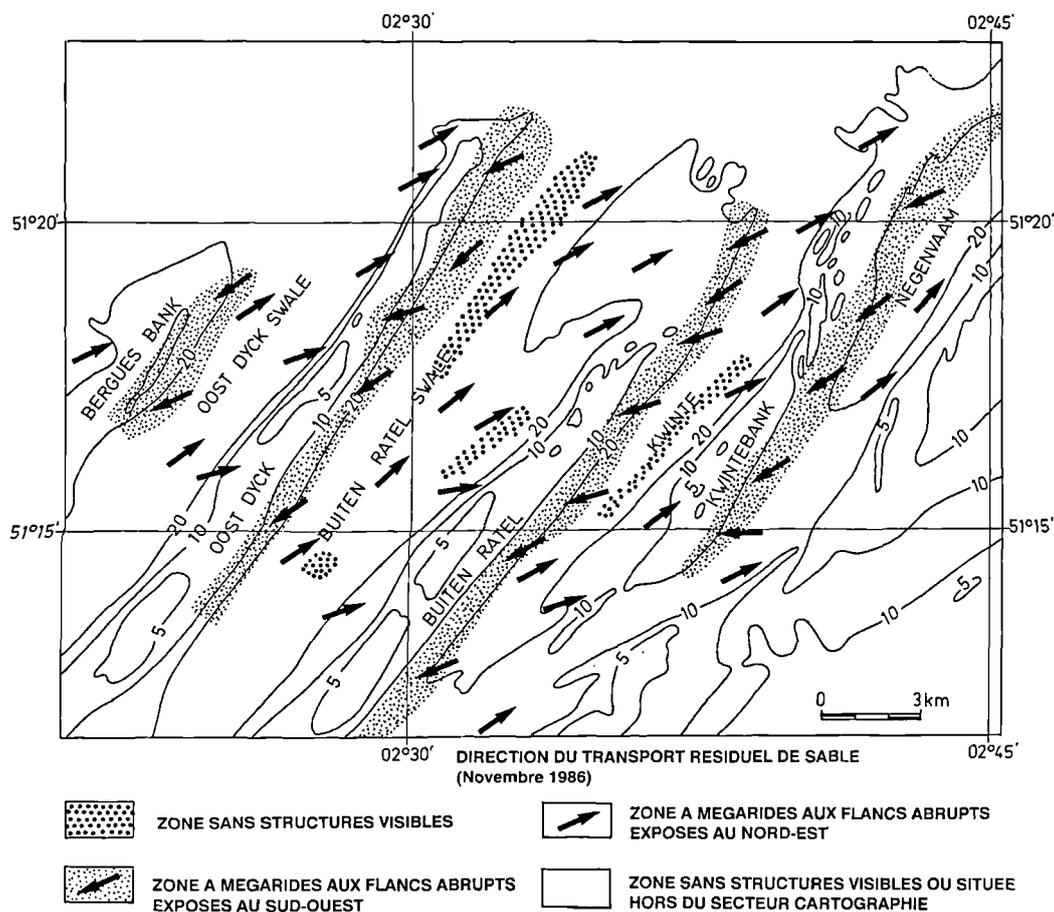


Fig. 6. — Dynamique sédimentaire résiduelle sur les Bancs de Flandre en novembre 1986. Les flèches indiquent les directions du transport résiduel de sable.

Fig. 6. — Residual sediment dynamics on the Flemish Banks in November 1986. The arrows indicate the direction of residual sand transport.

Comme sites-essais nous avons utilisé des transversales fixes, espacées à une distance d'environ 1 mille et parcourues à une vitesse constante de 10 nœuds. Ces routes de référence correspondent à des loxodromes entre des points situés sur des lignes rouges Decca (réseau 5B). La navigation et le positionnement ont été faits en utilisant le système TORAN jusqu'en 1987, puis à l'aide du réseau belge SYLEDIS. Le positionnement, les composantes de la vitesse au sol, le cap au sol et la course du navire ont été enregistrés toutes les 30 secondes en utilisant l'ordinateur de bord (HP 1000) du navire océanographique belge BELGICA et le programme d'acquisition ODAS réalisé par l'Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la Mer du Nord. Ces données ont été introduites dans un banc de données et soumises à un traitement par ordinateur en utilisant le programme BATPROVOL développé au Laboratoire de Géographie Physique de l'Université de Gand, et dont l'organigramme généralisé est indiqué sur la figure 7.

Sur le Kwintebank un suivi des changements volumétriques a été obtenu pour la période 1982-88 en levant, en moyenne tous les 3 mois, des profils bathymétriques le long d'une série d'une douzaine de transversales de référence.

Pour chaque passage on peut calculer la surface de chacune des transversales de référence au-dessus du niveau zéro ou entre des niveaux de référence choisis à des profondeurs fixes en dessous de ce niveau zéro. Celui-ci correspond au niveau moyen local des basses mers de vives eaux, défini par le Service Hydrographique de la Côte. Pour chaque transversale nous utilisons comme base du banc le niveau horizontal recoupant la concavité de base la plus élevée et enregistrée lors du premier passage.

Le concept volumétrique a été introduit en définissant le volume unitaire, c'est-à-dire le volume correspondant à la surface d'un profil transversal ayant une largeur de 1 m. Plusieurs types de volumes unitaires, soit horizontaux, soit verticaux, peuvent ainsi être définis. Ceci permet aussi d'exprimer numériquement l'évolution de certaines caractéristiques du banc, telles que son emplacement, son asymétrie ou l'importance volumétrique de la tranche sommitale.

Les séries de volumes unitaires ainsi mesurées pour chaque site-essai montrent d'importantes variations. Elles sont dues en partie à la dynamique naturelle des sédiments, en partie peut-être à des dragages de sable, voire à des erreurs de navigation non contrôlées, des fautes dans la réduction des marées, etc. Les données non fiables sont éliminées par l'analyse des tracés de route et aussi par comparaison visuelle de profils successifs superposés en utilisant des points fixes de référence. Les variations subsistant après ces corrections sont considérées comme étant dues au dynamisme sédimentaire. Les figures 8 et 9 donnent des exemples de quelques-unes de ces données volumétriques successives.

Afin d'évaluer la tendance d'évolution, une analyse de régression linéaire a été appliquée par transversale de référence. Elle fournit une valeur pour le changement moyen du volume-unitaire absolu (A en m<sup>3</sup>/m/année) par transversale

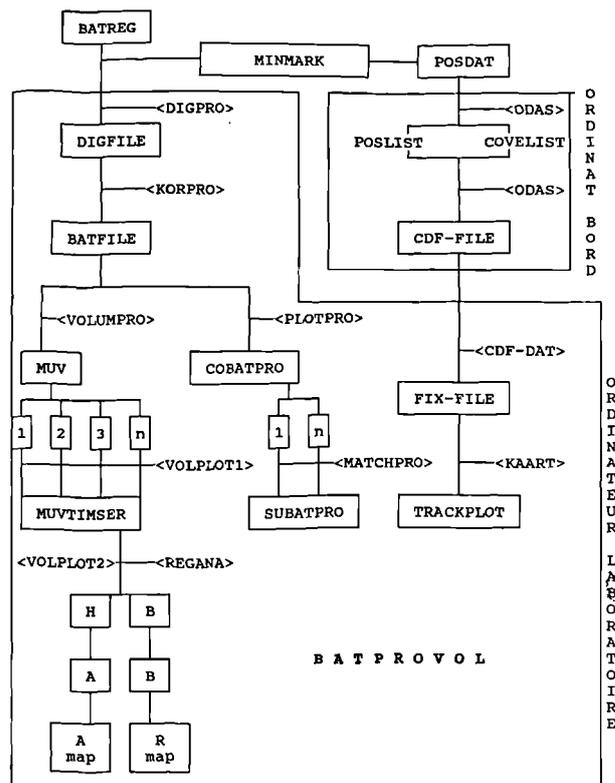


Fig. 7. — Organigramme généralisé du traitement des données bathymétriques.

Fig. 7. — Generalised flow chart of echosounding data processing.

- BATREG = enregistrement bathymétrique
- DIGPRO = programme de digitalisation de BATREG
- DIGFILE = fichier du BATREG digitalisé
- KORPRO = programme de correction de BATREG
- BATFILE = fichier du DIGFILE corrigé
- VOLUMPRO = programme de calcul des volumes unitaires
- MUV = fichier des volumes unitaires
- VOLPLOT 1 = programme représentation graphique volumes unitaires
- VOLPLOT 2 = programme d'analyse de régression
- REGANA = programme spécifique d'analyse de régression
- MUVTIMSER = fichier des séries de volumes unitaires
- H = changement moyen diurne volume unitaire absolu calcul
- B = volume unitaire initial
- A = changement moyen annuel volume unitaire absolu calcul
- R = changement moyen annuel du volume unitaire relatif
- PLOTPRO = programme pour tracer les profils bathymétriques
- COBATPRO = fichier des tracés
- MATCHPRO = programme comparaison visuelle des profils successifs
- SUBATPRO = fichier des profils comparés
- POSDAT = positionnement au 1/100'' toutes les 30 sec
- ODAS = Oceanographic Data Acquisition and Storage programme
- POSLIST = fichier des positionnements
- COVELIST = fichier des courses et vitesses
- CDF-FILE = fichier des données de navigation et de météo
- CDFDAT = programme de transformation HP 1000 / HP 600A
- FIXFILE = fichier des données de navigation transformées
- KAART = programme de tracer de routes
- TRACKPLOT = cartes des routes avec WP

pour le type de profil utilisé (volume total, tranche sommitale, etc.). Compte tenu des grandes différences en volume total constatées entre les différentes parties d'un banc, il est nécessaire de normaliser ces données par rapport à un volume de référence pour chaque transversale. Celui-ci correspond au volume-unitaire initial indiqué sur la droite de régression.

Les volumes-unitaires absolus (A) et relatifs (R en %/année) obtenus pour les différentes transversales de référence sont alors cartographiés. Cette cartographie permet une évaluation numérique et géographique du dynamisme sédimentaire résiduel et des changements morphologiques associés. Les figures 10 et 11 (volume total) et les figures 12 et 13 (volume sommital) donnent des exemples de cartes des tendances des changements volumétriques moyens pour la période 1983-88.

#### IV. — CONCLUSIONS

L'analyse des données volumétriques et l'étude des transits sédimentaires au sonar à balayage latéral obtenus à des intervalles réguliers montrent que la dynamique sédimentaire résiduelle du Kwintebank est extrêmement compliquée. Un modèle de cette dynamique ne peut être basé exclusivement sur l'analyse des transits, mais exige également l'étude des tendances d'évolution volumétrique.

La structure des mégarides montre que les courants de flot sont responsables d'un transport résiduel de fond le long du flanc occidental et que les courants de jusant dominent les transports de fond sur le flanc oriental. Vers le haut du banc ces transits s'orientent de plus en plus parallèlement à l'axe du Kwintebank et suggèrent un empilement résiduel

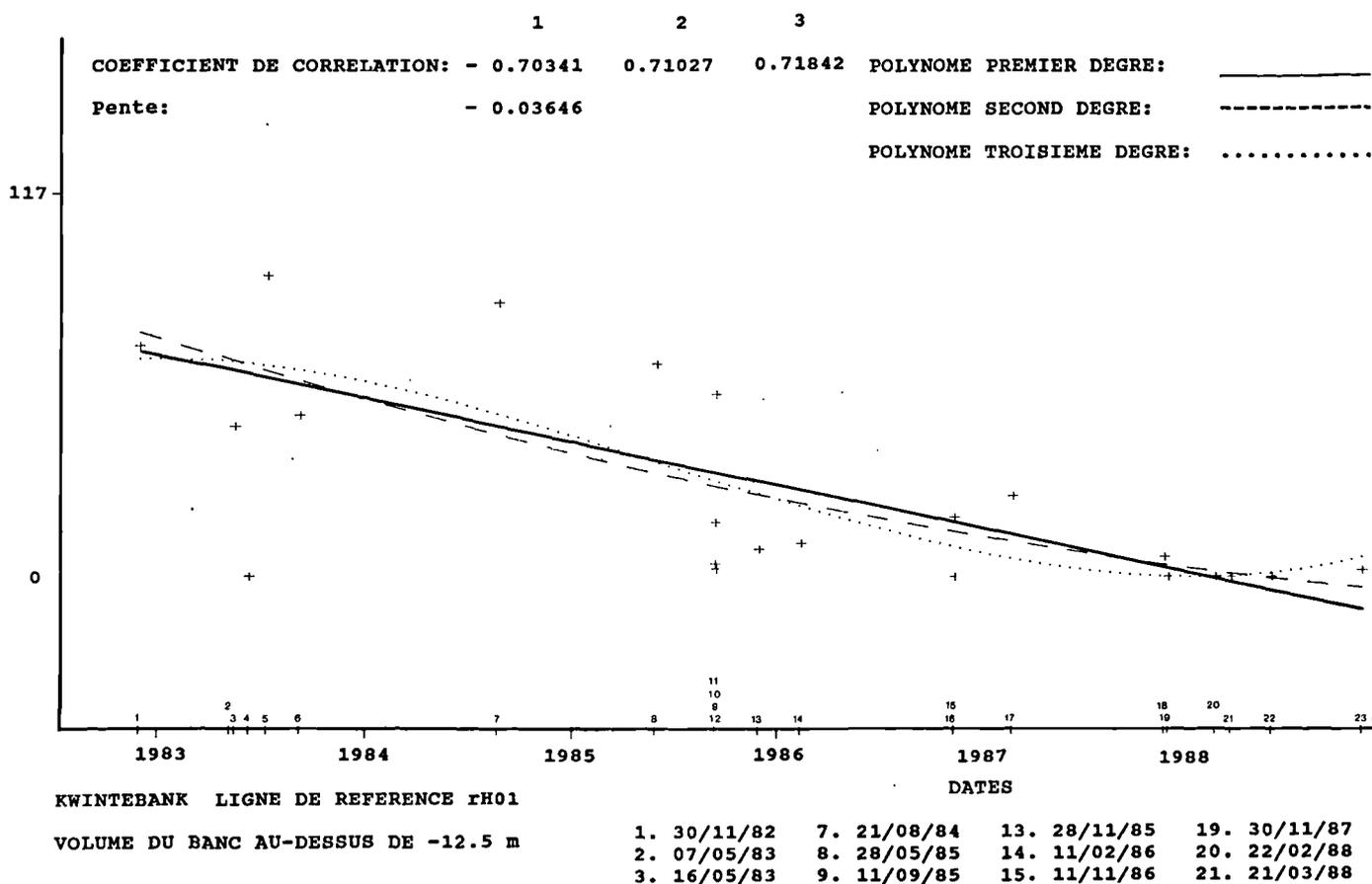


Fig. 8. — Analyse de régression des volumes-unitaires (au-dessus de -12.5 m) pour le Kwintebank le long de la ligne de référence rH01.

Fig. 8. — Unit-volumetric time series with regression lines ; unit-volume above -12.5 m along reference line rH01.

transversal. Des transports longitudinaux pourraient être importants sur les flancs et occasionnellement aussi sur le sommet. Ceci indique des remaniements sommitaux.

L'importance des deux flux latéraux opposés peut changer considérablement. En mai 1983, la direction du transport est orientée principalement vers le NE, tandis que l'apport en provenance du NE est limité à une zone réduite sur le flanc oriental. En novembre 1987, les sonogrammes suggèrent un transport dominant dirigé vers le SW. En novembre 1986 le transport résiduel de la charge de fond vers le NE est d'une importance comparable à celui orienté vers le SW.

L'analyse volumétrique montre que la mobilité du sable et les changements morphologiques varient tout au long du Kwintebank. La tendance à l'amaigrissement est la plus importante sur la partie sommitale de l'extrémité nord de ce banc. La partie centrale, la plus massive et la plus volumineuse, traduit localement un grand dynamisme sédimentaire résiduel. Vu sa grande masse, l'effet morphologique, représenté par le changement annuel relatif moyen (R), demeure peu marqué. L'engraissement reste le plus considérable sur la partie sud du Kwintebank. Ces données affirment que le Kwintebank est sujet à une accumulation de sable en provenance des chenaux adjacents.

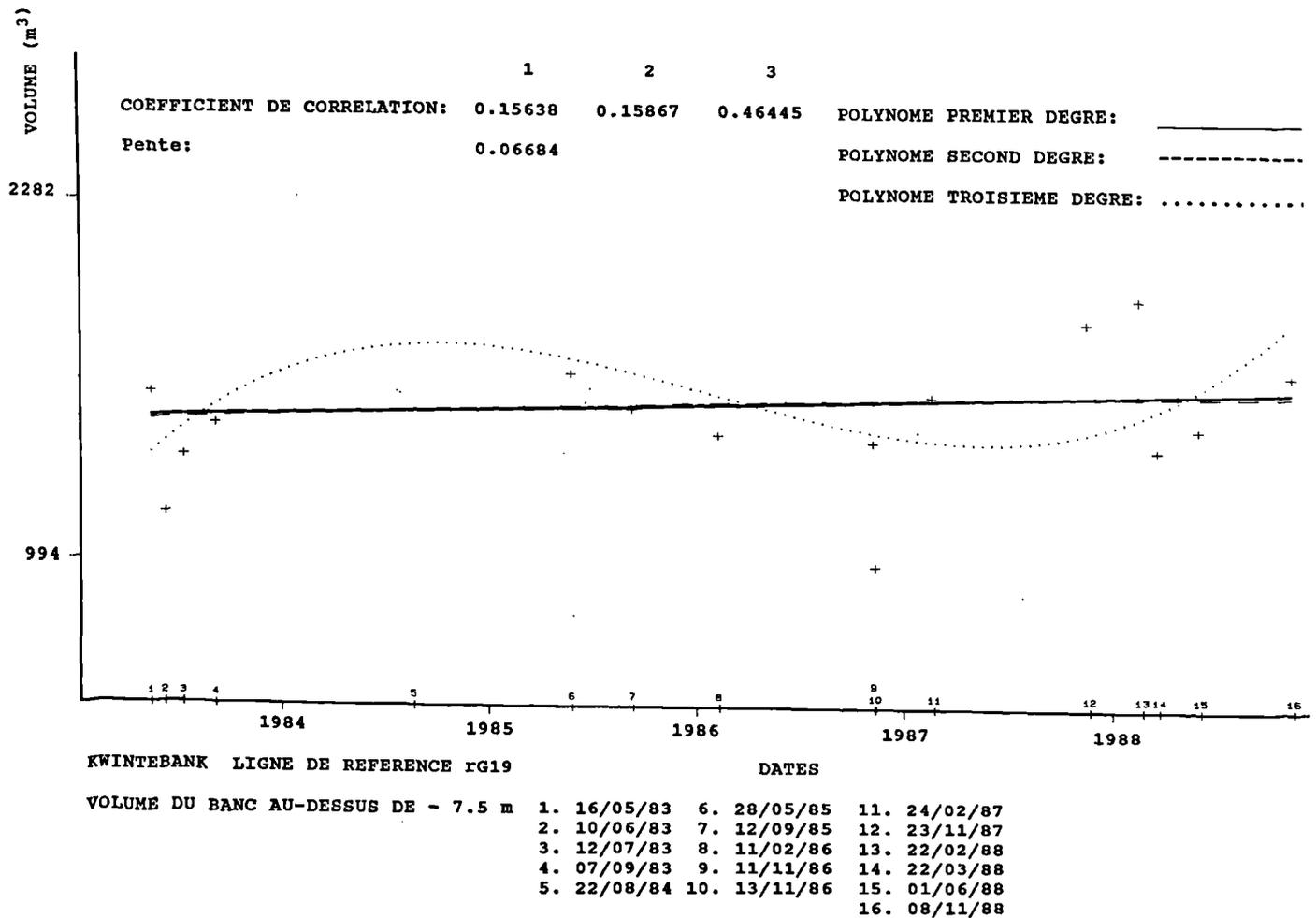


Fig. 9. — Analyse de régression des volumes-unitaires (au-dessus de - 7.5 m) pour le Kwintebank le long de la ligne de référence rG19.

Fig. 9. — Unit-volumetric time series with regression lines ; unit-volume above - 7.5 m along reference line rG19.

Certains résultats montrent toutefois que les tendances d'évolution ainsi détectées ne valent que pour une courte durée. En effet, l'analyse quadratique des mêmes séries volumétriques montre qu'en certains sites, une inversion des tendances s'est déjà manifestée au cours de la période des six années d'observation.

Tout au long de cette analyse on ne peut toutefois pas exclure l'effet de dragages de sable sur la partie nord du Kwintebank. Cette analyse permet d'avancer que l'effet d'une extraction de granulats pourrait être balancé par l'apport naturel de sable provenant des chenaux annexes aussi longtemps que la masse sableuse extraite ne dépasse pas une valeur critique. La définition de ce débit critique d'extraction forme

une tâche fondamentale afin de pouvoir conserver l'équilibre naturel existant dans ce milieu hautement énergétique mais sans que pour autant soit résolue la possibilité d'un changement graduel de la qualité des granulats, ni le danger de retombées érosives sur des sites côtiers.

*Remerciements.* — Les recherches ont été permises grâce à l'appui du Ministère de la Politique Scientifique, du Service du Modèle Mathématique de la Mer du Nord (Ministère de la Santé Publique), du Service des Mines (Ministère des Affaires Economiques), du Service Hydrographique de la Côte (Ministère des Travaux Publics) et du Fonds National de la Recherche Scientifique de Belgique. Les auteurs remercient le Commandant et l'équipage du navire océanographique belge Belgica.

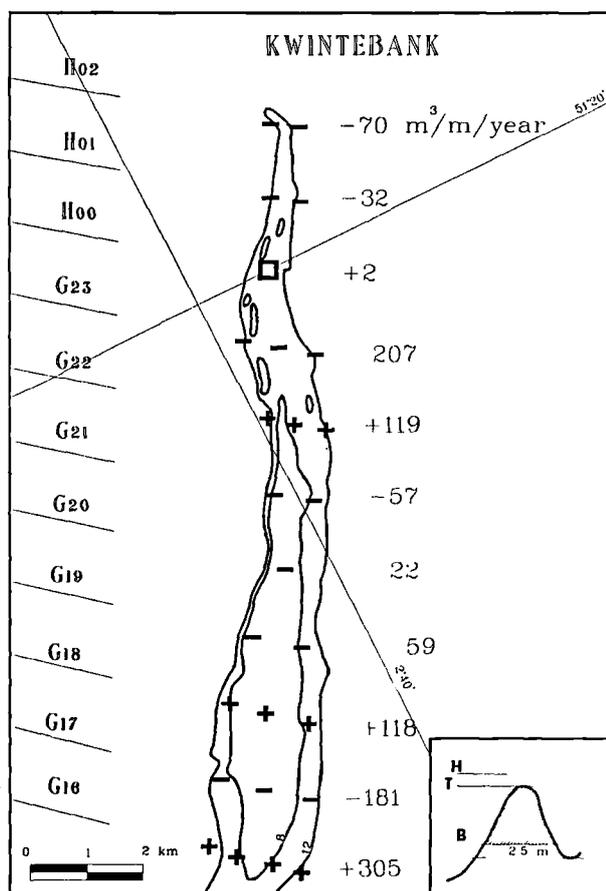


Fig. 10. — Evolution annuelle moyenne du volume total du Kwintebank, exprimée en volumes-unitaires absolus (A), pour la période 1983-1988.

Fig. 10. — Absolute mean annual change (A) of the total bank unit-volume of the Kwintebank during the period 1983-1988.

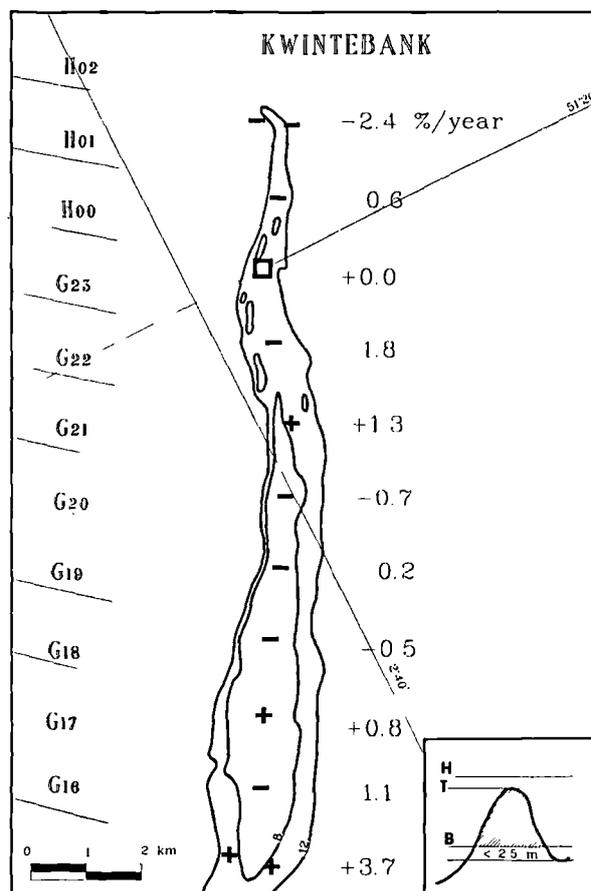


Fig. 11. — Evolution annuelle moyenne du volume total du Kwintebank, exprimée en volumes-unitaires relatifs (R) pour la période 1983-1988.

Fig. 11. — Relative mean annual change (R) of the total bank unit-volume of the Kwintebank during the period 1983-1988.

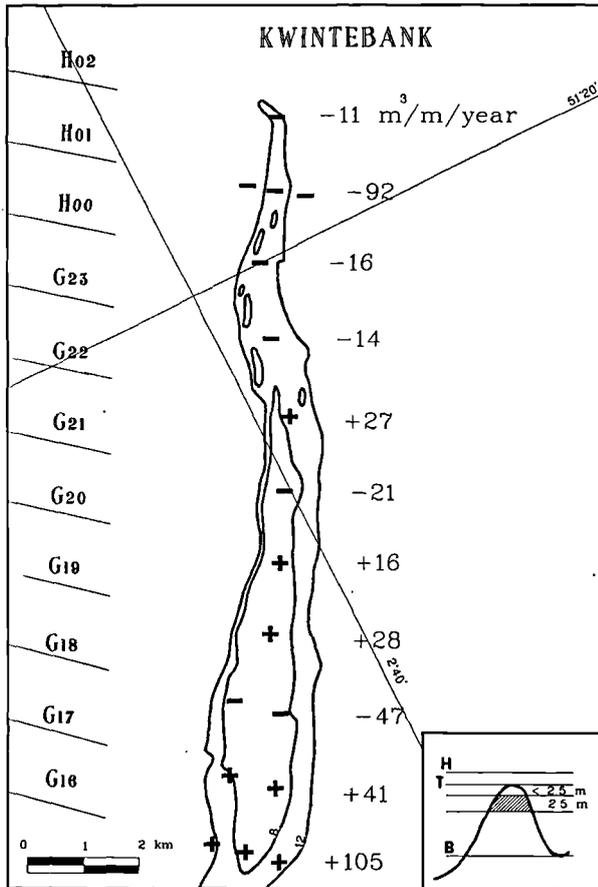


Fig. 12. — Evolution annuelle moyenne de la partie sommitale du Kwintebank, exprimée en volumes-unitaires absolus (A), pour la période 1983-1988.

