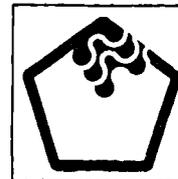


SOCIÉTÉ
GÉOLOGIQUE
DU
NORD



AGENCE
DE L'EAU
ARTOIS
-PICARDIE

GÉOLOGIE
ET
AMÉNAGEMENT RÉGIONAL

ANNALES

Tome CIX (1989) 1^{er} 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^{er}-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 |
| 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

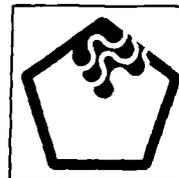
| | |
|--|--------------|
| Table 1 (Tomes I à XX) - Table 2 (Tomes XX à XXX) - Table 3 (Tomes XXXI à XL) - Table 4 (Tomes XL à LXXIX) | 50,00 F H.T. |
| Table 5 (Tomes LXXX à XCIX) | par table |

| | |
|---|----------------------------|
| 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 « zoïques du Nord de la France », présentée par C.F.) | Ins paléo- 50,00 F H.T. |

(1) Modification adoptée lors de l'Assemblée Générale du 1
(2) Les étudiants qui en font la demande annuelle peuvent,

ir l'abonnement (70,00 F).

SOCIÉTÉ
GÉOLOGIQUE
DU
NORD



AGENCE
DE L'EAU
ARTOIS
-PICARDIE

GÉOLOGIE
ET
AMÉNAGEMENT RÉGIONAL

ANNALES

Tome CIX (1989) 1^{er} 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 ^{me} 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^{me} 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.

A N N A L E S
DE LA
SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

Société fondée en 1870 et autorisée par arrêtés en date des 3 Juillet 1871 et 28 Juin 1873

Secrétariat : Société Géologique du Nord
Sciences de la terre, B.P. 36, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
Tél. 20 43 43 43 (postes 4104 et 4132) – C.C.P. Lille 52-47 Y

Avant-Propos

par F. THIÉBAULT

Avant de présenter les principaux résultats scientifiques de cette réunion organisée en Avril 1989, je voudrais remercier Monsieur le Président Dubrulle et Monsieur le Vice-Président Louis, ainsi que tous les services de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres-Artois, de l'aide efficace, matérielle et financière, qu'ils ont accepté de nous apporter dans l'organisation de ce colloque.

Ce colloque avait pour ambition de renouer le contact entre la Société géologique du Nord et l'ensemble des géologues professionnels de notre région. Avec plus de 90 inscrits, 37 communications orales et 24 publications écrites, le but a été manifestement atteint. A une époque où l'on parle beaucoup de professionnalisation des filières universitaires, la Société géologique du Nord a donc contribué utilement au dialogue nécessaire entre théoriciens et praticiens.

Lors du colloque, les communications et les discussions étaient destinées à faire le point sur l'évolution du rôle et de l'importance de la Géologie face aux problèmes suscités par l'Aménagement régional. Les interventions orales ont été regroupées en trois thèmes.

Le premier thème (géologie et aménagements souterrains et/ou de surface) a ouvert les débats avec les deux premières sessions et 14 présentations orales. Le second thème (géologie et gestion des ressources en eaux) fut le plus prolifique et occupa 3 importantes sessions avec 18 exposés oraux. Le troisième thème (géologie et aménagements du littoral) a donné lieu à une session de 5 communications orales.

La répartition des contributions, orales ou écrites, traduit assez bien l'ensemble des problèmes auxquels sont confrontées les Régions Nord - Pas-de-Calais et Picardie. Ces régions subissent en effet une douloureuse restructuration industrielle, aboutissant à de nombreuses friches industrielles dont il est nécessaire d'analyser, d'un point de vue géologique, l'impact sur l'environnement et la nécessaire réhabilitation. Dans le même temps elles doivent relever le défi européen et afficher leurs prétentions de grandes régions européennes placées au carrefour des influences britanniques, belges, hollandaises, germaniques et françaises. Il en résulte une réimplantation active d'installations industrielles et un développement impressionnant des infrastructures routières et ferroviaires. Tous ces travaux ont induit de nombreuses recherches géologiques concernant la structure et les propriétés mécaniques du sous-sol, l'évaluation des risques sismiques, la géométrie des corps rocheux exploités en carrières et l'impact de tous ces travaux sur les nappes phréatiques. Cette politique de développement industriel et de grands travaux dans une région à forte densité de population posent en effet de nombreuses questions quant à la gestion et à la qualité des ressources en eaux. Le nombre des communications consacrées à ce thème marque bien l'importance actuelle et future de ce problème dans notre région. Le petit nombre des communications concernant l'aménagement et la protection du littoral n'est certainement pas la marque d'un désintérêt mais l'indice d'une moindre perception, dans les années passées, de la fragilité du trait de côte dans nos régions. Les événements climatiques de l'hiver 1989-90 sont venus malheureusement rappeler l'urgence d'une politique concertée de défense contre l'action de la mer et la probable élévation de son niveau dans les décennies prochaines.

La qualité des exposés oraux développés lors du colloque, la valeur scientifique, attestée par les rapporteurs, des textes proposés pour publication témoignent que les Régions Nord - Pas-de-Calais et Picardie possèdent les géologues praticiens et théoriciens aptes à les aider à résoudre les multiples problèmes que pose leur développement.

La publication de toutes les notes écrites déposées lors des sessions a été rendue possible grâce aux aides financières apportées par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, le Bureau de Recherches géologiques et minières, le Conseil Régional Nord - Pas-de-Calais et l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres-Artois. Je les en remercie vivement au nom de la Société géologique du Nord. La réalisation du volume correspondant des Annales de la Société géologique du Nord a été menée à bien, en moins d'un an, grâce à l'activité et au dévouement de Madame P. Corsin, Déléguée aux Publications de la Société géologique du Nord, que je suis heureux de saluer et de remercier ici.

J'ai également l'agréable devoir de remercier tous ceux qui ont permis la réalisation de ce colloque et plus particulièrement Monsieur H. Maillot pour l'organisation scientifique et Madame E. Hanton pour l'organisation générale.

J'espère enfin que la réussite de ce symposium des 26 et 27 Avril 1989 encouragera l'organisation d'autres réunions du même type, toujours très enrichissantes pour l'ensemble de la communauté géologique de nos régions.

Métro de Lille - Ligne 1 bis Mouvements du sol autour de l'excavation du tunnel

Lille Subway - "Ligne 1 bis" Ground movements around tunnel excavation

par F. MAUROY (*) et F. VAN LAETHEM (**)

Résumé. — Les terrassements du tunnel du Métro de Lille ont fait l'objet de plusieurs instrumentations permettant de mesurer les déplacements horizontaux et verticaux du sol. Deux sites d'instrumentation sont décrits ici. Les résultats sont classiques et mettent en évidence l'influence prépondérante de la nature des sols excavés et du mode de terrassement (abattage, soutènement). Pour ce dernier point, ils ont permis de localiser l'origine des mouvements "parasites" qui génèrent des tassements trop élevés et de déterminer des techniques permettant de les minorer.

Abstract. — Several instrumentations have been undertaken on the site of the "Lille Subway" (Ligne 1 bis) which object was to measure ground deformations. Results of two instrumented test sections are described in this paper. They are current and demonstrated the preponderant influence of soil characters and methods used in works (excavation, lining). About this last point, they permitted to localize the source of parasitical movements which increased settlements and then, to determinate some engineering methods which should be used : settlements were thus significantly minimized.

Lors des travaux de la Ligne 1 bis du Métro de Lille, la Société Française d'Etudes et de Réalisations de Transports Urbains a demandé au Laboratoire Régional Nord - Pas-de-Calais de mesurer les mouvements des sols lors du creusement du tunnel et ce sur 2 plots de mesures très contrastés, tant dans le contexte géotechnique que dans la technique d'abattage.

1) Le premier plot de mesure

Intitulé "Cimetière", il se situe dans le Cimetière du Bourg de Lomme (Lot 2). Le tunnel y intéresse dans sa partie supérieure une argile plastique "l'argile des Flandres" et dans sa partie inférieure des sables fins (sables d'Ostricourt). Il est situé hors nappe.

La construction est traditionnelle : en première phase, demi-section supérieure avec abattage mixte manuel — chargeur sur pneu, soutènement provisoire par cintres H.E.B. lourds et enfilage de planches, suivi de la mise en place du

revêtement en béton non armé coulé derrière un coffrage glissant. Le terrassement de la demi-section inférieure et le coulage du reste du revêtement ne sont intervenus que quelques mois après la première phase.

Le dispositif de mesure mis en place était destiné à apprécier les mouvements du sol à chaque stade du terrassement. Il a constitué, pour l'essentiel, en la mise en place :

— de deux inclinomètres : l'un en front, l'autre latéral ;

— d'une batterie de tassomètres simples (barres scellées) répartis selon un profil perpendiculaire à l'axe et scellés à des profondeurs différentes.

Par ailleurs, d'autres mesures ont également été réalisées en galerie : efforts et déplacements sous les pieds de cintre (vérin plat et essai de plaque), mesures des variations de teneur en eau du matériau en front, mise en évidence du fluage de l'argile en voûte par fers fichés en ciel, mesures du mouvement du revêtement béton (ces mesures étaient effectuées soit

(*) SOFRETU, Mission de Lille, 1, rue du Ballon - 59034 Lille Cedex.

(**) Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement 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 par le Conseil de la S.G.N. le 6 décembre 1989.

par le C.E.T.E., soit par la SOFRETU ou le Groupement d'Entreprises).

Les résultats les plus intéressants concernent la première phase des terrassements (demi-section supérieure) et peuvent être résumés comme suit :

1° à l'intérieur de la galerie :

— courbe effort - déplacement sous les pieds de cintre linéaire dans la plage des surcharges supportées (de l'ordre de 30 à 40 tonnes par travée de 1 m),

— pas de variation sensible de la teneur en eau en front,

— écoulement net de l'argile en voûte (de visu : par la mesure de l'inclinaison des fers fichés en ciel de galerie) ;

2° à l'extérieur de la galerie :

a) *Mouvements verticaux*

Ils apparaissent à une distance du front de 5 à 8 m. Les tassements de surface obéissent à la loi normale $S = S_{max} \exp(-x^2/2i^2)$ (fig. 1) avec des volumes de cuvette variant de 0,35 à 0,80 m³/ml pour des amplitudes maximales de 35 à 85 mm et des zones d'influences restreintes ($2,5 < i < 6$ m), donc des tassements différentiels importants (fig. 2).

La répartition des tassements en profondeur obéit ici à une loi linéaire qui permet de calculer une valeur analogue à un coefficient de foisonnement ($\approx 2,8 \cdot 10^{-3}$ m/m). Le volume de cuvette reste constant ; il y a donc diminution de la zone d'influence (i passe ainsi de 5,3 à 3,1 m) mais la relation n'est pas linéaire, l'évolution la plus faible se situe dans l'argile et traduit ainsi un comportement "monolithique" de sa masse ("l'écoulement" cité plus haut serait donc superficiel).

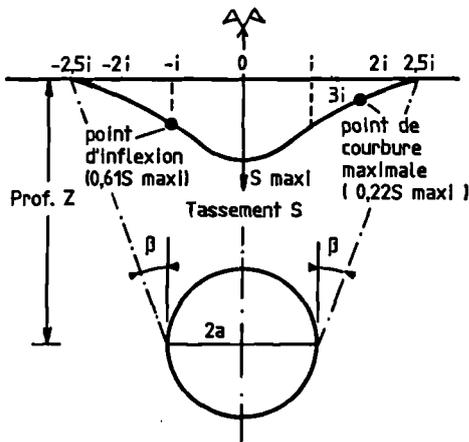


Fig. 1. — Loi normale de répartition des tassements.

Fig. 1. — Ground settlements above tunnel (general pattern).

b) *Mouvements horizontaux*

Les mouvements mesurés aux inclinomètres confirment ce type de comportement. De surcroît, un "appel au vide" apparaît en front mais il semble négligeable vis-à-vis de l'ensemble déplacé ($\approx 5\%$). Ils montrent par ailleurs une relation très nette entre la nature du sol et l'intensité du déplacement.

c) *Conclusion partielle relative au Lot 2*

La composition des mouvements verticaux (tassomètres) et horizontaux (inclinomètres) permet de caractériser les mouvements réels : ces derniers sont pondérés en fonction de la nature des sols (contraste net limon - argile - sable) (fig. 3) et mettent en évidence un appel au vide situé en tête de galerie et donc, des mouvements latéraux de type "spirale" (fig. 4).

Lors de la deuxième phase de terrassement (cuvette), les valeurs de tassement et de déplacement se sont révélées sans commune mesure avec ceux de la première phase (< 2 mm).

2) Le deuxième plot de mesure

Intitulé "Lavoisier", il se situe non loin du puits Lavoisier, avenue de Dunkerque. Le contexte géotechnique est différent puisque le tunnel intéresse ici la partie moyenne des sables d'Ostricourt, alternance de niveaux plus ou moins argileux et cohérents, voire de niveau de grès tendre ("tuffeau"), sous la nappe phréatique. Le mode de creusement est mécanisé (bouclier à pression de boue régulé à l'air comprimé). En raison du mode de creusement, seuls les tassements de sol autour de l'excavation ont su être mesurés (tassomètres à barres scellées à des profondeurs variables, répartis sur deux sites proches, et inclinomètres).

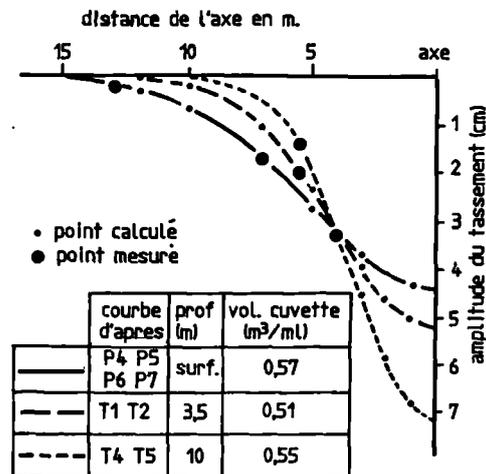


Fig. 2. — Loi normale dans le cas du plot "Cimetière".

Fig. 2. — Ground settlements above tunnel of Lille subway (Lot 2) and lost ground for several depths.

Par ailleurs, compte tenu de la cadence de creusement, les mesures sont rapprochées (jusqu'à 7 mesures par jour).

a) *Déplacements verticaux*

L'amplitude maximale des tassements est faible (< cm) et montre un contraste entre les deux sites où sont répartis les tassomètres (maxi respectifs : 5 et 8 mm).

Comme sur le lot 2, on observe une relation linéaire entre l'amplitude et la profondeur, au moins pour les tassomètres axiaux, et si l'on excepte la mesure de surface (rigidité de la chaussée ?). Pour les tassomètres latéraux, l'amplitude est trop faible (de l'ordre de 1 à 1,5 mm) devant la précision de la mesure pour que l'on puisse conclure.

Les courbes apparaissent heurtées avec de courtes phases de remontées avant des phases de descentes.

L'application de la loi normale de répartition des tassements donne des "volumes de cuvettes" nettement plus faibles que sur le lot 2 : 0,04 à 0,06 m³. La distance d'inflexion de la courbe caractéristique (i) demeure cependant du même ordre (5,5 m en surface à ≈ 3 m au-dessus du tunnelier).

b) *Déplacements horizontaux*

Ils n'apparaissent qu'à partir d'une distance du front d'abattage de 2 à 3,5 m. Les amplitudes sont faibles. Ils montrent en outre des inversions du sens des déplacements.

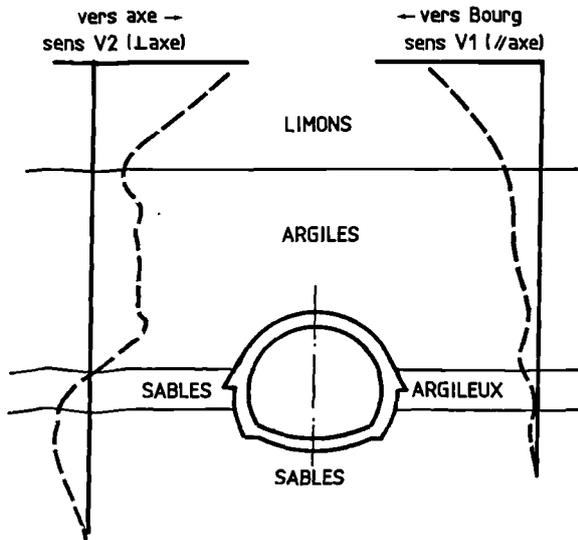


Fig. 3. — Schématisation des déplacements (inclinomètres).

Fig. 3. — Lateral movements (inclinometers).

Avant passage du front, les sols sont refoulés devant le tunnelier (amplitude maximale 12 mm en surface). A ce refoulement général se surimpose cependant un "appel au vide" vers la chambre (≈ 2 mm). Un déplacement inverse apparaît ensuite, surtout marqué au niveau du tunnelier. Au moment des injections, il y a de nouveau inversion du mouvement, l'inclinomètre est repoussé... Un nouveau resserrement apparaît ensuite.

c) *Conclusions partielles relatives au lot 3*

L'amplitude des mesures et leur précision ne permettent pas ici de composer les mouvements verticaux et horizontaux de manière significative. Une bonne concordance apparaît cependant entre les résultats des mesures et les phases de travail :

- lors de l'avancée de la machine, les sols sont repoussés ; ce mouvement est cependant atténué au niveau de la chambre de coupe,

- après passage du front de coupe on assiste à un resserrement des sols autour du tunnelier (compensation de la surcoupe),

- l'injection de compensation autour des voussoirs se traduit par un refoulement latéral,

- après injection, un nouveau resserrement annule le refoulement précédent.

3) *Conclusions générales*

Les mouvements mis en évidence sont tout à fait classiques et montrent des réactions sensibles du terrain vis-à-vis des sollicitations lors des abattages ; les mécanismes mis en jeu semblent similaires dans les 2 plots de mesures, les différences apparaissent surtout au niveau du quantitatif et mettent en évidence l'influence prépondérante de la nature des sols excavés et des sols surincombants, donc de la "coupe

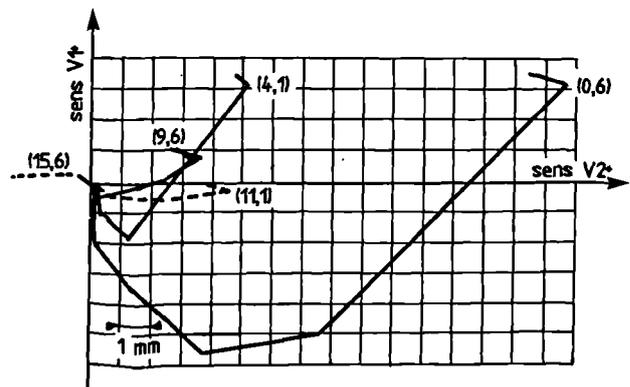


Fig. 4. — Déplacements en fonction des profondeurs.

Fig. 4. — Horizontal displacements for several depths.

géologique et géotechnique'' et de la technique d'abattage et de soutènement.

Les résultats confirment l'utilité de ce type de mesure lorsque certains phénomènes parasites (en particulier l'amplitude des tassements trop importante) gênent le déroulement du chantier.