Fig. 12. — Absolute mean annual change (A) of the unit-volume of the Kwintebank to slice during the period 1983-1988.

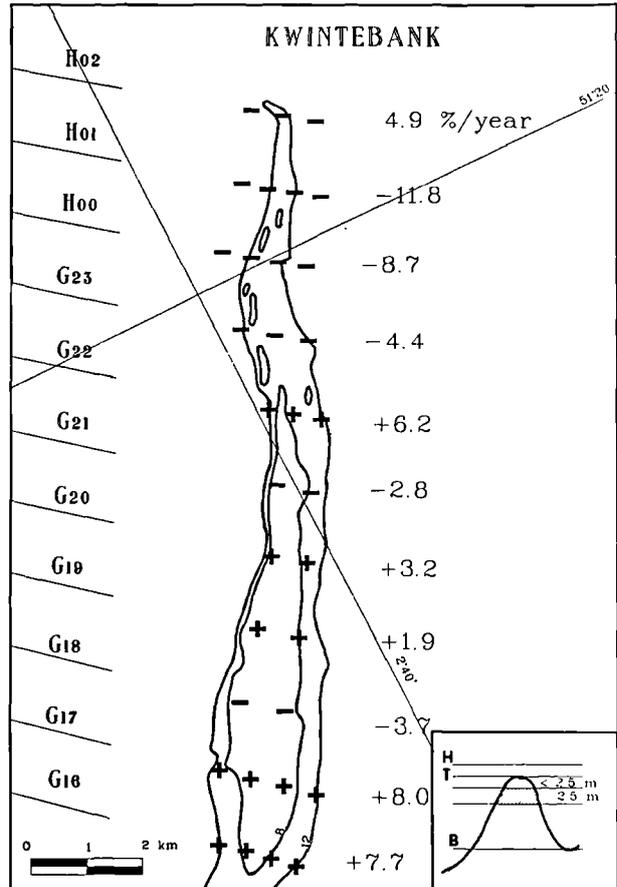


Fig. 13. — Evolution annuelle moyenne de la partie sommitale du Kwintebank, exprimée en volumes-unitaires relatifs (R), pour la période 1983-1988.

Fig. 13. — Relative mean annual change (A) of the unit-volume of the Kwintebank top slice during the period 1983-1988.

### BIBLIOGRAPHIE

- 1) AUFFRET J.P., AUGRIS C., CLABOUT P., LABET F. (1988). — Etude des transits sédimentaires en Baie de Wissant (Pas-de-Calais). *Ann. Soc. Géol. Nord*, T. CVIII, p. 239-246.
- 2) CLABAUD P., CHAMLEY H. (1986). — Observations sédimentologiques sur le littoral de Wissant (site des Caps, Boulogne). *Ann. Soc. Géol. Nord*, T. CV, p. 169-178.
- 3) DE MOOR G. (1985a). — Shelfbank Morphology off the Belgian Coast. Recent methodological and scientific developments. In : M. Van Molle (Editor), *Recent trends in Physical geography in Belgium. Liber Amicorum, L. Peeters VUB, Study series of the Vrije Universiteit Brussel, New Series, 20*, p. 149-184, 24 fig.
- 4) DE MOOR G. (1985b). — Present day morphodynamics on the Kwintebank and their meaning for the evolution of the Flemish Banks. In : R. Van Grieken and R. Wollast (Editors), *Progress in Belgian Oceanographic Research. Brussels, Belgian Academy of Sciences*, p. 102-113, 5 fig.
- 5) DE MOOR G. (1986). — Geomorfologisch onderzoek op het Belgisch continentaal plat. *Soc. belge Et. Géogr.*, 55, p. 133-174, 11 fig.
- 6) DE MOOR G., LANCKNEUS J. (1989). — Acoustic teledetection of sea-bottom structures in the Southern Bight. *Soc. belge de Géologie*, 97, 2, p. 199-210.

- 7) DE MOOR G., LANCKNEUS J., VAN OVERMEIRE F., VAN DER BROECK P., MARTENS E. (1989). — Volumetric analysis of residual sediment migrations on continental shelf sand banks in the Southern Bight (North Sea). *In* : Progress in Belgian Oceanographic Research (Ed. G. Pichot), Brussels. Prime Minister's Services Science Policy, p. 129-146.
- 8) FLEMMING B.W. (1976). — Side-scan sonar : a practical guide. *The international Hydrographic Review*, V. LIII, 1, 27 p.
- 9) HOUBOLT J.J.H.C. (1968). — Recent sediments in the southern Bight of the North Sea. *Geologie en mijnbouw*, V. 47, 4, p. 245-273.
- 10) LANCKNEUS J., DE MOOR G., DE SCHAEPMEESTER G., LIBEER L., (1989). — Acoustic teledetection of shelf bedforms and their meaning for the sediment dynamics. *In* : Progress in Belgian Oceanographic Research (Ed. G. Pichot), Brussels. Prime Minister's Services Science Policy, P. 147-163.
- 11) LANGHORNE D.N. (1982). — A study of the dynamics of a marine sandwave. *Sedimentology*, 29, p. 571-594.
- 12) MCCAVE I.N., LANGHORNE D.N. (1982). — Sand waves and sediment transport around the end of a tidal sand bank. *Sedimentology*, 29, p. 95-110.
- 13) STRIDE A.H. (1982). — Offshore tidal sands. Processes and deposits. Chapman and Hall, London, 222 p.



## Tunnel sous la Manche ou tunnel dans les eaux souterraines ? L'aspect hydrogéologique des travaux dans le domaine continental français

### Tunnel under the Channel or Tunnel through groundwater ? The hydrogeological side of works in the French continental area

par Norbert CRAMPON (\*), André LEVASSOR (\*\*), Jean-Pierre COLBEAUX (\*), Gilles POREL (\*),  
André CHESNEAU (\*\*\*) et Denis GUYOT-SIONNEST (\*\*\*\*)

*Résumé.* — Pour gagner l'assise marneuse du Cénomanien inférieur dans laquelle 85 % de son parcours sont creusés, le Tunnel sous la Manche doit déjà traverser, du côté français, toute la série aquifère crayeuse d'âge Cénomanien moyen à Sénonien. L'aquifère, normalement multicouche (niveaux plus marneux), se comporte localement comme un milieu fracturé hétérogène, tandis qu'à l'échelle d'ensemble de la nappe, l'évolution hydrodynamique est correctement restituée par un modèle en milieu poreux homogène. Alimentée par les affleurements des coteaux, la nappe se déverse dans la plaine maritime où elle réalimente les dépôts alluviaux. L'eau salée rencontrée en profondeur sous cette plaine est un reliquat des anciennes transgressions quaternaires.

Une étude hydrogéologique approfondie a été réalisée à la demande d'Eurotunnel en vue d'estimer l'impact des travaux sur la nappe : drainage imposé par la tranchée d'accès, effet d'écran du Tunnel, influence des terrassements du Terminal sur la recharge et la qualité des eaux souterraines. Inversement, la présence des nappes représente un handicap tant pour les remblais du Terminal que pour le creusement des galeries.

*Abstract.* — In order to reach the marly blue chalk layer dated from lower Cenomanian, the Channel Tunnel has to go through the whole chalk aquifer (middle Cenomanian to Senonian) in the French continental area. This aquifer is normally multilayered, but it locally behaves as an inhomogeneous fractured medium, whereas, at the comprehensive aquifer scale, hydrodynamic behaviour is properly simulated by a homogeneous porous medium model.

Infiltrated from chalk slope outcrops, groundwater is pouring into maritime plain where it is supplying alluvial deposits. Under this plain, the deep saline groundwater is a residue of former Quaternary transgressions. A hydrogeological study, required by Eurotunnel, has been carried out for assessing piezometric results of works : required drainage in entrance trench of the Tunnel, barrier effect of galleries, influence of the Terminal earthworks on the groundwater recharge and quality. On the contrary, groundwater is a constraint for the Terminal embankments and, obviously, for the digging of the triple tunnel.

Que le Tunnel sous la Manche (ou Liaison Fixe Transmanche) doive faire face à des problèmes de venues d'eau, cela paraît évident au non-spécialiste qui s'inquiète, en tant que futur usager, de sa sécurité lors d'une traversée qu'il envisage souvent plus comme sous-marine que souterraine. D'où son étonnement quand on lui dit que ces problèmes d'eau ne concernent pas tant la mer que les eaux douces, pas tant le passage du Détroit du Pas-de-Calais que les travaux dans le domaine continental français où le Tunnel doit traverser, sur plus de 3 km, la nappe de la craie avant de pénétrer dans sa couche enveloppe protectrice : la craie bleue cénomaniennne.

#### I. — CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Du côté français, le Tunnel s'engage dans la craie sénonienne à la faveur de la tranchée de Beussingue (6 km à l'WSW du centre de Calais), sur le flanc NE de la terminaison périclinale du Boulonnais (la "Boutonnière") extrémité orientale de l'antiforme du Weald dont le cœur jurassique est discordant sur des formations paléozoïques fortement plissées, chevauchantes et faillées qui affleurent aux environs de Ferques et Marquise (Delattre *et al.*, 1973) (Fig. 1).

(\*) Laboratoire d'Hydrogéologie, Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

(\*\*) ARMINES, 35, rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau.

(\*\*\*) SIMECSOL, Agence Régionale Nord, B.P. 4204, 59378 Dunkerque Cedex.

(\*\*\*\*) EUROTUNNEL, Tour Franklin, 100, Terrasse Boieldieu, 92081 Paris La Défense Cedex 11.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

Mais ce flanc NE de l'antiforme Weald-Boulonnais est lui-même affecté de plissements secondaires dont l'un, d'axe environ N 60° E, passe légèrement au large du Blanc-Nez où les assises du Crétacé supérieur s'inclinent vers l'ESE (localement du Sud à l'Est).

### 1) Crétacé

Les premiers dépôts, continentaux à faciès wealdien argilo-sableux, reposent sur les grés portlandiens. L'Aptien et l'Albien inférieur sont modérément transgressifs vers l'Est, avec des dépôts sablo-argileux et glauconieux, tantôt marins, tantôt continentaux. Les argiles du Gault (Albien moyen et supérieur) marquent l'avancée de la mer sur l'Artois et la disparition du golfe du Boulonnais (Colbeaux *et al.*, 1985) ; les sédiments argilo-marneux noirs de 10 à 15 m d'épaisseur (11 m à Calais, en forage), constituent le soubassement, très

impermeable, de tout un ensemble crayeux s'étendant du Cénomaniens au Sénonien, plus ou moins aquifère selon le faciès et le développement de la fissuration.

Cette série crayeuse débute par deux mètres de craie glauconieuse à petits galets phosphatés ("Tourtia" ou "Formation de Strouanne"), surmontée par environ 25 m de marnes bleu-verdâtre à bancs de craie marneuse ("craie bleue" ou "Formation du Petit Blanc-Nez") d'âge Cénomaniens inférieur (Colbeaux *et al.*, 1985). C'est dans cette formation encore riche en argile (60 % de Ca CO<sub>3</sub> à la base) et peu fissurée, que se situera 85 % du tracé du Tunnel (Hueber et Magnas, 1987).

La série se poursuit avec les "Formations du Cran" et "d'Escalles" ("craie grise" et "craie blanche") du Cénomaniens moyen puis supérieur, où la teneur en Ca CO<sub>3</sub> finit

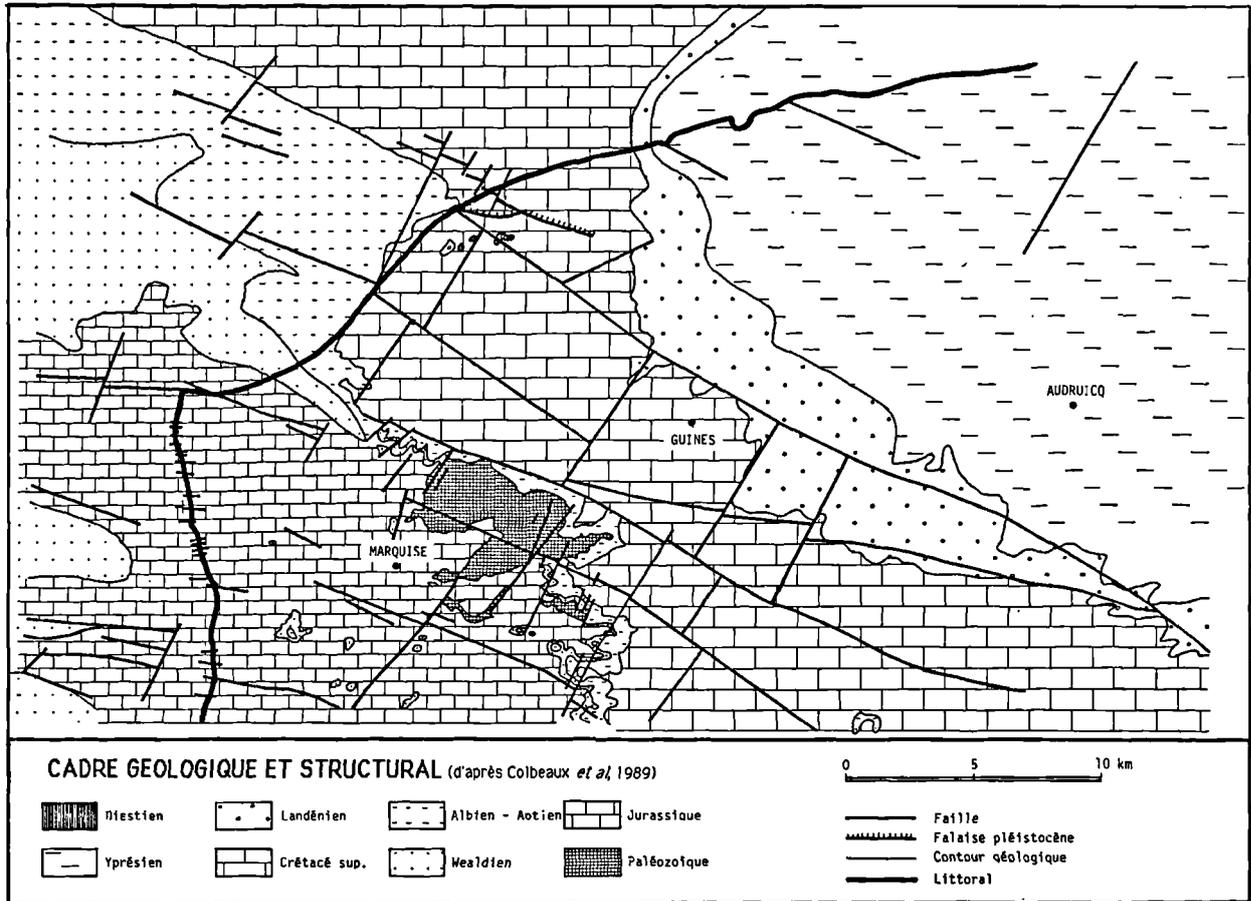


Fig. 1. — Cadre géologique et structural (d'après Colbeaux *et al.*, 1989).

Fig. 1. — Geological and structural setting (after Colbeaux *et al.*, 1989).

par atteindre 90 %. La perméabilité y croît vers le haut. Quelques lits marneux et crayeux ("Formation des Crupes" ou "Marnes à plenus") couronnent l'ensemble cénomanien dont l'épaisseur varie de 50 à 80 m (65 m à Sangatte).

Le Turonien débute par une vingtaine de mètres de craie noduleuse, surmontée de 25 à 40 m de craie blanche marneuse (Turonien moyen, essentiellement), recouverte à son tour par de la craie blanche à silex (sommet du Blanc-Nez) pouvant atteindre 35 m d'épaisseur (90 m en moyenne pour le Turonien dans les sondages du Calaisis). Le dépôt de craie blanche à silex se poursuit sur 70 à 80 m au Sénonien inférieur (Coniacien-Santonien, la limite entre ces deux sous-étages ayant été repérée dans l'ancienne carrière du Fond de la Forge, près de Coquelles). Cette craie, très pure (95 à 98 % de Ca CO<sub>3</sub>) est très poreuse, mais aussi très perméable dès qu'elle est suffisamment fissurée.

## 2) Landénien

Globalement, les assises du Crétacé supérieur inclinées vers le NE de quelques degrés, s'enfoncent dans cette direction sous les dépôts quaternaires de la plaine maritime de Calais qui viennent donc les recouvrir en discordance. Toutefois, on peut également trouver, sous les dépôts quaternaires et à l'Ouest du méridien de bordure occidentale de Calais, des assises tertiaires, elles aussi discordantes sur la craie sénoturoniennne. Il s'agit de Landénien constitué d'Argile de Louvil, très compacte, gris-vert à noirâtre, qui peut passer vers le haut à des niveaux sableux (sables d'Ostricourt).

Dans le Calaisis, ces formations ne sont connues que par sondage et leur extension vers l'Ouest n'a pu être précisée que grâce aux récentes campagnes de reconnaissance (Levasor et Cairon, 1987).

## 3) Morphologie du toit de la craie

Sous recouvrement tertiaire, la craie est peu altérée, simplement fissurée. Des poches de dissolution à remplissage d'argile à silex sont connues dans le Haut-Boulonnais (Lottinghem) mais n'ont pas été remarquées sur les coteaux crayeux dominant à l'Ouest la plaine maritime de Calais. Par contre, la craie est partout, dans ces coteaux, entaillée par des vallons secs, pour la plupart orientés SW-NE (N 35° à N 70° E avec prédominance N 50° à N 60° E). Ces directions, analysées statistiquement (Porel et Colbeaux, 1989) semblent correspondre à des rejeux d'accidents du socle paléozoïque dont la fracturation présente, dans le massif de Ferques (8 km au sud), une composante directionnelle très nette N 30° à 40° E. L'origine tectonique de ces thalwegs semble être confirmée par des basculements locaux récemment découverts dans certains d'entre eux.

La reconnaissance entreprise pour les travaux du Terminal de Coquelles-Fréthun a permis de constater l'existence d'un profond sillon dans le toit de la craie, au droit du vallon de la Basse-Normandie, d'axe N 60° E, au fond duquel la craie est fortement altérée et bréchifiée (Mazéas, 1987). Tout porte à croire qu'il s'agirait là d'un axe structural qui se raccorderait du reste vers le SW (coteaux) à un vallon sec, bien marqué entre Peuplingues et la Nationale 1.

## 4) Quaternaire

Dans une région particulièrement influencée par les transgressions et les variations climatiques, les dépôts quaternaires sont le plus souvent discontinus et changeants, notamment au Pléistocène. Parmi les plus anciens, le complexe de Rouge Cambre, qui repose directement sur la craie, est constitué d'un cordon dunaire dans lequel s'imbriquent des colluvions, en partie amont. Ces dépôts ont subi une altération climatique et ont ensuite été incisés par le fond thalweg de la Basse Normandie. Les colluvions anciennes peuvent former des accumulations en fond de vallée et s'imbriquer avec diverses formations en arrivant dans la plaine : il s'agit de limons remaniés et de produits d'altération de la craie. Des alluvions fluviales sablo-argileuses à galets et graviers de silex se retrouvent à la base des principaux vallons issus des coteaux crayeux (Mazéas, 1987).

L'isthme du Pas-de-Calais dont le rivage nord était marqué, au Pléistocène, par la falaise fossile de Sangatte, de direction N 95° E, disparaît à l'Holocène avec l'ouverture définitive du Pas-de-Calais lors de la transgression flandrienne (Colbeaux *et al.*, 1985).

Dans la plaine maritime proprement dite, la stratigraphie est relativement homogène : sables fins gris jaune à verdâtres ("sables pissarts") avec graviers et galets, passant latéralement à des niveaux plus argileux, recouverts par des sables dunaires coquilliers à lentilles argileuses, puis par des argiles bleues et enfin par de la tourbe. Seul émerge de la plaine

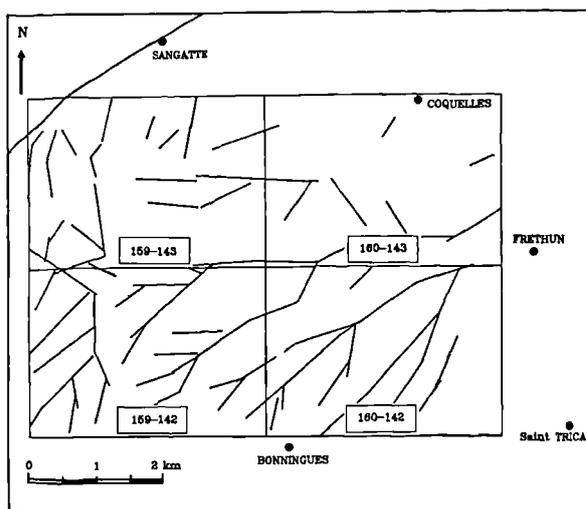


Fig. 2. — Orientation des vallons secs relevés sur fond topographique à 1/5000 (d'après Porel, 1989).  
En encadré, la référence de la coupure topographique.

Fig. 2. — Dry vale direction deduced from topographic map (scale 1/5000) (after Porel, 1989).  
Inset number : topographic map reference.

l'ancien cordon littoral des Pierrettes (de Sangatte à Marck). Cette assise, dite de Calais, est plus ou moins ravinée par les dépôts sableux et argileux de l'assise de Dunkerque où trois phases transgressives ont été relevées, toutes d'âges historiques, la dernière datant des X<sup>e</sup> et XI<sup>e</sup> siècles (Delattre *et al.*, 1973).

### 5) Fracturation

La morphologie (Fig. 2) a déjà mis en évidence des axes SW-NE à WSW-ENE (principaux thalwegs) et N 60° E (Vallon de la Basse-Normandie et son prolongement amont). Des relevés récents (Porel et Colbeaux, 1989) de fracturation sur les quelques rares affleurements disponibles (anciennes carrières, tranchée de Beussingue) montrent, malgré l'orientation sus-indiquée des vallons, une prédominance du nombre de fractures (à une échelle très locale) dans un faisceau directionnel N 130° à 160° E avec une deuxième composante, moins marquée, N 60° à 70° E (parfois jusqu'à 100°). Par contre, sur la falaise du Cran d'Escalles (Colbeaux et Mania, 1976), les directions les plus fréquentes se regroupent en deux familles équivalentes : l'une N 80° à 110°, l'autre N 140° à 180° E (Porel et Colbeaux, 1989). A l'échelle du Boulonnais, des fractures importantes sont orientées N 110° à N 140° E, telles les failles de Wimereux, du Gris-Nez et, en limite sud de la craie, celle de Landrethun (Fig. 1). Les vallées de la Canche et de l'Authie sont d'orientation assez voisine (N 120° E). Ces grandes fractures (N 110° à N 140° E) sont associées à un accident de socle cisailant dextre tardi-hercynien ayant joué à la fin du Crétacé ; elles sont responsables de la structure en horst de l'Artois (Colbeaux et Mania, 1976 ; Colbeaux *et al.*, 1985).

## II. — CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

### 1) La (ou les) nappe(s) de la craie

L'ensemble crayeux du Cénomaniens supérieur au Sénonien est habituellement considéré comme un aquifère unique, dans cette région calaisienne (Mania, 1978 ; Crampon, 1988). Par suite de la présence de "Marnes à plenus" de la fin du Cénomaniens supérieur (Blanc-Nez), on peut supposer (Levassor, 1989) l'indépendance d'un aquifère séno-turonien par rapport à un aquifère Cénomaniens supérieur, comme on le constate du reste plus à l'Est, dans la région de Fruges où l'on peut effectivement obtenir des niveaux piézométriques différents. On pourrait de même arguer de la présence de lits marneux dans le Turonien moyen pour subdiviser davantage encore l'aquifère crayeux. A vrai dire on manque de données démontrant un caractère multicouche, peut-être oblitéré par une fracturation facilitant les intercommunications.

Quoiqu'il en soit, le problème de la limite inférieure de l'aquifère (ou des aquifères) crayeux se doit d'être posé (Levassor, 1989) puisque cette limite dépend de la profondeur de fissuration, elle-même tributaire de facteurs morphologiques. La craie est un aquiclude (grande porosité matricielle) qui ne devient aquifère (perméabilité permettant une exploitation) que si les fissures sont suffisamment fréquentes, ouvertes et interconnectées. On peut, théoriquement, esti-

mer le tenseur des conductivités hydrauliques à partir de relevés de fracturation (Snow, 1969 ; Colbeaux et Mania, 1976 ; Carlier, 1983), mais l'estimation moyenne des ouvertures étant mal aisée (représentativité des mesures, variabilité) et intervenant à la puissance trois dans les calculs, l'application régionale reste très délicate (Colbeaux et Mania, 1976 ; Carlier, 1983). Dans les zones à fissuration dense, en affleurement et principalement en fond de vallée, l'assimilation à un milieu poreux équivalent paraît justifiée et c'est cette hypothèse qui a été retenue pour la modélisation hydrodynamique de la nappe de la craie (Levassor, 1988). L'ensemble des données disponibles (inventaire de 1986, campagne complémentaire de 1987) montre que la fissuration de la craie se développe sur des profondeurs de 20 à 50 m (10 à 87 m, sur 12 forages), zone non saturée comprise, soit une zone noyée perméable de l'ordre de 5 à 20 m. Les meilleures transmissivités ( $10^{-2}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> ou plus) semblent se rencontrer au pied des coteaux crayeux, à la limite du recouvrement, de Sangatte à Guines, sur une largeur de l'ordre du kilomètre, c'est-à-dire dans la zone où la craie fissurée est la plus saturée par suite de la faible profondeur de la nappe qui va se déverser au niveau de la plaine alluviale (sources de la Rivierette par exemple).

En ce qui concerne les coefficients d'emmagasinement, les pompages d'essai réalisés sur les ouvrages de reconnaissance en nappe libre (campagne 1987) montrent que les valeurs obtenues avec l'interprétation de Jacob sont trop faibles pour caractériser un emmagasinement à long terme qui devrait être proche de la porosité efficace (Levassor et Cairon, 1987). En vue de la modélisation, ce coefficient a été modulé en dix classes, de  $10^{-2}$  à  $10^{-1}$  selon la profondeur de la nappe libre (Levassor, 1989). Il apparaît toutefois, lors de pompages de durée suffisante, que l'évolution des rabattements peut se traduire par une rupture de pente, comme en aquifère limité ou partiellement réalimenté. L'hypothèse la plus vraisemblable nous paraît être celle d'un aquifère fissuré de type multicouche : une partie de l'aquifère peut réagir en nappe libre, tandis que des fissures plus profondes ou sub-horizontales libèrent une eau confinée (réaction de nappe captive). Les essais au micro-moulinet confirment la très grande hétérogénéité de la répartition verticale des zones perméables : le milieu apparaît de fait, comme discontinu et traversé par des fractures très conductrices bien localisées. Au nouveau captage de Sangatte, le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de  $1,5 \cdot 10^{-3}$  et la plus forte perméabilité ( $1,8 \cdot 10^{-2}$  m.s<sup>-1</sup>) a été rencontré à 38 m de profondeur, sur 1 m de hauteur verticale (Crampon, 1988).

Une bonne image de ce milieu fracturé à écoulements localisés est, somme toute, donnée par la falaise du Cran d'Escalles où Colbeaux et Mania (1976) ont pu mesurer les débits exhaérés en fonction de chaque fissure. A noter, au passage, que les fractures à faible pendage pourraient avoir un rôle important dans l'écoulement de la nappe. Si l'hypothèse du milieu poreux équivalent reste globalement valable à l'échelle régionale, son application ponctuelle et sectorielle (implantation de nouveaux captages, transfert de masse et risque de pollution d'un ouvrage) s'avère beaucoup plus délicate.

L'interprétation de traçages en milieu poreux isotrope permet de déterminer une "épaisseur efficace réduite"  $ew$  (produit de l'épaisseur efficace ou transmissive ( $e$ ) par la porosité cinématique  $w$ ). En milieu fracturé, l'épaisseur efficace n'a plus véritablement de sens et on ne peut donc en déduire la valeur de la porosité cinématique. La prévision des transferts convectifs reste néanmoins possible puisque l'on connaît généralement plus la transmissivité moyenne ( $T$ ) que la perméabilité équivalente horizontale ( $K$ ):

$$\text{vitesse effective : } u = \frac{Ki}{w} = \frac{Ti}{ew} \text{ avec } i : \text{gradient hydraulique}$$

L'unique traçage en écoulement convergent (Fig. 3) réalisé dans la nappe de la craie de ce secteur littoral (flanc NE du Mont Saint Martin) a permis de déterminer une dispersiveité de l'ordre de 10 m et une "épaisseur efficace réduite"  $ew$  de l'ordre de 1 m, soit une vitesse effective de l'ordre de 3,6 m.j<sup>-1</sup> en écoulement naturel (Crampon, 1988).

## 2) Limites et exutoires de l'aquifère crayeux

Sur le flanc NE du périclinal boulonnais, l'aquifère crayeux est globalement limité, au SSW par la faille de Landrethun, à l'WNW par les falaises du Blanc-Nez où le relèvement des couches, signalé plus haut, ne doit permettre qu'une exhaure limitée le long du littoral, au NNE par son ennoyage sous la plaine maritime, tandis que vers l'ESE l'aquifère se raccorde à tout l'ensemble crayeux du Nord-Pas-de-Calais.

Dans la zone des coteaux crayeux dominant Calais, la nappe est libre (si l'on accepte, à l'échelle régionale, le modèle poreux équivalent) et s'écoule globalement vers le NE selon un gradient hydraulique décroissant progressivement (plus de 10<sup>-2</sup> à l'amont, jusqu'à moins de 5.10<sup>-4</sup> à l'approche de la

plaine). C'est dans cette même zone d'affleurements que se produit la recharge de la nappe grâce à la pluie efficace, le ruissellement étant généralement nul comme le montre la présence de vallons secs.

L'écoulement devrait se poursuivre en profondeur, sous la plaine maritime quaternaire où la nappe peut devenir captive (sous l'argile de Louvil) ou semi-captive (sous certains niveaux aquitards quaternaires). Mais sous le Landénien la craie profonde devient rapidement peu transmissive (cf. les forages situés dans la ville de Calais), tandis qu'au pied des coteaux, sous recouvrement alluvionnaire la craie reste très conductrice. L'exutoire naturel essentiel serait donc les alluvions de la plaine maritime ainsi réalimentées, *per ascensum*, par les eaux de la craie. Des sources de débordement confirment cet écoulement au niveau des alluvions à la faveur de drains naturels dont l'origine peut être structurale, comme signalé pour le vallon de la Basse Normandie. En définitive, les watergangs drainant les alluvions, sont aussi l'exutoire de la nappe de la craie, exutoire auquel il faut évidemment ajouter les prélèvements par pompage.

## 3) La nappe des alluvions

Compte tenu de la complexité des variations de faciès des dépôts pléistocènes et parfois holocènes en bordure de la plaine maritime, il est probable que l'aquifère alluvial soit localement multicouche. Toutefois, régionalement, on peut le considérer comme unique ("sables pissarts"), alimenté essentiellement par les précipitations sur la plaine et drainé par les watergangs quand les conditions de marées permettent l'évacuation vers la mer. Des échanges verticaux par drainage existent avec la nappe de craie, drainage normale (*per descensum*) possible dans des zones plus centrales où la piézométrie des alluvions est supérieure à celle de la craie. Dans le modèle réalisé (Levassor, 1988), l'assise de Calais est considérée comme homogène avec une transmissivité uniforme de 10<sup>-3</sup>m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> et un coefficient d'emmagasinement de 10<sup>-1</sup>.

## 4) L'interface eau douce - eau salée

Le schéma classique de l'interface située au droit du rivage n'existe en fait qu'en dehors de la plaine maritime : c'est le cas au sud de Sangatte où la falaise crayeuse domine la mer. De Sangatte à Coquelles, l'interface, très redressée et orientée E-W est essentiellement parallèle à la bordure de la plaine flamandaise ; puis, entre Coquelles et l'Est de Fréthun, il s'incline vers le SW.

L'origine des eaux salées n'est pas à rechercher dans un phénomène contemporain d'intrusion d'eau marine : l'invasion aurait alors une extension limitée par rapport au littoral. En fait, la présence d'eau saumâtre ou salée s'explique par l'histoire géologique quaternaire de la plaine maritime avec les rivages pléistocène, puis flandrien et dunkerquiens où la mer s'est avancée jusqu'aux watergangs actuels.

Depuis, la réalisation de digues, la poldérisation et le drainage ont repoussé la mer, mais l'eau marine fossile reste retenue dans les terrains (alluvions et craie) bien que progressivement refoulée vers le rivage actuel par les eaux douces en

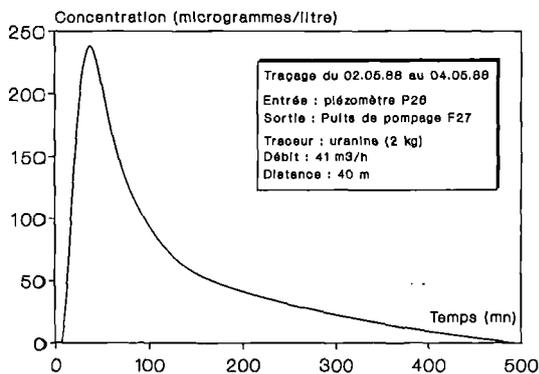


Fig. 3. — Courbe de restitution obtenue par traçage en aquifère crayeux en écoulement mixte : convergent surimposé à l'écoulement naturel. Courbe de restitution (d'après Porel, 1988).

Fig. 3. — Breakthrough curve achieved by tracer test in chalk aquifer by mixed groundwater flow : radial and natural flow (after Porel, 1988).

provenance des affleurements crayeux. Le recul des eaux salées serait plus rapide dans la partie supérieure de l'aquifère par suite des plus faibles perméabilités rencontrées en profondeur (Levassor, 1989).

### III. — LES TRAVAUX CONTINENTAUX DE LA LIAISON FIXE ET LA NAPPE

Trois sortes d'interactions peuvent être évoquées :

— les travaux du Tunnel ont nécessité des études, réalisées à la demande d'EUROTUNNEL, qui constituent un apport à la connaissance hydrogéologique de l'aquifère crayeux ;

— les travaux peuvent modifier le comportement de la nappe ;

— la nappe peut perturber les travaux.

#### 1) Les apports scientifiques liés aux études et travaux

Sur les plans stratigraphique et lithologique, les nombreux sondages ont permis de préciser les épaisseurs et les faciès des assises crétacées, leur composition minéralogique et chi-

mique, mais surtout de préciser l'extension du Landénien sous couverture quaternaire, et plus encore, la géologie et la morphologie des dépôts pléistocènes et holocènes.

En hydrogéologie, c'est surtout la campagne complémentaire d'acquisition de données, réalisée en 1987 (SIMECSOL - ARMINES) qui a été riche en enseignements, avec 36 sondages destructifs et enregistrement numérique simultané des paramètres de forage, 11 diagraphies, 20 essais Lefranc (sur 3 sondages), 12 essais au micromoulinet, 2 pompages d'essai de longue durée et 6 essais de courte durée, 19 mesures de conductivité électrique en sondages, 54 sondages électriques, des cartographies piézométriques détaillées à différentes époques, des enregistrements de fluctuations piézométriques. La description, dans les paragraphes précédents, de la structure de l'aquifère crayeux fracturé, des échanges avec la nappe des alluvions, de l'interface eau douce - eau salée, est le fruit de la réflexion sur ces mesures en vue, notamment, de la préparation d'un modèle numérique de simulation hydrodynamique (Levassor).

#### 2) Les travaux perturbent-ils la nappe ?

La question est à l'origine même des études hydrogéologiques entreprises et de la modélisation du comportement hydrodynamique en régime transitoire confiées à SIMECSOL

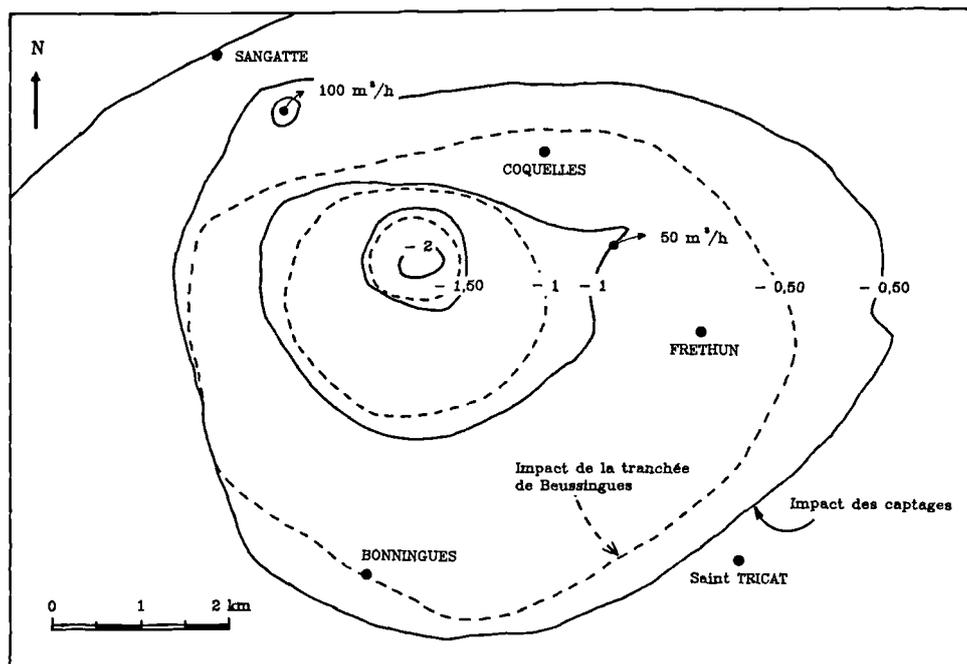


Fig. 4. — Rabattements induits par la tranchée de Beussingue (drainage à cote fixe) et les ouvrages de pompage prévus (d'après Levassor, 1989). Le niveau de référence de la nappe est celui de janvier 1987.

Fig. 4. — Draw down resulting from Beussingue ditch (fixed level dewatering) and scheduled water catchment (after Levassor, 1989). January 1987 aquifer level is used as reference.

- ARMINES. Il s'agit d'un modèle bi-couche couvrant une région d'environ  $20 \times 14$  km, comportant 999 mailles pour l'aquifère crayeux et une surface deux fois moindre pour les alluvions avec 451 mailles, les mailles étant carrées avec 250, 500 ou 1 000 de côté. L'outil de modélisation était le logiciel NEWSAM du Centre d'Informatique Géologique de l'École des Mines de Paris (de Marsily *et al.*, 1978).

Parmi les questions posées et auxquelles le modèle, une fois calé, a permis d'apporter des éléments de réponse (Levassor, 1989), on peut noter :

a) *Les répercussions piézométriques* et donc les rabattements supplémentaires qui pourraient se produire dans des captages existants, par le fait de la création :

— d'une condition de drainage à la tranchée d'accès au tunnel (tranchée de Beussingue),

— d'un pompage au fond de St-Martin, en remplacement du forage d'A.E.P. (1) de Sangatte supprimé par la galerie de service de la Liaison Fixe Transmanche,

— d'un deuxième ouvrage de prélèvement aux alentours du Terminal (pour ses besoins propres et en renforcement éventuel d'A.E.P.).

La tranchée de Beussingue ne draine évidemment la nappe que lorsque la charge hydraulique est supérieure à la cote de drainage. Le principal effet de cette tranchée sera de stabiliser, aux alentours de  $100 \text{ l.s}^{-1}$ , le débit de la Rivierette (partie amont aménagée en tranchée drainante) qui oscille actuellement entre 100 et  $220 \text{ l.s}^{-1}$ . Les débits de la tranchée de Beussingue s'annuleront en étiage et ne devraient guère dépasser  $70$  à  $150 \text{ l.s}^{-1}$  en hautes eaux.

L'influence sur les captages existants, tant de la tranchée de Beussingue que des deux nouveaux ouvrages de prélèvement (pour Sangatte, il s'agit essentiellement d'un changement d'implantation) dépend des distances, des débits et des dispositions hydrogéologiques locales. Sans entrer dans le détail, disons que l'influence la plus forte concernera le forage SNCF de Vieux Coquelles, le plus voisin des installations du Terminal, où la tranchée de Beussingue provoquera un rabattement de pointe de l'ordre de 2 m. Par contre, les rabattements théoriques induits (Fig. 4) seront d'ordre décimétrique dans le champ captant de Fréthun et centimétrique (donc négligeables) dans celui de Guines. A noter que les prélèvements de Guines n'ont guère eu de répercussion évidente sur les niveaux piézométriques enregistrés depuis une vingtaine d'années à Fréthun (Levassor, 1989).

b) *Les travaux du Terminal de Coquelles - Fréthun*, avec la mise en place de remblais puis d'aménagements d'accueil, de service et d'entretien, vont entraîner une imperméabilisation de plusieurs centaines d'hectares, ce qui aura un impact sur la recharge de la nappe des alluvions et, plus localement, sur celle de la craie. A l'aide d'une carte de coefficients d'absorption du sol, établie par le constructeur, la recharge a été recalculée dans ce domaine et le modèle a pris en compte

cette particularité lors des simulations. L'interface eau douce - eau salée coupant en deux les aquifères alluviaux et crayeux recouverts par le Terminal, tout pompage d'eau douce dans la moitié SW est vivement déconseillé, puisqu'il contrarie la progression de l'interface vers le NE et risquerait, à terme, de prélever des eaux saumâtres puis salées.

Parmi les répercussions possibles des travaux du Terminal sur la nappe, il y a bien évidemment aussi l'impact qualitatif que pourrait entraîner le lessivage, par les précipitations, des matériaux utilisés pour le remblai. Il fut notamment envisagé de réaliser ces remblais par voie hydraulique à partir de sédiments marins dragués et refoulés en suspension dans de l'eau marine. L'étude d'impact a nécessité, entre autres, la mise en œuvre d'un modèle de transfert de masse vertical par percolation.

c) *L'effet d'écran du Tunnel* (Fig. 5) a dû également être examiné : les trois galeries de la Liaison Fixe Transmanche vont en effet remplacer partiellement, sur 8,80 m de hauteur, la craie fissurée aquifère. Il en résultera une réduction d'épaisseur efficace et donc de transmissivité qui dépend surtout des cotes respectives du Tunnel et de la nappe ainsi que de la pro-

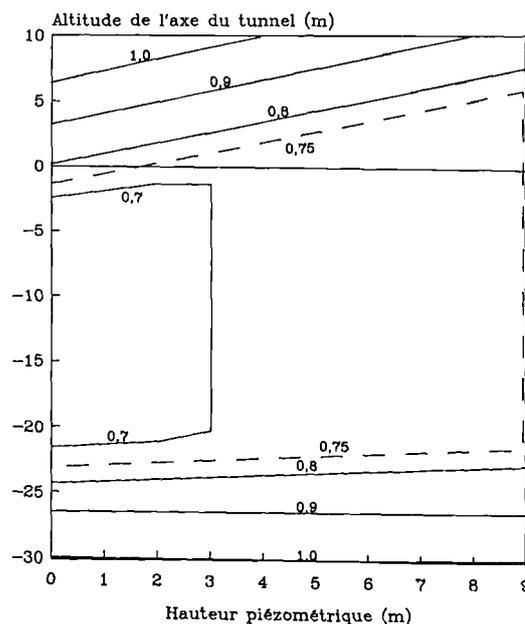


Fig. 5. — Effet d'écran du tunnel (d'après Levassor, 1989). Evolution du rapport  $T'/T$  en fonction de l'altitude et la hauteur piézométrique avec :  
 $T$  : transmissivité de la craie sans tunnel,  
 $T'$  : transmissivité de la craie avec tunnel.

Fig. 5. — Tunnel screen effect (after Levassor, 1989).  $T'/T$  ratio evolution versus altitude and groundwater level.  
 $T$  : chalk transmissivity without tunnel,  
 $T'$  : chalk transmissivity with tunnel.

(1) Alimentation en Eau Potable des Collectivités Publiques.

fondeur de fissuration. En supposant une épaisseur efficace de 30 m, une conductivité hydraulique de  $3.10^{-3}$  m.s<sup>-1</sup> en craie aquifère et  $10^{-7}$  m.s<sup>-1</sup> en craie aquiclude, l'effet d'écran peut se traduire par un coefficient réducteur pour la transmissivité, au pire égal à 0,7 lorsque l'axe du Tunnel sera compris entre les cotes -2 et -21 m NGF.

### 3) La nappe perturbe-t-elle les travaux ?

Cette question corollaire relève beaucoup plus de l'hydrogéotechnique et du génie civil que de l'hydrogéologie et il est difficile d'y répondre sans entrer dans le détail. Schématiquement, deux sortes de problèmes sont rencontrés.

Le premier est relatif aux terrains quaternaires saturés sur lesquels est implantée une partie au moins des installations du Terminal. Les couches compressibles, tourbeuses notamment, du vallon de la Basse-Normandie et des waterings de la zone NE sont évidemment susceptibles de tassements sous le poids des remblais et des installations, dans la mesure où leur drainage serait facilité par un rabattement de la nappe, soit en conséquence du drainage de la Tranchée de Beussingue, soit plus simplement par suite de variations dans les conditions d'exploitation des forages avoisinants de Fréthun.

Le deuxième problème est relatif aux travaux souterrains : percement du Puits d'accès de Sangatte, puis des galeries en milieu continental aquifère. Pour le Puits d'accès, le problème a été résolu par injection latérale circulaire d'un voile étanche, puis par bétonnage des parois. Dans le percement, en cours, des galeries, la progression est liée à des injections au fur et à mesure de l'avancée, les venues d'eau étant particulièrement abondantes lors de la traversée des failles ou des fractures conductrices. Là encore l'aquifère se révèle être un milieu fracturé en grand, donc hétérogène, beaucoup plus qu'un milieu poreux saturé. Il est à noter que cette progression en milieu fracturé est l'une des difficultés majeures des

travaux du côté français, tandis que les travaux britanniques débutent directement dans la "craie bleue" cénomaniennne peu perméable.

## CONCLUSIONS

Les travaux de la Liaison Fixe Transmanche dans le domaine continental français ont nécessité un approfondissement considérable de la connaissance hydrogéologique régionale qui a pu être obtenu par la mise en œuvre de nouvelles mesures ou d'essais in situ, tant en forage qu'en géophysique et en géotechnique.

Ces données ont servi à alimenter un modèle de simulation hydrodynamique du système bi-couche nappe de la craie - nappe des alluvions et permis ainsi de mieux en connaître le comportement d'ensemble. Mais, on retrouve, là encore, l'inévitable problème d'échelle : les mesures ponctuelles, souvent indicatrices de l'hétérogénéité d'un milieu fracturé aux réactions hydrodynamiques complexes, ne peuvent totalement être prises en compte dans la conceptualisation d'ensemble sous la forme d'un modèle en milieu poreux, ce type de modèle restant cependant nécessaire, pour estimer l'influence des travaux (drainage, pompes nouveaux, effet d'écran, effet d'imperméabilisation) sur l'ensemble de la nappe et les ouvrages d'exploitation.

La concentration d'importants intérêts économiques dans ce secteur justifierait largement le développement des investigations hydrogéologiques et, en tous cas, de suivre l'évolution piézométrique et qualitative des nappes pendant plusieurs années après la fin des travaux. Plus fondamentalement, une synthèse de toutes les observations géologiques, structurales (pendages, fracturation) et des venues d'eau (en forages, dans le Puits d'accès de Sangatte et en galeries) constituerait une retombée scientifique indéniable des travaux du Tunnel sous la Manche.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1) BECKELYNCK J., BAILLY S. et JOURDAIN E. (1986). — EUROTUNNEL : Etude Hydrogéologique et Hydrochimique. Etat initial du domaine des installations continentales françaises. Phase 1. Rapport B.R.G.M. n° 86 SGN 524 NPC, 22 p., 22 annexes, 3 cartes, 124 fiches d'enquête.
- 2) CARLIER E. (1983). — Influence de la fracturation sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif des calcaires paléozoïques de l'Avesnois (Nord). *Thèse de 3<sup>e</sup> Cycle*, Lille, 224 p.
- 3) COLBEAUX J.P. et MANIA J. (1976). — Relations entre la fracturation et l'écoulement des eaux superficielles et souterraines en pays crayeux au Cran d'Escalles. Application à l'Artois. *Deuxième Coll. d'Hydrologie en Pays Calcaire*, Besançon, *Ann. Scient. Univ. Besançon*, Géol., fasc. 25, 3<sup>e</sup> sér., p. 179-194.
- 4) COLBEAUX J.P. *et collab.* (1985). — Géologie du Boulonnais. Parc Naturel Régional du Nord - Pas-de-Calais. *Science et Nature* n° 3. Ed. E.N.R., 176 p.
- 5) CRAMPON N. (1988). — Les eaux souterraines : un problème d'échelle. *L'Hydrogéologie : une science d'interface. Ann. Soc. géol. Nord*, t. CVI, p. 309-321.
- 6) CRAMPON N. (1988). — Création de deux captages de remplacement pour l'alimentation en eau potable de Sangatte et les installations du Tunnel sous la Manche. *Rapport Hydrogéologique Agréé en Matière d'Hygiène Publique*, 11 p.
- 7) DELATTRE Ch., MERIAUX E. et WATERLOT M. (1973). — Région du Nord : Flandres, Artois, Boulonnais, Picardie. *Guides Géologiques Régionaux*. Ed. Masson, 176 p.

- 8) HUEBER J. et MAGNAS J.P. (1987). — Le Tunnel sous la Manche dans son cadre géologique. *Journées d'Etude "Grands Travaux et Géologie"*, ENPC, 21 p.
- 9) LEVASSOR A. et CAIRON D. (1987). — Etude hydrogéologique du domaine des installations continentales françaises du Tunnel sous la Manche. Phase 2. Campagne de sondages et mesures. Rapport de synthèse. SIMECSOL, rapport n° NT 04-0560-A 08 A, 34 p.
- 10) LEVASSOR A. (1988). — France Manche. Etude hydrogéologique du domaine des installations continentales françaises. Etablissement du modèle. SIMECSOL, rapport n° NT 04-0560-A 31 A, 31 p.
- 11) LEVASSOR A. (1989). — Etude hydrogéologique du domaine des installations continentales françaises du Tunnel sous la Manche. Modélisation. Rapport de synthèse. SIMECSOL, rapport n° NT 04-0560-A 48 A, 21 p.
- 12) MANIA J. (1978). — Contribution à l'étude des systèmes aquifères. Leurs influences sur la gestion des ressources en eau du Nord de la France. *Thèse Dr ès Sc.*, Lille, Soc. géol. Nord, mém. n° XV, 228 p.
- 13) MARSILY (de) G., LEDOUX E., LEVASSOR A., POITRI-NAL D. et SALEM A. (1978). — Modelling of large multi-layered aquifer systems : theory and applications. *Journ. of Hydrol.*, 36, p. 1-34.
- 14) MAZEAS H. (1987). — TransManche Construction. Terminal France. Synthèse des données géotechniques. Chap. 1. Cadre géologique et stratigraphique. *Rapport MECASOL*, 17 p.
- 15) POREL G. et COLBEAUX J.P. (1989). — Implantation d'un puits de pompage d'eau potable aux alentours du Terminal de Coquelles. *Rapport Labo. Hydrogéologie USTL pour TML*, 1<sup>re</sup> phase, 43 p.
- 16) SNOW D.T. (1969). — Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resour. Res.*, 5, p. 1273-1289.



## Application de la photogéologie et de la géophysique à la recherche de ressources en eau dans la craie à la limite Avesnois-Cambrésis

### Analysis of satellite images and results of geophysics for research of groundwater resources in North of France (Avesnois/Cambrésis)

par Paul CAULIER (\*), Henri MAILLOT (\*\*), et Christian PRÉAUX (\*\*)

*Résumé.* — Dans le cadre d'un renforcement de la ressource en eau potable des groupements de communes du S.I.D.E.N. dans la région du Quesnoy, une recherche appliquée s'est appuyée non seulement sur les connaissances documentaires existantes, mais également sur les éléments apportés par des missions satellitaires et aéroportées, vérifiés par prospections géophysiques puis mécaniques (sondages de reconnaissance).

Les auteurs envisagent successivement dans le détail les résultats :

- des missions satellitaires, avec interprétation des linéaments,
- des missions aéroportées spécifiques avec prises de photos en infrarouge et étalonnage au sol,
- des prospections géophysiques par méthodes sismique et électrique (sondages, traînés),
- des sondages de reconnaissance mécaniques avec tests de productivité.

Cette recherche a été réalisée avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et du Ministère de l'Environnement. Dans un secteur où, biseauage et quelquefois disparition des assises crayeuses sur le vieux socle primaire affecté de failles rendent difficile la localisation des secteurs aquifères, elle aura permis, grâce à la complémentarité des méthodes, d'implanter judicieusement les sondages de reconnaissance. Ces derniers ont mis en évidence, pour la moitié d'entre eux, de nouvelles ressources en eau potable, dont l'exploitation prochaine permettra d'éviter le renforcement d'une adduction lointaine, tout en sécurisant la production par sa diversification.

*Abstract.* — In order to increase resources of groundwater ensured by SIDEN for a group of villages around Le Quesnoy, a specific applied research is undertaken. It is based on various elements, satellites photos, air reconnaissances, and boreholes.

*Details are developed for :*

- photos with interpretation of lineaments,
- infrared air photos taken in specific areas,
- geophysical prospection with seismic and electric methods,
- reconnaissance boreholes with tests.