En particulier, sur le lot 2, certaines améliorations ont pu être ainsi mises au point (entre autres surcintre permettant l'enfilage sans faire jouer le blindage en place, multiplication des phases de recompression, diminution de la longueur des travées) ; elles ont abouti à une diminution de moitié des tassements en surface.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- 1) SCHLOSSER F., MAGNAN J.P. et HOLTZ R.D. — Influence des travaux de terrassements sur les structures existantes (plus de 60 références y sont citées). 11^e Congrès International de Mécanique des Sols - Août 1985.
- 2) CHAPEAU C. et KASTNER R. — Mesures de déplacement de terrain au passage d'un tunnelier. Colloque Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Interaction Sols - Structures - Mai 1987.

Dimensionnement des ouvrages de soutènement dans la craie Problème de l'évaluation des caractéristiques mécaniques de la craie Exemple du parking souterrain de l'Hôtel de la D.D.E. à Lille

Proportioning of lateral superstructure in chalk Determination of chalk mechanical properties

Exemple : underground parking of Departmental Equipment Direction Building in Lille

par A. DUWICQUET (*) et Y. HULO (*)

Résumé. — L'Hôtel de la Direction Départementale de l'Équipement à Lille comporte un parking souterrain circulaire de 40 m de diamètre et de 19 m de profondeur environ. Pour des raisons économiques et compte tenu de contraintes d'environnement, il était souhaitable de construire une paroi moulée autostable en phase travaux, qui serait butonnée ensuite au fur et à mesure de la construction des différents niveaux de parking.

Le calcul de cette paroi nécessitait la détermination des caractéristiques mécaniques de la craie (cohésion et angle de frottement interne). Ces caractéristiques mécaniques sont délicates à apprécier, notamment la cohésion qui est essentiellement liée au degré de fracturation de la craie.

Ce sont ces caractéristiques qu'il a fallu évaluer en l'absence de méthode expérimentale fiable.

Abstract. — *The Departmental Equipment Direction building situated in Lille has got a circular underground parking whose diameter is about 40 m and depth 19 m.*

For economical reasons and environmental servitudes, it was suitable to build a self-stabilized slurry trench wall during working, which would be then buttressed progressively during the construction of the different parking levels.

The calculation of this wall needed the chalk mechanical characteristics determination (cohesion and coefficient of internal friction).

It's complex to determine these mechanical characteristics, particularly the cohesion which is mainly bounded with chalk fragmentation level.

These characteristics must be estimated without a reliable experimental method.

L'exemple cité ici met l'accent sur un type de difficulté technique très particulière aux répercussions économiques parfois importantes. Il pose une question et ne prétend aucunement apporter une solution définitive à un problème concret et quotidien. Il révèle que des progrès restent indispensables dans le domaine de la géotechnique.

Les méthodes de dimensionnement des ouvrages de soutènement font généralement appel aux paramètres utilisés par la mécanique des sols (cohésion C - angle de frottement

interne Φ - module E). Or, la craie, matériau répandu dans notre région, présente parfois le comportement d'un sol, mais plus souvent celui d'une roche. La détermination des caractéristiques géomécaniques par les essais courants pratiqués en mécanique des sols devient alors difficile, sinon impossible. Pour des projets d'ouvrages de ce type, le choix des paramètres mécaniques souffre de beaucoup d'arbitraire. Afin de réduire les risques de désordres encourus dans l'étude d'un ouvrage, les valeurs retenues le sont par défaut. Ces errements induiront un surdimensionnement parfois très coûteux.

(*) Centre d'Études Techniques de l'Équipement 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 par le Conseil de la S.G.N. le 6 décembre 1989.

En pratique, s'affrontent plusieurs points de vue :

— le géotechnicien et le bureau de contrôle tendent à sous-estimer les valeurs, réduisant ainsi les risques qu'ils sont amenés à prendre,

— l'entreprise recherche volontiers une solution économique, donc à faible sécurité, vis-à-vis de ses concurrents,

— le maître de l'ouvrage souhaite, quant à lui, trouver le meilleur compromis coût - sécurité.

Ci-après, est présentée la démarche qui a permis le dimensionnement de la paroi moulée à l'Hôtel de la Direction Départementale de Lille (fig. 1). Cet ouvrage (fig. 2 et fig. 3) comporte un parking souterrain circulaire de 40 m de diamètre et de 19 m de profondeur environ, construit à l'intérieur d'une paroi moulée circulaire, encastrée à 28 m de profondeur dans la craie, et renforcée en tête par un couronnement.

Pour des raisons économiques et compte tenu de contraintes d'environnement, il était demandé d'étudier une paroi autostable en phase travaux (absence de tirants d'ancrage provisoires). Celle-ci était ensuite butonnée par les planchers en fin de construction.

Les sondages réalisés (fig. 2) ont mis en évidence la présence des formations reportées sur la coupe (fig. 3). Le niveau maximal de la nappe phréatique a été estimé à 2,5 m de profondeur.

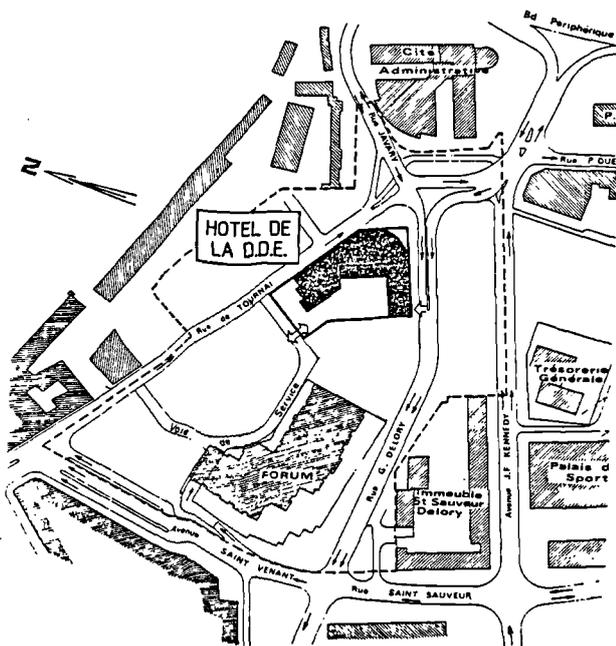


Fig. 1. — Plan de situation.
Fig. 1. — Site location plan.

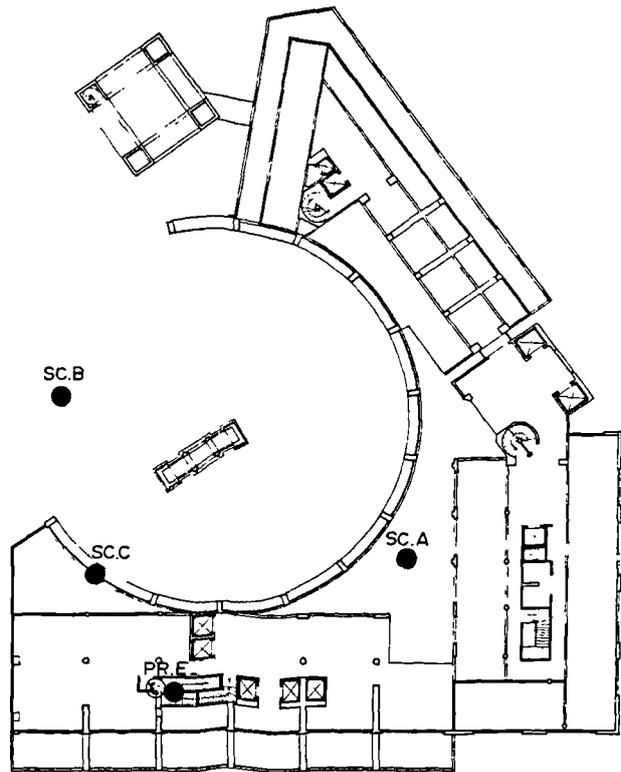


Fig. 2. — Plan masse.
Fig. 2. — Overall plan.

Le principe du calcul des sollicitations du sol sur la paroi (fig. 4) consiste à exprimer la pression exercée sur la structure à un niveau donné en fonction de son déplacement selon une loi de comportement élasto-plastique (fig. 5). La pression et le déplacement sont linéaires lorsque celui-ci est faible, le coefficient de proportionnalité étant un module de réaction du sol K_h déterminé à partir du module E mesuré à l'essai pressiométrique (fig. 6). Pour des déplacements supérieurs à un seuil correspondant à la rupture du sol, la pression limite est exprimée par la théorie de la poussée et de la butée : elle dépend alors des valeurs de C et Φ .

L'essai pressiométrique (fig. 7), réalisé tous les mètres en profondeur, in situ, intègre dans une certaine mesure l'état d'altération et de fissuration de la craie. L'angle de frottement interne Φ obtenu par des essais de cisaillement sur échantillons, en laboratoire, exprime le frottement physique entre grains ou entre blocs. Les valeurs de E et Φ ainsi obtenues laissent une place à la discussion et nécessitent parfois une correction, mais la mesure est toujours possible. En ce qui concerne la cohésion C , la pratique de l'essai est, par contre, impossible, la taille de l'éprouvette n'étant pas à

l'échelle de la fracturation. On peut cependant admettre que cette cohésion dépende de l'importance de la fragmentation du matériau : une craie massive autorise des talus quasi-verticaux (cohésion très importante) ; à l'inverse, une craie très fragmentée ne supporte pas de talus très raides (cohésion faible).

La méthode a consisté à se référer à des ouvrages similaires construits dans une craie de nature proche (Métro de Lille notamment) et à déterminer les caractéristiques, principalement la cohésion C, en comparant l'état du matériau à celui de l'ouvrage de référence. Des corrélations ont été établies entre la valeur de C à définir et le degré de fracturation évalué à partir du Rock Quality Designation (R.Q.D. - fig. 8) et également d'essais Lugeon (essais de mise en pression d'eau à l'intérieur des trous de forage). Des zones de fracturation plus ou moins prononcées ont ainsi été identifiées (fig. 9). La prise en considération de ces deux types de profil, une description détaillée des horizons rencontrés, l'exa-

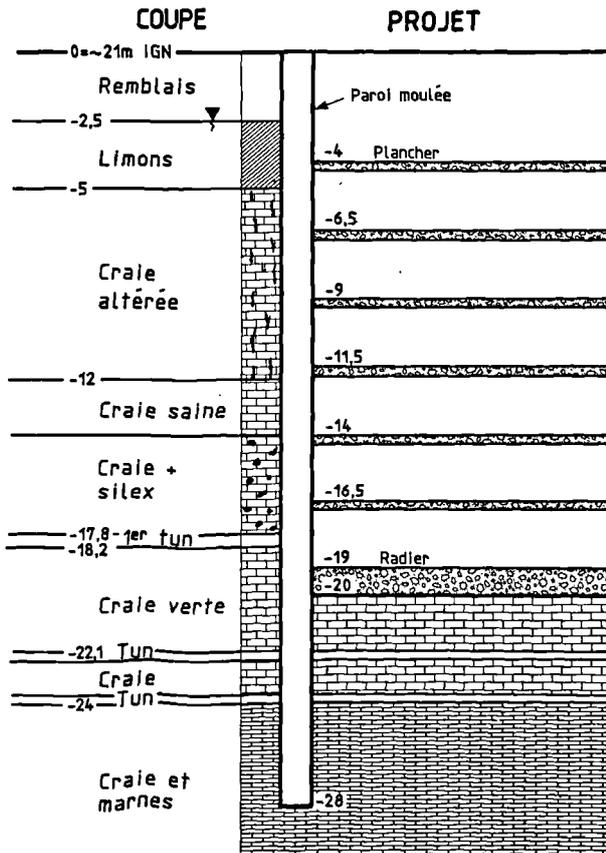


Fig. 3. — Coupe de l'ouvrage et du sol.
Fig. 3. — Structure and soil cross section.

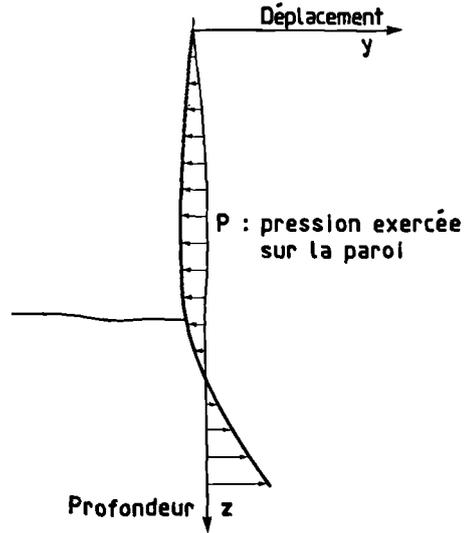


Fig. 4. — Sollicitations du sol sur la paroi.
Fig. 4. — Soil solicitations against the wall.

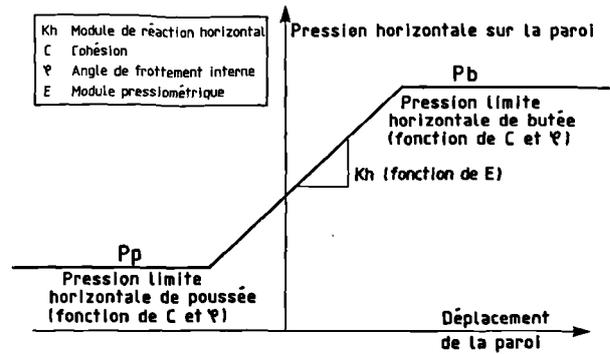


Fig. 5. — Définition de la loi de réaction.
Fig. 5. — Reaction law definition.

$$\frac{1}{Kh} = \frac{1}{E} \left(\frac{\alpha a}{2} + 0,133 (9a)^\alpha \right)$$

- Kh Module de réaction horizontal
- E Module pressiométrique
- α Paramètre rhéologique (1/3 à 2/3)
- a Paramètre dimensionnel (géométrie de l'ouvrage)

Fig. 6. — Module de réaction.
Modulus of reaction.

men des caractéristiques mécaniques utilisées pour les chantiers du Métro, et l'observation du comportement de ces chantiers ont permis un choix de valeurs pour C et Φ (fig. 10).

Le comportement de l'ouvrage lui-même lors de sa réalisation a été suivi au moyen de tubes inclinométriques solidaires de la paroi sur toute sa hauteur. L'amplitude maxi-

male de la déformée reste faible : moins de 5 mm en fin de terrassement, 3 mm environ à l'issue de la construction des planchers (fig. 10). La cohésion n'a donc pas été surestimée comme cela avait été craint au cours de l'élaboration du projet. Les valeurs choisies étaient en effet nettement supérieures à celles habituellement retenues dans ce genre de calcul.

Néanmoins, la méthode adoptée pour l'étude de ce projet est restée très approximative. La mise au point de relations quantitatives entre des paramètres mesurables (R.Q.D. - Essais Lugeon ou autres) et une caractéristique, qui elle ne l'est pas (cohésion), devrait déboucher sur des dimensionnements plus satisfaisants dans certains sols (craie pour l'exemple cité). Le suivi du comportement de l'ouvrage permet ensuite la vérification de la validité des calculs prévisionnels et les réajustements souhaitables.

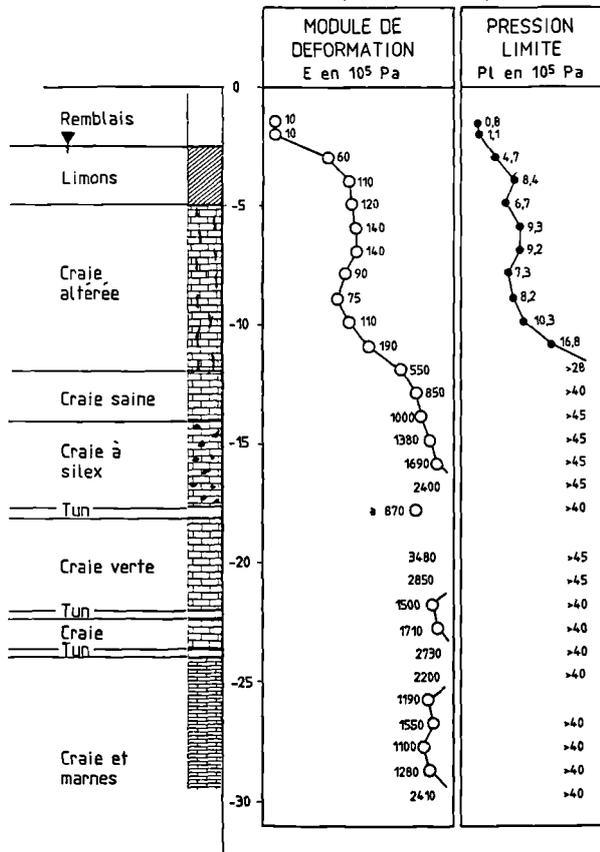


Fig. 7. — Essai pressiométrique.
Fig. 7. — Pressiometric test.

$$\text{R.Q.D. \%} = \frac{\sum \text{longueurs des tronçons de carottes} > 10 \text{ cm}}{\text{longueur de la passe carottée}} \times 100$$

Fig. 8. — Définition du R.Q.D.
Rock Quality Designation.

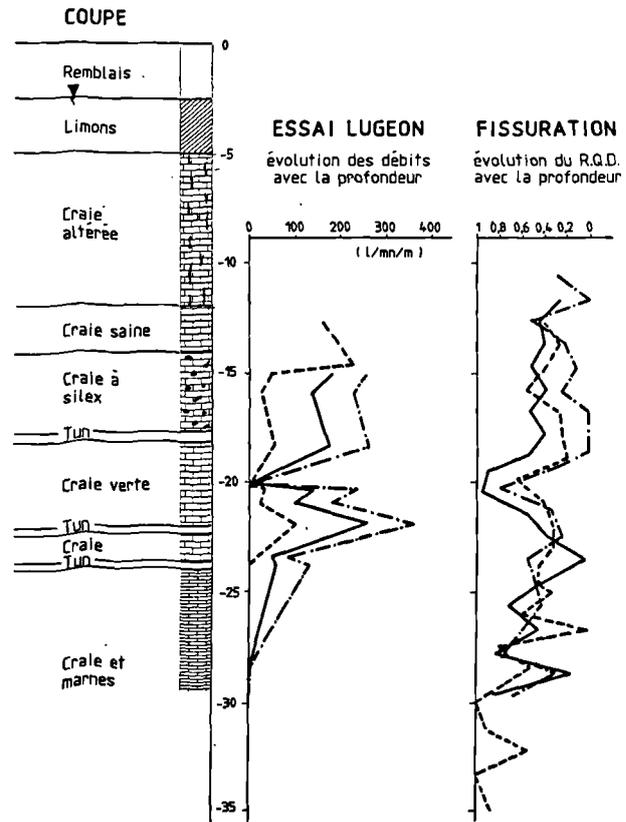


Fig. 9. — Détermination des niveaux de fracturation.
Fig. 9. — Fracture levels determination.