*This research is subsidized by Agence de l'Eau Artois-Picardie and Environment Ministry.*

*The studied area shows a thinning and sometimes a disappearance of chalk beds lying on a faulted paleozoic basement. This make the work more difficult in view to localize the water bearing areas. The complementary methods were fruitful for half of the trials, so a far conveying is avoided.*

---

(\*) Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord (S.I.D.E.N.), 23, avenue de la Marne, B.P. 101, 59443 Wasquehal Cedex.

(\*\*) Cycle Urbain et Pollution des Eaux - EUDIL - USTL, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

## INTRODUCTION

Dans le cadre d'un renforcement des ressources en eau potable de plusieurs groupements de communes situés dans la région du Quesnoy, le Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord (S.I.D.E.N.) a effectué avec le concours financier du Ministère de l'Environnement et de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, une recherche de sites favorables à l'implantation de nouveaux captages d'eau souterraine.

L'implantation des sondages de reconnaissance s'est appuyée non seulement sur les connaissances documentaires existantes, mais également sur les éléments apportés par des missions satellitaires et aéroportées, vérifiées par prospections géophysiques.

Les études ont été confiées :

— à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs (EUDIL) de l'Université des Sciences et des Techniques de Lille, pour la partie photo-géologique : examen d'images-satellites SPACELAB et SPOT permettant de visualiser l'occupation du sol et de repérer les grands linéaments existants ; exécution et interprétation de photos infrarouge couleurs prises d'avion pour préciser les observations satellitaires ;

— au Service Géologique Régional Nord - Pas-de-Calais du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (SGR/N.PC-BRGM), pour la partie : examen documentaire, études au sol (prospection géophysique, suivi des forages de reconnaissance, essais de débit et analyses d'eau) et synthèse générale (1).

Les sondages ont été réalisés par le laboratoire du Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (C.E.T.E.) de St-Quentin, par foration à l'outil à lames avec injection d'air.

### I. — CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

La partie occidentale de l'Avesnois est un plateau très vallonné descendant progressivement du SE vers le NW, c'est-à-dire vers la vallée de l'Escaut (2). Il est constitué par des dépôts sédimentaires dont la succession est, de haut en bas, la suivante :

a) *couverture quaternaire* masquant la quasi-totalité des terrains sous-jacents et composée d'alluvions limono-sableuses et tourbeuses de quelques mètres d'épaisseur dans les principales vallées ; de limons d'épaisseur et de composition très variables, fonctions de la nature du substrat et des mouvements tectoniques récents ; ou encore du résidu d'altération des terrains crétacés (argile plastique brune ou verdâtre, avec silex caverneux vers la base). Cette formation a été dénommée "Marnes de la Porquerie" par J. Gosselet, et constitue le substratum de la forêt de Mormal et de ses environs ;

b) *sables tertiaires* (Landénien) à niveaux argileux et gréseux ne subsistant plus que sous forme de lambeaux de quelques mètres sur les plateaux ;

c) *assises crayo-marneuses du Crétacé supérieur* comprenant :

— la craie blanche à silex de la base du Sénonien, présente vers l'Ouest de la zone d'étude,

— 10 à 20 mètres de craie gris-blanc à gros silex du Turonien supérieur,

— une alternance de bancs de marnes gris-bleu et de bancs crayeux gris du Turonien moyen, épais de 20 à 30 mètres,

— des marnes vertes à craies argileuses, avec un niveau très glauconieux à la base caractéristique d'un faciès de transgression (tourtia) sur le socle *primaire dévono-carbonifère*.

Les assises crétacées et tertiaires présentent un pendage général faible vers le NW mais elles peuvent localement être affectées par des failles ou des flexures en relation avec la tectonique du socle primaire.

Seules les assises crayeuses du Turonien supérieur et de la base du Sénonien constituent lorsqu'elles sont présentes et en position favorable un réservoir aquifère peu profond, contenant une nappe généralement de bonne qualité.

Cette dernière est essentiellement alimentée par percolation des eaux de pluie tombant sur les plateaux et elle s'écoule globalement vers le NW, en régime libre à l'E puis captif vers l'W. Son gradient est élevé (indice d'une perméabilité et d'une transmissivité plutôt faibles). Son épaisseur va de quelques mètres à plus de 10 mètres tandis que ses fluctuations piézométriques naturelles sont de plusieurs mètres dans les secteurs déjà exploités.

### II. — TRAITEMENT DES CLICHÉS SATELLITAIRES SPACELAB

#### 1) Caractéristiques du cliché SPACELAB

Le cliché SPACELAB (réf. 01.0277.07) provient de l'une des expériences réalisées à bord du laboratoire européen embarqué lors du 9<sup>e</sup> vol de la navette spatiale américaine (4 et 5).

La photo est issue de l'utilisation d'une chambre photographique dérivée d'un appareil de prises de vues aériennes modèle Zeiss QMKA 30/23 équipé d'un objectif Zeiss Topar A de 305 mm de focale permettant des prises de vues stéréoscopiques.

Le film employé lors du survol à 250 km d'altitude de la région Nord - Pas-de-Calais est le Kodak-Aérocrome infrarouge couleur 2443 (il permet de capter les longueurs d'ondes jusqu'à 900 nm).

Le négatif fourni à l'échelle au 1/820 000 a été agrandi au 1/100 000.

#### 2) Examen des linéaments

##### a) *Méthodologie*

Sont déterminées visuellement les directions préférentielles (alignements, cours d'eau...). Les éléments parasites tels que les routes, voies ferrées, limites parcellaires... sont éliminés grâce à l'emploi de cartes reportées sur films transparents.

Fort de ces précautions, il est possible d'admettre que les linéaments retenus correspondent à des éléments naturels. On observe, soit des discontinuités de longueurs importantes (20 à 50 km) pouvant atteindre une largeur de 500 m, soit des discontinuités plus petites.

b) *Comparaisons des linéaments de SPACELAB avec les discontinuités tectoniques déjà connues*

Nous partons de l'hypothèse de travail selon laquelle ces linéaments peuvent correspondre à des accidents tectoniques.

Afin de comparer les résultats obtenus sur le cliché SPACELAB avec ceux déjà connus nous avons :

— limité notre observation au secteur défini sur la figure 1,

— reporté sur la figure 2 les linéaments issus de l'analyse des données de Landsat I par Cazabat (1972-1977),

— reporté sur la figure 3 les linéaments que nous avons déduits de l'analyse de SPACELAB.

Il apparaît que les linéaments mis en évidence sur SPACELAB sont complémentaires de ceux déjà connus mais ne se superposent quasiment jamais aux discontinuités tectoniques linéaires figurées sur les cartes géologiques ou tectoniques publiées.

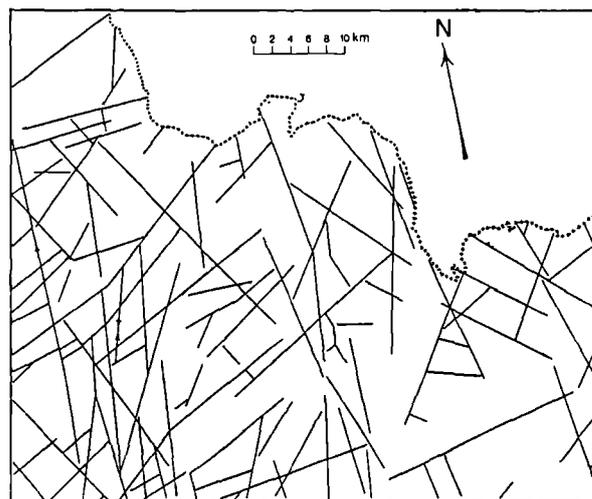


Fig. 2. — Linéaments d'après les analyses des données de LANSAT 1, in Cazabat 1972-1977.

Fig. 2. — Lineaments from LANSAT 1 analysis, in Cazabat 1972-1977.

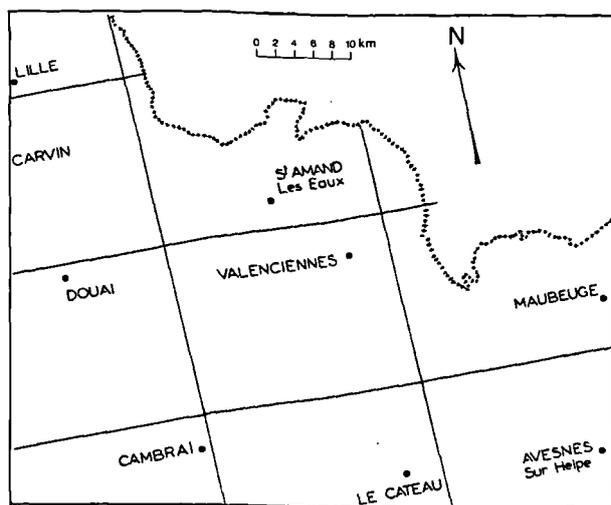


Fig. 1. — Localisation de la zone d'étude, découpage des cartes topographiques de l'I.G.N.

Fig. 1. — Localisation of the study area, outlines of the topographic maps of I.G.N.

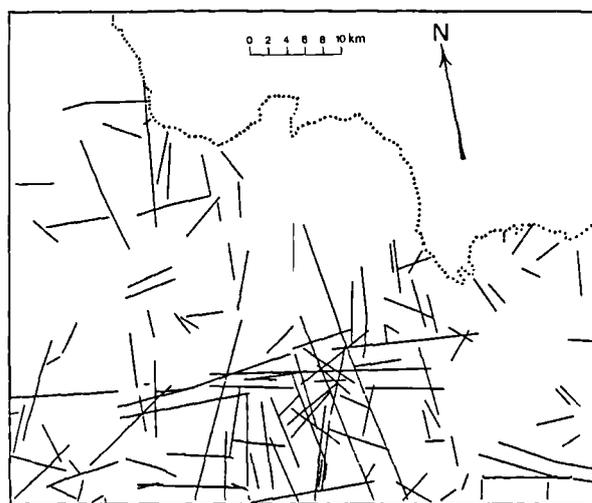


Fig. 3. — Linéaments d'après les analyses des données de SPACELAB, Préaux 1985.

Fig. 3. — Lineaments from SPACELAB analysis, Préaux 1985.

### III. — INTERPRÉTATION DES CLICHÉS IGN ET SPOT

#### 1) Caractéristiques des clichés IGN et du cliché SPOT

##### a) Clichés IGN

Ont été examinés des clichés stéréoscopiques permettant l'obtention de stéréogrammes, c'est-à-dire permettant de recréer la vision en relief.

Ces clichés obtenus auprès de l'Institut Géographique National (I.G.N.) ont été réalisés à moyenne échelle ( $\approx 1/11\,000^\circ$ ).

Toutes ces photographies aériennes ont été réalisées avec des caméras à axe vertical avec des films spéciaux sensibles aux longueurs d'ondes du spectre visible.

##### b) Cliché SPOT

SPOT 1 est un satellite automatique européen mis sur orbite en 1986. Les deux instruments indépendants embarqués sont du type H.R.V. (Haute Résolution Visible), mais la caractéristique principale du système est de comporter un miroir orientable permettant un angle de prise de vue  $\pm 27^\circ$  de part et d'autre de la verticale.

L'orbite, à 832 km d'altitude est héliosynchrone. Le mode multispectral permet une observation dans 3 bandes de fréquence : 500 à 590 nm, 610 à 680 nm et 790 à 890 nm.

Les données de SPOT 1 sont disponibles sur 3 supports.

Nous avons opté pour un prétraitement de niveau 2 qui autorise les corrections radiométriques et géométriques par points d'appui. Le cliché est redressé et superposable à la projection de Lambert (zone 1).

La prise de vue réf. (K : 41, J = 248,321) date du 1<sup>er</sup> février 1987 à 10 h 41 GMT et concerne un quadrilatère centré sur Valenciennes dont les sommets sont : Lille au NW, Soignies au NE, Avesnes-sur-Helpe au SE et Bapaume au SW.

#### 2) Examen des linéaments

##### a) Méthodologie

Elle est identique à celle détaillée pour l'interprétation du cliché SPACELAB. La précision est meilleure (de l'ordre de 5 m).

##### b) Comparaison des linéaments obtenus sur le cliché SPOT avec les discontinuités tectoniques linéaires et linéaments déjà connus

Le nombre de linéaments observés sur SPOT 1 est moins important que celui mis en évidence sur le cliché LANDSAT ou sur celui de SPACELAB. Les données sont complémentaires de celles déjà obtenues lors des autres interprétations (figure 4).

#### 3) Occupations du sol

La précision et les contrastes colorés apportés par le cliché SPOT lui donnent un net avantage sur ceux de SPACELAB.

Sans que le détail en soit donné ici, retenons que le cliché SPOT permet de distinguer : zones boisées, surfaces en herbe, champs cultivés, zones urbanisées, étendues d'eau, voies de communication et divers détails ponctuels.

Bref, l'interprétation du cliché apporte rapidement une information sur l'occupation du sol à l'échelle du  $1/100\,000^\circ$ .

#### 4) Conclusion partielle sur l'apport des deux clichés : fracturation potentielle et occupation du sol

Si le cliché SPOT apporte un maximum d'informations sur l'occupation du sol, il permet aussi de définir quelques linéaments qui, joints à ceux déduits de l'examen du cliché SPACELAB, apportent de nouvelles informations interprétables comme des fracturations d'assises proches de la surface.

En effet, ces linéaments ne correspondent pour la plupart à aucune discontinuité tectonique déjà reconnue par les auteurs (cartes géologiques, tectoniques, géophysiques, documents divers).

Afin d'obtenir une meilleure localisation de ces linéaments, une prospection aéroportée spécifique a été entreprise sur la zone d'étude ainsi qu'une prospection géophysique (sismique) pour préciser leur nature.

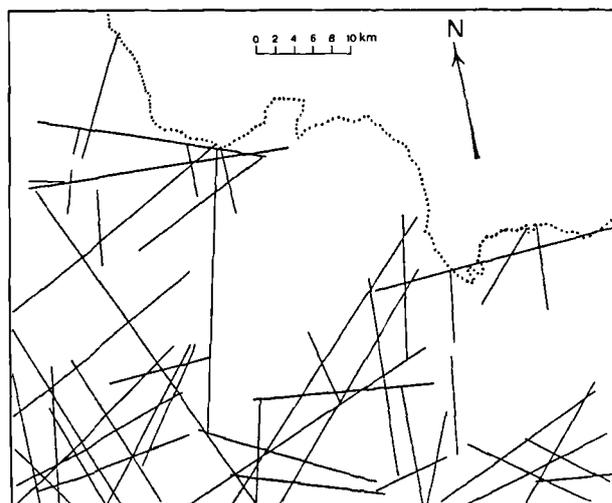


Fig. 4. — Linéaments d'après les analyses des données de SPOT, Préaux 1987.

Fig. 4. — Lineaments from SPOT analysis, Préaux 1987.

#### IV. — PRINCIPAUX APPORTS DE LA PROSPECTION AÉROPORTÉE ET DE LA PROSPECTION GÉOPHYSIQUE (SISMIQUE)

##### 1) Méthodologie

Cette méthodologie est détaillée dans un autre article publié dans ce volume des annales auquel nous renvoyons : "Assainissement, épuration et ressources en eau potable. Apport des recherches de géophysiques appliquées dans la région Nord - Pas-de-Calais".

##### 2) Résultats

###### a) Prospection aéroportée par infrarouge

Sur les secteurs retenus suite aux phases qui précèdent, les survols aériens avec prises de clichés infrarouge à des échelles comprises entre le 1/2 000 et le 1/5 000 (environ 600 clichés) ont mis en évidence des contrastes linéaires blanchâtres correspondant vraisemblablement à des zones de drainage préférentiel, liées aux couloirs de fracturation.

###### b) Prospection géophysique (sismique)

Elle a permis outre la détermination de la nature des terrains (limons, sables, craies, marnes...) de confirmer la fracturation de ces zones et ainsi d'orienter la prospection électrique.

#### V. — PROSPECTION GÉOPHYSIQUE (ÉLECTRIQUE)

Une dizaine de sites *a priori* favorables ont été déterminés par :

— la définition du contexte hydrogéologique d'après les données existantes ;

— l'examen des images satellitaires SPACELAB et SPOT définissant les grands linéaments de la région ;

— l'interprétation de photos couleur infrarouge précisant les données de la phase précédente et la prospection géophysique par sismique.

Parmi ceux-ci cinq ont été retenus pour une prospection géophysique par sondages et traînés électriques (profils de résistivité).

##### 1) Procédés utilisés

Dans le cas présent les deux procédés ont été employés suivant deux démarches distinctes (1) :

— sondages électriques (AB maximum = 400 m) puis profils de résistivité (AB = 30 ou 40 m), au cours d'une première campagne de mesures (du 1 au 4/9/1987) ;

— profils de résistivité (AB = 80 ou 140 m) puis sondages électriques (AB maximum = 200 m) à l'aplomb des zones de faible résistivité apparente, au cours d'une seconde campagne (du 28/9 au 2/10/1987).

##### 2) Résultats

Sauf en ce qui concerne la détermination de la profondeur de la craie sous recouvrement tertiaire et quaternaire, l'utilisation de la géophysique (sondages électriques et profils de résistivité) est apparue dans le cas présent peu efficace du fait de la grande homogénéité lithologique de la craie et donc d'un manque de contraste suffisant entre zones très fracturées et zones plus compactes. Il semble par contre que l'utilisation d'images satellitaires et de photos aériennes permette, par les linéaments mis en évidence, de repérer plus aisément les zones où la craie peut présenter une fracturation notable. Cependant, là aussi la méthode n'est pas fiable à 100 %.

#### VI. — CONCLUSIONS : RÉSULTATS DES SONDAGES MÉCANIQUES DE RECONNAISSANCE

Sur les huit sondages de reconnaissance implantés à l'issue des prospections antérieures, quatre n'ont pas atteint leur objectif puisque deux n'ont pas rencontré la craie et deux autres ont traversé la craie, avec un débit insignifiant.

Quatre sondages ont par contre traversé un aquifère crayeux très productif pour deux sites (80 à 100 m<sup>3</sup>/h prévus en exploitation) à moyennement productif (30 m<sup>3</sup>/h prévu en exploitation) pour deux autres sites.

La qualité de l'eau est en général très bonne sauf sur un site où la teneur en nitrates dépasse la concentration maximale admissible (50 mg/l). Son implantation, en tête de bassin versant dans une zone agricole avec ruissellement en est probablement la cause.

Si G. Waterlot pouvait affirmer dès 1947 « que le problème de l'eau est moins celui de la recherche des zones aquifères dont la position est à peu près complètement déterminée, qu'un problème d'organisation de l'exploitation des ressources », il s'avère que dans des secteurs tectoniquement aussi complexes que celui de la limite Cambrésis-Avesnois, seules les méthodes ci-dessus peuvent apporter une partie des compléments d'information indispensables à la mise en évidence de nouvelles ressources aquifères.

### BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- 1) CAOUS J.Y. (1988). — Recherche de sites favorables à l'implantation de captages d'alimentation en eau potable en bordure occidentale de l'Avesnois (Nord). Rapport des 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> phases et de synthèse générale. Rapport BRGM 88 SGN 211 NPC, 26 p., 2 tabl., 3 ann.
- 2) CAULIER P. (1986). — Recherche de sites favorables à l'implantation de captages d'alimentation en eau potable en bordure occidentale de l'Avesnois (Nord). Rapport de 1<sup>re</sup> phase. Rapport BRGM 86 SGN 599 NPC, 33 p., 5 fig., 4 pl.
- 3) MAILLOT H., PREAUX C., BOURGAIN J.M., CUENIN J.L., DE GOYON A., DUPONT C., SZYJKA P. (1988). — Recherche régionale sur la mise au point de mesures géophysiques et son application à l'hydrogéologie et à l'assainissement. Compte rendu de convention de recherche passée entre le S.I.D.E.N. et l'U.S.T.L. (E.U.D.I.L.).
- 4) PREAUX C. (1984). — Application de l'étude de 2 clichés de SPACELAB à l'hydrogéologie de la région Nord - Pas-de-Calais. Résultats préliminaires, 15 p., 8 ann. Compte rendu IGN.
- 5) PREAUX C. (1985). — Etude linéaire de l'arrondissement de Cambrai en vue d'applications hydrogéologiques à partir d'une image SPACELAB (01-277-07) agrandie au 1/100 000, 8 p., 3 fig. Compte rendu IGN.
- 6) WATERLOT G. (1947). — Les ressources hydrogéologiques du Nord de la France. *Le Monde Industriel*, volume 532, p. 5 à 27.

## La cartographie radon des eaux naturelles appliquée à la détermination de zones à risques domestiques de pollution par le radon (cas de la région de Monceau en Ardenne, Belgique)

### Radon mapping of natural water applied at the determination of areas with domestic pollution risks (example of "Monceau en Ardenne" area, Belgium)

par P. DOREMUS (\*), Y. QUINIF (\*) et J.-M. CHARLET (\*)

*Résumé.* — Une cartographie des concentrations en radon dans les sources a été effectuée par notre laboratoire de 1985 à 1987 avec, comme principal but, l'exploration de l'uranium. L'aire étudiée concerne la zone anticlinale du massif paléozoïque de l'Ardenne. Après une présentation des techniques développées par notre laboratoire pour l'analyse du radon dans l'eau (sources, sondages...), quelques exemples de cartographie sont discutés. Ils concernent les possibilités de migration du radon dans les zones fracturées et son accumulation dans les sols et les nappes. Finalement, l'importance de l'étude de la relation entre l'environnement géologique et la pollution par le radon domestique est présentée.

*Abstract.* — A mapping of radon concentration in spring waters has been carried out by our laboratory in 1985-1987 with the principal aim the exploration of uranium concentrations. The area surveyed concerns the anticlinal zone of the paleozoic Ardenne massif. After a presentation of the techniques developed by our laboratory for radon analysis in waters (springs, boreholes...), some examples of mapping are discussed. They concern the possibilities of radon migration in fractured zones and its accumulation in soils and ground water. Finally, the importance of studying the geological environment incidence on indoor is presented.

#### I. — INTRODUCTION

Le problème du radon dans la pollution domestique a fait récemment l'objet de nombreuses études et enquêtes tant en Europe qu'aux Etats-Unis. Il apparaît que le radon dans les habitations constitue, après le tabac, la cause principale du cancer du poumon (Nero, 1988).

La concentration en radon dans les habitations peut varier de façon très importante. Elle a, d'une manière générale, doublé au cours des dix dernières années, conséquence d'une isolation thermique plus importante. Si certains matériaux de construction comme les phosphogypses radifères constituent une source de pollution il apparaît cependant que l'environnement géologique joue un rôle très important. La nature des formations géologiques constitue un facteur susceptible de

créer à une échelle régionale des zones à risques : régions granitiques (Rannou, 1988), formations sédimentaires riches en niveaux radioactifs telles que les faciès "schistes noirs" (Hand et Banikowski, 1988), etc... En Belgique, par exemple, les premières enquêtes démontrent la différence du taux de concentration dans l'habitat de Flandre et de Wallonie (Vanmarcke, 1987). A une échelle plus locale, des facteurs comme la perméabilité des sols et les conditions hydrogéologiques peuvent jouer un rôle important (Hand et Banikowski, 1988). Aussi, des études radiométriques régionales et locales sont-elles nécessaires pour cartographier les zones à risque possible.

Depuis plus de dix ans, le Service "Géologie, Etudes et Prospection" de la Faculté Polytechnique de Mons poursuit des recherches sur le radon, ses méthodes de détection et ses

(\*) Faculté Polytechnique de Mons, Service Géologie - Etudes et Prospection, rue de Houdain, 9, 7000 Mons (Belgique).

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

applications (Mc Laughlin *et al.*, 1982 ; Quinif *et al.*, 1984 ; Doremus, 1985 ; Doremus *et al.*, 1988).

De 1985 à 1987, il a, dans le cadre d'un contrat passé avec la Région Wallonne, réalisé une prospection en uranium du Dévonien inférieur de l'Anticlinal de l'Ardenne. L'un des outils utilisés a été l'inventaire radiohydrogéochimique des eaux des sources de cette région. Nous possédons ainsi une banque de données non négligeable constituée de 410 sources analysées et qui nous donne une "image" radon des eaux naturelles de la région examinée.

Aussi, il nous est apparu intéressant de tenter d'utiliser nos données de prospection avec un autre regard. L'objectif de cet article est de voir comment l'étude des taux de concentration en radon dans les eaux naturelles peut aider à mieux en appréhender les risques domestiques de pollution. Nous avons volontairement limité l'ensemble des données traitées en nous plaçant à une échelle surtout locale.

## II. — LES MÉTHODES DE DÉTECTION DU RADON 222 UTILISÉES A LA FPMS

Nous utilisons, en routine, deux méthodes de détection du radon 222 dans les eaux naturelles. Nous les présentons ici très rapidement, il est possible pour plus de détails de se reporter à nos travaux antérieurs (Quinif *et al.*, 1984 ; Doremus, 1985 ; Doremus *et al.*, 1988).

### 1) Méthode instantanée

Cette première méthode, tout comme la seconde, est basée sur la facilité qu'a le radon à se dissoudre dans les composés organiques. Le rapport R de solubilité du radon dans le toluène sur celle du radon dans l'eau est de 53 (à 20°C, 1 atm) (Stephan *et al.*, 1963). De cette constatation découle le principe de la méthode (fig. 1). Un échantillon d'un litre d'eau est pris sur le terrain et on y incorpore au laboratoire 50 ml de toluène. Les deux phases sont maintenues en présence pendant 4 à 6 heures. Après séparation, le toluène est placé dans un flacon de verre et les radioéléments descendants du radon sont dosés par spectrométrie gamma. Cette technique permet d'estimer la quantité de radon présente dans l'eau par le biais de la radioactivité de ses descendants solides émetteurs de rayonnement gamma (Pb214, Bi214).

La méthode utilisée permet en outre de déterminer la présence du radium dissous dans l'eau et éventuellement de le doser à partir d'un second comptage effectué 30 jours après le premier (durée basée sur la demi-vie du radon 3,8 jours). La totalité du radon alors présent est à attribuer à du radium initialement dissous et qui le génère. Cette technique analytique permet d'obtenir rapidement une cartographie radon des eaux naturelles et en un temps relativement bref d'établir la présence ou non de radium dans les eaux. Le radium est une source pratiquement continue de radon et présente donc une nocivité importante.

La méthode possède cependant des limites : elle n'est pas aisément applicable dans les puits ou forages ni dans les cours et plans d'eau. Dans ceux-ci, les facteurs de dilution et de dégazage prennent en effet une importance considérable.

Les concentrations en radon ont été exprimées en unité standardisée (pCi/l) à partir d'une droite de calibration préalablement établie par une étude comparative avec l'Institut d'Hygiène de Bruxelles.

En outre, la concentration en radon de l'eau ou du sol variant dans le temps en fonction de différents paramètres dont le climat (Klusman *et al.*, 1981 a et b ; Doremus, 1985), il est nécessaire de définir un taux d'anomalie (T.A.) exprimé en pourcent et qui est le rapport suivant :

$$T.A. = \frac{(Rn) \text{ d'une source quelconque } \times 100}{(Rn) \text{ d'une source de référence (le même jour)}}$$

Pour le cas des eaux de sources alimentées par des nappes superficielles ou peu profondes, le paramètre qui a le plus de poids est la pluviométrie. Celle-ci amène une dilution plus ou moins importante du radon dans les eaux alimentant les sources.

Dans le cas qui nous intéresse la source de référence est la source 49 (fig. 3A). Celle-ci n'est jamais sèche, présente un débit suffisant et montre des concentrations en radon non négligeables en permanence.

### 2) Méthode intégrée

Pour tenter de pallier à une partie des inconvénients évoqués, nous avons mis au point un mode de détection passif du radon dans les milieux saturés. Le radon diffusant aisément à travers les matières plastiques (Pochet, 1982 ; Henquin, 1985) nous avons choisi, après de nombreux tests en laboratoire d'utiliser des pots de polyéthylène renfermant 50 ml d'hexane (R = 60 à 20°C, 1 atm). Ce détecteur peut aisément être placé dans un puits, un forage, en ligne de fond ou entre deux eaux dans des cours d'eau, des plans d'eau ou des zones marécageuses.

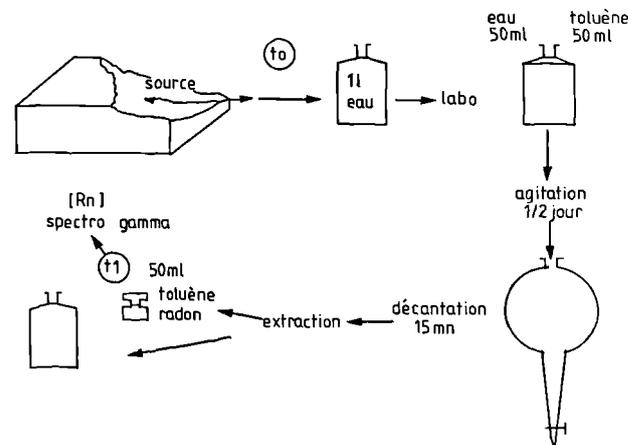


Fig. 1. — Méthodologie d'extraction et de mesure du radon 222 dissous.

Fig. 1. — Methodology of extraction and measurement of the dissolved radon 222.

En routine il est ainsi placé pendant 15 jours dans les zones réputées de faible radioactivité naturelle. Cette période peut être abrégée dans des environnements plus radioactifs. Après récupération, les descendants du radon émetteurs de rayon-

nement gamma sont dosés par radiométrie. Ceci permet d'estimer la dose de radon piégée pendant la période d'exposition à l'émanation. Nous présentons en figure 2 un exemple de résultat obtenu dans un sondage sur une anomalie en uranium.

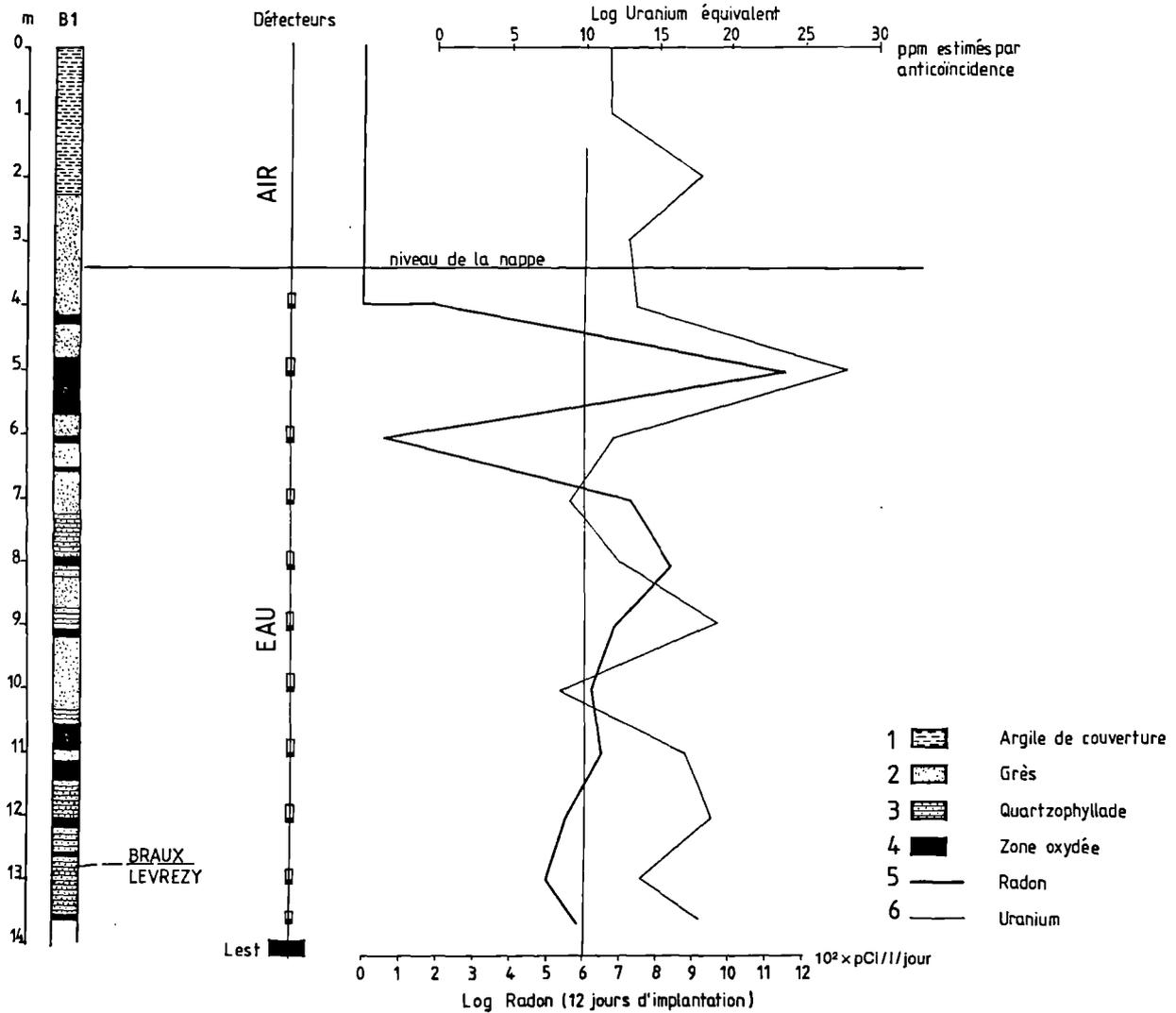


Fig. 2. — Exemple de log radon réalisé grâce aux détecteurs passifs. Comparaison des résultats avec l'estimation des teneurs en uranium : noter la coïncidence des maximum de chaque courbe (5 m) ainsi que l'allure comparable de l'ensemble des deux logs.  
1 argiles, 2 grès, 3 quartzophyllades, 4 zone oxydée, 5 radon, 6 uranium.

Fig. 2. — Example of passive detectors radon logging. Comparison with the uranium estimated content : correspondance of the maxima (5 m) and comparable evolution of both loggings may be noticed.  
1 clays, 2 sandstone, 3 quartzphyllite, 4 oxydized level, 5 radon, 6 uranium.

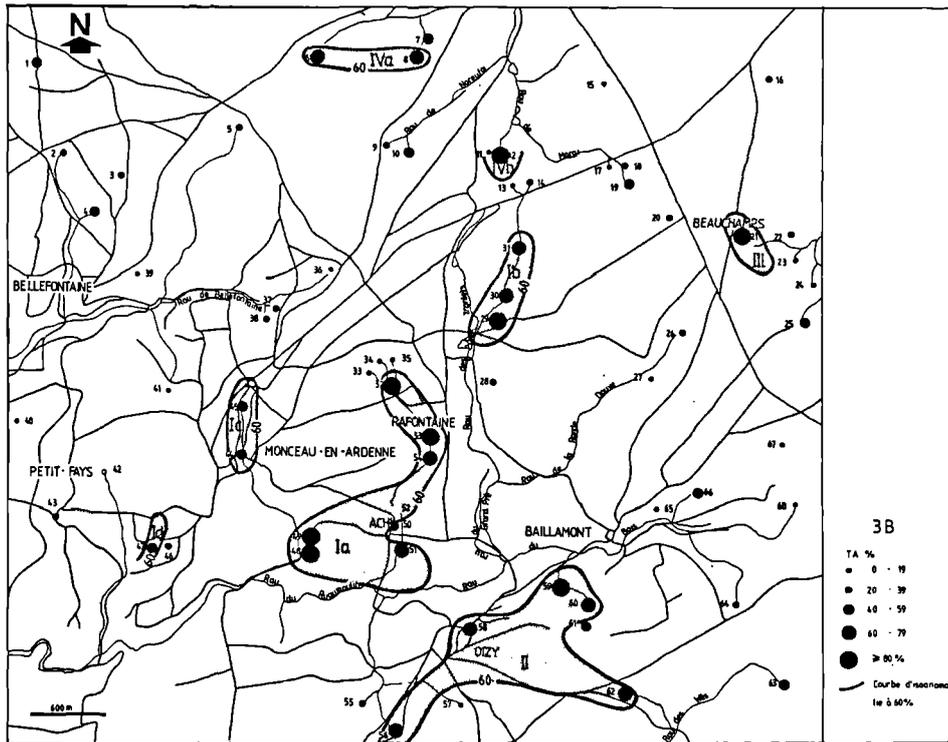
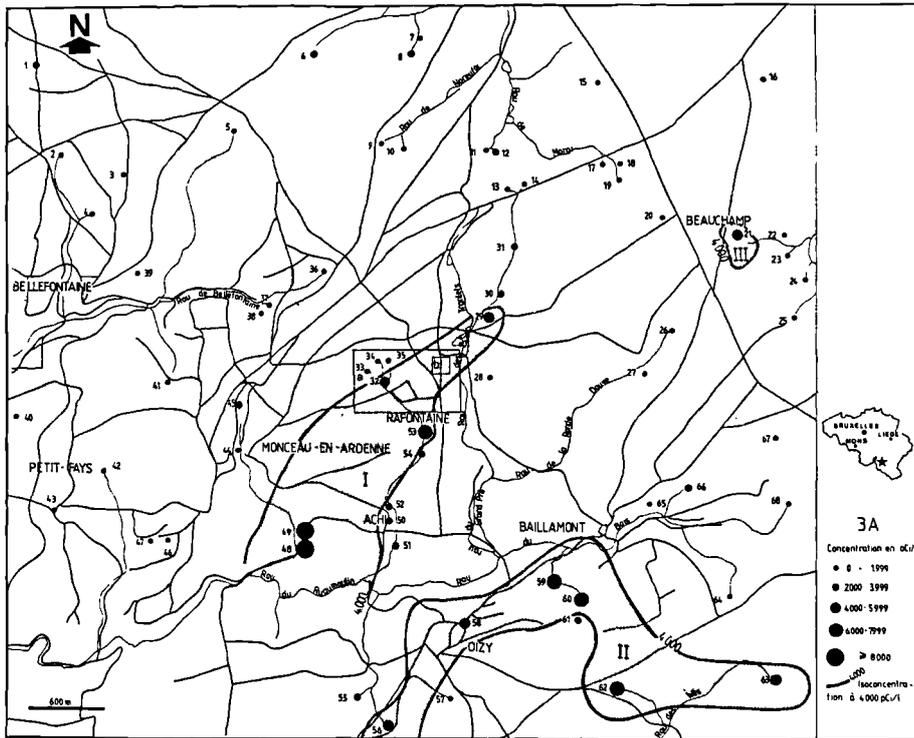


Fig. 3. — Région de Monceau.  
 A. Carte des activités radon sur 68 points, légende dans le texte.  
 B. Carte des Taux d'Anomalie, légende dans le texte.

Fig. 3. — Monceau area.  
 A. Radon activity map (68 springs), legend in the text.  
 B. Anomaly rate map, legend in the text.

### 3) Conclusion

Ces deux méthodes sont complémentaires. La première permet de dresser rapidement les cartes de concentration radon en eau naturelle de surface. La seconde permet la mise en évidence des émanations de radon dans les plans d'eau, puits de toute nature, zone de marais ; c'est-à-dire d'étudier d'une part les grandes masses d'eau, d'autre part les aquifères.

## III. — PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

### 1) Cartographie radon de la région de Monceau en Ardenne

Les prélèvements réalisés dans cette région ont conduit à l'étude de 68 points de source (fig. 3). Les résultats des dosages par la méthode instantanée (tableau I) permettent de dresser les cartes de la figure 3. La figure 3A est établie à partir des dosages exprimés en pCi/l, la figure 3B à partir des taux d'anomalie (T.A.).

#### a) Cartographie des concentrations

En figure 3A nous présentons la cartographie en concentration (pCi/l) des sources de la région étudiée. Nous avons tracé la courbe des "isoconcentrations" à 4000 pCi/l, valeur retenue comme étant la concentration maximale admissible (C.M.A.) pour l'eau (Bull. du Bénélux, 1961 ; Denis-Lempereur, 1984). Cette limite permet de circonscrire trois secteurs où les concentrations en radon des eaux de source sont supérieures à 4000 pCi/l : I Monceau en Ardenne, II Oizy-Baillamont, III Beauchamps. Si l'on considère l'ensemble des résultats (fig. 4A) on observe que les doses varient de 500 à 9600 pCi/l et que 16 % des sources sont dosées à plus de 4100 pCi/l.

#### b) Cartographie des T.A.

En prospection de routine, nous avons considéré que les T.A. supérieurs à 60 % étaient anormaux, cette courbe figure donc sur la carte des T.A. (fig. 3B). Nous retrouvons, en première approximation, les zones définies précédemment avec en outre quelques endroits où les prélèvements se trouvent être anormaux après la prise en compte des paramètres climatiques (Ic, Id, IVa, IVb). Si l'on considère à nouveau la totalité des résultats (fig. 4b), on constate que : les T.A. varient de 1 à 177 %, la moyenne est de 44 % et 17,5 % des échantillons ont un T.A. supérieur à 71 %.

#### c) Les dosages de radium

Principalement en zone I et sur quelques échantillons des zones II et III, nous avons d'une part, pu obtenir quelques analyses radium de l'Institut d'Hygiène et d'Epidémiologie de Bruxelles (Gillard *et al.*, 1986) et, d'autre part, effectué dans nos laboratoires des dosages du radium. Les résultats sont présentés au tableau II. Les doses relevées sont faibles, bien que non négligeables sur certains points, et restent en dessous des C.M.A. (3 à 400 pCi/l selon les sources).

source n°	Activité Cps/mn/l	pCi/l	TA %	n°49 Cps/ mn/l
1	323	2400	55	588
2	74	940	22	338
3	133	1300	39	"
4	158	1400	47	"
5	130	1300	39	"
6	268	2100	63	428
7	215	1800	50	"
8	283	2200	66	"
9	142	1300	33	"
10	179	1600	42	"
11	85	1000	20	430
12	444	3200	103	"
13	124	1200	16	768
14	218	1800	28	"
15	64	870	15	430
16	162	1500	21	784
17	78	960	18	428
18	159	1400	37	"
19	233	1900	54	"
20	112	1200	22	504
21	338	4200	83	406
22	109	1100	26	"
23	76	950	19	"
24	ND	ND	ND	"
25	196	1700	48	"
26	92	1000	21	428
27	75	950	18	406
28	139	1300	34	"
29	822	5400	107	768
30	567	3900	74	"
31	247	2000	61	406
32	797	5300	122	650
33	33	690	4	768
34	136	1300	18	"
35	96	1100	12	"
36	140	1300	18	"
37	297	2300	39	"
38	191	1600	25	"
39	2	500	1	338
40	ND	ND	ND	784
41	14	520	3	436
42	48	780	11	"
43	109	1100	25	"
44	237	1900	46	516
45	307	2300	47	650
46	102	1100	23	436
47	190	1600	44	"
48	1271	8100	124	1023
49	1524	9600	100	1524
50	355	2600	55	650
51	404	2900	62	"
52	541	3700	83	"
53	1152	7400	177	650
54	392	2800	60	"
55	444	3200	35	1254
56	862	5700	69	"
57	164	1500	13	"
58	662	4500	65	1023
59	1033	6700	82	1254
60	999	6500	79	1269
61	435	3100	42	1023
62	920	6000	73	1254
63	659	4400	52	1269
64	100	1100	21	475
65	243	1900	19	1254
66	273	2100	53	516
67	59	850	11	"
68	92	1000	18	"

Tableau I. — Région de Monceau : résultats du dosage de 68 sources.

Table I. — Monceau area : results of 68 springs monitoring.

## 2) Résultats obtenus par la méthode intégrée

L'ensemble des résultats présentés a été obtenu dans des sondages courts (10 à 15 m) implantés sur des indices en uranium ou de fortes anomalies en radon.

n° source ruisseau	A. RADIUM Dosage I.H.E.				B. RADIUM Dosage par estimation (calibrage sur l'I.H.E.)						
	49	50	58	62	21	32	49	51	52	54	69*
Dose pCi/l	1,29	0,13	0,22	0,27	0,8	1,1	0,8	0,7	0,4	0,7	1,5

Tableau II. — Dosage du radium dans quelques sources.

Table II. — Radium measurements on a few springs.

### a) Le site de Brigitte I

Il est possible de localiser ce site (fig. 5, tableau III) en se reportant à la figure 3A (zone Ib). Nous disposons sur ce site de 21 sondages dans lesquels nous avons pu installer nos détecteurs. Nous sommes en présence d'un indice minéralisé en uranium caractérisé par des minéraux secondaires (autunite, torbernite) pris dans les argiles de couvertures elles-mêmes très radioactives (jusqu'à 500 ppm d'uranium métal) (Charlet *et al.*, à paraître).

Les logs radon obtenus dans ces sondages (fig. 2) nous ont indiqué que les flux de radon empruntent préférentiellement les zones fortement oxydées et/ou fracturées. Les teneurs les plus fortes sont souvent proches de la surface, ce qui est en accord avec la géologie du site.

Si l'on considère la répartition de l'uranium en fond de trou (fig. 5), il se dégage principalement une structure orientée N.NW-S.SE. La carte "radon fond de trou" donne le même type d'information quoique les deux cartes ne soient pas exactement superposables. Ceci est attribué au caractère divagant du radon qui diffuse et migre aisément dans les milieux très poreux et fracturés, cas du terrain étudié.

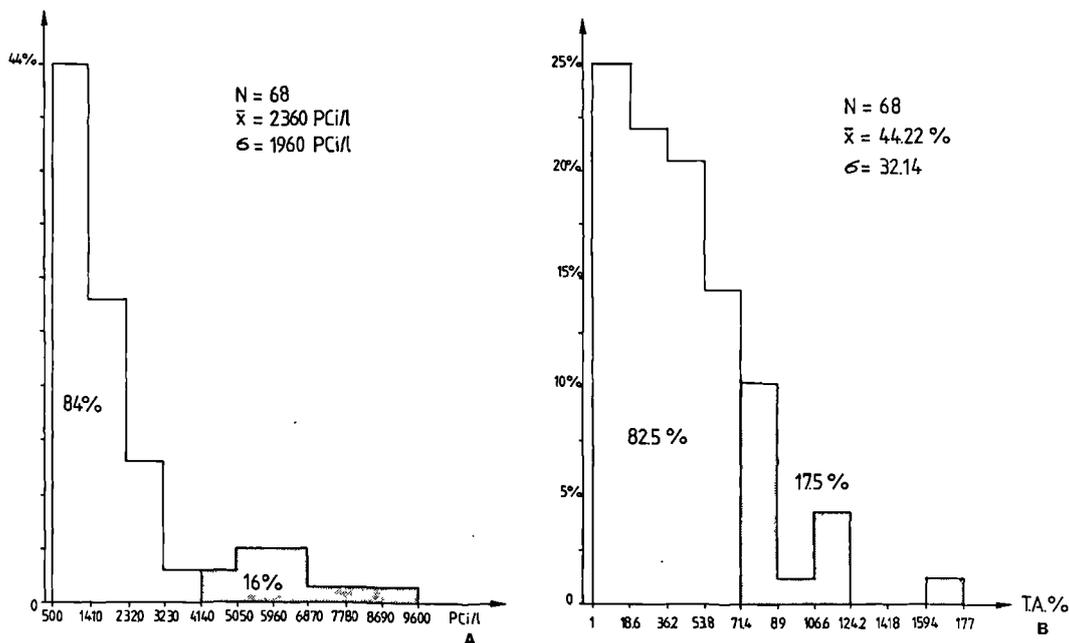


Fig. 4. — Traitement statistique des données.  
A. Histogramme de distribution des activités en pCi/l.  
B. Histogramme de distribution des taux d'anomalie (%).

Fig. 4. — Statistical treatment.  
A. Activity distribution histogram (pCi/l).  
B. Anomaly rate distribution histogram (%).

Puits	RADON Activité (cps/mn)	RADON Activité (pCi/23 jours)	URANIUM Teneur (ppm)
1	1333	8500	15
2	2756	17000	14
3	5567	33800	14
4	1479	9400	10
5	17	600	14
6	3108	19100	7
7	374	2700	11
8	383	2800	10
9	601	4100	35
10	671	4500	14
11	6	500	9
12	255	2000	10
13	297	2300	11
14	1033	6700	10
15	ND	ND	12
16	155	1400	14
17	87	1000	13
18	1409	8900	11
19	252	2000	11
20	993	6400	9
21	614	4200	16
$\bar{x}$	1019	6600	13
$\sigma$	1345	8100	6

Cependant, pour des teneurs en uranium relativement modestes de la roche totale (13 ppm en moyenne), le flux de radon est loin d'être négligeable. Il peut atteindre un maximum de 33800 pCi pour 23 jours d'implantation (1500 pCi/jour). On peut avancer deux explications à ce phénomène :

1° les argiles sableuses de surface, très radioactives, forment de plus une cloche à radon sous laquelle ce dernier circule et se concentre localement à la faveur du réseau de fracture ;

2° il peut aussi exister une source de radon plus profonde dont le produit migre de bas en haut et qui est ainsi décelé à — 10 m.

b) *Le site de la Fontaine du Pauge*

Sur ce site (fig. 3A secteur a), nous avons implanté 5 sondages pour tenter de déterminer l'origine du radon mis en évidence à la source n° 32. Ils ont été placés en ligne et sépa-

Tableau III. — Monceau - Brigitte I : dosage du radon et de l'uranium dans le sondage B1.

Table III. — Monceau - Brigitte I : radon and uranium dosing in the B1 bore hole.

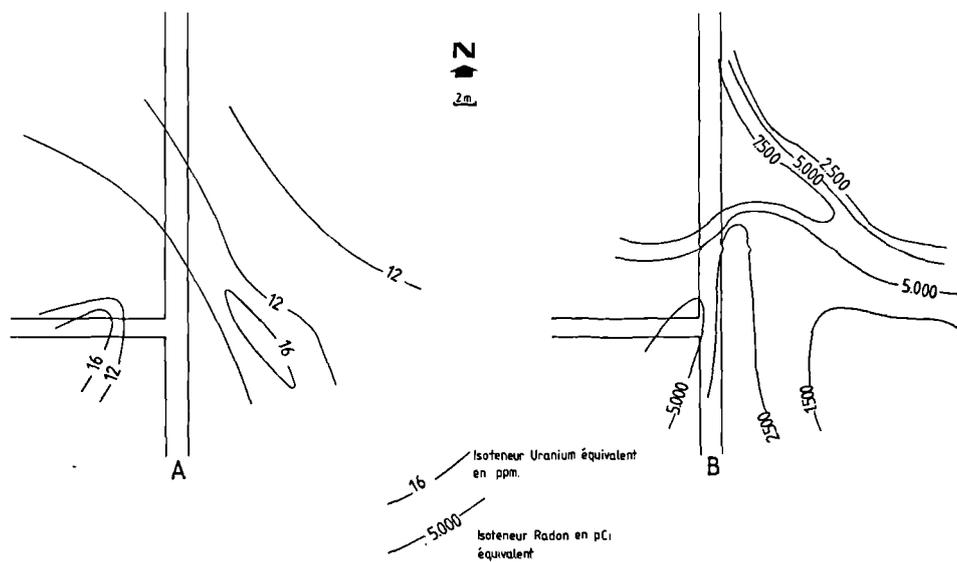


Fig. 5. — Monceau — Brigitte I (fig. 3A - encart b).  
 Comparaison des cartes d'isoteneur en uranium et radon de fond de trou.  
 A. Teneur en uranium (ppm).  
 B. Activité radon (pCi).

Fig. 5. — Monceau — Brigitte I (fig. 3A - inset b).  
 Radon and Uranium maps intercomparison. Ground drill hole measurements.  
 A. Uranium rate (ppm).  
 B. Radon activity (pCi).

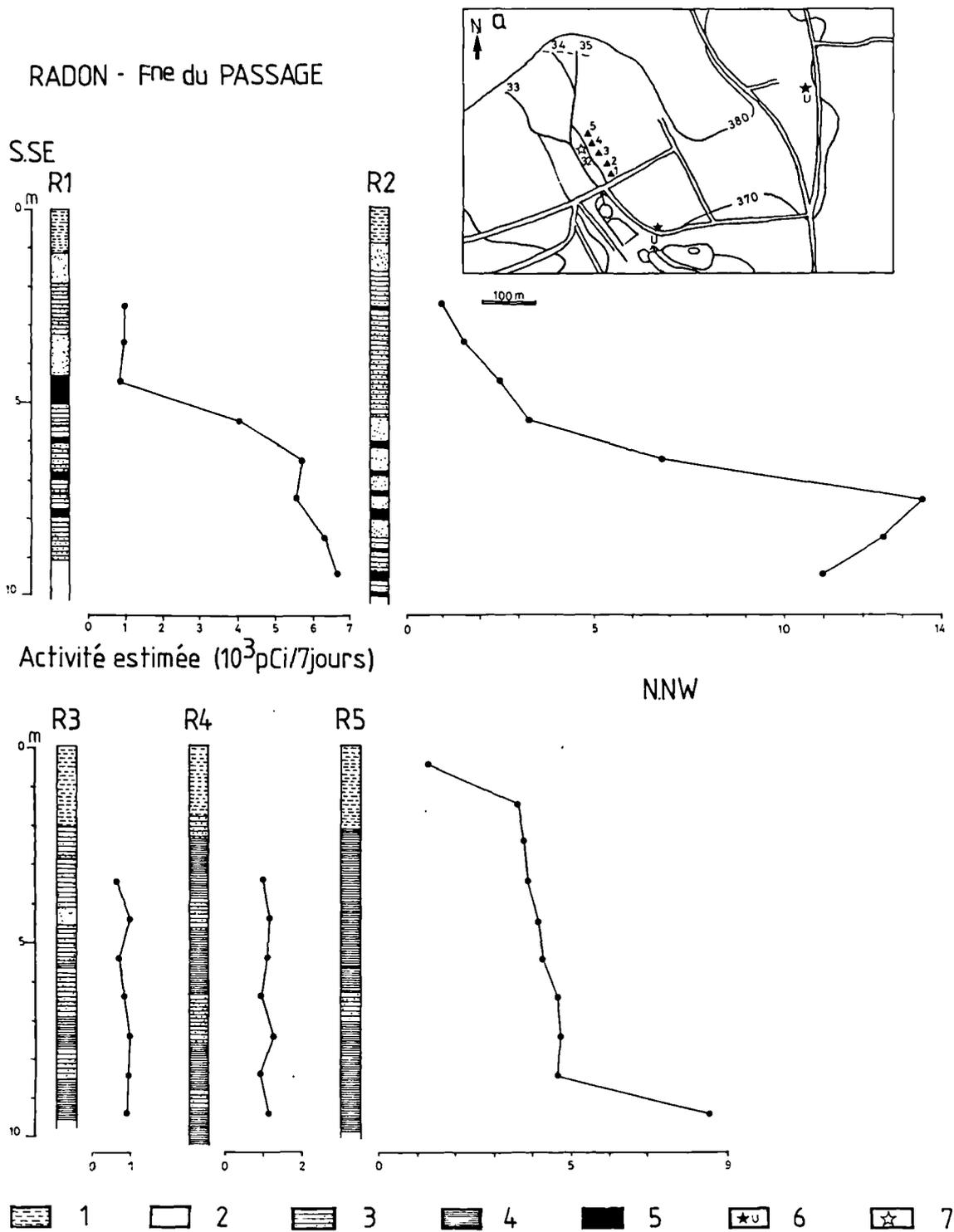


Fig. 6. — Monceau — Fontaine du Passage (fig. 3A - encart a).  
 Comparaison des cinq logs radon réalisés dans les sondages.