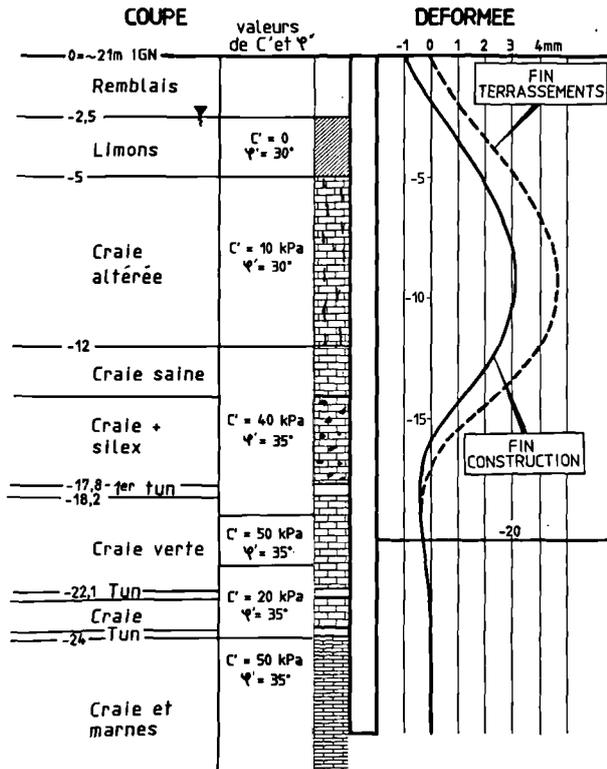


Fig. 10. — Caractéristiques mécaniques prises en compte et observations expérimentales.

Fig. 10. — Considered mechanical characteristics and experimental observations.

Les géologues ont certainement un rôle important à jouer par leur connaissance des formations naturelles. Mais, dans le domaine des calculs, il est important qu'ils puissent traduire cette connaissance en données chiffrées qui rendent alors possible une approche par corrélation.

Une des voies possibles serait d'orienter les recherches dans le domaine des essais en place.

Afin de prendre en compte l'état initial du sol, il serait souhaitable, non pas de prélever l'échantillon, mais de mettre en œuvre un appareil de mesure dans le sol. On pourrait par exemple concevoir une boîte de cisaillement géante mise en place autour d'un échantillon de craie non prélevé. Ce type d'essai serait associé à des essais traditionnels d'identification et à des essais mettant en évidence le degré de fracturation de la craie (essais Lugeon, R.Q.D.). Une telle expérimentation, réalisée sur différents types de craie, devrait permettre l'établissement de corrélations entre la cohésion, l'angle de frottement interne, la nature et le degré de fracturation de la craie.

La réalisation d'une telle expérimentation nécessiterait toutefois la mise à disposition d'un site expérimental, d'un dispositif d'essai étudié et fabriqué spécialement, d'engins de terrassement et de manutention, donc de crédits conséquents.

BIBLIOGRAPHIE

- HAZEBROUCK R. et DUTHOIT B. (1979). — Particularités du comportement mécanique des craies : rôle de l'eau, rupture sous contrainte hydrostatique. *Revue Française de Géotechnique*, n° 8.
- SIGISMOND J., DUPAS J.M., LEFEBVRE A. (1983). — La craie à Nogent-sur-Seine. Caractéristiques géotechniques déduites des reconnaissances et essais. *Revue Française de Géotechnique*, n° 24.
- International chalk Symposium (1989). — Constant normal stiffness direct shear testing of chalk/concrete interfaces (C.R.I. CLAYTON).
- "La craie" - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées - Spécial V - Octobre 1973.

Contribution de la télédétection spatiale à la connaissance de l'anomalie thermique du forage géothermique de Condé-sur-Escaut (France)

Remote sensing contribution at the knowledge of the thermal anomaly discovered during the Condé-sur-Escaut geothermical drilling (France)

par O. ROUZEAU (*)

Résumé. — Dans le cadre de la connaissance des causes de l'anomalie thermique constatée sur le forage géothermique de Condé-sur-Escaut (Nord), des images spatiales Landsat-MSS et —TM ont servi de support à une interprétation structurale de télédétection. Il s'est avéré que le forage se positionnait exactement à l'aplomb d'une structure linéaire, de direction N40°-50°. L'utilisation du canal infrarouge thermique de TM a permis de caractériser cette structure comme étant une anomalie thermiquement froide, dont l'origine probable serait une modification des conditions de drainage, de surface ou de sub-surface, ayant un lien avec une brusque rupture de pente observée au toit des formations géologiques du Paléozoïque.

Abstract. — *As part of the recognition of the thermal anomaly discovered during the Condé-sur-Escaut geothermical drilling (France), Landsat-MSS and TM spatial data were used to build a structural remote sensing interpretation. It has been showed that this drilling was exactly set-up straight above a N40°-50° linear structure. The use of thermal infrared TM band allowed us to characterize this structure as a cold rectilinear anomaly. Its origin could be probably due to a change in surface or sub-surface draining conditions, with possible connections with a slope break observed on the top of the Paleozoic geological formations.*

I. — INTRODUCTION

Cette étude, réalisée dans le cadre de la connaissance des causes de l'anomalie thermique constatée sur le forage géothermique de Condé-sur-Escaut (département du Nord, France), consiste à interpréter les données spatiales des satellites de télédétection Landsat 2 (MSS) et Landsat 5 (TM) de la région de Valenciennes (fig. 1), restituées photographiquement après avoir fait l'objet de traitements d'images spécifiques (amélioration des contrastes, correction géométrique...).

Son but est d'identifier le réseau de fractures cassantes parfois drainantes de surface et même de sub-surface, d'échelle hectométrique à pluri-kilométrique, observé dans des domaines de longueur d'onde allant du visible (0,4 à 0,7 μm) à l'infrarouge thermique (classiquement de 8 à 14 μm).

II. — CONTEXTE DE L'ÉTUDE

La présence de sources thermales et de certaines venues d'eau chaude dans les forages profonds exécutés sur la bordure nord du bassin houiller franco-belge sont des indices suggérant l'existence de réservoirs géothermiques importants (Bernard, 1979 ; Bernard *et al.*, 1980 ; Bosch *et al.*, 1980 ; Legrand et Neybergh, 1979 ; Marlière, 1976 ; Talbot, 1979 ; Talbot *et al.*, 1980). Ainsi, dans cette région, le thermalisme de certaines eaux a été signalé depuis fort longtemps, comme par exemple à Saint-Amand-les-Eaux (Nord) où elles ont conduit au développement d'un établissement thermal connu et fréquenté des Romains. Dans le cadre de l'exploration géothermique de Condé-sur-Escaut, le forage GCND1, situé au lieu-dit Courbois, à moins de 600 mètres de la frontière franco-belge (coordonnées Lambert : X = 691 575 ; Y = 308 836 ; Z = + 18 m NGF), devait être un puits de

(*) Bureau de Recherches Géologiques et Minières Département de Télédétection, B.P. 6009, 45060 Orléans Cedex.

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 6 décembre 1989.

reconnaissance et de production assurant l'appoint énergétique nécessaire au chauffage de serres horticoles. L'étude préliminaire, réalisée par la Compagnie Française pour le Développement de la Géothermie et des Energies Nouvelles (CFG), prévoyait la réalisation d'un forage de l'ordre de 1 300 mètres, captant les eaux chaudes des horizons karstifiés du Calcaire Carbonifère (Dinantien). La température était estimée à environ 50°C en tenant compte des caractéristiques des forages géothermiques belges (Delmer, 1977 ; Leclercq, 1980 ; Legrand, 1974), distants seulement de quelques kilomètres (tabl. I).

A l'exécution, on a constaté que le forage présentait une température anormalement faible (29,5°, ± 0,5°C au niveau de la zone productrice à — 1243 mètres), et un débit artésien de 100 m³/h ± 10 essentiellement concentré au niveau d'une seule zone vraisemblablement fissurée et de faible épaisseur (environ 1 mètre).

En ce qui concerne la géologie, les résultats du forage sont tout à fait comparables à ceux du forage belge de Douvrain (Leclercq, 1980) situé à la même latitude et distant de 16 kilomètres (fig. 1). La seule différence est la profondeur à partir de laquelle on atteint le Viséen : moins de 900 mètres à Condé ; plus de 1 060 mètres à Douvrain.

Dans ces conditions, on ne peut manquer de rappeler ce que disait Delmer *et al.* en 1982 : « En dépit du résultat encourageant obtenu à Douvrain, il serait téméraire d'implan-

ter de nouveaux sondages géothermiques trop au Nord de l'axe du bassin crétacique dans un but de facilité, pour atteindre le gîte aquifère à moindre profondeur ; on risquerait en effet de se heurter à une zone affectée de fractures sauvages et de manquer les venues aquifères ».

III. — ÉTUDE PAR TÉLÉDÉTECTION

L'étude par télédétection du cadre structural de la région de Condé-sur-Escaut a pour principal objet la mise en évidence et l'identification de grandes failles ou réseaux de fractures qui pourraient jouer un rôle de barrières hydrauliques ou de drains et qui seraient responsables de l'anomalie thermique observée au niveau de l'aquifère. Sa réalisation a nécessité l'acquisition sous forme numérique de deux types de données spatiales : celles du capteur MSS (Multi Spectral Scanner) de Landsat 2 et celle du capteur TM (Thematic Mapper) du satellite Landsat 5 (tabl II).

Ces données ont l'avantage :

1° de posséder des résolutions au sol différentes permettant d'intégrer des éléments qui n'ont pas la même surface ;

2° d'être prises à deux dates fort différentes (aussi bien année que saison) tentant ainsi de pallier le problème du masquage des unités géologiques par l'abondance et la diversité du couvert végétal ;

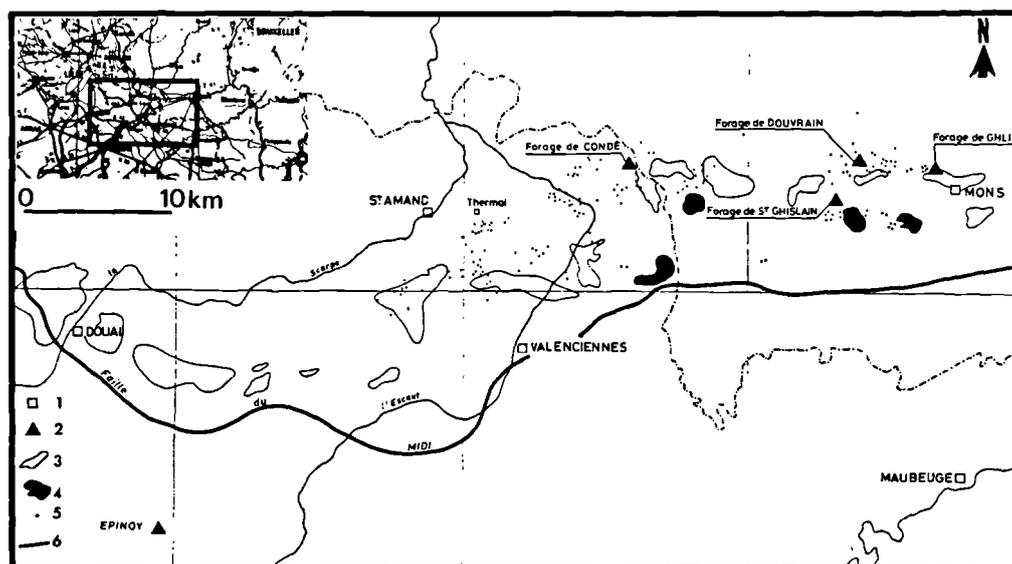


Fig. 1. — Plan de situation générale montrant l'implantation des principaux forages profonds (1 - Localité ; 2 - Forage ; 3 - Cuvette ; 4 - Dôme ; 5 - Puits naturel ; 6 - Faille).

Fig. 1. — Location of the main deep drillings (1 - City ; 2 - Drilling ; 3 - Basin ; 4 - Dome ; 5 - Natural Drilling ; 6 - Fault).

3° d'enregistrer la luminance spectrale émise par la surface terrestre dans des bandes variées du spectre électromagnétique.

IV. — TRAITEMENTS DES DONNÉES

1) Amélioration des contrastes

Les données spatiales numériques sont, à l'origine sous leur forme brute, peu contrastées, ce qui les rend impropres à toutes différenciations. Afin d'améliorer leur lisibilité lors de leur restitution sous forme d'image, il est donc nécessaire d'utiliser au maximum toute la latitude de sensibilité en brillances et nuances des moyens de visualisation. Dans cette étude, l'amélioration des contrastes est effectuée suivant des fonctions algébriques linéaires.

2) Visualisation en composition colorée

L'utilisation d'une composition colorée pour visualiser une représentation en couleur d'une image spatiale est obtenue par la superposition de trois canaux suivant les couleurs fondamentales rouge, vert, bleu. Ce type de traitement a pour résultat d'améliorer considérablement le potentiel d'interprétation.

Trois compositions d'images trichromiques (ou multi-spectrales) ont retenu notre attention pour cette étude : une composition colorée MSS avec le canal 7 en rouge, le 5 en

| FORAGE | DEBITS m ³ / h | PROFONDEUR mètres | TEMPERATURE degrés C | FORMATIONS |
|-------------|------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|
| St-Ghislain | 100 | 2400-2630 | 74° | Karst viséen |
| Douvraïn | 130 | 1353 | 67° | Karst carbonifère |

Tableau I. — Caractéristiques des forages géothermiques belges.

Table I. — Characteristics of the belgian geothermic drillings.

| CAPTEURS | SATELLITES | DATES | RESOLUTION mètres | BANDES SPECTRALES UTILISEES (µm) |
|----------|------------|------------|----------------------|---|
| MSS | LANDSAT 3 | 02/11/1980 | 80 | CANAL 4 (0,5 à 0,6) visible |
| | | | 80 | CANAL 5 (0,6 à 0,7) visible |
| | | | 80 | CANAL 7 (0,8 à 1,1) proche-infrarouge |
| TM | LANDSAT 5 | 25/04/1988 | 30 | CANAL 2 (0,52 à 0,60) visible |
| | | | 30 | CANAL 5 (1,55 à 1,75) proche-infrarouge |
| | | | 120 | CANAL 6 (10,4 à 12,5) infrarouge thermique |
| | | | 30 | CANAL 7 (2,08 à 2,35) infrarouge thermique |

Tableau II. — Caractéristiques des moyens spatiaux utilisés.

Table II. — Characteristics of the space engines used.

vert et le 4 en bleu, mettant en évidence les massifs boisés en brun, les prés et prairies en rouge, les champs et sols labourés en gris bleuté, les zones urbanisées en gris sombre à gris bleuté et les surfaces d'eau libre en noir (cette composition est classiquement dite en "fausses couleurs") ; une composition colorée TM avec le canal 7 en rouge, le 5 en vert et le 2 en bleu montrant la représentation à peu près fidèle qu'aurait un observateur en regardant la surface terrestre d'avion par exemple (composition en "vraies couleurs") ; forêts en vert sombre, prés en vert plus clair, sols nus en beige blanchâtre, agglomération urbaine à dominante rosé (toits en tuiles) et grisé (toits en ardoises et asphaltes des routes) ; une seconde composition colorée TM avec le canal 7 en rouge, le 5 en vert et le 6 en bleu. L'image ainsi obtenue met en évidence les forêts en vert, les zones urbanisées en rouge orangé, les champs cultivés et les prairies en jaune et les surfaces d'eau libre en noir. Ainsi, plus l'eau sera présente (sous forme d'humidité de surface par exemple) plus les teintes décrites précédemment seront sombres.

3) Corrections géométriques

Les transformations géométriques d'images numériques sont utilisées pour corriger les erreurs systématiques introduites par le système d'acquisition durant la phase d'enregistrement des données. Elles sont nécessaires pour superposer rigoureusement les images aux cartes, les images entre elles, repérer l'image par rapport à un système de projection cartographique, permettre des changements d'échelles... (Malon, 1984). Dans notre cas, la démarche consiste, dans un premier temps, à redresser géométriquement les images TM en y recherchant des points d'appui judicieusement choisis (confluences de rivières, croisements de routes, points remarquables du paysage) sur quatre fonds de cartes IGN à 1/50 000. Il permet le calcul d'un modèle de déformation globale. Les cartes utilisées sont respectivement celles de Saint-Amand-les-Eaux (n° 21), Crespin-Mons (n° 22), Valenciennes (n° 28) et Le Quesnoy (n° 29). Ensuite, l'image MSS est redressée de la même façon mais cette fois-ci en prenant une des images TM corrigées comme référence cartographique.

4) Traitement du canal 6 de TM

Le canal 6 de TM a subi des traitements spécifiques (filtrages et convolutions par transformées de Fourier) permettant une interprétation originale. Ce canal est très intéressant car il enregistre la luminance des sols sous forme d'une pseudo-température de surface, elle-même significative de leur contenu en eau. En effet, du fait de sa forte inertie thermique, l'eau s'oppose à toutes variations brutales de température. Les sols gorgés d'humidité vont donc apparaître toujours plus froids sur les thermographies diurnes que les sols plus secs qui se réchauffent rapidement sous l'action de l'éclairage solaire. Il devient alors possible d'apprécier le réseau de fractures, non seulement en surface, mais aussi en subsurface par différence de drainage au niveau du sol. Le résultat obtenu sous forme d'une image noir et blanc et comparable à une thermographie aéroportée (fig. 2), souligne :

- en sombre, les surfaces de températures plutôt froides : des brumes dans le quart nord-est de l'image ; les massifs forestiers qui sont soumis aux heures de passage du satellite à une importante évapotranspiration régulatrice de la température foliaire des arbres ;
- en clair, les zones de températures plutôt chaudes : zones urbanisées, sols nus et secs.

V. — INTERPRÉTATION DES IMAGES

Sur chaque image, on a repéré des discontinuités linéaires. En effet, les images satellitaires, grâce à leur effet synoptique, permettent d'intégrer des éléments plus ou moins linéaires et *a priori* disparates, souvent regroupés sous le terme de linéaments. C'est Hobbs (1904) qui le premier a défini les linéaments « comme des éléments qui apparaissent dans le paysage, correspondant à des crêtes, rides ou limites de relief, lignes de partage des eaux ou rivages, limites linéaires de formations géologiques et lignes d'affleurements ». Il compléta cette définition en 1912 en y ajoutant « des vallées et ravins ainsi que des éléments d'origines structurales — lignes visibles de fractures ou zones de brèches de failles ». Cependant, dans les bassins sédimentaires, régions où la tectonique et la morpho-structure sont peu marquées en surface, les causes probables des linéaments sont beaucoup plus

variées. Ainsi, aux critères morphologiques, renforcés par le choix d'images hivernales (avec une faible élévation du soleil) ainsi que par des procédés d'acquisition d'images en infrarouge thermique, s'ajoutent des critères liés à la configuration du réseau hydrographique et à la végétation, elle-même significative des variations dans l'humidité des sols (Rouzeau, 1985).

Sur l'image du canal 6 de TM, trois types de "linéaments thermiques" ont été distingués suivant la nature de leur réponse spectrale par rapport à leur environnement le plus proche. Ainsi, on a différencié des linéaments thermiquement froids (c'est-à-dire sombres dans des zones plus claires sur l'image de la figure 2), des linéaments thermiquement chauds (c'est-à-dire clairs dans des zones plus sombres sur l'image de la figure 2) et des linéaments thermiquement indifférenciés lorsqu'il s'agit d'une limite rectiligne entre une zone froide et une zone chaude.

VI. — RÉSULTATS DES INTERPRÉTATIONS

L'observation de la carte des linéaments (fig. 3) montre, dans le voisinage du forage de Condé-sur-Escaut, deux directions principales de linéaments : l'une, N110°-120°, bien représentée par une succession de rivières et ruisseaux au Nord de la carte (en Belgique), dans la région se situant au

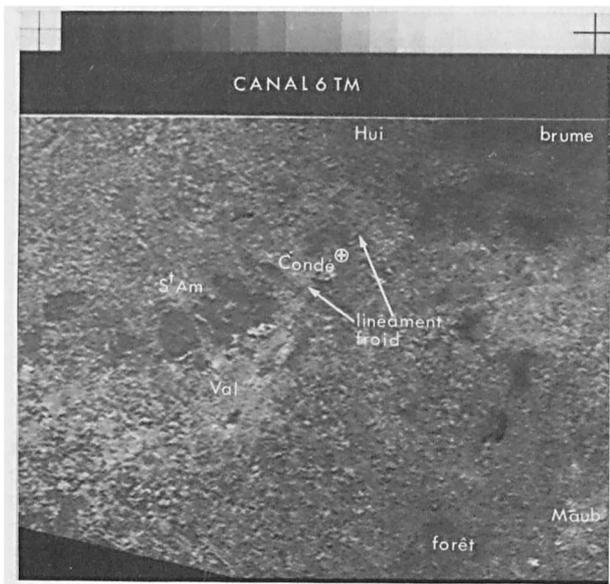


Fig. 2. — Image du canal infrarouge thermique de TM (Hui- Huissignies ; Maub- Maubeuge ; St Am- Saint-Amand-les-Eaux ; Val- Valenciennes).

Fig. 2. — Thermal infrared TM data (Hui- Huissignies ; Maub- Maubeuge ; St Am- Saint-Amand-les-Eaux ; Val- Valenciennes).

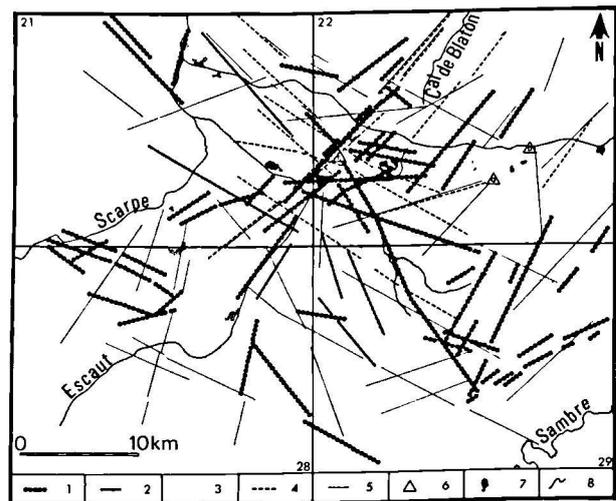


Fig. 3. — Carte des linéaments observés sur les scènes MSS du 02/11/1980 et TM du 25/04/1988

1 - Linéament thermique froid ; 2 - Linéament thermique indifférencié ; 3 - Linéament thermique chaud ; 4 - Linéament TM ; 5 - Linéament MSS ; 6 - Forage ; 7 - Lac ou étang repéré par télédétection ; 8 - Canal ou rivière).

Fig. 3. — Map of the MSS (1980/11/02) and TM (1988/04/25) lineaments

1 - Cold lineament ; 2 - Undifferentiated lineament ; 3 - Hot lineament ; 4 - TM lineament ; 5 - MSS lineament ; 6 - Drilling ; 7 - Remotely sensed lakes ; 8 - River

NE de la Forêt domaniale de Mormal et enfin par le brusque changement de direction du cours de l'Escaut entre Condé et Laplaigne en Belgique ; l'autre, N40°-50°, qui forme un faisceau assez dense de linéaments entre Valenciennes au Sud, Huissignies au Nord, et se continue vers Condé.

Ce faisceau Valenciennes/Huissignies est intéressant à plusieurs titres. Tout d'abord, il se situe dans le prolongement du cours de l'Escaut dans sa partie sud (de Valenciennes jusqu'à Condé), passe le long des étangs de Chabaud-Latour (pratiquement à l'aplomb du forage de GCND1) et se continue au Nord retrouvant ainsi la direction du cours de la Hunelle lorsque celle-ci est longée par le Canal de Blaton à la hauteur de Huissignies.

Sur l'image du canal infrarouge thermique de TM (fig. 2), ce faisceau a une température au niveau du sol manifestement froide par rapport à son environnement proche, pratiquement identique à celle des eaux libres de surface. Ce type de phénomène, déjà observé lors d'autres études sur des thermographies (Rouzeau, 1988), nous conduit à émettre l'hypothèse que ce faisceau est caractéristique d'un drainage préférentiel des eaux de sub-surface. Or, compte tenu de l'étendue spatiale de cette anomalie froide, il se peut très bien qu'elle soit le lieu d'une importante zone d'infiltration des eaux de surface "polluante" ainsi thermiquement les eaux de l'aquifère. Lorsque l'on observe la carte des isohypses du toit du Paléozoïque sous recouvrement (C.F.P. *et al.*, 1965), on constate que cette anomalie se positionne exactement à l'aplomb d'une brusque variation de pente (passant pratiquement de l'affleurement à - 300 mètres) (fig. 4), alors que les deux forages belges de Saint-Ghislain et Douvrain se situent, quant à eux, au niveau d'un approfondissement des isohypses. De façon plus générale, sur l'ensemble de la région, les axes d'orientation N40°-50° et N110°-120° correspondent à des directions de fracturation (failles ou diaclases) connues dans les formations dinantiennes en surface comme en mines.

CONCLUSION

L'utilisation de la télédétection spatiale, en particulier dans le domaine infrarouge thermique, permet de proposer une explication de l'anomalie thermique constatée lors du forage de Condé-sur-Escaut. Ce dernier est placé précisément sur

un faisceau de linéaments N40°-50° thermiquement froids, ce qui pourrait signifier qu'il est le siège d'une infiltration préférentielle des eaux de surface, probablement liée à une brusque rupture de pente au niveau du toit des formations paléozoïques.

Les faibles températures mesurées dans le forage de Condé-sur-Escaut seraient dues à un phénomène de pollution de l'aquifère par des eaux plus froides en provenance d'une zone d'alimentation peu éloignée. Cette hypothèse semble être confirmée par les premiers résultats des analyses chimiques et isotopiques qui font apparaître le fluide de Condé comme un mélange entre un fluide d'âge viséen s.s., rechargé par les précipitations dans les zones d'affleurement voisines, et un fluide plus chaud d'origine profonde.

Remerciements. — Je tiens à remercier vivement MM. J.P. Deroin et J.Y. Scanvic pour leurs suggestions lors de la rédaction de ce manuscrit.

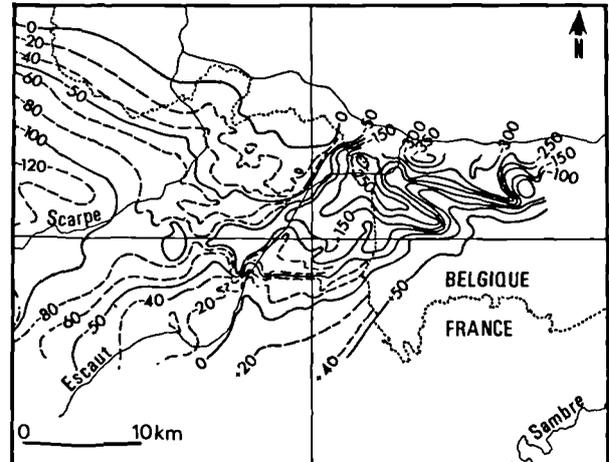


Fig. 4. — Carte d'isohypses (en mètres) du toit du Primaire sous recouvrement (Bernard *et al.*, 1980).

Fig. 4. — *Isohypses Map (in Meters) of the Paleozoic Top* (Bernard & al., 1980).

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BERNARD D. (1979). — Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Etat et acquisitions du chimisme de l'eau. Thèse de 3^e cycle. Université des Sciences et Techniques de Lille. U.E.R. des Sciences de la Terre.
- 2) BERNARD D., BOSCH B., CAULIER P. (1980). — Acquisition et rassemblement des données géothermiques disponibles et nouvelles dans la zone franco-belge de Saint-Ghislain à Saint-Amand-les-Eaux (Nord). Rap. BRGM 80 SGN 406 NPS/MGA/GTH.
- 3) BOSCH B., CAULIER P., TALBOT A. (1980). — Etude préliminaire à la réalisation de forages dans la nappe du Calcaire carbonifère. Acquisition de données complémentaires (deuxième phase). Rap. BRGM 80 SGN 689 NPC.
- 4) C.F.P., C.O.P.E.S.E.R., R.A.P. et S.N.P.A. (1966). — Contribution des bassins paléozoïques du Nord de la France. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. LXXXV.
- 5) DELMER A. (1977). — Le Bassin du Hainaut et le sondage de Saint-Ghislain. *Service géologique de Belgique, Prof. Pap.* n° 143, pp. 12-36.

- 6) DELMER A., LECLERCQ V., MARLIÈRE R., ROBASZYNSKI F. (1982). — La géothermie en Hainaut et le sondage de Ghlin (Mons - Belgique). *Ann. Soc. Géo. Nord*, t. CL, octobre 1982.
- 7) HOBBS W.H. (1904). — Lineaments of the Atlantic border region. *Bull. Soc. Geol. Am.*, Vol. 15, pp. 483-506.
- 8) HOBBS W.H. (1912). — Earth fractures and their meaning : an introduction to geology for student and general reader. Mc Millan Co, New York, 506 p.
- 9) LECLERCQ V. (1980). — Le sondage de Douvrain. *Service géologique de Belgique. Professionnal Paper n° 170*.
- 10) LEGRAND R. (1974). — Jalons géothermiques. *Service géologique de Belgique. Mémoire n° 16*, Bruxelles.
- 11) LEGRAND R., NEYBERGH H. (1979). — La nappe aquifère du Calcaire carbonifère du Tournaisis. *Prof. Pap.*, Bruxelles, 1979/8.
- 12) MARLIÈRE R. (1976). — Les eaux chaudes de Baudour (Belgique) et les tunnels inclinés. *Mém. et Public. Soc. Sc. Arts et Lettres*, Mons, 1976, vol. 87, pp. 35-131.
- 13) MALON J.F. (1984). — Principaux traitements des images satellitaires et associées. Rap. BRGM 84 SGN 396 GEO.
- 14) ROUZEAU O. (1985). — Apport des données satellitaires thermiques. Bassin de Paris. Etudes des linéaments d'après les images HCMM. Rap. BRGM 85 SGN 396 GEO.
- 15) ROUZEAU O. (1988). — Problématique de la transposition des modèles de distribution de température dans le sol aux interprétations issues de la télédétection thermique spatiale. Rap. BRGM 88 DT 044 TED.
- 16) TALBOT A. (1979). — Etude préliminaire à la réalisation de forages dans la nappe du Calcaire carbonifère. Rap. BRGM 79 SGN 542 NPC.
- 17) TALBOT A., JOURDAIN E. (1980). — Etude préliminaire à la réalisation de forages dans la nappe du calcaire carbonifère. Acquisition de données complémentaires. Rap. BRGM 80 SGN 233 NPC.

Géologie structurale et exploitation de carrière en Avesnois (massif ardennais ; Nord, France)

Structural geology and quarrying in Avesnois (Ardennes Massif ; Nord, France)

par Amar KHATIR (*) et François GUILLOT (*)

Résumé. — Certains problèmes d'exploitation des calcaires dinantiens, dans la carrière Bocahut à Avesnes-sur-Helpe, sont liés à des complications structurales dues à la tectonique varisque. En tenant compte des résultats structuraux, il serait possible d'optimiser la progression et l'agrandissement des excavations ; d'évaluer les potentialités d'exploitation ; de définir les lieux économiquement les moins intéressants, pour accumuler les stériles.

Abstract. — *Some exploitation problems in the Dinantian limestones, in Bocahut's quarries near Avesnes-sur-Helpe, are linked up to structural complications due to Variscan tectonics. Field investigations might help : to solve progression problems and to foresee the excavations extension ; to evaluate exploitation potentialities ; to define less interesting economically sites devoted to terre barren.*

I. — INTRODUCTION

Le Dinantien du Nord de la France, dans l'Avesnois, est conservé uniquement au cœur de plis synclinaux d'axe Est-Ouest, de longueur d'onde kilométrique (fig. 1). Pendant longtemps, ces plis varisques de l'Avesnois ont été décrits comme des ondulations simples de l'épaisse série sédimentaire dévono-dinantienne, à peu près indemnes de complications internes (Gosselet, 1888 ; Carpentier, 1913 ; Delattre *et al.*, 1967 ; G. Waterlot et B. Waterlot, 1969 ; Bouroz, 1988). En effet dans cette région les meilleurs affleurements ont toujours été constitués par les carrières ; jusqu'aux dates citées, les excavations étant peu profondes, les complications structurales décrites ci-après ne pouvaient être soupçonnées.

Récemment la reprise d'activité, avec des moyens matériels plus importants, a conduit à un agrandissement des excavations. C'est alors que des difficultés à suivre certains bancs sont apparues. En effet, ceux-ci disparaissent ou se dédoublent à la faveur d'accidents jusque-là ignorés.

II. — LE SYNCLINAL D'AVESNES DANS LA CARRIÈRE BOCAHUT

Pour produire de la chaux, la société Bocahut exploite près d'Avesnes-sur-Helpe (loc. fig. 1) deux niveaux de calcaire pur d'âge viséen : ce sont la Formation de Godin (V1a, fig. 2) qui est formée de calcaires oolithiques massifs et grisâtres, et la Formation de Neffe (V2a, fig. 2), constituée de calcaires blanchâtres crinoïdiques. Les autres formations du dinantien (Tournaisien et Viséen, ou "calcaires carbonifères" des auteurs), économiquement moins intéressantes car dolomitiques, sont concassées pour produire du ballast (voir leur liste en fig. 2).

Au XIX^e siècle, l'exploitation s'était faite au centre du site, là où est installé maintenant le petit terril E1 (fig. 2). La carrière actuelle comporte quatre excavations, numérotées de 1 à 4, sises de part et d'autre de l'axe cartographique du synclinal d'Avesnes, une des grandes structures synclinales régionales (fig. 1). Dans le flanc nord du synclinal, où

(*) Laboratoire de Dynamique Sédimentaire et Structurale, bâtiment SN5, Université de Lille Flandres-Artois, 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.

se trouvent les excavations 2 et 3, les couches sont monoclinales, avec un pendage uniforme de 65° vers le Sud. On y observe une succession stratigraphique normale et continue, comprenant notamment le niveau-repère V1a de calcaires oolithiques. Les deux autres excavations (1 et 4) sont installées au Sud de l'axe du synclinal. A cet endroit les calcaires oolithiques V1a avaient été signalés, avec un pendage de 40° au Nord. L'on pouvait donc s'attendre à retrouver, cette fois

avec un pendage modéré au Nord, la même série. Mais la progression de l'exploitation a révélé des terrains dilacérés par des accidents plats (Fb) ou subparallèles aux couches (F'a, F''a, F'''a). En particulier, l'assise V1a disparaît en s'aminçant selon un biseau montant vers l'Est ; le caractère de contact anormal, tectonique, de son mur (noté Fb), qui se relève lentement vers l'Est, est prouvé par exemple par le repos de V1a sur V2a dans le coin NE de l'excavation n° 1.

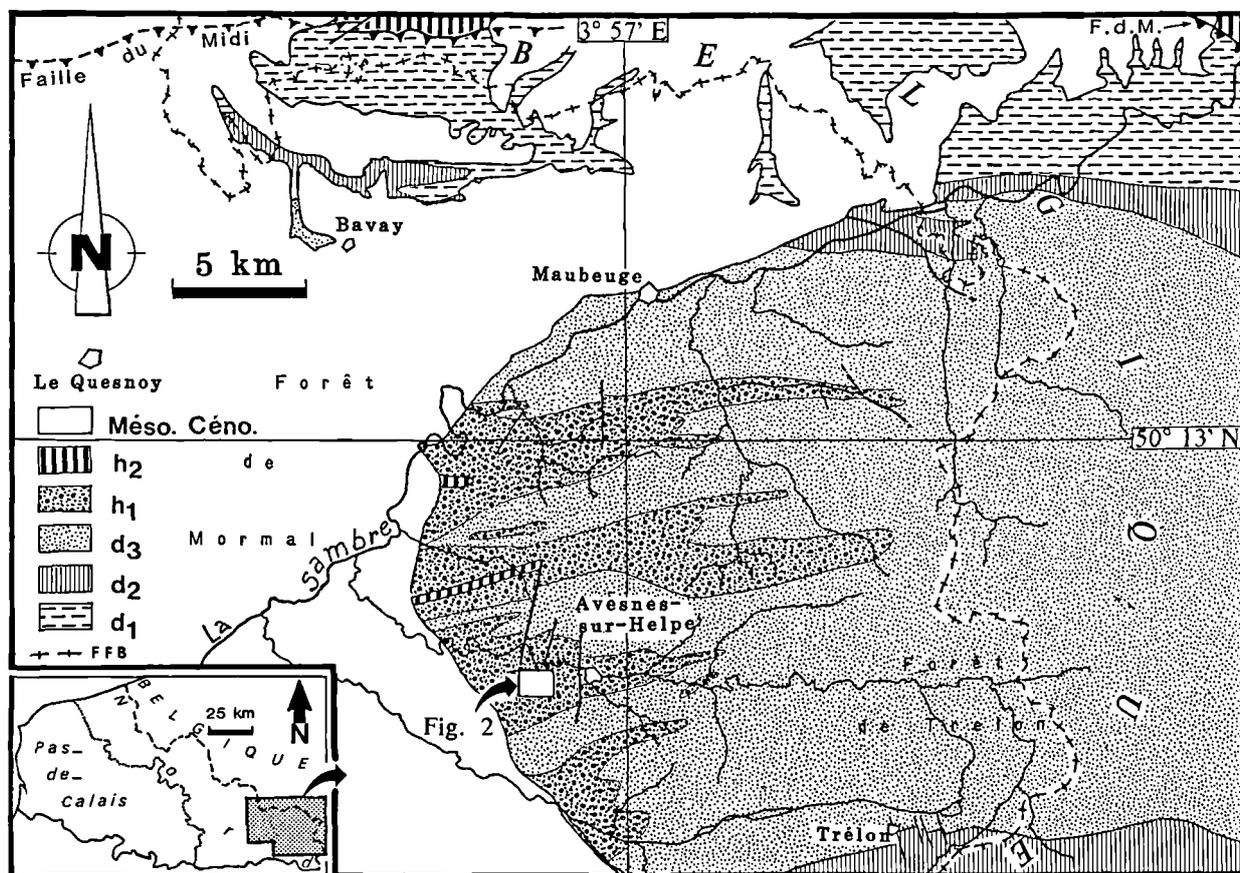


Fig. 1. — Situation du Dinantien de la région d'Avesnes (fig. extraite de Khatir *et al.*, 1988 ; légèrement modifiée).
d1 : Dévonien inférieur - **d2** : Dévonien moyen - **d3** : Dévonien supérieur - **h1** : Dinantien - **h2** : Houiller - **Mésoc. Céno.** : Mésozoïque et Cénozoïque - **FFB** : frontière franco-belge.
 L'Avesnois, partie la plus occidentale du massif ardennais, montre les derniers affleurements du Paléozoïque supérieur, surmontés en discordance par des sédiments méso-cénozoïques. Le Paléozoïque supérieur de l'Avesnois fait partie de la Nappe de Dinant (Allochtone Ardennais), qui chevauche vers le Nord, à la faveur de la Faille du Midi (F. d. M., bord nord de la carte), le Parautochtone Brabançon, dont l'avant-fosse molassique correspond au bassin houiller (h2).