1 argiles, 2 grès, 3 quartzophyllades, 4 phyllades, 5 zone oxydée, 6 indice d'uranium, 7 anomalie radon en source.

Fig. 6. — Monceau — Fontaine du Passage (fig. 3A - a).  
 Comparison of five logs radon obtained from boreholes.

1 clays, 2 sandstones, 3 quartzophyllites, 4 phyllites, 5 oxidized level, 6 uranium occurrence, 7 spring radon anomaly.

rés de 10 m chacun. Les logs radon obtenus (fig. 6) sont très contrastés. Ils sont de deux types R1, R2, R5 d'une part, et R3, R4 d'autre part. Les sondages R3-R4 ne montrent pas d'anomalies, les sondages R1-R2-R5 montrent une très forte anomalie en fond de trou avec, de plus, des concentrations en radon assez importantes à moindre profondeur. Il faut ajouter à cette observation que les sondages R1, R2 et R5 ont été réalisés dans des niveaux très fracturés et que les roches concernées ne présentent pas de teneurs anormales en uranium. Il faut donc voir dans la fracturation un vecteur du flux de radon issu d'une source plus profonde ou distale. Nous connaissons par ailleurs, non loin du site des sondages (150 m environ, fig. 6), des fractures à remplissage limonitique riche en uranium (200 à 300 ppm). Un autre argument plaide pour une origine profonde du radon, c'est le caractère normal des sources 33 à 35 alimentées par la nappe superficielle du plioquaternaire qui couvre le bed rock en cet endroit.

#### IV. — INTERPRÉTATION ET UTILISATION DES RÉSULTATS

##### 1) Le problème de l'eau

A l'évidence, les résultats en notre possession nous ont conduits à déterminer trois zones (fig. 3) qui dans la région de Monceau en Ardenne présentent des concentrations anormales en radon. Les dosages de radium dissous montrent que la majeure partie du radon de ces eaux de source n'est pas due à celui-ci. En conséquence, le radium générateur du radon mis en évidence n'est pas dissous par l'eau analysée soit parce qu'il reste piégé dans la roche baignée par la nappe à l'émergence, soit parce que le radon seul a migré au sein de la roche avant d'être capté par l'eau.

Les eaux analysées ne sont actuellement pas utilisées par l'homme dans ses besoins domestiques bien que certaines l'aient été dans le passé. Nous avons en effet pu doser le radon dans un certain nombre de puits ou de fontaines publiques (points nos 8, 43, 44, 58).

Le point 21 mérite que l'on s'y attarde puisqu'il s'agit d'un forage (environ 50 m) qui a été fait à titre privé pour une éventuelle commercialisation de l'eau. Dosée à plus de 4000 pCi/l de radon et à 0,75 pCi/l de radium, elle demanderait à être étudiée plus en détail dans le cas d'une concrétisation de ces projets.

Les sources étudiées sont superficielles pour la majorité mais il importe de noter que dans cette région il existe de nombreux pompages alimentant les agglomérations. Ceux-ci sont installés sur les formations géologiques où nous avons mis en évidence l'existence de nombreuses anomalies et indices en uranium générateurs de radium et de radon. Une étude de ces eaux de pompage serait à réaliser dans l'avenir pour en vérifier les concentrations en radon et radium.

Il faut aussi signaler que dans cette région essentiellement rurale, il existe encore de nombreux puits domestiques alimentés par les mêmes nappes que les sources étudiées. Ils sont parfois situés à l'intérieur des habitations créant ainsi, le cas échéant, une source de radon "in situ".

Les risques pour la santé de l'homme sont à relativiser. Une eau de consommation (de boisson) n'est nocive que dans deux cas : le premier et le principal est celui où elle contient du radium en quantité importante (plus de 400 pCi/l) ; le second est celui où contenant une forte dose de radon elle est ingérée par l'individu avant d'être dégazée de son radon, permettant alors une fixation des descendants radioactifs solides par l'organisme.

##### 2) Impact sur l'habitat

La richesse en radon des eaux de sources étudiées nous indique que l'émanation régionale est importante, les causes géologiques en sont maintenant bien connues.

La cartographie établie montre que les zones I, II et III englobent un nombre non négligeable d'habitations et de lotissements nouveaux. De nombreuses études récentes (Denis-Lempereur, 1984 ; Nero, 1988 ; Rannou, 1988) montrent que les effets sur l'homme de la concentration domestique du radon ne sont pas négligeables. Il importe donc d'entamer dans ces zones une série de mesures (les tests préliminaires sont en cours) visant à établir si les eaux de sources drainent la totalité du radon, si elles en deviennent un vecteur et si les sols sont des milieux favorables à l'émanation radon malgré le drainage dû aux nappes.

Sur ce dernier point nous possédons déjà des éléments de réponse. Notre prospection d'uranium nous a amenés à mesurer l'émanation radon du sol notamment en zone I (fig. 7). La répartition statistique des mesures indique des maxima à 7 et 15 cps (unité arbitraire de comptage, matériel utilisé :

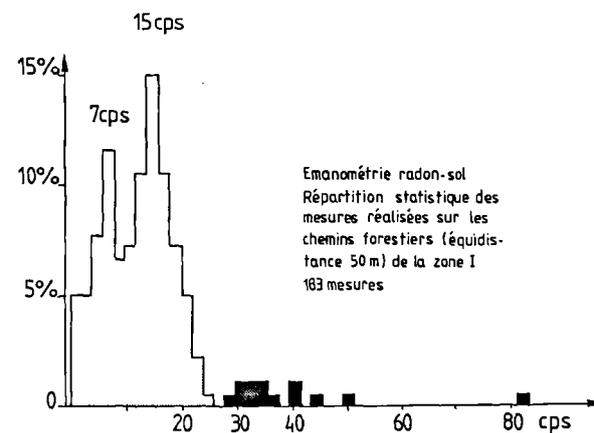


Fig. 7. — Région de Monceau.  
Emanométrie — mesure du radon dans le sol.  
Histogramme de distribution des mesures (équidistance 50 m) faites en zone I.

Fig. 7. — Monceau area.  
Emanometry — ground radon measurement.  
Distribution histogram of zone I measurements (interdistance 50 m).

émanomètre EPP10-CEA) avec, de plus, un nombre assez important de mesures supérieures à 30 cps. Il faut savoir qu'un sol qualifié de normal n'est compté qu'à 1 ou 2 cps. La moyenne locale est donc nettement supérieure à la normale, le maximum enregistré (au droit des sources 53 et 54) est de 158 cps. Il existe donc effectivement une concentration radon dans le sol qui n'est pas négligeable.

Il est logique, dans des études à venir, de tester la qualité de l'environnement radon de l'habitat ancien, de proposer le

cas échéant des solutions visant à diminuer les risques de concentration excessive. Pour ce qui est des constructions futures, il serait peut-être bon de préconiser dans les 4 zones définies des techniques architecturales mieux adaptées à la protection de l'individu. Dans le cas le plus courant, il suffit d'une dalle de béton un peu plus épaisse pour arrêter le flux de radon et évidemment d'éviter la création de cave sous l'habitat principal.

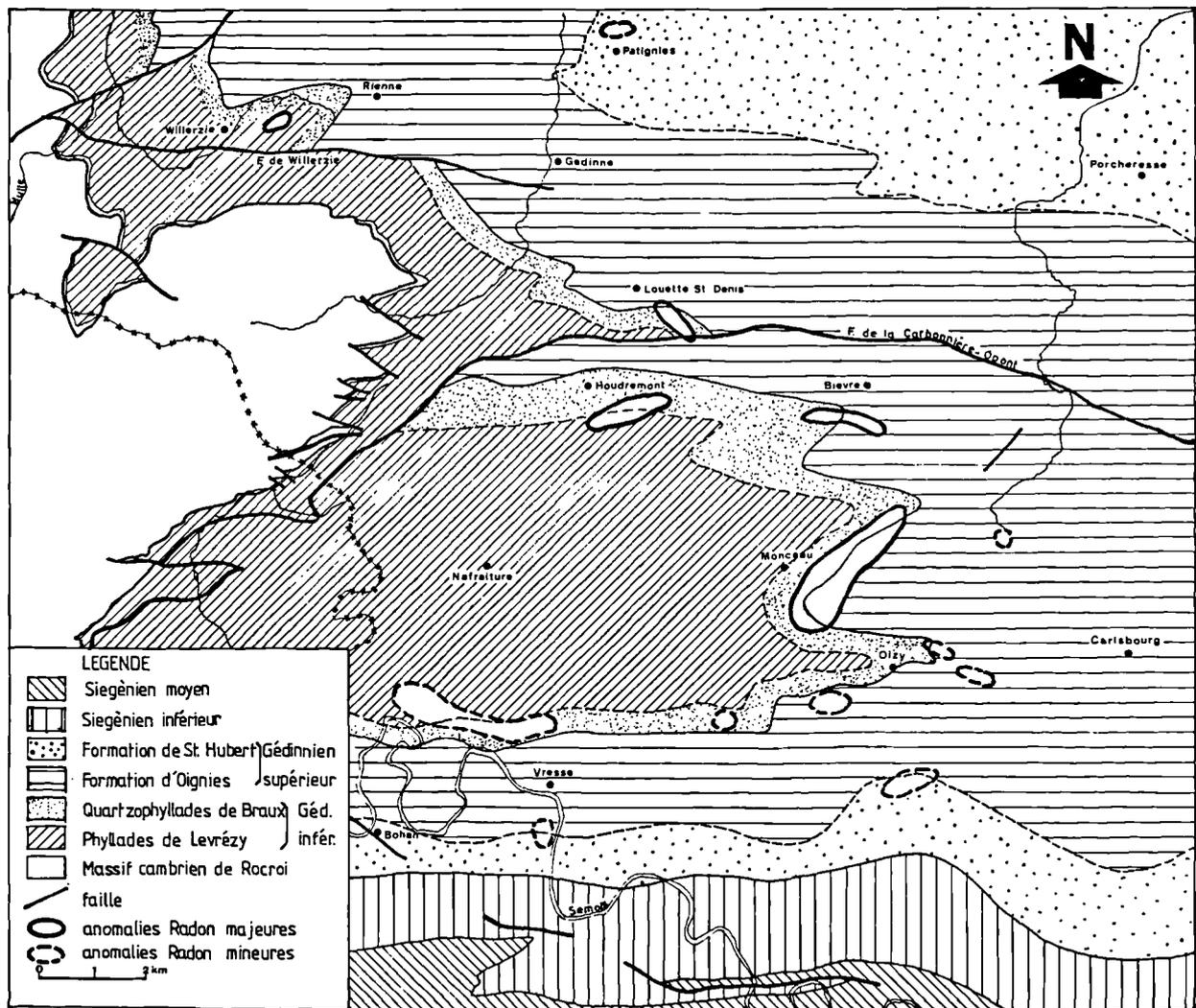


Fig. 8. — Situation dans le contexte géologique régional des principales anomalies radon rencontrées.

Fig. 8. — Localization of the main radon anomalies in their regional geological context.

### 3) Extension régionale du problème

Nous avons présenté ici le cas de la région de Monceau en Ardenne mais il ne s'agit pas d'un cas isolé dans cette zone géographique. En effet, la prospection d'uranium y a permis la découverte d'assez nombreuses anomalies en radon dans les eaux de source (fig. 8). Si on les place dans le contexte géologique régional on est amené à constater qu'elles se localisent principalement au niveau des quartzophyllades de Braux

et accessoirement à celui de la formation de St-Hubert. Ces observations doivent servir d'indications pour permettre éventuellement la définition de zones à risques domestiques de pollution par le radon dans la région concernée (Hand *et al.*, 1988). Les terrains situés au-dessus des quartzophyllades de Braux (Gédinnien inférieur) sont ceux pour lesquels la probabilité d'émanation de radon importante est la plus élevée. Il importe donc d'avoir une vision géologique du problème pour la mise en évidence de zones à risques.

### BIBLIOGRAPHIE

- 1) Bulletin Bénélux (1961). — Mesures de protection sanitaires relatives à l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire. *Bull. Bénélux*, 1961-4, 13 p.
- 2) CHARLET J.M., DOREMUS P., QUINIF Y. et IMBERT Th. (1989). — Découvertes de minéraux uranifères dans l'Anticlinal de l'Ardenne. Caractérisation et contexte géologique des occurrences (A paraître).
- 3) DENIS-LEMPEREUR J. (1984). — Des curies et des hommes ou la menace de l'overdose. *Sciences et Vie*, n° 800, p. 24-37.
- 4) DOREMUS P. (1985). — Les anomalies uranifères dans le Gédinnien inférieur de l'Anticlinal de l'Ardenne (Oizy, Belgique) : Prospection, sédimentologie, tectonique et géochimie. Thèse Univ. de Lille, 1985, 352 p.
- 5) DOREMUS P., QUINIF Y., CHARLET J.-M. (1988). — Mise au point d'un détecteur passif du radon 222 en milieu saturé. Premiers résultats. *Annales Soc. Géol. du Nord*, TCVII, p. 211-219.
- 6) GILLARD J., FLEMAL J.-M. et GILLET Ph. (1986). — Etude de la radioactivité des principales sources d'eau minérale en Belgique (1984-1985), publication du Ministère de la Santé Publique et de la Famille - Institut d'Hygiène et d'Epidémiologie, 20 p.
- 7) HAND B.-M. et BANIKOWSKI J.-E. (1988). — Radon in Onondaga country, New-York : Paleohydrogeology and redistribution of uranium in Paleozoic sedimentary rocks. *Geology*, V 16, p. 775-778.
- 8) HENQUIN J.-P. (1985). — Mise au point d'une nouvelle méthode de mesure du radon dans l'eau : intérêt en géologie appliquée. T.F.E. Faculté Polytechnique de Mons, 47 p.
- 9) KLUSMAN R.-W. et WEBSTER J.-D. (1981a). — Preliminary analysis of meteorological and seasonal influences on crustal gas emission relevant to earthquake prediction. *Bull. of the Seismical Society of America*. Vol. 71, n° 1, p. 211-222.
- 10) KLUSMAN R.-W. et WEBSTER J.-D. (1981b). — Meteorological noise in crustal gas emission and relevance to geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 15, p. 63-76.
- 11) Mc LAUGHLIN J.-P., CHARLET J.-M., DUPUIS Ch., QUINIF Y., BOUKO Ph. et RAMU J.-P. (1982). — An intercomparison of several methods of dating radon 222 in overburden gases. *Ann. Soc. géol. Belgique*, t. 105, p. 221.
- 12) NERO A. (1988). — Les contrôles de la pollution dans les logements. *Pour la Science*, n° 129, p. 24-31.
- 13) POCHET R. (1982). — Dosimétrie de l'hélium et du radon dans l'eau et dans les sols saturés non consolidés. Uranium exploration methods. O.C.D.E. Paris, p. 505-516.
- 14) QUINIF Y., DOREMUS P., BOUKO Ph. et CHARLET J.-M. (1984). — Une méthode d'analyse du radon 222 dans les eaux naturelles. Application à la prospection de l'uranium (région de Oizy-Belgique). *C.R. Acad. des Sciences Paris*, t. 299, série II, n° 17, p. 1187-1190.
- 15) RANNOU A. (1988). — Le radon et ses risques dans les habitations. R.G.M. 1988 n° 3, p. 238-244.
- 16) STEPHAN H. et STEPHAN T. (1963). — Solubilities of inorganic and organic compounds. Pergamon Press.
- 17) VANMARCKE H. (1987). — De bijdrage van het woonmilieu tot de blootstelling aan straling afkomstig van nuiden uit de natuurlijke 238 U reeks. Thèse Gent, p. 72-73.



## Aspects réglementaires et problèmes posés par l'élimination des produits de curage des cours d'eau

### Current regulation and problems layed by stream silting-up wastes

par P. SIX (\*), J.-P. PREZ (\*\*), D. DARMENDRAIL (\*\*\*)  
avec la collaboration de G. BREDA (\*\*\*\*) et D. LEROUX (\*\*\*\*)

*Résumé.* — L'envasement des cours d'eau, dans le département du Nord, est important (Population, Industries, Topographie plane). Il faut donc curer et éliminer régulièrement les produits de curage dont le volume est conséquent (460.000 m<sup>3</sup>/an).

Le mode d'élimination dépendra à la fois de la composition de ces produits et de la réglementation en vigueur.

Pour éviter des situations de blocage, la solution la plus appropriée (exemple : La Marque) sera retenue et dans tous les cas, les différents partenaires essaieront d'avoir une attitude préventive.

Le Ministère de l'Agriculture et de l'Environnement travaillent actuellement sur ce thème ; les recherches en cours ainsi que celles à mener prochainement devraient permettre de progresser dans le domaine de la connaissance.

*Abstract.* — *Streams in the North Département suffer from severe silting-up owing to population density, industry and the lack of topographic relief. They have, therefore, to be regularly cleaned and the large quantity of waste produced, 460.000 m<sup>3</sup> per year, eliminated.*

*The method of elimination will depend both on the composition of the products of the cleaning and the current regulations.*

*In order to avoid hold-ups, the most appropriate solution will be sought (such as at La Marque) and in any case, the parties involved will make an effort to avoid such situations.*

#### I. — INTRODUCTION

L'envasement des cours d'eau (courants, becques, fossés, riez...) est un phénomène naturel, connu depuis toujours, dû à l'érosion, au ruissellement et à l'effondrement des berges. Il peut être "accentué" par la présence des rejets de Collectivités ainsi que par ceux d'Industries, lorsqu'elles ne disposent pas de système d'épuration ou encore, lorsque ceux-ci s'avèrent insuffisants ou en cas de mauvais fonctionnement.

Si ces différents phénomènes contribuent de façon concomitante à l'envasement, il arrive aussi fréquemment que l'un d'eux devienne prédominant par rapport aux autres et influe sur la composition des produits à extraire.

A ce titre, la situation du département du Nord est particulière, caractérisée par :

— une forte densité de population (2,5 millions d'habitants),

— de nombreuses industries (plus de 1 200),

— une topographie plane, d'où un réseau hydrographique dense (plus de 4 000 km de cours d'eau) ; ceux-ci sont d'ailleurs repris dans le P.O.S. en servitude A4 (entretien de cours d'eau non domaniaux, Article 115 du Code Rural, et doivent attirer toute l'attention lors de l'élaboration de ces documents).

Ceci se traduit par des volumes de produits de curage à extraire chaque année, de l'ordre de 460 000 m<sup>3</sup> de produit brut, auxquels il faut ajouter la production de boues des stations d'épuration (de l'ordre de 150 000 m<sup>3</sup>/an de produit brut, ce qui correspond au traitement de 32 % des rejets des Collectivités).

(\*) Chambre d'Agriculture du Nord, 140, bd de la Liberté, 59013 Lille Cedex et Agence de l'Eau Artois-Picardie, 764, bd Lahure, 59508 Douai Cedex.

(\*\*) Direction Départementale de l'Équipement du Nord, Subdivision Villeneuve d'Ascq, Lannoy et Cysoing, 38, rue des Epoux Labrousse, 59651 Villeneuve d'Ascq.

(\*\*\*) B.R.G.M., Fort de Lezennes, Lezennes 59260 Hellemmes-Lille.

(\*\*\*\*) Direction Départementale de l'Équipement du Nord, 44, rue de Tournai, 59019 Lille Cedex.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

Pour permettre la libre circulation des eaux, l'enlèvement des produits de curage est une nécessité, mais pose désormais de plus en plus de problèmes tant sur les plans techniques et juridiques que financiers.

Ce sont ces différents aspects que nous allons aborder dans le présent document en vue de faire quelques propositions sur le mode d'élimination qui paraît le mieux adapté.

A cet égard, nous examinerons comme exemple, celui de La Marque qui présente un intérêt tout particulier.

## II. — LE CURAGE CONSTITUE-T-IL UNE NÉCESSITÉ ?

En vertu d'une règle fondamentale en matière d'hydraulique : "les eaux doivent pouvoir circuler librement", les opérations de curage doivent être effectuées régulièrement au niveau des différents cours d'eau. Celles-ci sont nécessaires, voire indispensables, tant pour les collectivités et les industriels que pour les agriculteurs qui doivent impérativement évacuer leurs eaux de drainage.

Lorsque les vases s'accumulent dans certains cours d'eau, pendant des laps de temps plus ou moins courts et à un point tel que leur niveau se situe au-dessus des collecteurs (ex. à Wahagnies (59), dans un fossé recevant les eaux usées des cités minières, on détecte une hauteur de 1,20 m de vases, tous les 3 ans !) qui permettent d'évacuer l'eau des terres agricoles, le réseau de drainage peut être mis en péril. En effet, lorsque celui-ci ne fonctionne plus, il se "bouche" progressivement.

Dans certains cas, des remontées de vases peuvent même se produire dans les drains ; or le coût d'un drainage est de l'ordre de 7 000 à 10 000 francs/ha.

En l'occurrence, les drains doivent être débouchés à l'aide d'appareils à haute pression (fusées...) ou encore renouvelés.

Ces différentes opérations engendrent bien évidemment un coût supplémentaire dont l'agriculteur se passerait bien.

Il existe aussi le cas où une partie des vases est entraînée avec les eaux, lorsque leur niveau monte et s'étale sur les prairies et terres cultivées pour y déposer tout ce qu'elles contiennent, y compris les éléments indésirables, tels que les éléments-traces (ex. : La Marque).

Le choix de l'une ou l'autre solution d'élimination pour ces produits de curage est essentiellement lié à leur composition chimique et à la réglementation en vigueur.

## III. — QUELLE COMPOSITION CES PRODUITS DE CURAGE ONT-ILS ?

Des prélèvements et analyses réalisées en 1987 par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, la D.D.A.F. et la Chambre d'Agriculture du Nord, ont permis de montrer que les teneurs en métaux des sédiments dépassaient dans 90 % des

cas, les teneurs limites fixées pour un sol, par la Norme AFNOR NFU 44041, homologuée depuis juillet 1985 et rendue d'application obligatoire par arrêté du 29 août 1988.

Ces résultats relativement défavorables ont provoqué au niveau des différents organismes, le plus grand étonnement.

## IV. — DES USAGES LOCAUX EN MATIÈRE DE CURAGE A UNE RÉGLEMENTATION MIEUX ADAPTÉE...

Pour les cours d'eau non domaniaux, les riverains, propriétaires de la moitié du fond, doivent en principe effectuer ou faire effectuer les travaux de curage nécessaires, à leurs frais (Article 115 du Code Rural).

En raison d'un engorgement de plus en plus important et de plus en plus rapide, très souvent, le Département, les Syndicats Intercommunaux, les Communes, les Associations syndicales... se substituent aux riverains pour des raisons que l'on peut comprendre assez aisément.

En l'occurrence et jusqu'à des temps qui ne sont pas très éloignés, les riverains étaient dans l'obligation de laisser passer les engins pour curer et recevoir les produits de curage sur leur terre et ceci, pratiquement, quelle que soit leur composition.

Cette pratique, consacrée par les anciens règlements et les usages locaux (cf. jurisprudence, Conseil d'Etat, 20 février 1867) que le Préfet, en vertu de l'article 115 du Code Rural, pouvait et peut faire exécuter en cas de nécessité, est en train d'évoluer notamment en raison de la toxicité présentée par certains produits.

N° de boues Nombre de fois la norme sol	% de boues conformes							TOUS MÉTAUX CONFOUDUS
	CADMIUM	CHROME	CUIVRE	MERCURE	NICKEL	PLOMB	ZINC	
1	43,7	85,4	60,4	70,8	75	16,7	16,7	8,3
2	75	93,7	79,2	85,4	95,8	39,6	39,6	31,2
3	87,5	95,8	91,7	85,4	97,9	62,5	56,2	45,8
4	89,6	95,8	97,9	89,6	100	77,1	70,8	68,7
5	89,6	95,8	97,9	93,7	100	87,5	75	70,8
6	89,6	93,8	97,9	95,8	100	89,6	79,2	72,9
7	91,7	95,8	100	97,9	100	93,7	83,3	75
8	91,7	95,8	100	97,9	100	97,9	87,5	81,2
9	91,7	95,8	100	100	100	97,9	87,5	83,3
10	91,7	95,8	100	100	100	97,9	87,5	83,3

% de boues conformes de tous les métaux	CADMIUM	CHROME	CUIVRE	MERCURE	NICKEL	PLOMB	ZINC	TOUS MÉTAUX CONFOUDUS
91,7	95,8	100	100	100	97,9	87,5	83,3	

Tableau I. — Pourcentage de produits de curage conformes à une fois et à plusieurs fois les teneurs limites en métaux fixées pour un sol par la norme AFNOR, dans le département du Nord.

Table I. — Waste percentage in conformity with one or several times, the metal limit contents, determined for soil by AFNOR NORM, in North Department.

Après un examen approfondi de la législation dans ce domaine, il apparaît que celle-ci est relativement satisfaisante, mais qu'elle n'était pas toujours appliquée parce que méconnue ou encore parce que les problèmes de pollution étaient purement et simplement ignorés ou passés sous silence.

Il est vrai que les matières de curage ne peuvent plus, dans de nombreux cas, être comparées à un "loess fertile", susceptible d'apporter une plus-value directe aux terrains, comme cela était le cas autrefois...