Fig. 1. — Avesnois location and geological map (in Khatir *et al.*, 1968, slightly modified).
d1 : Lower Devonian - **d2** : Middle Devonian - **d3** : Upper Devonian - **h1** : Dinantian - **h2** : Coal Measures - **Meso.Ceno.** : Mesozoic and Cenozoic - **FFB** : France/Belgium boundary.
 Avesnois is the western end of the Ardennes Massif, with its westernmost Upper Paleozoic outcrops. The Avesnois Upper Paleozoic is a part of Dinant's Nappe (Ardenne Allochthonous), which is thrust to the North over the Brabant parautochthonous Coal Measures (h2). The main accident is the "Faille du Midi" (F. d. M.), a local name for the North Variscan Front.

Pour tenter de comprendre ces structures, la stratigraphie régionale et locale du Dinantien a été récemment revue en détail par Mansy *et al.* (1988), à l'aide notamment de la suc-

cession continue visible dans l'excavation n° 3. En même temps la géométrie des assises a été reconstituée dans toute la carrière (Khatir *et al.*, 1988). Ces révisions stratigra-

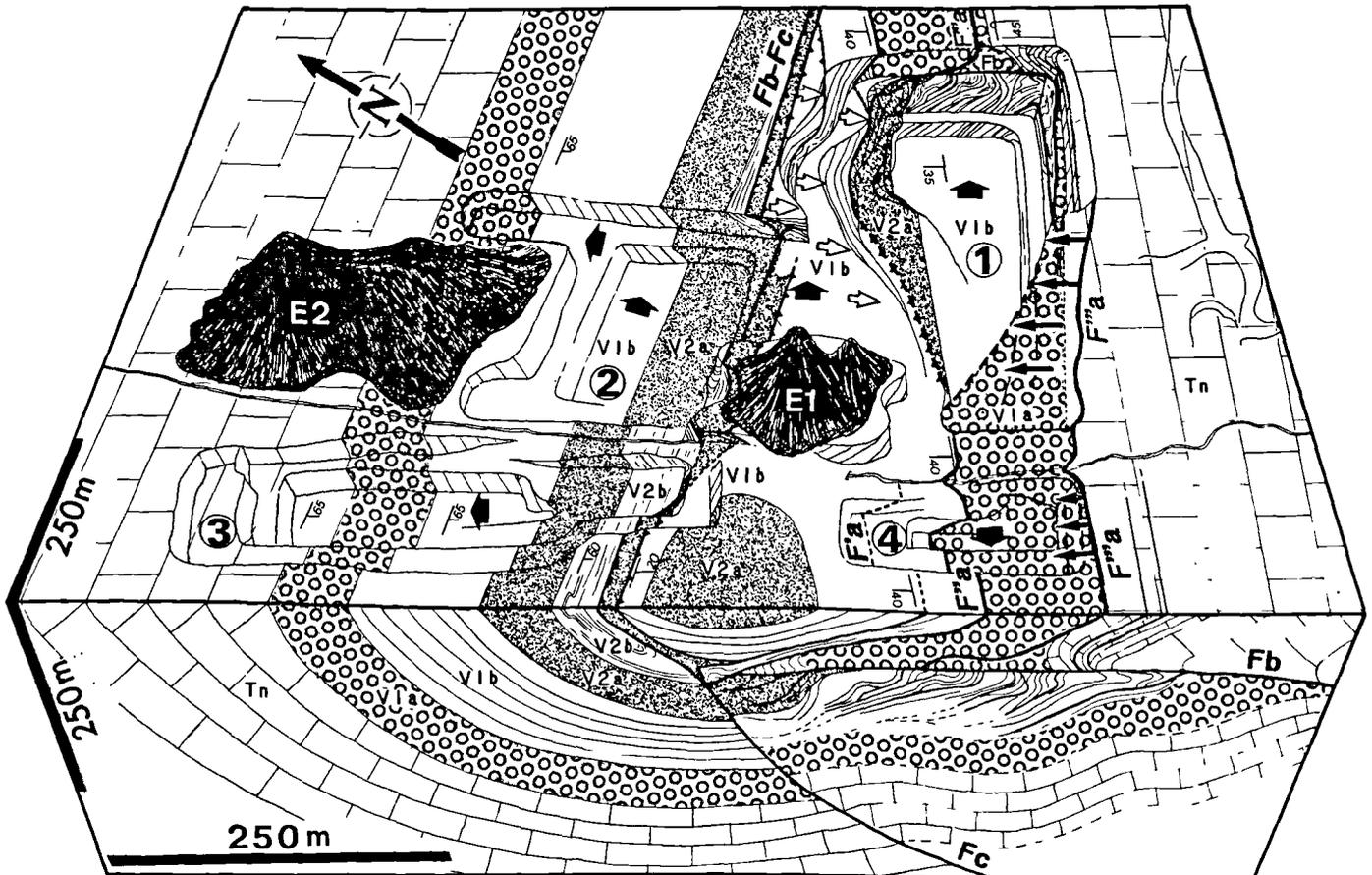


Fig. 2. — Bloc-diagramme interprétatif du site géologique de la carrière Bocahut à Avesnes-sur-Helpe (loc. fig. 1).
Tn : Tournaisien et transition au Viséen (épaisseur visible : 167 m) - **V1a** : Formation de Godin (68 m) - **V1b** : Formation de Terwagne (92 m) - **V2a** : Formation de Neffe (50 m) - **V2b** : Formation de Lives (épaisseur visible : 30 m).
1, 2, 3, 4 : numéros des excavations (dans l'ordre chronologique d'ouverture) - **E1, E2** : terrils - flèches épaisses : sens de progression des exploitations - flèches minces pleines : effondrement - flèches creuses : effondrement potentiel.
Fb et **Fc** sont les accidents principaux ; **F'a, F''a** et **F'''a**, replissés, correspondent à un système de glissements précoces. L'accident plat **Fb** est à l'origine de l'arrêt de l'exploitation dans l'excavation n° 1. L'accident **F'''a** a donné lieu à un important effondrement lors d'un tir de mine, dans cette même excavation.
 Le terril **E1**, qui comble une ancienne excavation, se trouve au-dessus de l'accident **Fb-Fc**, par conséquent au-dessus de la formation **V2a**. Le terril **E2** gêne maintenant l'exploitation de la formation **V1a**.

Fig. 2 — Bocahut's quarries tentative geological block-diagram (loc. fig. 1).
Tn : Tournaisian to Viséan transition (visible thickness : 167 m) - **V1a** : Godin Formation (68 m) - **V1b** : Terwagne Formation (92 m) - **V2a** : Neffe Formation (50 m) - **V2b** : Lives Formation (visible thickness : 30 m).
1, 2, 3, 4 : quarries numbers (according to their opening chronology) - **E1, E2** : refuse dumps - thick, solid arrows : direction of advancement of the quarrying - thin, solid arrows : collapsed terranes - empty arrows : sense of potential collapse.
Fb and **Fc** are the main accidents. Folded **F'a, F''a** and **F'''a** faults behaved to an early slipping system. **Fb** accident has caused **V1a** exploitation to stop toward the South-East in n° 1 quarry. **F'''a** accident has produced an important breaking down in the same quarry. The refuse dump **E1** lays above the **Fb-Fc** accident, then maybe above the **V2a**, useful level. The refuse dump **E2** now makes the exploitation of the other useful, **V1a** level difficult in the n° 2 quarry.

phiques et structurales conjointes ont permis à l'un de nous (A.K.) de proposer le bloc-diagramme interprétatif de la figure 2.

III. — CONSÉQUENCES POUR L'EXPLOITATION

1) Blocage de la progression

L'extraction a été interrompue dans l'excavation n° 1, et intensifiée dans les autres excavations.

2) Risques d'effondrement

Outre les accidents plats, le flanc sud du synclinal comporte de nombreuses failles plissées, généralement peu visibles car subparallèles aux plans de stratifications. L'une d'elles, notée **F'''a** (fig. 2), est localement inclinée de près de 40° au Nord. En approfondissant l'excavation n° 1, on a fini par la dégager par le bas, et elle a pu fonctionner comme un plan de glissement — lors d'un tir de mine —, entraînant la chute de tout un pan du bord sud de cette excavation (site indiqué en fig. 2). Cet effondrement a provoqué la perte d'un équipement important, et l'exploitation a failli être compromise.

Actuellement l'abattage se fait au cœur du synclinal entre les excavations n° 1 et n° 2, où des risques de glissement vers le Sud, à la faveur de la faille inclinée notée à cet endroit **Fb-Fc**, sont encore à considérer (flèches évidées en fig. 2).

3) Stockage des stériles

Pour atteindre les calcaires dinantiens il est nécessaire d'enlever les quelques mètres de dépôts superficiels quaternaires, et de prévoir des lieux proches pour le stockage de ces stériles. Dans les carrières Bocahut on a édifié successivement deux terrils (fig. 2).

Le premier (**E1**) a été installé dans une ancienne excavation (dite carrière de la Cressinière) sise au cœur du synclinal. Dans l'interprétation structurale que nous proposons, nous supposons qu'en ce lieu, sous l'accident **Fb-Fc**, par conséquent sous la formation **V1b**, peu intéressante économiquement, se retrouveraient les calcaires **V2a**. Ainsi le déblaiement du modeste terril encombrant cette excavation permettrait, sans frais excessifs, de retrouver ces calcaires.

Le second terril (**E2**) est plus imposant. On l'a édifié à une époque où les problèmes du flanc sud n'étaient pas prévisibles. Or ce terril se trouve juste à l'aplomb de la formation **V1a**, dont il gêne maintenant l'exploitation.

CONCLUSIONS

Les connaissances structurales ont ici progressé grâce à l'agrandissement des excavations. En retour, il semble que ces recherches pourraient maintenant profiter à l'exploitation.

Le dispositif structural proposé est plus compliqué que celui qui était admis auparavant. Mais il semble l'illustration d'un motif structural que l'on découvre de plus en plus, dans l'Avesnois comme dans le reste des Ardennes et dans le Boulonnais.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BOUROZ A. (1988). — Réflexions sur l'orogénèse varisque dans le Nord de la France. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. CVIII (1), p. 45-57.
- 2) CARPENTIER A. (1913). — Contribution à l'étude du Carbonifère du Nord de la France. *Mém. Soc. géol. Nord*, t. VII (2), 434 p.
- 3) DELATTRE C., POLVÈCHE J., WATERLOT G. et WATERLOT B. (1967). — Aperçu de la structure des terrains carbonifères de l'Avesnois. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. LXXXVII, p. 203-209.
- 4) GOSSELET J. (1888). — L'Ardenne. *Mém. carte Géol. Fr.*, 889 p.
- 5) KHATIR A., MANSY J.L. et MEILLIEZ F. (1988). — Structures et déformation dans l'Allochtonne Ardennais en Avesnois (Nord). *Ann. Soc. géol. Nord*, t. CVIII (2-3), p. 73-83.
- 6) MANSY J.L., CONIL A., MEILLIEZ F., KHATIR A., DELCAMBRE B., GROESSENS E., TRENTESAUX A. et WEYANT M. (1988). — Nouvelles données stratigraphiques et structurales du Dinantien de l'Avesnois. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. CVIII (2-3) p. 125-139.
- 7) WATERLOT G. et WATERLOT B. (1969). — Feuille Avesnes-sur-Helpe. *Carte géologique de la France à 1/50 000*, B.R.G.M. éd., Paris-Orléans, XXVII-7, carte et notice.

La sédimentation dans deux étangs de la vallée de la Sensée (Nord de la France)

Sedimentation in two ponds of the Sensee Valley (North of France)

par Eric MERCIER (*) (***), Anne BOUQUILLON (**), Stéphane BACROT (*)

Résumé. — Depuis le détournement de la rivière en 1963, les deux étangs situés en amont dans la vallée de la Sensée (Nord de la France) sont soumis à des processus de sédimentation accélérés. Le taux de sédimentation actuel est estimé à environ 10 000 m³/an. Les sédiments apportés sont de deux types : matières en suspension charriées par la rivière, prédominantes dans le premier étang et dépôts organiques autochtones, plus répandus dans le second étang. Des études bathymétriques et des comparaisons de photos aériennes prises avant 1963 et après montrent le développement d'un mini-delta à l'entrée du premier étang ; au front de cette structure, des reprises en masse qui engendrent des courants de densité semblent participer de façon notable à la sédimentation dans le second étang.

Abstract. — Since the diversion of the Sensee River (North of France) in 1963, the two first ponds of the Sensee Valley are going to fill up more and more. The sedimentation rate is estimated to be around 10 000 m³/yr. The deposited sediments are constituted by 1) suspended matters carried by the river and 2) autochthonous organic remains. The first compounds are largely dominant in the first pond, the second ones are rather encountered in the second pond. Bathymetric studies and the observation of aerial photographs allow to identify the appearance of a little fan at the mouth of the first pond after 1963. Notable density currents are periodically coming from the fan face ; they probably explain a part of the sedimentation in the second pond.

I. — INTRODUCTION

Dans le domaine de l'aménagement, et plus particulièrement quand on s'intéresse à des étangs, les impératifs écologiques, économiques et touristiques obligent à contrôler d'une part la qualité des eaux mais également le niveau des eaux et les processus de comblement éventuels par une sédimentation minérale ou organique.

Ce type de comblement est un phénomène inexorable, mais dans le Nord de la France il est normalement assez lent. Pourtant, dans la vallée de la Sensée, les étangs de Lécluse (étang du haut et étang du bas) (fig. 1) subissent un comblement extrêmement rapide qui met en cause à la fois leur potentialité écologique et leur utilisation économique et touristique.

Ainsi, en une vingtaine d'années, la surface en eau libre de ces étangs a diminué de plus d'un tiers et dans une grande partie de la surface restante, il est devenu très difficile de se déplacer en barque du fait de la végétation aquatique qui s'est développée dans les zones devenant moins profondes. Actuellement, nulle part la profondeur ne dépasse 2,5 à 3 m alors qu'à l'origine, des profondeurs de l'ordre de 4 à 6 m étaient quasi-générales (Masson *et al.*, 1982).

C'est dans le cadre d'une étude préliminaire à la réhabilitation de ces étangs que nous avons accumulé des informations originales sur les processus sédimentaires en œuvre et leur quantification. Ces données sont d'autant plus intéressantes qu'aucune étude sur ce type de sujet n'a été réalisée dans notre région. L'objet de cette note est donc de synthéti-

(*) Bureau d'Etudes d'Impact Environnement Aménagement (BIEA), 80340 Méricourt / Somme.

(**) Laboratoire de dynamique sédimentaire et structurale, USTLFA, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

(***) Laboratoire de géologie structurale et appliquée, Univ. de Franche-Comté, place Leclerc, 25030 Besançon.

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

ser les résultats scientifiques extraits d'études techniques préalables à des travaux de curage et au calcul d'un décanteur (Bacrot *et al.*, 1988a et b).

II. — LE SECTEUR D'ÉTUDE ET LE CONTEXTE HYDRAULIQUE

La vallée de la Sensée est parsemée d'une chaîne d'étangs qui ont été creusés dès la fin du XVIII^e siècle pour extraire la tourbe interstratifiée dans les alluvions quaternaires. Ces alluvions atteignent une épaisseur de 15 m au niveau d'un sondage situé 600 m à l'Ouest des étangs (Desjoignies, 1966), et reposent sur la craie, substratum principal du bassin versant de la Sensée, dont la couverture est représentée par des limons, des loess et localement par des placages de sables tertiaires.

La nappe alluviale qui détermine le niveau d'eau dans les étangs est en liaison directe avec la nappe de la craie. Le réseau hydrographique du bassin est très artificialisé : dès le Haut Moyen Age, les hommes ont réalisé des endiguements importants, des croisements de cours d'eau à l'aide de siphons, et même la capture de certains affluents vers d'autres bassins versants ; la superficie du bassin versant effectif est donc diminuée d'autant ; actuellement, le bassin versant effectif occupe une surface de 400 km², c'est-à-dire la moitié de son extension à l'origine. Par ailleurs, ces travaux hydrauliques ont aussi des conséquences sur les relations entre la chaîne d'étangs et la rivière. En 1963 notamment, la rivière a été détournée de son cours ancien pour venir alimenter successivement les deux étangs étudiés, situés très en amont dans la vallée.

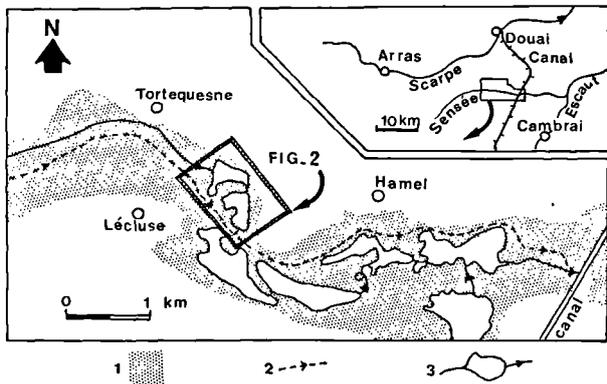


Fig. 1. — Localisation
1 : vallée alluviale ; 2 : ancien cours de la Sensée ; 3 : cours de la Sensée depuis 1963.

Fig. 1. — Location map.
1 : alluvial valley ; 2 : Sensée old flow ; 3 : actual Sensée flow (since 1963)

III. — LA DYNAMIQUE DE LA SÉDIMENTATION

1) Généralités

En passant, en 1963, d'un régime "fermé" à un régime "ouvert", les deux étangs ont subi une modification de leur régime sédimentaire et une dynamique de comblement s'est mise en place. Elle résulte d'une sédimentation autochtone amplifiée mais surtout d'une sédimentation allochtone alimentée par les matières en suspension (MES), indices d'une érosion du bassin amont (Lemoine-Honoré. 1983 ; Auzet, 1987).

Pour cerner l'évolution récente des atterrissements, masse de sédiments peu consolidés dont le sommet est très proche de l'émersion, nous disposons d'un certain nombre de documents :

— des photos aériennes verticales (IGN) ou obliques prises en 1963, 1980, 1983, 1988 ;

— des campagnes bathymétriques partielles de 1980 (Masson *et al.*, 1982) ou complètes de 1985 (SRAE, com. pers.) et 1988 (Bacrot *et al.*, 1988b).

Ces données sont synthétisées sur les figures 2 et 3.

2) Analyse cartographique de la sédimentation antérieure à 1963

En 1963, quelques mois après le détournement de la Sensée, il existait déjà des zones émergées à l'intérieur des limites cadastrales (hachurage vertical sur la fig. 2). On en reconnaît deux types :

— la zone insulaire, au Nord de l'étang du bas. Comme aucune hypothèse n'explique la présence d'un atterrissement à cet endroit avant 1963, on suppose qu'il s'agit d'un haut-fond laissé lors de l'exploitation de la tourbe ;

— les atterrissements, en contact avec une rive. Les analyses cartographiques et morphologiques montrent qu'ils peuvent avoir trois origines différentes.

a) Les atterrissements liés à un ruissellement

C'est le cas des atterrissements en bordure du Pré Loliot, au Nord de l'étang du haut (fig. 2). Ils s'appuient sur la seule rive d'étang en contact avec le versant de la vallée (fig. 1) qui atteint ici une pente de 10 %. En l'absence de débouché de tout cours d'eau pérenne ou non, on pense que les apports sédimentaires sont liés à des ruissellements le long du versant abrupt. Ce phénomène de faible ampleur existerait depuis le XVIII^e siècle.

b) Les cônes de déjection fluviale

C'est le cas des atterrissements développés dans le marais de dessous et sur les bordures septentrionale et occidentale de l'étang du bas. Leur structure est maintenant en grande partie cachée par la végétation, mais, en 1963, les deux cônes, montrant une structure en éventail caractéristique, étaient encore visibles sur les photos aériennes.

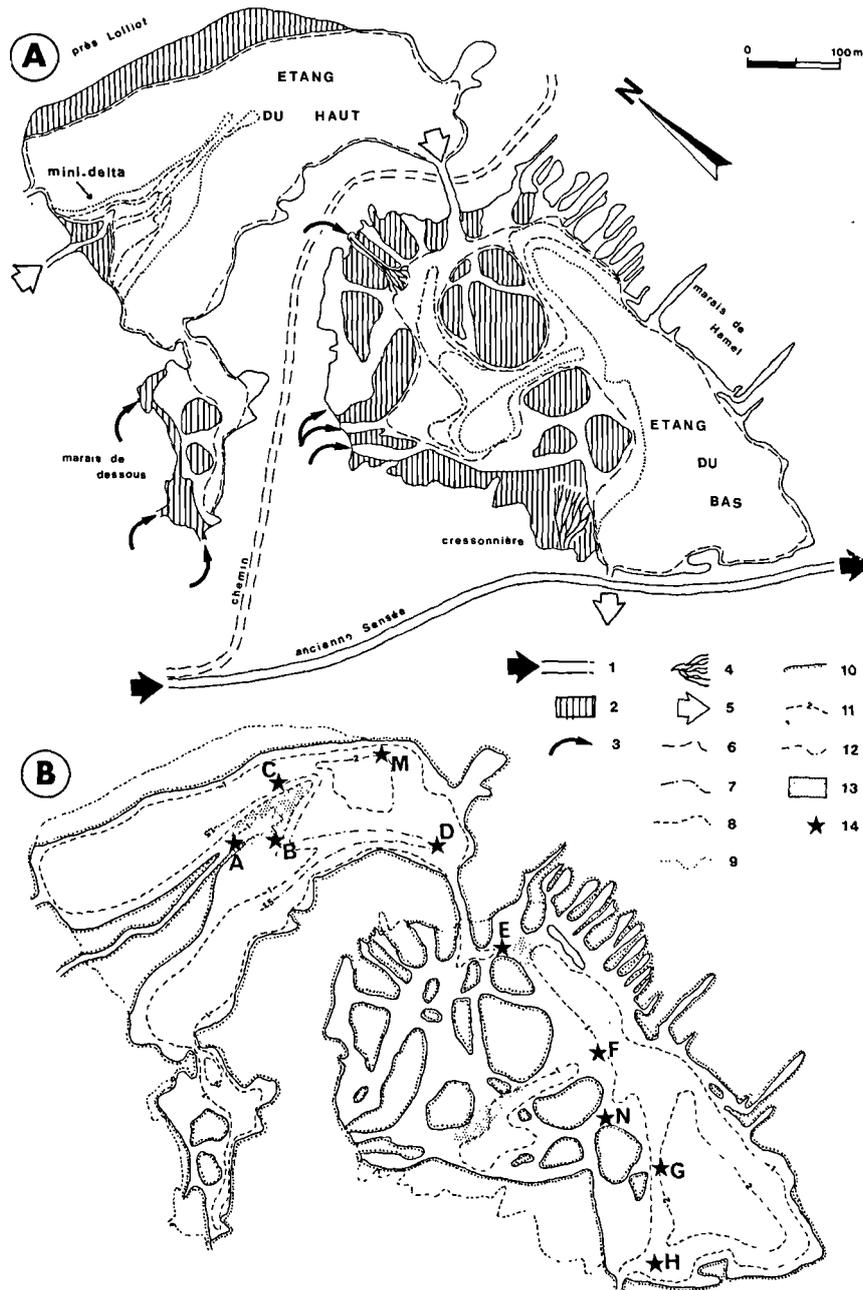


Fig. 2 : A. — Evolution des atterrissements depuis 1963
 1 : ancien lit perché de la Sensee ; 2 : zones émergées à l'intérieur de la limite cadastrale des étangs en 1963 ; 3 : débouché de quelques fossés ; 4 : cône d'alluvionnement sur la photo aérienne de 1963 ; 5 : cours de la Sensee après 1963 ; 6 : secteurs proches de l'émerision en 1963 ; 7, 8, 9 : extension de ces secteurs en 1980, 1983, 1988.
 B. — Bathymétrie en 1988
 10 : limites des zones émergées ; 11 : isobathes (équidistance 1 m) ; 12 : isobathes intermédiaires ; 13 : végétation spécifique des zones à sédimentation très active ; 14 : position des différents échantillons.

Fig. 2 : A. — Evolution of the studied area since 1963
 1 : Old Sensee river bed ; 2 : Emerged areas in 1963 ; 3 : Limits of some drains (before 1963) ; 4 : Limits of the alluviation fan observed on aerial photographs (in 1963) ; 5 : Actual Sensee flow ; 6 : Limits of emerged areas in 1963 ; 7, 8, 9 : Limits of emerged areas in 1980, 1983, 1988.
 B. — Bathymetry in 1988
 10 : Limits of emerged areas ; 11 : Isobaths (contour interval = 1 m) ; 12 : Secondary isobaths ; 13 : Typical vegetation of high sedimentation rate areas ; 14 : Samples location.

La situation de ces atterrissements indique qu'ils sont vraisemblablement dus à la rupture ou à l'ouverture volontaire de digues de l'ancienne Sensée lors des crues.

c) *Le mini-delta*

Cet atterrissement, situé juste au débouché du nouveau lit de la rivière possède dès les premiers mois suivant le détournement de la rivière une surface non négligeable (fig. 2). Sa structure particulière et l'analyse des premiers stades de croissance sont développées dans le chapitre suivant.

3) **Dynamique de la sédimentation depuis 1963**

Les atterrissements situés sous le Pré Lolliot ont très peu évolué entre 1963 et 1988, ce qui confirme leur faible taux de croissance déjà signalé. C'est également le cas pour ceux du marais de dessous qui ne sont plus alimentés par les débordements de l'ancienne Sensée. Par contre, le "delta" de l'étang du haut et l'ensemble des atterrissements de l'étang du bas se sont fortement engraisés.

a) *Le mini-delta*

Apparu en 1963, il s'est développé selon une forme simple caractérisée par un chenal encadré par deux digues sub-aériennes (fig. 2 et 3). A l'extérieur de ces digues, deux zones marécageuses triangulaires ont progradé à la faveur des apports de crue qui permettent le débordement au-dessus des digues. La partie sous-aquatique du delta est constituée de deux langues principales dont la plus méridionale peut être considérée comme actuellement inactive comme le montrent les végétations aquatiques (Boulet, comm. pers.). L'existence de telles langues indique que le mélange des eaux de la Sensée avec celles de l'étang n'est pas toujours instantané : les eaux riches en MES de la rivière sont plus denses et peuvent former une tranche d'eau autonome à l'intérieur de l'étang. La sédimentation se fera donc préférentiellement le long du trajet de ces eaux. Le taux de sédimentation et la limite de pénétration de ces eaux denses sont maxima quand le flux et la concentration en MES sont les plus élevés, c'est-à-dire en période de crue. En dehors de ces périodes, la sédimentation est plus proximale et se fait au débouché du chenal aérien sous forme d'un haut-fond ("middle ground bar", Miall, 1984 ; Reading, 1986), comme on l'a observé sur les photos obliques de l'été 1983 ou lors du premier semestre 1988. Il est difficile d'estimer le rythme de croissance du mini-delta depuis 1963, trop d'incertitudes subsistent sur l'extension des parties sous-aquatiques. Néanmoins l'analyse des photos aériennes prouve l'importance des volumes de MES transportés lors des premiers mois qui ont suivi les travaux de détournement de la rivière en 1963. Depuis la stabilisation du lit, les apports sont plus faibles.

b) *Les atterrissements de l'étang du bas*

Ils croissent le long de deux axes de part et d'autre de la zone insulaire signalée précédemment (§ III-B). A l'Ouest de celle-ci, on constate en effet le comblement d'une zone profonde (> 1,5 m) maintenant limitée à son ancienne extrémité méridionale. A l'Est, le phénomène est similaire

(A, fig. 2) mais moins actif comme le révèle la présence dans cette zone de végétaux aquatiques, témoin d'une sédimentation moins importante (B, fig. 2).

En première approximation, on peut considérer que le comblement de l'étang se fait par un engraissement des atterrissements déjà existants et non par un rehaussement des zones profondes qui ont peu évolué entre 1980 (dates des premières données bathymétriques) et 1988. Ce mode de croissance est lié à la présence d'associations végétales à Lesse d'eau et surtout à Callitriches. En effet, ces végétaux diminuent localement la vitesse de l'eau et contribuent ainsi à la capture de la MES. On observe donc une extension des atterrissements sous l'effet d'une dynamique bio-sédimentaire.

IV. — ANALYSE DES SÉDIMENTS

Dix échantillons ont été prélevés dans les deux étangs (cf. localisation fig. 3). Tous correspondent à des sédiments postérieurs à 1963 à l'exception du point N situé au niveau d'un atterrissement particulièrement important du second étang. Les huit premiers échantillons (A à H) se trouvent le long du flux hydraulique entre le chenal principal du mini-delta (pt A) et l'exutoire de l'étang du bas (pt H). Le point M est situé dans une zone plus abritée mais soumise au ruissellement du versant. Tous ces échantillons ont fait l'objet de quatre types d'analyses sédimentologiques :

— observations de frottis sur le matériel brut et décalcifié ;

— calcimétries (calcimètre de Bernard) ;

— teneurs en carbone organique et soufre total (analyseur Leco) ;

— granulométrie : tamisage à 63 μm pour la fraction silteuse et sédi-graph pour les fractions < 63 μm .

L'observation des frottis révèle que les échantillons A à H sont constitués essentiellement de quartz et d'argiles, associés à des quantités variables de carbonates 15 % à 50 %, de phytoplancton siliceux (diatomées surtout) et de débris ligneux. On note une nette augmentation des constituants carbonatés (a, fig. 3) et siliceux dans les échantillons de l'étang du bas. Parallèlement, les teneurs en carbone organique et en soufre total (b, fig. 3) augmentent aussi dans l'étang du bas (5,1 % C. org. contre 3,8 % dans les sédiments de l'étang du haut), comme le laissent supposer les plus grandes quantités de débris ligneux identifiés dans les particules supérieures à 63 μm .

Deux échantillons se démarquent de ces évolutions, il s'agit des points M et N qui montrent des teneurs en carbonates plus élevées, entre 65 et 75 %. Mais on notera que ces prélèvements ont été effectués dans des zones particulières, au pied d'un versant pour le premier et au sein d'un atterrissement antérieur à 1963 pour le second.

La nature des processus hydro-sédimentaires se déroulant dans chacun des deux étangs a pu être déterminée par l'analyse des courbes de sédi-graph. Dans le premier étang, les échan-

tillons A, B, C présentent une courbe à faciès parabolique (c, fig. 3) typique de dépôts de courants liés à un excès de charge (Rivière, 1977). Ces résultats, ainsi que l'importance de la fraction > 63 µm enrichie en quartz, caractérisent la nature proximale des échantillons et le piégeage de matériaux grossiers dans les structures du mini-delta.

Par contre, à partir de l'échantillon G et jusqu'à H, on passe progressivement à un faciès logarithmique, indiquant des sédiments fins plus ou moins vaseux de zones calmes (Rivière, 1977). Si l'on considère la variation de la médiane des fractions < 63 µm (d, fig. 3), on observe bien la décantation progressive du matériel. La tendance asymptotique de cette évolution est compatible avec la loi de Stokes qui régit la vitesse de sédimentation des particules.

En ce qui concerne les échantillons M et N, l'importance de la fraction minérale grossière, le faciès parabolique de la courbe granulométrique et la valeur de la médiane indiquent

la proximité immédiate d'une source d'apports, soit le versant (point M), soit l'ancienne Sensée qui, avant 1963, alimentait directement en période de crue les atterrissements de l'étang du bas (point N).

A l'issue des analyses sédimentologiques, on peut donc confirmer la présence d'une sédimentation détritique grossière dans le premier étang et un piégeage important des particules les plus importantes.

Dans le second étang, en revanche, outre des phénomènes de décantation du matériel le plus fin, les mesures de C.org. et les observations de frottis de sédiments bruts montrent que l'on aurait un effet de "bloom" biologique en tête de l'étang, bloom corrélatif au développement notable d'herbiers aquatiques et de zooplancton associé (Bacrot *et al.*, 1988b). Ce développement végétal est favorisé par une augmentation de l'éclairage liée à la baisse de la turbidité des eaux. Ce phénomène pourrait-il aussi expliquer les fortes

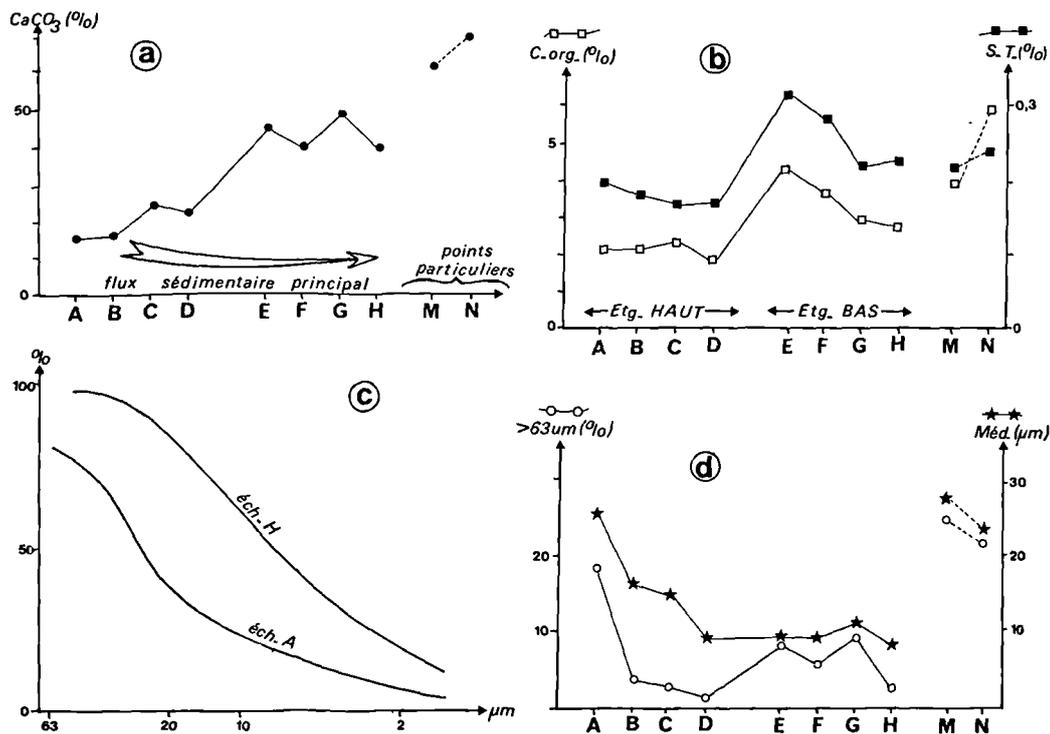


Fig. 3. — Analyses sédimentologiques des échantillons
 a : teneurs en CaCO₃ ; b : teneurs en carbone organique (C.org.) et en soufre total (S.T.) ; c : exemples de courbes granulométriques à faciès logarithmique (éch. H) et parabolique (éch. A) ; d : pourcentage de fraction supérieure à 63 µm et médiane (Med.) des sédiments allochtones. On note une augmentation de la fraction > 63 µm au passage entre les deux étangs. Ceci correspond à l'apparition des débris organiques autochtones dont on n'a pas tenu compte dans le calcul de la médiane.

Fig. 3. — Sedimentological analyses
 a : Calcium carbonate content ; b : Organic carbon (Corg) and sulphur (ST) contents ; c : Examples of two grain-size curves : Sample H (logarithmic facies) - Sample A (parabolic facies) ; d : Abundance of the sandy fraction (> 63 µm) and median grain-size in allochthonous sediments. Note the increase of the sandy fraction at the limit between the two ponds. This increase is probably due to the occurrence of autochthonous organic remains.

teneurs en carbonates dans l'étang du bas ? Des processus de précipitation de CaCO_3 au niveau d'herbiers aquatiques sont en effet décrits dans un certain nombre de lacs (Vatan, 1967 ; Muller, 1968 ; Trucker, 1981). Ils résultent de mécanismes chimiques liés à des modifications du CO_2 dissous dues à la photosynthèse, et le calcaire apparaît sous forme de petits granules. Nos propres observations sur frottis avant et après décalcification montrent l'existence d'une petite fraction des carbonates sous forme de granules, mais l'essentiel se présente comme des particules de plus grande taille, ce que confirme d'ailleurs l'analyse du résidu $> 63 \mu\text{m}$. En plus, les grandes quantités de carbone organique et de soufre engendrent un milieu acide, très réducteur, allant même jusqu'à la production de méthane (Debrabant, comm. or.), ce qui crée des conditions peu favorables à la précipitation directe de CaCO_3 . L'importance du tonnage annuel en carbonates dans l'étang du bas, environ 300 tonnes (cf. procédure de calcul au chap. V), permet d'exclure l'hypothèse de rejets anthropiques ou d'érosion des alluvions anciennes (craie, tufs holocènes...) affleurant dans le chenal entre les deux étangs. Il nous est donc difficile de proposer une explication logique à la présence de ces quantités anormales de carbonates dans l'état actuel de nos connaissances, nous considérerons donc que ces matériaux sont allochtones et que la surcharge résulte peut-être de phénomènes de sédimentation différentielle complexes. Remarquons toutefois que la présence de quantités importantes de carbonates dans les sédiments est une caractéristique que l'on retrouve dans des étangs similaires de la vallée de la Somme. Les sédiments de ces étangs eutrophes, voire hypereutrophes, révèlent en effet des teneurs en CaCO_3 supérieures à 50 % (SRAE-CEMAGREF, comm. or.).