Actuellement, le curage est réalisé, le plus souvent, en vertu des articles 175 et suivants, du Code Rural, et dans tous les cas, le programme des travaux est soumis à enquête publique. C'est dans ce cadre que toutes les interventions utiles peuvent être faites.

Il peut aussi être entrepris par une Association Syndicale (A.S.) ou encore dans le cadre de l'article 116 du Code Rural, « notamment si l'application des règlements et l'exécution du mode de curage consacré par l'usage, présentent des difficultés, ou bien encore, si les changements survenus exigent des dispositions nouvelles, il est procédé en conformité des dispositions régissant les A.S. ». Dans ce cas, le Service chargé de la Police des Eaux peut intervenir auprès de l'A.S. pour indiquer les mesures qui paraissent nécessaires si l'on se trouve en présence de sédiments pollués et faire connaître l'utilité d'une Déclaration Publique de Travaux (D.U.P.).

Ces dispositions ont été renforcées par l'article 159.2.6 du Règlement Sanitaire Départemental (R.S.D.) qui prévoit que des produits contaminés ne peuvent être épandus sur les terres agricoles et prend en référence la norme AFNOR NFU 44041. Cet article prévoit en particulier qu'en cas de problème, une déclaration sera faite au Préfet qui arrêtera après avis des Services compétents, les conditions d'élimination de ces produits.

## V. — QUE FAIRE DE CES BOUES ?

Suivant leur composition :

- les éliminer en agriculture (régalage sur les terres agricoles, épandage...),
- les stocker (cordon, site approprié, décharge...), sans que toutefois elles ne constituent un risque pour l'environnement,
- les traiter dans un centre spécialisé.

Ces différents cas seront envisagés ci-après, ainsi que les problèmes qu'ils sont susceptibles de soulever.

## VI. — AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE CES DIFFÉRENTS MODES D'ÉLIMINATION

### 1) L'épandage

L'épandage sur les terres agricoles de produits, sous-produits..., tel qu'il est habituellement pratiqué par les agriculteurs, ne paraît possible que si celui-ci ne porte pas atteinte

au milieu récepteur, comme le stipule d'ailleurs "la CHARTE MONDIALE DES SOLS" (F.A.O.). Autrement dit, seuls peuvent être épandus les produits de curage dont les teneurs en éléments-traces sont inférieures à celles fixées comme limite pour un sol (et non pour des boues) ou ceux qui, après mélange au sol (couche arable), n'entraîneront pas de dépassement par rapport aux seuils fixés. La quantité de 30 t de matières sèches est en l'occurrence, le maximum que l'on puisse apporter à l'hectare, sur une période de 10 ans.

Cette technique qui n'est pas usuelle pour des produits de curage peut néanmoins être mise en œuvre, après ressuyage des sédiments en cordon.

Elle trouve cependant ses limites dans le fait que, très souvent, les parcelles riveraines n'ont pas une surface suffisante et qu'il paraît difficile d'imposer aux agriculteurs qui exploitent des parcelles plus éloignées, de les recevoir, alors qu'ils n'en ont pas obligation et ceci d'autant que ces produits n'ont aucune valeur agronomique et sont par surcroît très hétérogènes.

### 2) Le régallage

Le régallage consiste à épandre les produits de curage sur une bande de terre de 5 à 10 m de large, contiguë au cours d'eau. C'est la technique qui était jusqu'alors la plus employée et la moins onéreuse.

Cette pratique, qui consiste à apporter de plus ou moins grandes quantités de sédiments au mètre carré a eu pour effet, dans un certain nombre de cas, de provoquer des dépassements en éléments-traces, notamment par rapport aux seuils fixés, avec pour conséquence des effets phytotoxiques ou toxiques.

De nombreux cas ont été recensés dans le département du Nord, tant sur les végétaux que sur les animaux (avec mortalité de bétail dans certains cas), aussi les plaintes émanant des agriculteurs sont de plus en plus fréquentes et si des solutions mieux adaptées ne sont pas proposées, une situation de blocage pourrait fort bien apparaître, c'est ce que nous nous efforçons d'éviter.

Par ailleurs, il faut bien reconnaître que lorsque l'agriculteur est concerné par une longueur importante de cours d'eau, quelquefois supérieure à un kilomètre, le préjudice subi est important. Il s'évalue, dans ce cas, sur une surface supérieure à un hectare. Dans un contexte économique difficile et à un moment où il est imposé aux agriculteurs de travailler dans des créneaux de plus en plus serrés, cette situation devient difficilement acceptable.

### 3) Le stockage

La solution qui consiste à stocker les produits de curage en cordon, le long du cours d'eau nécessite, dans la pratique, que la collectivité fasse l'acquisition du lit du cours d'eau et d'une bande de terre de 10 à 15 m de large, soit sur une seule rive, soit sur les deux, afin de permettre à la fois le passage des engins pour curer et le stockage des sédiments.

En l'occurrence, il faut que le propriétaire du lit du cours d'eau et de la bande de terre consentie de vendre la surface de terrain concernée. En cas de refus, le Maître d'Œuvre peut recourir à l'expropriation.

L'exploitant agricole qui jouit du droit de cultiver doit, lui aussi, faire l'objet d'une indemnisation.

Afin de permettre l'écoulement en surface de l'eau provenant des parcelles de terre voisines (écoulement "hypodermique"), le cordon sera discontinu et l'agriculteur en effectuant une raie de charrue le long de ces dépôts, éviterait une contamination éventuelle de son terrain par des éléments indésirables.

Pour le moment, nous ne savons pas de façon précise si les dépôts de sédiments peuvent être une source de pollution pour les nappes ou si les éléments indésirables sont susceptibles de regagner le lit du cours d'eau. Des études entreprises très prochainement devraient tenter d'y répondre (cf. prochain appel d'offre du Ministère de l'Environnement - SRETIE).

Le cordon devra être entretenu pour éviter la prolifération des adventices. Les produits de traitement utilisés ne devront cependant pas être une source de pollution pour les eaux et devront, en tout état de cause, être admis par la réglementation en vigueur.

Au cas où la bande de terre concernée ferait partie d'un lot de terre constructible (P.O.S.), alors se poserait le problème de la valeur à attribuer à ce terrain.

Pour ce qui est des prairies, se posent, en outre, les problèmes du déplacement des clôtures, de l'abreuvement des animaux...

Le stockage des produits de curage dans des sites qui conviennent sur le plan hydrogéologique, pose finalement moins de problèmes, mais encore faut-il disposer de ce genre de site et à une distance pas trop éloignée. Le prix dépend surtout du coût du transport des produits.

La réglementation actuelle prévoit que les boues de stations d'épuration peuvent être déposées dans des décharges de type II. Elle n'a rien prévu pour ce qui est des produits de curage. A cet égard, une rubrique spéciale pourrait être utilement ajoutée dans le Schéma Départemental d'Élimination des Déchets.

#### 4) Le traitement en centre spécialisé

Le procédé n'est à envisager qu'après que toutes les autres solutions aient été passées en revue.

Son coût est en général très élevé (10 à 30 fois le prix des autres solutions, voire davantage).

Afin d'illustrer certains propos, il nous a paru intéressant de détailler un exemple, celui de "La Marque" qui est un sujet d'actualité.

## VII. — L'EXEMPLE DE LA MARQUE

Dans le cadre d'un contrat de rivière, le curage de la Marque sur sa partie non domaniale a été entrepris par le Syndicat Intercommunal du Bassin de la Marque (S.I.B.M.).

Le secteur concerné, situé entre Bouvines et Wasquehal (fig. 1) est caractérisé par un important envasement (4 à 11 m<sup>3</sup> par ml), une pollution importante des sédiments par des métaux (2 à 5 fois la norme sol) et un environnement urbain dense ou à vocation plutôt touristique.

Le volume à extraire a été évalué pour l'ensemble de ce secteur à 70 000 m<sup>3</sup>, par la D.D.E., Maître d'Œuvre pour le compte du Syndicat Intercommunal du Bassin de la Marque.

Avant d'aboutir aux travaux de la première section sur le terrain, une longue procédure administrative a été mise en œuvre, à savoir :

1) Appel d'offre de travaux réalisé par la D.D.E. pour le compte du S.I.B.M. : les entreprises devaient proposer un site de dépôt qui devait être agréé par le Maître d'Œuvre.

2) Réalisation d'analyses des boues de curage à extraire.

3) Etude des caractéristiques hydrogéologiques des sites proposés en vue de l'agrément par le Maître d'Œuvre.

4) Enquête publique (délai entre le premier appel d'offres et l'enquête : un an).

5) Réalisation des travaux de curage.

Dans le cas de la Marque (cf. Darmendrail *et al.*, à paraître), divers sites de dépôts ont été successivement proposés et parfois rejetés du fait de risques importants vis-à-vis des eaux souterraines exploitées (ex. carrière de craie d'Haubourdin) et de contraintes de voisinage.

Pour l'élimination des boues, diverses solutions ont été retenues après examen de la vulnérabilité de l'environnement au droit des sites, de la nocivité relative des produits, des contraintes administratives (appartenance des parcelles, indemnités éventuelles) et optimisation du coût de l'opération de curage.

Les boues issues de la première section (Wasquehal, Avenue de Flandre à Villeneuve d'Ascq) ont été stockées dans une des bretelles de l'autoroute A22 (boucle de l'échangeur A22-RN350 à Marcq-en-Barœul). Ce site, appartenant à l'Etat, non constructible, non utilisable en agriculture, interdit au public, ne présente que peu de risques pour l'environnement et notamment pour les eaux souterraines (la craie étant séparée des alluvions de la Marque par 8 à 15 mètres d'Argile de Louvil, formation très peu perméable). A la fin de la mise en dépôt, une couverture de terre végétale sera mise en place et un aménagement paysager pourra alors être envisagé.

Pour la deuxième section (Avenue de Flandre - Avenue de Roubaix à Hem), des dépôts sur des parcelles riveraines, appartenant à des particuliers, sont envisagés, moyennant des aménagements :

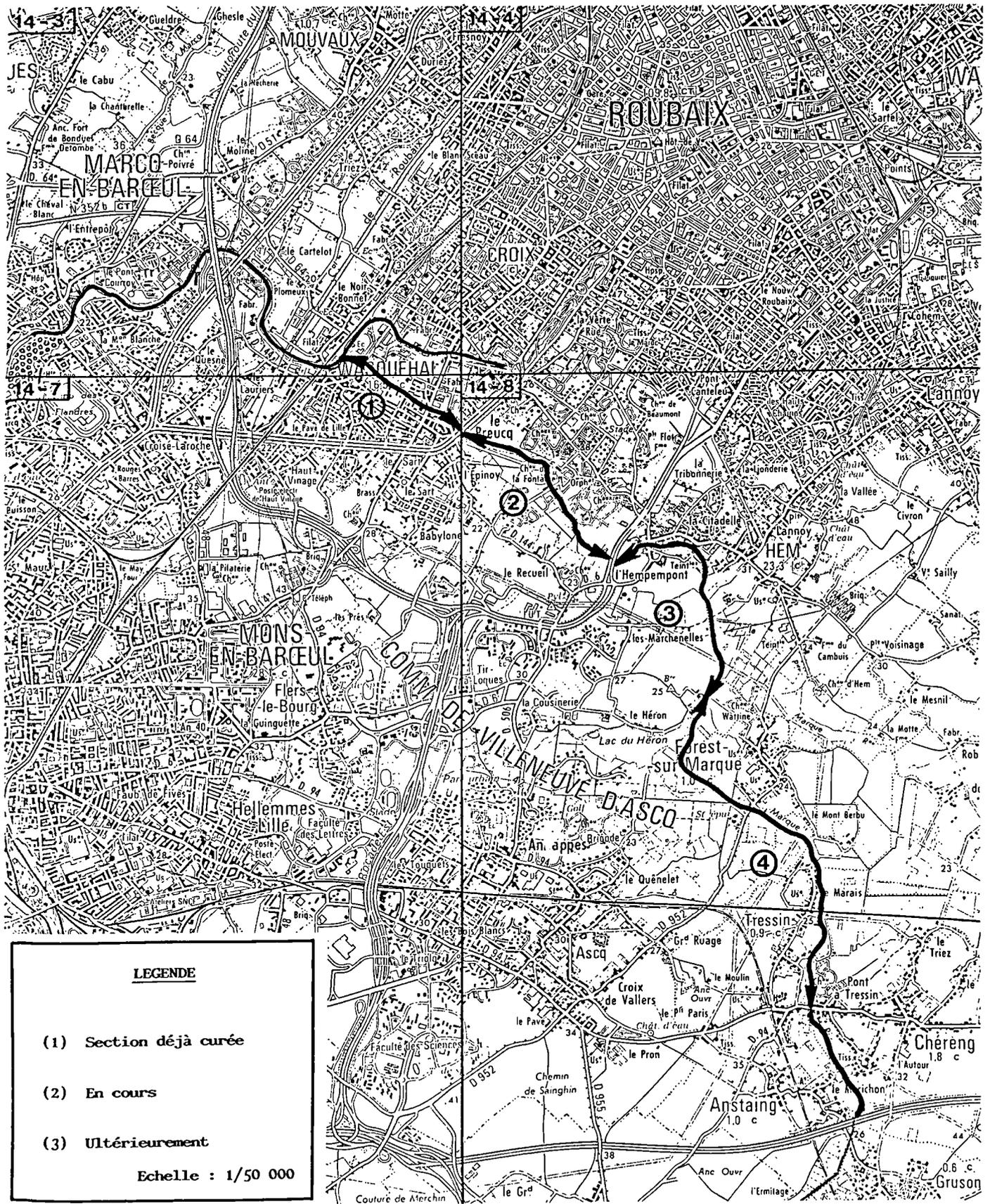


Fig. 1. — Localisation de la zone d'étude.

Fig. 1. — Location of the study area.

— pose de lit drainant en fond de dépôt recouvert d'une géomembrane imperméable recevant les boues,

— pose d'une couverture constituée d'argile et terre végétale en vue du retour du site à l'état de prairie.

Cette solution permettra aussi de rendre ce secteur non inondable, qui sera restitué après les travaux à l'agriculteur propriétaire.

### CONCLUSION

Comme nous venons de le souligner, le problème de l'élimination des produits de curage est rendu complexe par la potentielle toxicité de ceux-ci. De nouvelles dispositions réglementaires doivent venir se substituer aux pratiques et usages locaux en vigueur.

Les conditions d'évacuation de ces produits doivent faire l'objet de concertation entre les différents intéressés permettant ainsi d'éviter des situations de blocage par la profession agricole très concernée par la mise en dépôt en cordon (ou par régilage) sur les parcelles riveraines. A ce titre, l'exemple de la Marque devait être cité (Darmendrail *et al.*, à paraître).

La pollution mise en évidence, dans les boues, qu'elle soit industrielle ou urbaine, doit être traitée à la source afin d'éviter le report de la qualité dans le temps et l'espace, ainsi que l'impossibilité de valoriser en agriculture ces produits et des surcoûts lors du curage.

Par ailleurs, il faut noter que le curage d'un cours d'eau a comme conséquence directe de modifier sur le plan hydraulique et physico-chimique les relations entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Une attention particulière mériterait d'être apportée à cet aspect technique pour éviter la détérioration de la qualité des eaux souterraines, et plus particulièrement celle des volumes prélevés sur des champs captants asservis aux cours d'eau sur le plan hydraulique.

La conservation de notre patrimoine pédologique et de nos ressources en eaux souterraines passent par une gestion intégrée des cours d'eau qui doit prendre en compte ces aspects de curage et de protection des eaux souterraines.

Les contrats de rivière paraissent être une voie privilégiée pour aboutir à un tel résultat en coordonnant les efforts de tous les intervenants : les riverains et professionnels concernés, l'Agence de l'eau, collectivités locales, syndicats d'aménagement, Etat et Administration de tutelle.

Le Ministère de l'Agriculture et le Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement, conscients des difficultés soulevées, ont chargé le Conseil Général du GREF de réunir un groupe de travail en vue de faire la synthèse des travaux déjà réalisés, et de définir les axes de recherches futures dans le cadre d'appel d'offres (ex. SRETIE : Groupe de travail sur la Qualité et la Conservation des sols agricoles).

### BIBLIOGRAPHIE

- 1) DARMENDRAIL D. *et al.* — Devenir des boues de curage d'un cours d'eau : Exemple de la Marque (Nord) (à paraître).
- 2) Norme AFNOR NF U 44-041. — Boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines. Juillet 1985.
- 3) SIX P. (1988). — Les boues de curage des cours d'eau : le point dans le département du Nord. Rapport pour Ministère de l'Environnement.

## Vieillessement du parc de forages et conditions d'abandon des ouvrages de production d'eau dans la Région Nord - Pas-de-Calais

### Ageing of boreholes and conditions for abandoning water production works in the Nord and Pas-de-Calais Departments

par H. DENUDT (\*) et J. RICOUR (\*\*)

*Résumé.* — Le développement et l'évolution permanente des activités humaines conduisent à l'accroissement et à la diversification de l'occupation du sol et du sous-sol dans la Région Nord - Pas-de-Calais. De ce fait, on assiste à la multiplication des structures enterrées : cuvelage, émissaire, égout, forage, puits d'extraction minière, galerie technique, carrière souterraine...

Pour ce qui concerne plus spécialement les forages de production d'eau, les restructurations qui portent sur les activités industrielles traditionnelles associées à un effort de rationalisation de l'utilisation des ressources en eaux souterraines ou à leur détérioration locale, en particulier dans l'emprise de l'agglomération lilloise et du Bassin Minier, sont à l'origine de l'abandon de nombreux forages dans des conditions qui ne sont pas toujours satisfaisantes pour assurer la protection des eaux souterraines.

Par ailleurs, le vieillissement du parc de forages constitué pour l'essentiel entre les deux guerres et au cours des deux décennies 1950-1960 contribue à accroître les risques de défaillance de production tant pour les usagers publics que privés. L'effort de rénovation et d'entretien entrepris depuis 1980 devrait permettre d'assurer la maîtrise de l'essentiel des aléas liés à la "sous-maintenance" de ces dernières décennies.

*Abstract.* — *The development and permanent evolution of human activities is resulting in an increasing and varied land and subsurface use in the Nord and Pas-de-Calais departments. Buried structures are thus becoming more and more numerous — casing, drains, sewage pipes, boreholes, mine shafts, inspection tunnels, underground quarries, etc.*

*Many water production boreholes, in particular, were abandoned under conditions which were not always satisfactory for guaranteeing the protection of groundwater. This was the outcome of restructuring of traditional industrial activity associated with attempted rationalisation of the use of groundwater resources or with its local deterioration, in particular in the area of the Lille conurbation and the mining basin.*

*The ageing of the water boreholes drilled mainly in the inter-war period and in the 1950s and 60s is a factor in the increasing risks of production failure for public and private users alike. The efforts in rehabilitation and maintenance undertaken since 1980 should ensure the control of most of the hazards connected with the "under-maintenance" of the last few decades.*

#### I. — INTRODUCTION

Le développement et l'évolution permanente des activités humaines conduisent à l'accroissement et à la diversification de l'occupation du sol et du sous-sol dans la Région Nord - Pas-de-Calais, économiquement proche de l'Europe du Nord de par ses caractéristiques démographiques, industrielles et agricoles.

De ce fait, la densité élevée d'occupation du sol conduit à un accroissement et à un développement du nombre de structures enterrées : cuvelage, émissaire, égout, forage, puits d'extraction minière, galerie technique, carrière souterraine...

Pour ce qui a trait de façon plus spécifique aux forages de production d'eau, il apparaît comme nécessaire d'analyser les motifs de réduction ou de vieillissement du parc de forages afin de mieux appréhender les risques encourus et les mesures conservatoires susceptibles d'être mises en œuvre dans le but d'assurer :

— la protection de notre environnement, et plus particulièrement des eaux souterraines ;

— la desserte des usagers publics et privés avec un niveau de risque minimum de défaillance.

(\*) Ingénieur hydrogéologue au B.R.G.M./NPC.

(\*\*) Directeur du B.R.G.M./NPC.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication le 6 décembre 1989.

## II. — ANALYSE DES CONTRAINTES QUI PÈSENT SUR L'OUTIL DE PRODUCTION DES EAUX SOUTERRAINES

### Abandon des forages de production d'eau

L'outil de production "eaux souterraines" constitué par les forages de production d'eau est soumis à diverses contraintes dont certaines sont liées à l'évolution récente de l'économie occidentale.

Les tendances actuelles qui pèsent sur les structures industrielles concernent successivement :

— la disparition de filières de production traditionnelle et l'apparition de nouveaux besoins (PAC eau-eau par exemple) ;

— la restructuration des unités de production publiques ou privées visant à atteindre une taille critique minimale au niveau national, voire international ;

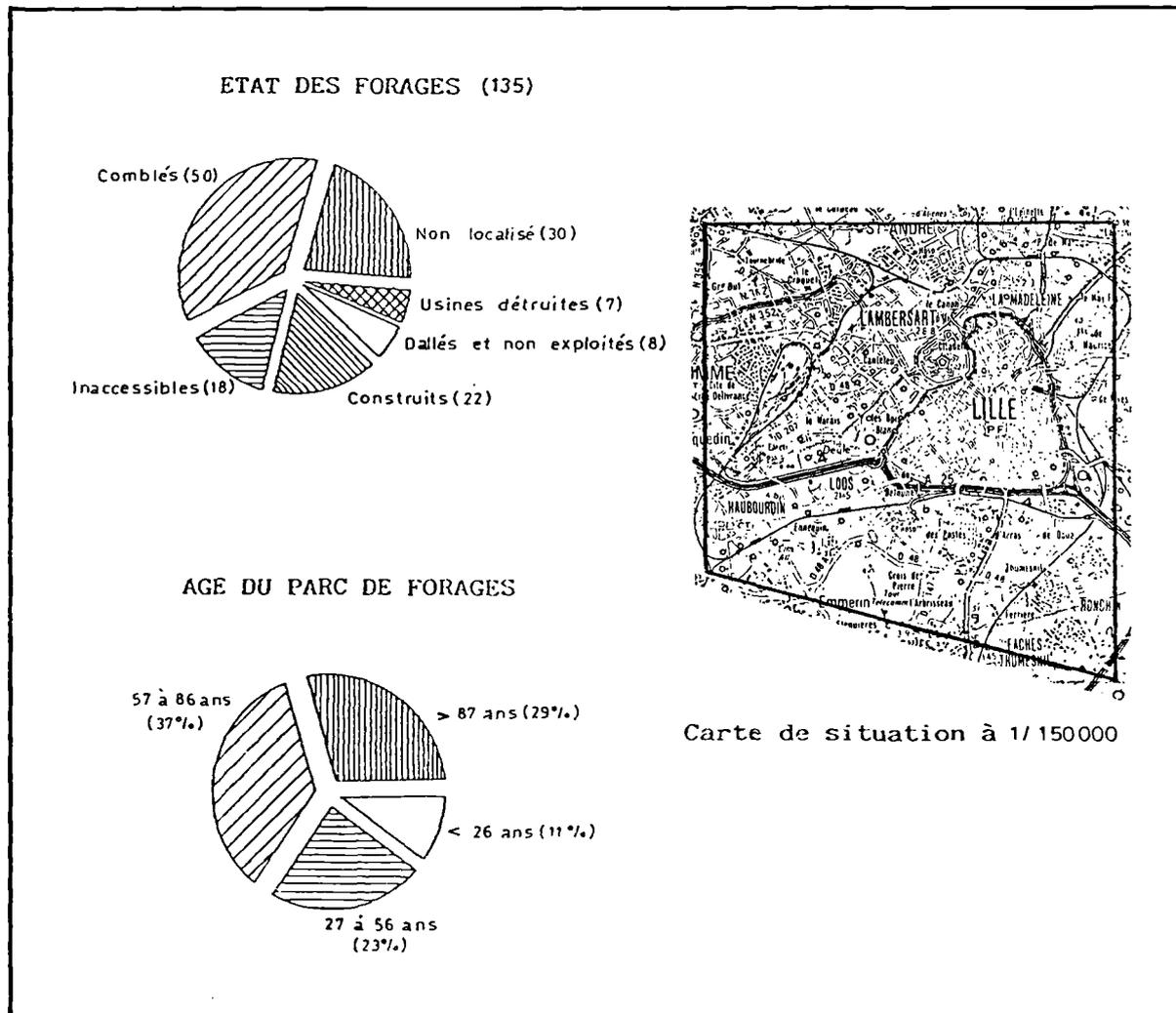


Fig. 1. — Etat et âge du parc de forages dans le secteur de Lille  
(d'après J. Beckelynck — Exploitation de la base de données technico-administratives).

Fig. 1. — Stage and age of water production in the Lille conurbation.

— la délocalisation des entreprises des centres urbains vers la périphérie des villes et des pays développés vers les pays en voie de développement, soit pour des raisons de sécurité ou de disponibilité foncière, soit pour des raisons de coût de production ;

— la recherche et la maîtrise des éléments qui concourent à une production de meilleure qualité dans un cadre de sécurité accrue.

Tous ces éléments participent à l'abandon de forages de production d'eau et à la réduction de la taille du parc exploité dans des conditions de précarité qui peuvent être la source de risques soit vis-à-vis des riverains (mouvements du sol), soit vis-à-vis des usagers des eaux souterraines (pérennité de voies privilégiées d'accès de la pollution vers le milieu souterrain en cas d'abandon sans obturation).