V. — ESSAI DE QUANTIFICATION ET DISCUSSION

Etant donnés les objectifs très précis de cette étude, nous nous sommes particulièrement attachés à quantifier les phénomènes sédimentaires. Mais les données historiques étant peu abondantes, les chiffres qui suivent doivent être considérés comme des ordres de grandeur qui ne donnent pas l'image précise de l'évolution, mais une idée semi-quantitative des phénomènes.

Les processus de sédimentation par engraissement des atterrissements existants, sans rehaussement significatif des fonds permet de réaliser un calcul préliminaire du volume de matériel déposé depuis 1963. On l'évalue à $10\,000 \text{ m}^3/\text{an}$ soit environ 4 500 t à 5 000 t de MES, dont 30 % dans l'étang du bas. Par ailleurs, la sédimentation allochtone est dominante dans les deux étangs : elle dépasse probablement 90 % dans l'étang du haut et est comprise entre 65 % et 85 % dans l'étang du bas. La contribution à la sédimentation de la MES apportée par la rivière peut donc être évaluée à environ 4 000 t/an. Pour confirmer cet ordre de grandeur, nous l'avons comparé avec les données disponibles sur le flux annuel de MES transitant par la rivière. Celle-ci présente des périodes de crues annuelles de l'ordre d'une semaine environ, au cours desquelles le débit passe de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ à $6 \text{ m}^3/\text{s}$ et la MES moyenne de $0,02 \text{ g/l}$ à $0,8 \text{ g/l}$ (Masson *et al.*, 1982 ; Lemoine-Honoré, 1983 ; Bacrot *et al.*, 1988a et b). Ces chiffres permettent d'évaluer le flux annuel : 4 150 t/an (ce qui est proche du

calcul précédent) dont 70 % véhiculé en environ 7 jours. La sédimentation autochtone s'est beaucoup développée depuis 1963 du fait de l'ouverture de l'écosystème sur l'extérieur. Comme dans la plupart des cas, c'est le phosphate (PO_4) qui, avec l'éclairage, semble ici contrôler les blooms biologiques (Polaud, 1988). En effet, cet élément, provenant surtout des pollutions humaines, est apporté par la rivière à raison de $0,1$ à $0,15 \text{ mg/l}$ (Masson *et al.*, 1982). A la sortie de l'étang du bas et en période estivale, on s'aperçoit que 80 % du phosphate est fixé.

Nos différentes évaluations du flux sédimentaire allochtone apparaissent donc comme cohérentes ; par contre, la répartition en volume entre les deux étangs pose problème. Ainsi, les mesures de MES en basses eaux (Masson *et al.*, 1982) comme celles en hautes eaux (Bacrot *et al.*, 1988b) montrent que seulement 10 % de la MES provenant de la rivière, sont piégés dans l'étang du bas. L'importance du volume annuel de sédiments allochtones déposés dans l'étang du bas et l'existence de faciès bio-sédimentaires importants (§ IV) obligent à supposer qu'une part non négligeable du transit sédimentaire vers l'étang du bas se fait sous forme de courant de densité à partir du mini-delta. Ce processus se déroulerait principalement durant les crues, période au cours de laquelle aucune mesure n'a pu être faite. On pense que les apports seraient maxima quand la langue méridionale du delta serait la plus active, langue dont le débouché est fort proche de la liaison entre les deux étangs (fig. 2). Cette hypothèse rend donc très probable une accélération future du comblement de l'étang du bas avec la progression vers l'aval du delta de l'étang du haut.

VI. — CONCLUSIONS

Une étude d'aménagement, préalable à des travaux de curage et à la réalisation d'un décanteur nous a conduit à étudier et à chiffrer les processus et la dynamique de la sédimentation dans les deux étangs les plus en amont de la vallée de la Sensée.

On retiendra notamment que le régime sédimentaire a été fortement modifié en 1963 après le détournement de la Sensée vers les étangs. La sédimentation représente actuellement $10\,000 \text{ m}^3/\text{an}$ et intéresse les deux étangs ; elle se manifeste par la constitution d'un mini-delta dans l'étang du haut et par la progradation des atterrissements dans l'étang du bas. Une part des transits entre les deux étangs est probablement liée à des reprises du front du delta qui engendrent des courants de densité vers l'étang du bas et risque donc d'affecter les étangs situés plus en aval dans les années à venir.

L'essentiel de la sédimentation est allochtone, mais une part non négligeable, surtout dans l'étang du bas est d'origine autochtone. Elle y est de nature carbonée, mais semble en tous cas résulter de blooms biologiques dus à de meilleures conditions d'éclairage, des apports de nutriments par la rivière et une turbidité plus faible. La sédimentation allochtone est attribuable à l'érosion des sols du bassin versant. La part des produits de cette érosion qui arrive à la rivière et qui l'alimente en MES peut être chiffrée à l'échelle du bas-

sin à 10 tonnes/km²/an, ce qui correspond (selon la méthode de calcul de Morand et Vickerek (1987) à une érosion moyenne de l'ordre de 0,01 mm/an. Celle-ci serait indiscernable sur le terrain et inférieure à la capacité de régénération d'un sol (Henensal, 1987). Cette hypothèse est en contradiction avec les observations qui ont été faites dans le bassin où l'érosion est considérée comme préoccupante depuis la réalisation d'aménagements fonciers (remembrements) et la modification des pratiques culturales (Lemoine-Honoré, 1983 ; Auzet, 1987). On peut donc penser que les manifestations érosives (coulées boueuses ou ravinements) ne correspondent qu'à une redistribution des sols à l'échelle du bassin, mais que les caractéristiques de la morphologie limitent fortement les arrivées de MES au réseau hydrographique,

comme c'est le cas dans d'autres bassins du Nord de la France (Broquet, com. pers.). Il est donc à craindre que les mesures de lutte anti-érosion actuellement engagées sur le bassin aient peu d'effet sur l'arrêt du comblement des étangs.

Remerciements. — Nous exprimons toute notre gratitude à Monsieur le Président du Syndicat Intercommunal de la région d'Arleux (SIRA) pour le compte duquel nous avons réalisé l'étude d'aménagement des étangs de Lécluse et qui nous a autorisés à publier cet article. Nous remercions également MM. Raynaud, Verdevoye et Masson au Service Régional d'Aménagement des Eaux (SRAE, Lille) qui nous ont fourni une aide précieuse et qui ont mis à notre disposition de nombreuses données inédites. Nous sommes également reconnaissants envers Monsieur le Professeur Broquet pour ses suggestions lors de la lecture du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) AUZET V. (1987). — L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture, 60 p. Ministères environnement et Agriculture Eds.
- 2) BACROT S., BOUQUILLON A., MERCIER E. (1988a). — Etude de faisabilité de la réhabilitation des étangs de Lecluse / Hamel / Torquenne. Rapport BIEA inédit, 40 p. + annexes, Méricourt / Somme.
- 3) BACROT S., MERCIER E., BOUQUILLON A. (1988b). — Réhabilitation des étangs de Hamel / Lecluse / Torquenne, étude technique. Rapport BIEA inédit, 79 p. + annexes, Méricourt / Somme.
- 4) DESJOIGNIES J. (1966). — Carte géologique 1/50 000 de Douai. BRGM Ed.
- 5) HENENSAL P. (1987). — Le risque d'érosion hydrique des sols. Bull. liaison Labo P et Ch, n° 150-151, pp. 117-129.
- 6) LEMOINE-HONORÉ A. (1983). — Erosion des terres agricoles du Haut versant de la Sensée. DEA Lille I, 42 p.
- 7) MASSON F.X., PELLETIER J.L., VERDEVOYE P. (1982). — Etude qualitative des eaux — La Sensée —. Rapport SRAE inédit, 103 p. + annexes, Lille.
- 8) MIALL A.D. (1984). — Deltas — in "Facies models" — Geosciences Canada Ed., Reprint series 1, pp. 105-118.
- 9) MORAND F., WICKEREK S. (1987). — Douze parcelles de mesure d'érosion sur un versant de la France des plaines — l'exemple de Lessières (1977-1983) in "Processus et mesure de l'érosion", CNRS Ed., pp. 271-290.
- 10) MULLER G. (1968). — Exceptionally high Strontium concentration in fresh water onkolites and mollusk shells of lake Constance. In "Carbonate sedimentology in Central Europe", p. 116-127. Berlin, G. Müller and G.M. Friedman Ed.
- 11) POLAUD M. coord. (1988). — Actes du colloque international. Phosphates, eau et qualité de la vie. Paris, Rhône-Poulenc (PHOS) Ed., 49 p.
- 12) READING H.G. (1986). — Sedimentary environments and Facies, second éd., Blackwell Ed., 615 p.
- 13) RIVIÈRE A. (1977). — Méthodes granulométriques, techniques et interprétations. Masson Ed.
- 14) TRUCKER M.E. (1981). — Sedimentary petrology - An introduction. Geoscience Texts, vol. 3, Blackwell Ed., 252 p.
- 15) VATAN A. (1967). — Manuel de sédimentologie. Technip Ed., 397 p.

Les friches industrielles et la gestion du sous-sol Analyses des contraintes à prendre en compte dans le cadre d'un plan de réhabilitation

Industrial wasteland and subsurface management Factors to be taken into account for rehabilitation planning

par J. RICOUR (*)

Résumé. — L'évolution technologique et la volatilité de nos besoins sont à l'origine des friches industrielles, phénomène dynamique lié à notre civilisation occidentale.

L'examen des contraintes qu'imposent la résorption de ces friches fait apparaître des règles générales dans les domaines concernant le sol et le sous-sol, et plus particulièrement :

- la nécessité de conserver les informations ayant trait à la nature et à la localisation des aménagements enterrés, quel que soit le support matériel de stockage, afin de disposer des données nécessaires pour assurer la sécurité des riverains ; dans ce cadre, un des problèmes qui reste à maîtriser a trait aux différents systèmes de repérage géographique qui ont évolué dans le temps au cours de ce dernier siècle ;
- l'obligation d'une approche économique globale s'appuyant sur la notion de coût complet d'un ouvrage intégrant les conditions d'abandon de ce dernier et sur un savoir-faire pluridisciplinaire intégrant les sciences de la terre ;
- les contraintes résultant du traitement séparé et sélectif des dépôts de déchets anciens, des déblais de démolition, de leur valorisation éventuelle, ainsi que de l'obturation des structures enterrées ;
- la spécificité et l'hétérogénéité des milieux à reconnaître où le dimensionnement des fondations des ouvrages s'avère difficile et nécessite le recours à une reconnaissance hydrogéotechnique adapté et dense, associé à d'éventuelles planches d'essai.

Abstract. — *The technical evolution and ever-changing nature of our requirements have given rise to a dynamic phenomenon of our western civilisation - industrial wasteland.*

When the constraints imposed by the re-utilization of this wasteland are examined, some general rules appear regarding the surface of the ground and the subsurface. The main points are :

- 1. It is necessary to preserve information concerning the nature and location of buried structures, whatever the material means of storage used, so as to be able to ensure the safety of those living in the vicinity. One of the problems still to be solved here concerns the various geographical location systems which have developed during this century.*
- 2. A global economic approach is required based on the notion of the total cost of any structure, including the conditions in which it is abandoned and on multidisciplinary know-how which takes in the earth sciences.*
- 3. The separate and selective processing of old waste dumps and demolition rubble, their possible re-use and the closing off of the buried structures impose their own particular constraints.*
- 4. The characteristics of the media to be investigated where sizing the foundations of structures proves difficult and requires the aid of detailed hydrogeotechnical investigations and very varied tests.*

(*) B.R.G.M., Fort de 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.

I. — INTRODUCTION

L'évolution permanente de nos besoins au sein de notre civilisation occidentale génère en continu des *friches industrielles, phénomène dynamique* lié à la mutation permanente des activités humaines. Les industries d'aujourd'hui seront les friches de l'an 2000 : il convient d'en anticiper, dès à présent, l'apparition et les problèmes de résorption. Aussi est-il nécessaire d'intégrer leur traitement dès leur conception ; cette approche conduit à la notion de coût complet d'un investissement qui prend en compte les coûts partiels liés à la conception, la réalisation, l'exploitation, la maintenance et la résorption des risques induits par l'abandon de l'ouvrage.

Par ailleurs, depuis 1975 la concentration et la restructuration des activités traditionnelles liées pour partie à une internationalisation du marché, pour partie à une taille critique minimale de production (cimenterie, raffinerie, chimie de base, mines et carrières...) se traduit par la disparition de certaines unités de fabrication. *Anticiper la fermeture de ces établissements a pour objectif de faciliter leur réintégration dans le tissu urbain et/ou agricole*, plus généralement dans notre environnement, et de permettre de limiter l'impact de leur abandon sur notre cadre de vie.

En outre, l'analyse des problèmes posés par cette restructuration d'établissements industriels et par l'abandon d'unités de fabrication devrait permettre, en s'appuyant sur des exemples précis, de définir les risques encourus, les difficultés susceptibles d'être rencontrées et les mesures conservatoires à mettre en œuvre pour tout ce qui concerne le sol et le sous-sol.

Enfin, il convient de rappeler, du point de vue de la réglementation que les établissements industriels relèvent depuis 1978, et sous certaines conditions, de la loi sur l'environnement (études d'impact préalables à leur création) ; les industries plus anciennes n'intègrent que les notions de réhabilitation et mise en sécurité en cours et en fin de durée de vie lors de leur abandon (*) ; l'analyse des problèmes posés par leur reconquête devrait permettre une meilleure appréciation des contraintes à prendre en compte dans les études d'impact et de sécurité à réaliser dans les années à venir.

II. — IMPORTANCE DU PHÉNOMÈNE "FRICHES INDUSTRIELLES" EN FRANCE

Le problème des friches industrielles est un phénomène d'envergure européenne qui touche tous les grands pays industrialisés : Allemagne Fédérale, Italie, Belgique, Angleterre, France...

Pour la France, la surface estimée des friches industrielles est de 20 000 hectares réparties comme suit :

— Nord - Pas-de-Calais : 9 400 hectares (dont 8 234 recensés au 31/12/1984) ;

(*) Notamment au terme de la loi n° 77.1133 du 21/09/1977, article 34 ("l'exploitant doit remettre le site de l'installation dans un état tel qu'il ne s'y manifeste aucun danger ou inconvénient mentionné à l'article 1 de la loi du 19/07/1975").

— Lorraine : 2 300 hectares ;

— Ile-de-France : 1 000 hectares (dont 33 % en Seine St-Denis, 19 % sur les Hauts de Seine et 13 % en Val de Marne) ;

— autres : 7 300 hectares.

Sur 1 200 sites recensés en Nord - Pas-de-Calais, la surface moyenne est de 6,9 hectares, et 57 % des surfaces concernées relèvent des H.B.N.P.C.

En Ile-de-France, les 272 friches connues ont une surface comprise entre 0,5 et 70 hectares et 34 % des terrains vacants en 1981 étaient réaffectés en 1986, soit 118 hectares et une durée moyenne "d'abandon" de 6 ans pour les friches reconquises de la Région parisienne.

Les friches industrielles sont pour 50 % localisées en zone urbanisée, avec imbrication importante dans les zones d'habitat.

En surface, elles sont liées, au niveau national, pour 54 % d'entre elles à des activités minières et plus généralement pour 56 % à l'extraction de combustibles (73 % pour la Région Nord - Pas-de-Calais).

Pour la seule Région Nord - Pas-de-Calais, d'après l'inventaire du BETURE-SETAME de novembre 1984, 15 % des surfaces intéressées sont propriétés de l'Etat ou des Collectivités locales, alors que 67,3 % relèvent d'Etablissements Publics.

III. — PROBLÈMES POSÉS SUR LES FRICHES INDUSTRIELLES DU POINT DE VUE DU SOUS-SOL

Du point de vue du sous-sol, la reconquête et la réhabilitation des friches industrielles posent de nombreux problèmes :

1) Hydrogéologie

Les points qui méritent d'être abordés sous l'angle de l'interférence entre les friches industrielles et l'hydrogéologie sont les suivants :

a) Localisation et état des forages en exploitation susceptibles d'être abandonnés

Ceux-ci peuvent, en effet, soit être réutilisés ou obturés en fonction :

— de leur état de vétusté ;

— de leurs caractéristiques techniques et hydrauliques ;

— des caractéristiques de la ressource en eau mobilisable tant en terme de quantité que de qualité.

La définition précise de leur état en fin d'exploitation s'avère donc indispensable. Par ailleurs, leur protection, durant d'éventuels travaux de démolition doit être envisagée afin d'éviter qu'ils ne constituent une voie privilégiée de péné-

tration de la pollution ou un risque vis-à-vis des immeubles riverains (interférence avec la couverture et effondrement lié à la dissolution d'évaporites par détérioration des tubages de tête, par exemple).

En outre, la conservation des informations au titre des articles 131 à 136 du Code Minier peut constituer une excellente source d'informations pour l'ensemble des partenaires économiques concernés par ces problèmes d'abandon de forages ou d'autres structures enterrées (puits de mines, carrières souterraines...).

b) Piège hydraulique

L'arrêt de certaines installations industrielles peut nécessiter la maintenance de pièges hydrauliques indispensables à la maîtrise de l'extension de zones contaminées liées à l'infiltration d'effluents ou de polluants (exemple des diverses raffineries d'hydrocarbures dont la fonction première a été abandonnée pour être transformées en aires de stockage).

L'optimisation du fonctionnement de ce type d'installation est, toutefois, indispensable compte tenu des modifications apportées aux risques encourus d'une part, aux installations de surface (utilisation de l'eau à l'aval du piège hydraulique par exemple) d'autre part.

c) Remontée de nappe

L'arrêt de prélèvements importants peut avoir diverses conséquences. Du seul point de vue hydrogéologique, on peut citer notamment :

1° la rediffusion de "taches" de pollution vers des secteurs d'aquifère où l'eau est de bonne qualité, avec contamination éventuelle d'ouvrages riverains encore en exploitation (et création "d'effet domino") ;

2° l'apparition de débits pérennes dans des vallées (dont les fonds peuvent être localement encombrés), des axes de drainage asséchés et/ou la reconstitution de zones marécageuses temporairement disparues ;

3° la dégradation de la qualité de la ressource qui peut être liée à plusieurs phénomènes :

— remobilisation rapide de contaminations physico-chimiques "piégées" en milieu non saturé (ex. : nitrates, sulfates, chlorures, organochlorés...) ;

— dissolution d'espèces minérales solubles néoformées en milieu aéré par dénoyage et aération de l'aquifère (ex. : gypse à partir de pyrite microcristalline), évolution d'évaporites (ex. : anhydrite hydratée en gypse), interférence avec la frange altérée de minéraux contenus dans l'aquifère (ex. : relarguage de sodium à partir d'albite) ;

— apport d'eau de surface à partir de cours d'eau de qualité médiocre (exemples : pertes de l'Escaut à Kain vers le Calcaire carbonifère en 1978, pertes de la Rosselle dans le Bassin houiller Lorrain vers les grès du Trias en 1977, pertes de la Marque à l'amont d'Anstaing) ;

— modification des conditions d'oxydo-réduction par remise en charge de la nappe sous couverture (passage d'un milieu oxydant à un milieu réducteur autorisant la remobilisation de certaines espèces minérales à la suite de l'évolution des conditions de Eh-pH). Ces altérations de la qualité peuvent s'accompagner de phénomènes hydrauliques secondaires, de type drainance, modifiant les échanges entre aquifères de qualité variable.