Les conditions de délaissé de ces ouvrages sont fonction de facteurs intrinsèques liés à :

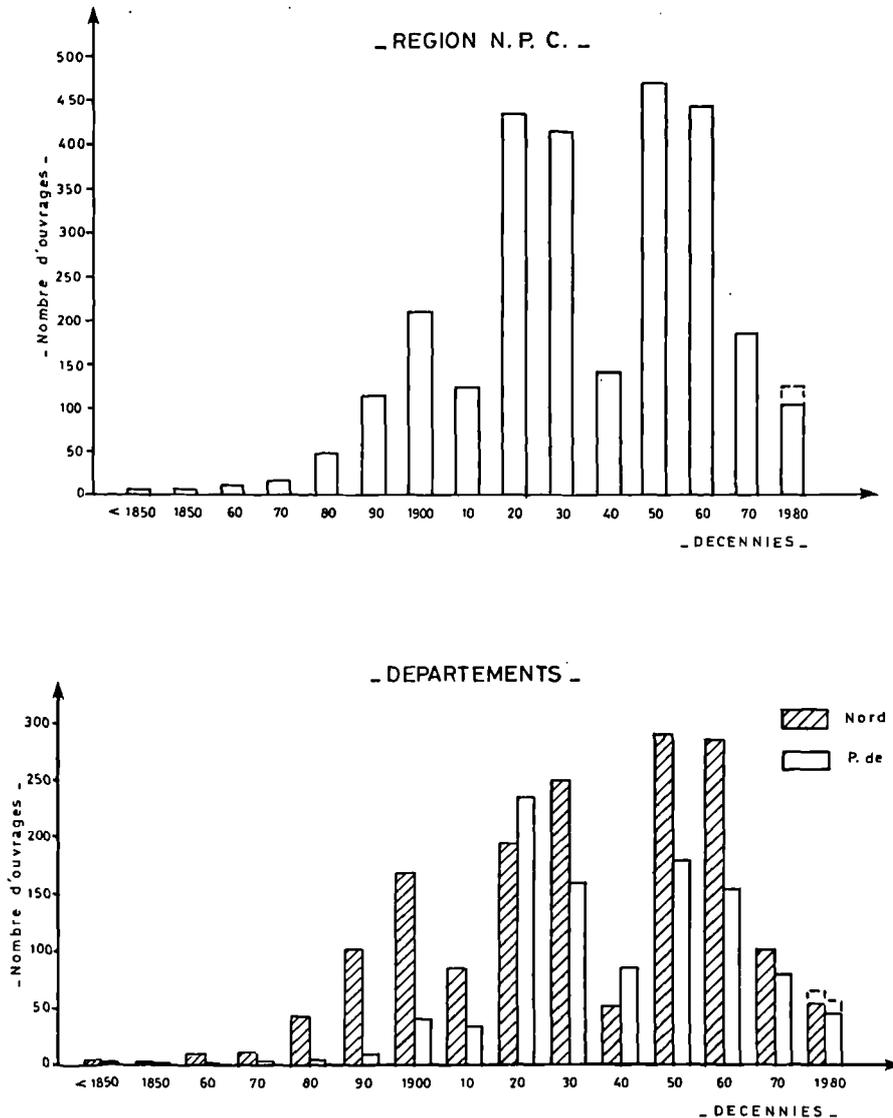


Fig. 2. — Age du parc de forage de la Région Nord - Pas-de-Calais (d'après J. Beckelynck, 1988).

Fig. 2. — Age of water production boreholes in the North and Pas-de-Calais departments.

— l'ouvrage : mode d'équipement et de cimentation, diamètre utile notamment ;

— l'aquifère sollicité et la nature de son recouvrement, qui peuvent conduire à la nécessité de respecter certaines contraintes lors de l'obturation (spécificités propres aux systèmes karstiques, couverture à évaporites...).

Elaboré en s'appuyant sur la base de données technico-administratives mise en place en 1988, l'exemple de l'état des forages sollicitant la craie et le Calcaire Carbonifère dans l'emprise de l'agglomération lilloise montre que 135 ouvrages sont abandonnés dans des conditions variables (figure 1 d'après J. Beckelynck).

Seuls 37 % d'entre eux ont fait l'objet d'une obturation permettant de satisfaire à des règles minimales de sécurité pour ce qui a trait au mouvement du sol en surface, d'une part, aux risques de transfert de pollution vers le sous-sol, d'autre part. 35,6 % sont inaccessibles ou n'ont pu être localisés, ce qui témoigne de la perte rapide d'informations au niveau de la "mémoire collective" sur une durée de quelques décennies. 7 forages sur 135 correspondent à des usines détruites dans le cadre de friches industrielles. 8 sont dalés et inexploités, alors que 22 (soit 16,2 %) sont en domaine construit sans que l'on puisse préciser ni leur localisation, ni leur état, ni leurs conditions d'abandon.

Cet exemple qui s'appuie sur une base de données permettant de gérer 2 950 ouvrages et de réaliser des tris sélectifs portant sur 80 critères préétablis (Beckelynck 1988) montre — si besoin en était — l'extension du phénomène en zone urbaine soumise à des restructurations conséquentes de son tissu industriel.

### III. — VIEILLISSEMENT DU PARC DE FORAGES

L'effort d'investissement important concernant la production d'eau et la desserte publique a été réalisé entre les deux guerres de 1920 à 1940 et au cours des décennies 1950-1970 si l'on s'en réfère aux graphiques de la figure 2. Cette tendance générale qui caractérise l'ensemble de la Région Nord - Pas-de-Calais est plus marquée encore pour le département du Pas-de-Calais du fait du développement de l'exploitation du Bassin Minier de 1930 à 1960-1965.

Cet effort d'équipement qui a porté sur la création de forages neufs afin de répondre à la demande croissante des usagers publics et industriels a masqué, jusqu'en 1980, les besoins liés à l'entretien et à la maintenance des ouvrages.

A partir des années 1970, la réalisation de forages neufs ne correspond plus qu'à la restauration partielle du parc existant, à la délocalisation d'ouvrages contaminés et mal protégés en zone urbaine, et enfin à la satisfaction de nouveaux besoins.

De façon similaire à la prise de conscience qui a eu lieu entre 1970 et 1980 pour assurer le suivi, l'entretien et la maintenance des réseaux de distribution, ce n'est que plus récemment que les différents acteurs économiques ont intégré ce

nouveau besoin, et ont mis en place les moyens nécessaires au suivi, à l'entretien et à la réfection périodique des forages de production d'eau, notamment dans le domaine industriel.

Ce besoin s'est avéré d'autant plus pressant que de nouveaux risques de détérioration des ouvrages sont apparus liés à la modification de l'usage du sous-sol, ou, localement, à la détérioration de la qualité des eaux souterraines. La densification d'occupation des sols est, par exemple, synonyme d'accroissement des courants vagabonds et de corrosion galvanique. L'augmentation des concentrations en nitrates associée aux remontées de nappes peut être à l'origine de modification des conditions d'oxydo-réduction, d'apparition de phénomène de dénitrification associé au développement de souches bactériennes (bactérie sulfato-réductrice) susceptibles d'accélérer les processus de corrosion.

Enfin, la perception par les usagers de besoins nouveaux à satisfaire notamment sur le plan qualitatif est un élément supplémentaire qui milite en faveur de l'entretien des forages et captages d'eau souterraine.

L'analyse de la répartition de l'âge des forages de production d'eau potable par arrondissement sur l'ensemble de la Région Nord - Pas-de-Calais conforte les conclusions précédentes, et reflète, en outre, la répartition dans l'espace des ressources en eaux souterraines. De légères distorsions peuvent apparaître dans la répartition des familles de forages classés par âges et arrondissements liées, en particulier, au contexte géologique particulier (arrondissement de Boulogne) ou à des spécificités industrielles (arrondissement de Béthune, Lens et Valenciennes).

L'âge moyen des ouvrages de production d'eau potable, comme le montre le tableau ci-après, est voisin pour les deux départements et s'accroît pour les arrondissements de Douai,

DEPARTEMENT/ARRONDISSEMENT	Age moyen	Effectif total	"ouvrages non datés"
<b>NORD</b>	<b>46,5</b>	<b>426</b>	<b>5</b>
Avesnes-sur-Helpe	38,5	72	0
Cambrai	52	98	4
Douai	55,5	80	0
Lille	43	107	0
Valenciennes	43	69	1
<b>PAS-DE-CALAIS</b>	<b>47,5</b>	<b>661</b>	<b>23</b>
Arras	56	293	13
Béthune	52	93	2
Boulogne	42	30	2
Montreuil	41	44	0
Calais	46,5	42	0
St Omer	37	64	3
Lens	58,5	95	3

Tableau I. — Répartition du parc de forages de production d'eau potable et de l'âge moyen par arrondissement et par département dans la Région Nord - Pas-de-Calais.

Table I. — Repartition of the water production boreholes and the middle-age per conurbation and per department in the Nord - Pas-de-Calais.

Arras et Lens sans que l'on puisse apporter une explication à cette observation.

A contrario, la moyenne d'âge est inférieure à la moyenne départementale de façon significative pour l'arrondissement de St-Omer. Les ouvrages "non datés", faute d'informations disponibles, ne représentent que 2,6 % environ de la population totale étudiée répartie pour 46 % dans le département du Nord et pour 54 % dans le département du Pas-de-Calais.

La figure 3 permet d'appréhender, sous forme graphique, les divers éléments d'information énoncés ci-avant.

Une analyse plus détaillée sur l'Arrondissement de Lille montre que, à la date de l'analyse sur l'échantillon de forages de production d'eau potable étudié :

- 75 % sollicitent la nappe de la craie ;
- 17,30 % exploitent la nappe du Calcaire Carbonifère;
- 7,70 % ont recours à d'autres aquifères.

98 % des ouvrages ont plus de 20 ans et incitent à un suivi continu, un contrôle périodique de l'état des tubages par vidéo-caméra et de la courbe caractéristique des forages en

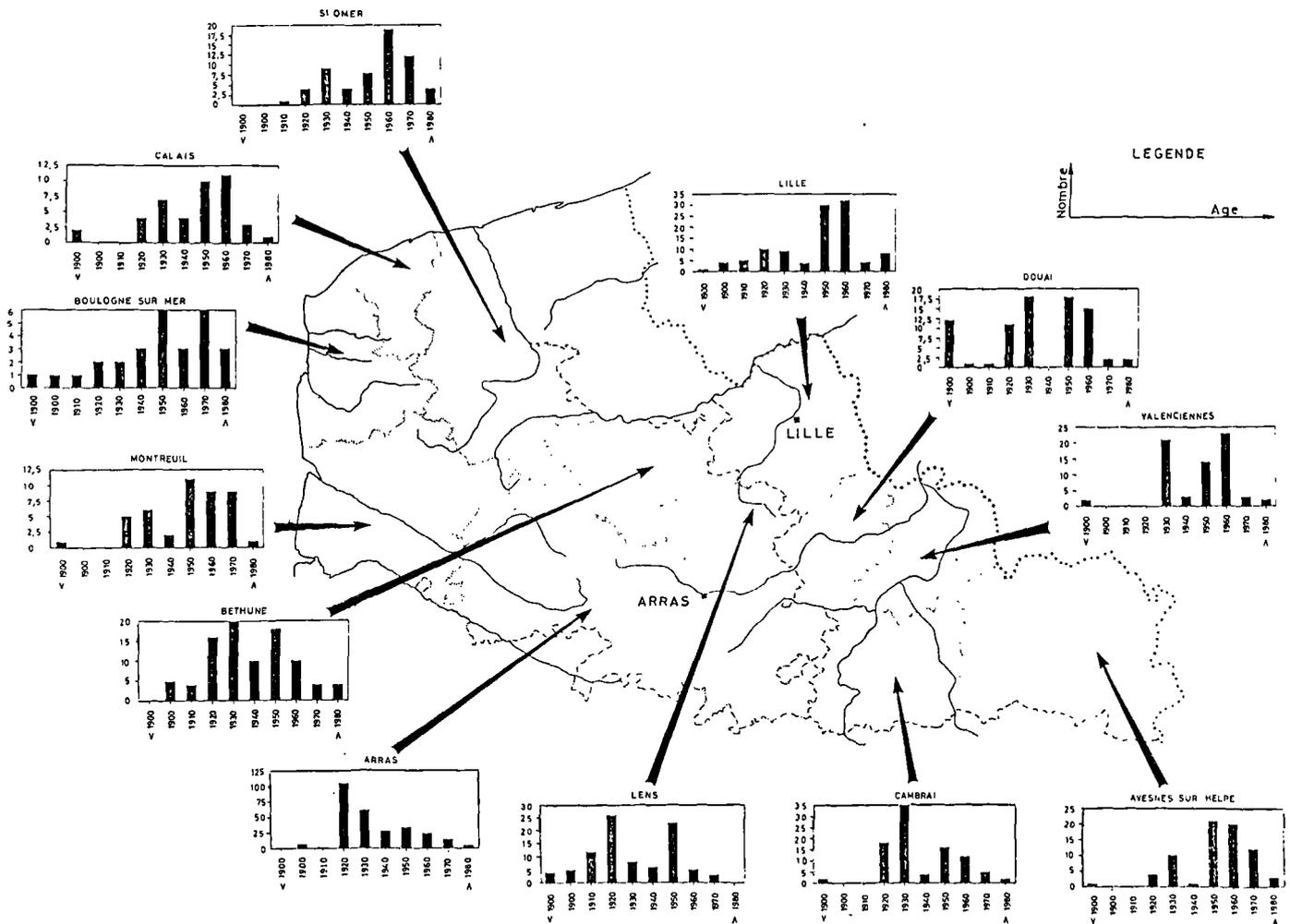


Fig. 3. — Age du parc de forages dans la Région Nord - Pas-de-Calais (par arrondissement)  
Document élaboré par A. Philippart et N. Gosset à partir des documents de la Banque de données technico-administratives.

Fig. 3. — Age of the water production boreholes in the North - Pas-de-Calais departments (per conurbation).

fonction du vieillissement des équipements et de la baisse régulière de la nappe du Calcaire Carbonifère.

Ces éléments sont de nature à permettre une exploitation rationnelle des ressources sollicitées.

### CONCLUSIONS

Le vieillissement et les conditions d'abandon du parc de forages de production dans la Région Nord - Pas-de-Calais méritent une attention toute particulière de la part des exploitants et/ou des Maîtres d'Œuvres.

Le recours aux eaux souterraines pour la desserte en eau des usagers publics ou privés est une spécificité régionale qui correspond à l'importance des ressources facilement accessibles (nappe de la craie et nappe du Calcaire Carbonifère en particulier).

Cette tradition plus que séculaire a comme conséquence un vieillissement de l'outil de production qui ne peut que s'accroître du fait du développement de l'usage du sol et du sous-sol.

Le suivi et l'entretien du parc de forages sont des contraintes à intégrer dans la gestion de l'outil de production pour parvenir à la satisfaction des besoins exprimés à moindre coût dans un cadre de sécurité et/ou de qualité accrue.

Toutefois, l'analyse réalisée est pour partie biaisée dans la mesure où elle ne prend pas en compte :

— les réfections locales d'ouvrages qui ont été effectuées au hasard des nécessités, et sans contrôle spécifique ;

— la mise en service d'ouvrages neufs récents qui se sont substitués à des ouvrages défectueux abandonnés dans des conditions aléatoires mal maîtrisées.

### BIBLIOGRAPHIE

- 1) AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE. — Contrôle et entretien des captages d'eaux souterraines (Juin 1989).
- 2) AGENCE DE L'EAU SEINE-NORMANDIE. — Surveillance et entretien des ouvrages de captage d'eau potable. Recommandations aux élus et responsables de la gestion (Note technique Octobre 1988).
- 3) B.R.G.M./NPC. — Vieillessement du Parc de forages et conditions d'abandon des ouvrages de production d'eau dans la Région Nord - Pas-de-Calais (89 SGN 243 NPC - J. RICOUR, H. DENUDT).
- 4) B.R.G.M./LOR. — Pathologie des forages d'eau (T.S.M. - Mai 1986 - Cl. MAIAUX, J. RICOUR, B. NEISS).
- 5) B.R.G.M./NPC. — Entretien et réfection des forages d'eau. Analyse des motivations et présentation de quelques exemples (*Hydrogéologie*, n° 4, 1986. H. DENUDT, Cl. MAIAUX, J. RICOUR).
- 6) B.R.G.M./NPC. — Les forages de production d'eau et la gestion des risques (*Hydrogéologie*, n° 4, 1987, M. COMBE, J. RICOUR, J.J. RISLER).
- 7) B.R.G.M./BREGG-MAURITANIE. — Prévention, diagnostic et réhabilitation des installations et ouvrages de production d'eau (1988).
- 8) B.R.G.M./AQUI. — Bien moins cher que du neuf : la réhabilitation de forages anciens d'exploitation d'eau potable (*Annales de la voirie et de l'environnement*, 1988, M. COMBE, J. RICOUR, J.J. RISLER).
- 9) B.R.G.M./ALS. — L'inspection interne des forages par vidéo-caméra couleur. Matériel, champ d'application, références, cas réels (1988).
- 10) ILE-DE-FRANCE FORAGES. — Entretien et réhabilitation des ouvrages de captage (*Génie rural*, n° 12, 1988, Jean LAURENT).
- 11) B.R.G.M./ALS. (Cas réels). — Puits n° 3 camp captant de Bietlenheim (67) ; Forage du centre hospitalier de Hoerdt (67) ; Forage du Cial au Wacken à Strasbourg ; AEP de la commune de Reiningue ; AEP de Baldersheim (68) ; Puits P2, P4 de la Brasserie Kronembourg à Strasbourg-Cronembourg ; Puits de l'usine BMW à Strasbourg ; Puits P4, P6 bis et P15 de l'usine Rhône-Poulenc de Chalampe (68) ; Forages de la Raffinerie de Reichstett-Vendenheim ; P1 de la Brasserie de Mützig ; Forage incendie de ESSO-SAF à Strasbourg ; Puits P13 de Stracel à Strasbourg ; Forages P1, P2 de la Brasserie de Schiltigheim ; Forages AEP de Mitschdorf ; Forage PAC du Crédit Agricole à Strasbourg ; Sources Carola à Ribeauville.





Sont en vente au Siège de la Société :

### MÉMOIRES (\*)

<b>Tome I</b> , n° 1. – Ch. BARROIS, <i>Recherches sur le terrain crétaé de l'Angleterre et de l'Irlande</i> , 1876, 232 p. ....	336,00 F
n° 2. – P. FRAZER, <i>Géologie de la partie Sud-Est de la Pensylvanie</i> , 1882, 178 p. ....	252,00 F
n° 3. – R. ZEILLER, <i>Mémoire sur la flore houillère des Asturies</i> , 1882, 24 p. ....	36,00 F
<b>Tome IV</b> , n° 1. – J. GOSSELET, <i>Etudes sur les variations du Spirifer Verneuilli</i> , 1894, 63 p., 7 pl. ....	90,00 F
<b>Tome VI</b> , n° 1. – P. BERTRAND, <i>Etude du stipe de l'Adelophyton jutieri</i> , B. Renault, 1907, 38 p., 4 pl. ....	85,00 F
n° 2. – J. GOSSELET <i>et al.</i> , <i>Faune silurodévonienne de Liévin</i> , 1912-1920. Fasc. 2 .....	336,00 F
n° 3. – V. COMMONT, <i>Saint-Acheul et Montières : Notes de Géologie, de Paléontologie et de Préhistoire</i> , 1909, 68 p., 3 pl. ....	156,00 F
<b>Tome VII</b> , n° 1. – P. BERTRAND, <i>Etude des Stipes d'Asterochloena laxa</i> , Stenzel, 1911, 72 p., 6 pl. ....	102,00 F
<b>Tome VIII</b> , n° 2. – Ed. LEROUX, <i>Le tunnel de l'Ave Maria</i> , 1929, 50 p., 5 pl. ....	120,00 F
<b>Tome IX</b> , n° 1. – G. DUBAR, <i>Etude sur le Lias des Pyrénées françaises</i> , 1925, 332 p., 7 pl. ....	432,00 F
n° 2. – G. FOURNIER <i>et al.</i> , <i>Poissons élasmodontes de Denée</i> , 1926, 23 p., 6 pl. ....	96,00 F
<b>Tome X</b> , n° 2. – J. LAVERDIERE, <i>Terrains paléozoïques des Pyrénées occidentales</i> , 1931, 132 p., 8 pl. ....	180,00 F
<b>Tome XII</b> . – D. LEMAITRE, <i>Faune des calcaires dévoniens du Bassin d'Ancenis</i> , 1934, 268 p., 18 pl. ....	336,00 F
<b>Tome XIII</b> . – P. BRICHE <i>et al.</i> , <i>Flore infraliasique du Boulonnais</i> , 1963, 145 p., 11 pl. ....	252,00 F
<b>Tome XIV</b> . – G. WATERLOT, <i>Les Gigantostacés du Siluro-Dévonien de Liévin</i> , 1966, 23 p., 5 pl. ....	84,00 F
<b>Tome XV</b> . – J. MANIA, <i>Gestion des Systèmes aquifères. Applications au Nord de la France</i> , 1978, 228 p. ....	180,00 F
<b>Tome XVI</b> . – A. BOUROZ <i>et al.</i> , <i>Essai de synthèse des données acquises dans la genèse et l'évolution des marqueurs pétrographiques dans les bassins houillers</i> , 1983, 118 p., 10 pl. ....	250,00 F

### FASCICULES SPÉCIAUX (\*)

« Géologie du Nord de la France » (T. LXXXIX, fasc. 1) .....	85,00 F
« Centenaire de la S.G.N. » (T. XC, fasc. 4) .....	100,00 F
« Rupture des roches et massifs rocheux » (T. XCV, fasc. 3) .....	70,00 F
« Données nouvelles sur le Paléozoïque de l'Europe occidentale » (T. XCVI, fasc. 4 et T. XCVII, fasc. 1) .....	200,00 F
« Apports récents à la Géologie du Gondwana » (T. XCVII, fasc. 4) .....	150,00 F
« Géologie de l'Europe, du Précambrien aux bassins sédimentaires post-hercyniens » (T. XCIX, fasc. 1) .....	150,00 F
« Géologie appliquée aux problèmes d'énergie et de matières premières » (T. CII, fasc. 2) .....	150,00 F
« Tectonique cassante en distension et coulissement » (T. CIII, fasc. 2-3) .....	250,00 F
« Aspect de la Géologie de l'Ardenne, hommage au Professeur Beugnies » (T. CV, fasc. 2) .....	125,00 F
« Paléozoïque supérieur continental » (T. CVI, fasc. 2) .....	300,00 F
« Actualisation de quelques thèmes géologiques » (T. CVI, fasc. 4) .....	125,00 F

### PUBLICATIONS (\*)

Publication N° 1. – J. CHOROWICZ, <i>Etude géologique des Dinarides le long de la transversale Split-Karlovac</i> (Yougoslavie) .....	130,00 F
Publication N° 2. – J. CHARVET, <i>Essai sur un orogène alpin : Géologie des Dinarides au niveau de la transversale de Sarajevo</i> (Yougoslavie) .....	150,00 F
Publication N° 3. – J. ANGELIER, <i>Néotonique de l'arc égéen</i> .....	140,00 F
Publication N° 4. – J.J. FLEURY, <i>Les zones de Gavroto-Tripolitza et du Pinde-Olonos (Grèce continentale et Péloponnèse du Nord). Evolution d'une plate-forme et d'un bassin dans leur cadre alpin</i> .....	175,00 F
Publication N° 5. – M. COUSIN, <i>Les rapports Alpes-Dinarides. Les confins de l'Italie et de la Yougoslavie</i> .....	175,00 F
Publication N° 6. – F. THIEBAULT, <i>L'évolution géodynamique des Hellénides externes en Péloponnèse méridional</i> ....	185,00 F
Publication N° 7. – P. DEWEVER, <i>Radiolaires du Trias et du Lias de la Thétyss</i> .....	180,00 F
Publication N° 8. – J. FERRIERE, <i>Paléogéographie et tectoniques superposées dans les Hellénides internes : les massifs de l'Othrys et du Pélion (Grèce continentale)</i> .....	185,00 F
Publication N° 9. – H. MAILLOT, <i>Les Paléoenvironnements de l'Atlantique sud : Apport de la géochimie sédimentaire</i> .....	130,00 F
Publication N° 10. – Cl. BROUSMICHE, <i>Les Fougères sphénoptériennes du Bassin Houiller Sarro-Lorrain</i> .....	200,00 F
Publication N° 11. – B. MISTIEN, <i>Phénomènes récifaux dans le Dévonien d'Afghanistan (Montagnes Centrales). Analyse et systématique des Stromatopores</i> .....	200,00 F
Publication N° 12. – T. HOLTZAPFFEL, <i>Les minéraux argileux. Préparation, analyse diffractométrique et détermination</i> .....	T.T.C. 90,00 F
Publication N° 13. – J.L. MANSY, <i>Géologie de la Chaîne d'Omineca des Rocheuses aux plateaux intérieurs (Cordillère Canadienne). Evolution depuis le Précambrien</i> .....	200,00 F
Publication N° 14. – C. BECK, <i>Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas (Venezuela)</i> .....	125,00 F
Publication N° 15. – J.M. DEGARDIN, <i>Le Silurien des Pyrénées : Biostratigraphie, Paléogéographie</i> .....	125,00 F
Publication N° 16. – J. SIGAL, <i>Les recherches sur les Foraminifères fossiles en France des environs de 1930 à l'immédiat après-guerre</i> .....	T.T.C. 100,00 F

Les membres abonnés bénéficient d'une réduction de 20 % sur un exemplaire de chacune de ces publications.  
**Les prix sont augmentés des frais de port et d'emballage quand les volumes ne sont pas pris directement au dépôt.**  
 (\*) Tous les prix sont indiqués hors taxe, sauf indication contraire (T.T.C.).

# SOMMAIRE

Tome CIX

(1989)

2<sup>e</sup> trimestre

	pages
P. CELET, D. BERNARD, J. FIEVET et H. MAILLOT. — Vulnérabilité de la nappe de la craie dans le Nord de la France .....	93
B. GUERIN et J.-Y. CAOUS. — Expérience de dénitrification par bassin d'infiltration près du champ captant de la Communauté Urbaine de Lille à Emmerin (Nord) .....	101
C. PRÉAUX. — Pollution des eaux souterraines par les nitrates d'origines agricoles et urbaines. Bilan sur l'arrondissement de Cambrai (Nord - France) .....	107
H. MAILLOT. — Assainissement, épuration et ressources en eau potable : apports des recherches de géophysique appliquée dans la région Nord - Pas-de-Calais .....	113
D. BERNARD et P. CAULIER. — Exploitation d'eau souterraine potable dans la nappe de la craie en position captive dans le Nord - Pas-de-Calais .....	121
T. DUBREUCQ. — Etude sommaire d'ouvrages de défense contre la mer de la baie de l'Authie	125
G. De MOOR et J. LANCKNEUS. — Stabilité et apports sédimentaires sur les bancs de Flandre	129
N. CRAMPON, A. LEVASSOR, J.-P. COLBEAUX, G. POREL, A. CHESNEAU et D. GUYOT-SIONNEST. — Tunnel sous la Manche ou tunnel dans les eaux souterraines ? L'aspect hydrogéologique des travaux dans le domaine continental français .....	141
P. CAULIER, H. MAILLOT et C. PRÉAUX. — Application de la photogéologie et de la géophysique à la recherche de ressources en eau dans la craie à la limite Avesnois-Cambrésis .....	151
P. DOREMUS, Y. QUINIF et J.-M. CHARLET. — La cartographie radon des eaux naturelles appliquée à la détermination de zones à risques domestiques de pollution par le radon (cas de la région de Monceau en Ardenne, Belgique) .....	157
P. SIX, J.-P. PREZ, D. DARMENDRAIL, avec la collaboration de G. BREDAS et D. LEROUX. — Aspects réglementaires et problèmes posés par l'élimination des produits de curage des cours d'eau .....	169
H. DENUDT et J. RICOUR. — Vieillessement du parc de forages et conditions d'abandon des ouvrages de production d'eau dans la Région Nord - Pas-de-Calais .....	175

© 1989 Société Géologique du Nord Editeur, Lille

Toute reproduction, même partielle, de cet ouvrage est interdite. Une copie ou reproduction par quelque procédé que ce soit, photographie, microfilm, bande magnétique, disque ou autre, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 sur la protection des droits d'auteur.

Imprimé en France (Printed in France)