A cette occasion, il peut être nécessaire de faire apparaître le concept de "friche aquifère", partie d'un système aquifère où l'altération définitive ou pour une longue période des caractéristiques hydrodynamiques du réservoir ou de la qualité de la ressource mobilisable condamne leur mise en valeur dans des conditions économiques données.

La *gestion patrimoniale* des ressources en eaux souterraines est donc une nécessité tant en terme *quantitatif* que *qualitatif* en tenant compte, notamment, des contraintes liées à une exploitation intensive et temporaire.

2) Risques générés par les dépôts ou les stockages de déchets

a) Surveillance et réaménagement

Les risques générés par les dépôts de déchets en exploitation ou abandonnés peuvent être accrus par l'apparition des friches industrielles. Dans ce cadre, il convient d'examiner les points suivants :

1° maintenance du réseau de surveillance (piézométrie, qualité des eaux souterraines et superficielles) du dépôt ou du stockage : cette surveillance devra être éventuellement adaptée en fréquence et en densité en fonction de l'évolution du dépôt et de son environnement (exemple : remontée de nappe susceptible de venir "lécher" la base du stockage et modifications des conditions de Eh-pH - cf. supra) ;

2° réaménagement en limitant les risques pour l'usager, notamment en terme de sécurité (stabilité des pentes, drainage des eaux de ruissellement, réseaux d'élimination de biogaz...) ;

3° réintégration des emprises concernées dans le tissu économique (prise en compte des anciens dépôts dans les servitudes inscrites au Plan d'occupation des sols).

La typologie des dépôts (terrils, bassins de décantation, dépôts de déchets solides en carrières, lagunes...) et leur gestion passée jouent un rôle important sur l'usage à venir et les risques encourus. Aussi, une *connaissance* aussi précise que possible de l'*historique d'exploitation* est un élément de décision indispensable pour appréhender les problèmes susceptibles de se poser et définir les conditions de réaménagement et de réutilisation de l'espace disponible.

b) Contamination des sols

Les sols contaminés, soit à partir d'anciens dépôts de déchets, soit à partir de retombées de poussières ou d'aérosols sont un élément important de décision. La nature des pol-

luants, leur mode de stockage dans le sol, les conditions de remobilisation en fonction des variations des conditions d'oxydo-réduction du milieu environnant (eau, air ou sol) conditionnent les possibilités de revalorisation du sol et son usage en fonction des moyens et du coût de réhabilitation techniquement et économiquement supportables.

Dans ce domaine, la comparaison de divers sites contaminés avec des sites vierges de pollution associée à des enquêtes épidémiologiques paraît souhaitable pour cerner l'envergure du problème posé et les limites des interventions de restauration à adopter.

Des recherches portant sur le maillage et la densité des prélèvements, le traitement statistique et cartographique des résultats analytiques en fonction de la pédologie et de la minéralogie des sols constituent des outils de décision importants pour juger du niveau de contamination en regard du fond géochimique régional, de ses anomalies et de la reconversion possible des sites (usage agricole, industriel...).

c) Valorisation des déchets

Les friches industrielles peuvent être une source de matériaux et de déchets valorisables. Matériaux de démolition, laitier et scories, schlamms de lavage de charbon, boues chargées de battitures, schistes miniers... constituent des matières premières valorisables après analyse :

- de la ressource disponible tant en terme quantitatif que qualitatif ;
- des contraintes économiques du marché susceptible d'absorber ces matières premières qui peuvent venir concurrencer d'autres sources d'approvisionnement ;
- des risques de contamination du milieu naturel que peuvent générer ces matières premières de "deuxième génération".

Leur exploitation suppose toutefois une analyse fine des gisements disponibles et des coûts de mise en valeur.

3) Géotechnique

Sur le plan du génie géologique divers problèmes peuvent se poser qui concernent plus particulièrement :

a) Le dimensionnement des fondations sur des milieux très hétérogènes

En effet, sur le plan géomécanique l'abandon de sites industriels conduit, en général, à des milieux très hétérogènes où se côtoient niveaux remblayés, anciens dépôts de matériaux fins compressibles, anciennes fondations... Du point de vue géotechnique, la spécificité des problèmes rencontrés est liée à plusieurs paramètres : hétérogénéité des milieux sollicités, grande place occupée par les gaz, évolution des caractéristiques dimensionnelles et physiques de certains éléments constitutifs du sous-sol, présence de vides francs...

A ce titre, il convient de souligner différents points :

1° L'analyse historique et les plans successifs d'occupation du site peuvent être d'une utilité certaine pour :

— guider la campagne de reconnaissance ultérieure nécessaire au dimensionnement des fondations (choix du type de sondages et du type d'essais par exemple) ;

— orienter les nouveaux plans-masse en fonction de la qualité des sols de fondation et d'une typologie d'occupation préexistante du sous-sol et de ses conditions d'abandon (obturation des vides liés aux caves, galeries, émissaires, forages... par exemple).

2° La nature physique et chimique des remblais peut poser des problèmes d'interférence soit avec les fondations soit avec les structures enterrées tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

3° Les remontées de nappe sont susceptibles de générer des contraintes de réaménagement des friches industrielles : sous-pression sur les ouvrages enterrés, détérioration de l'assainissement, attaque des bétons par des eaux sulfatées...

La reconnaissance géomécanique de tels milieux suppose une adaptation des outils existants aux milieux hétérogènes et des modes de traitement des données acquises se rapprochant de la géostatistique.

L'hétérogénéité macroscopique pose, en effet, un problème de caractérisation :

- difficulté de tester en laboratoire des échantillons représentatifs ;
- difficulté tant de réalisation que d'interprétation des sondages carottés ou des essais "in situ" ;
- difficulté de modélisation.

L'évolution géomécanique de certains éléments de remblai doit être examinée du point de vue :

- de la durée et de la nature de l'évolution de ces éléments,
- de l'incidence sur le comportement d'ensemble,

sachant que toute interpolation d'un site à l'autre reste délicate et que chaque site présente des spécificités qui lui sont propres.

Les solutions confortatives généralement retenues s'appuient :

- soit sur l'amélioration de la densité des formations en place par compactage dynamique et/ou surcharge par remblai associé à des fondations profondes et à des structures de drainage de l'eau et des gaz ;
- soit sur une substitution des déchets par des matériaux sains compactés avec évacuation dans des sites répondant à la législation en vigueur des déchets extraits.

Cette deuxième solution, en général onéreuse, n'est retenue que dans des cas très spécifiques.

Quelle que soit la solution à retenir, elle est en général précédée de la réalisation de planches d'essai en vraie grandeur avec un suivi technique détaillé permettant d'adapter les mesures confortatives à la spécificité du site.

b) *Les problèmes de sécurité*

Ceux-ci concernent, notamment, les ouvrages abandonnés suivants :

— stabilité des fronts de carrière et mise en conformité avec les règles de sécurité en fonction des facteurs de dégradation à moyen et long terme (altération, remontée des niveaux d'eau...) ;

— diagnostic de stabilité d'ouvrages souterrains abandonnés (carrières souterraines, sous-sol enterrés...) et confortement éventuel avant réutilisation des sols ;

— aménagement des dépôts fins en bassin ou en terril assurant la stabilité définitive des digues...

CONCLUSIONS

L'évolution technologique des besoins de notre civilisation conduit à l'apparition permanente de friches industrielles. Parallèlement la densification de l'occupation urbaine, la pression foncière et la nécessité d'une reconquête de notre environnement incitent à la valorisation de ces friches ; cette approche impose d'intégrer tous les problèmes liés au sol et au sous-sol.

De ce dernier point de vue, l'analyse générale des spécificités et des difficultés générées par la reconquête de ces friches suppose que l'on définisse des recommandations d'ordre général.

A l'examen de l'expérience acquise sur un certain nombre de cas particuliers, il ressort en effet les points suivants :

1° L'importance de l'analyse des documents d'archives et de l'enquête bibliographique préalable à tout choix d'aménagement, pour ce qui a trait, notamment, au plan-masse des anciens ouvrages enterrés, au stockage des matières premières et à l'élimination des déchets et/ou effluents.

Se pose ainsi le problème de la conservation des informations — quel que soit leur support matériel — concernant les aménagements et les activités passés, notamment pour ce qui a trait au sol et au sous-sol, dans un système de repérage géographique homogène.

En l'absence d'information précise un lever photogramétrique du site avant toute intervention est souhaitable pour faciliter la localisation ultérieure des anciennes structures.

2° La nécessité d'une approche économique globale doit intégrer les contraintes liées au sous-sol dans le choix des futurs aménagements (résorption de dépôts de déchets, consolidation des sols, remontée de nappe, corrosion des bétons...) en faisant intervenir des équipes pluridisciplinaires.

3° L'obligation de traiter séparément les problèmes liés au dépôt de déchets anciens et à la démolition ou à la réhabilitation de structures immobilières apparaît rapidement, ainsi que l'obturation de toutes structures enterrées (forages, galeries techniques, émissaires de gros diamètres...) afin d'éviter la diffusion et la dispersion des pollutions éventuellement existantes et des mouvements ultérieurs du sol.

Enfin, la mise au point d'outils adaptés visant à caractériser les milieux dans le domaine hydrogéotechnique et à faciliter le dimensionnement des fondations d'ouvrages s'avère indispensable, ainsi que l'élaboration de règles concernant les planches d'essai à réaliser en vraie grandeur, approche indispensable permettant de satisfaire à la contrainte d'hétérogénéité des milieux rencontrés.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BARRES M. (1989). — Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire. Impact des friches industrielles sur l'environnement (89 SGN 0024).
- 2) BONIN H. (1989). — Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire. Impact des friches industrielles sur l'environnement (89 SGN 0024).
- 3) BOVE Y. (1985). — SAEN friches industrielles de la COFAZ Aubry (Nord). Examen géotechnique complémentaire au droit des zones de stockage des vinasses (85 NPC 0023).
- 4) BOVE Y. (1985). — Région Nord - Pas-de-Calais. Traitement des friches industrielles, Fourmies (Nord). Usine des filés de Fourmies. Diagnostic géotechnique (85 NPC 0026).
- 5) BOVE Y. (1985). — Région Nord - Pas-de-Calais. Traitement des friches industrielles, Douai (Nord). Usine SAMIIA terril et tabulaire consigné au CD 917. Diagnostic géotechnique (85 NPC 0040).
- 6) BOVE Y. (1987). — Région Nord - Pas-de-Calais. Traitement des friches industrielles, Quiévrechain (Nord). Verrerie de Blanc-Misseron. Diagnostic géotechnique (87 NPC 0039).
- 7) BOVE Y. (1988). — Région Nord - Pas-de-Calais. Traitement des friches industrielles, Avion (Pas-de-Calais). Carreau de la Fosse 7 et 7 bis (87 SGN 0779).
- 8) CAOUS J.Y. (1988). — Houillères du Bassin du Nord et du Pas-de-Calais. Diagnostic sommaire de vulnérabilité de 24 sites de friches industrielles (88 SGN 0038).
- 9) CAOUS J.Y. (1989). — Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire. DRIR Nord - Pas-de-Calais - HBNPC - BRGM. Etude sur la qualité des eaux souterraines au droit de certains sites industriels (89 SGN 0121).
- 10) DARMENDRAIL D. (1989). — Société COFRAN. Influence des anciennes activités de la Société "OKOIL" sur la friche de Fourmies (Nord) sur l'environnement (89 SGN 0259).

- 11) DARMENDRAIL D. (1989). — Mairie de Fourmies (Nord). Estimation technique et financière au stade de l'étude préliminaire des travaux à réaliser sur la friche "OKOIL" de Fourmies en vue de sa réhabilitation industrielle (89 NPC 0027).
- 12) DENUDT H. (1987). — Friches industrielles Gillet-Thaon, Cambrai (Nord). Examen de la toxicité des sols. Compte rendu des travaux et analyses chimiques effectués (87 NPC 0026).
- 13) FILIS G. (1989). — SIVOM sur la région de Denain (Nord). Friche Usinor, rue Louis Petit. Construction d'un bâtiment industriel locatif. Unité de Peinture industrielle. Examen géotechnique des sols de fondation (89 SGN 0529).
- 14) FILIS G. (1989). — SIVOM de la région de Denain (Nord). Friche Usinor, Rivière des Moulins. Réalisation d'un port de plaisance. Examen géologique et géotechnique (89 SGN 0565).
- 15) LALLEMAND A. (1989). — Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire. Impact des friches industrielles sur l'environnement (89 SGN 0024).
- 16) LEPLAT J. (1989). — Usinor Denain (Nord). Cadre géologique et hydrogéologique (89 NPC 0004).
- 17) RICOUR J. (1988). — Les friches industrielles et la gestion du sous-sol. Analyses des contraintes à partir de quelques exemples (88 SGN 0714).
- 18) RICOUR J. (1989). — Les friches industrielles et la gestion du sous-sol. Analyses des contraintes à prendre en compte dans le cadre d'un plan de réhabilitation (89 SGN 0244).

Evaluation de l'aléa sismique dans le cadre d'études des dangers d'installations industrielles à haut-risque de la région Nord-Pas-de-Calais

Seismic hazard assessment applied to the definition of "high risk" industrial facilities design parameters in Nord-Pas-de-Calais région (France)

par P. GODEFROY (*) et J. LEPLAT (**)

Résumé. — Ce travail, effectué à l'instigation de la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche du Nord-Pas-de-Calais, s'inscrit dans le cadre des "études de dangers" appliquées à des unités industrielles classées "à haut risque" conformément à la directive européenne SEVESO. Il vise à estimer les paramètres permettant de prendre en compte l'aléa sismique dans le dimensionnement des installations. La démarche suivie est conforme à la pratique réglementaire en matière de sûreté nucléaire (règle fondamentale de sûreté n° I-2C, 1981), dont les principes sont étendus aux installations industrielles "à haut risque" et s'appuie sur une évaluation déterministe de l'aléa sismique régional, reposant sur un bilan de la sismicité et une analyse sismotectonique conduits dans un rayon de plus de 150 kilomètres autour des sites. Celle-ci a permis de proposer la définition d'unités sismotectoniques représentées soit par des structures majeures (systèmes de failles), soit par des domaines structuraux, dans une région s'étendant sur le Nord-Ouest de la France, la Belgique, la Manche, la Mer du Nord méridionale et le Sud-Est de l'Angleterre. Pour la région Nord-Pas-de-Calais, le rôle essentiel du cisaillement Nord-Artois, de la zone faillée du Pas-de-Calais et de la faille des Flandres, dans l'activité tectonique et sismique récente et actuelle, est particulièrement souligné. Cependant, de nombreuses incertitudes subsistent aux différentes étapes de l'évaluation de l'aléa sismique, justifiant une approche "conservative" ou "sécuritaire" dans la protection des installations à haut risque.

Abstract. — *This work was performed on the Direction Régionale de la Recherche et de l'Industrie Nord-Pas-de-Calais instigation, in the framework of the "safety studies" applied to high risk classified industrial facilities, according to the SEVESO european directive. It aims at the determination of seismic design parameters for these industrial plants. The present approach follows the nuclear safety regulation practice (règle fondamentale de sûreté R.F.S. I-2c), extended from now to the high-risk industrial facilities. It is based on a deterministic regional seismic hazard assessment, from a review of the seismicity and a seismotectonic analysis performed over more than 150 kms, all around the sites. The individualization of seismotectonic units, either major tectonic structures (faults systems) or structural domains, is proposed in a region extending over North-western France, Belgium, the Channel, southern North Sea and South-eastern England. In the Nord-Pas-de-Calais région, the "Cisaillement Nord-Artois" ("Kent-Artois shear zone"), the "zone faillée du Pas-de-Calais" ("Dover straight fault zone") and the "Flandres fault" are the main features associated with the recent and present tectonic and seismic activity. Nevertheless, many uncertainties are still emphasized at the different steps of seismic hazard assessment, justifying a conservative approach of the high risk facilities seismic design.*

I. — INTRODUCTION

Ce travail, effectué à l'instigation de la Direction régionale de l'Industrie et de la Recherche du Nord-Pas-de-Calais, dans le cadre des études de dangers appliquées à des unités

industrielles classées à "haut risque" vise à estimer les paramètres utiles au dimensionnement des installations à partir d'une évaluation déterministe de l'aléa sismique. La démarche suivie est conforme à la pratique réglementaire en matière de sûreté nucléaire (règle fondamentale de sûreté n° 1-2c, 1981). Elle repose sur :

(*) Service "Risque et génie sismiques" - BRGM - Domaine de Luminy - 13009 Marseille.

(**) 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 par le Conseil de la S.G.N. le 6 décembre 1989.

— *un bilan de sismicité régionale* faisant ressortir, pour la région Nord-Pas-de-Calais, une activité relativement modérée par la fréquence des secousses observées, mais loin d'être négligeable par les intensités susceptibles d'être atteintes ;

— *une analyse sismotectonique* conduite dans un rayon de plus de 150 km autour des sites, intégrant les données structurales off-shore et néotectoniques.

Dans un tel contexte, une évaluation probabiliste de l'aléa sismique (Goula et Godefroy, 1985) reste peu crédible et assortie d'incertitudes qu'il est difficile de quantifier. La philosophie de la protection recherchée pour ce type d'installations (Mansot, 1987 ; Godefroy, 1989a, 1989b) consiste à caractériser, sur chaque site, les effets maximaux plausibles résultant de secousses sismiques (Godefroy et Levret, 1985), en définissant :

— le (s) S.M.S. ou Séisme Majoré de Sécurité correspondant,

— le (s) S.M.H.V. ou Séisme Maximum Historiquement Vraisemblable, proche et lointain,

Ces séismes de référence représentent les séismes les plus forts connus dans chaque unité sismotectonique pouvant être individualisée (domaine sismotectonique ou structure sismogène), ramenés dans la position la plus pénalisante pour les sites considérés.

Cette étude a fait l'objet d'un rapport exhaustif (Godefroy et Leplat, 1987) auquel le lecteur pourra se reporter pour plus de détails sur la synthèse et l'interprétation des données de base relatives à la sismicité et la néotectonique, présentées succinctement ici.

II. — BILAN DE LA SISMICITÉ RÉGIONALE

Pour les données macrosismiques, historiques et contemporaines, un inventaire aussi exhaustif que possible des évé-

nements ayant affecté la Manche et l'extrémité méridionale de la Mer du Nord, les côtes françaises, britanniques et belges, le Nord de la France et la Belgique, du littoral jusqu'aux Ardennes et au Fossé Rhénan inférieur, a été dressé, à partir :

— du fichier informatisé de sismicité historique de la France "Sirène" (Godefroy *et al.*, 1980 ; Godefroy et Levret, 1990),

— des catalogues britanniques les plus récents (Principia Mechanica, 1982 ; Ambraseys and Melville, 1983 ; Soil Mechanics, 1982 ; Burton and al., 1984),

— du fichier de l'Observatoire Royal de Belgique (De Backer, 1984).

La confrontation de ces données et la révision des séismes majeurs recensés a permis d'établir des cartes synthétiques (ex. : fig. 1), d'individualiser les principales zones sismiques, de décrire leur activité et de sélectionner les secousses les plus fortes leur étant associées, dont les caractéristiques focales (intensité épicentrale, magnitude, profondeur focale) ont été réestimées :

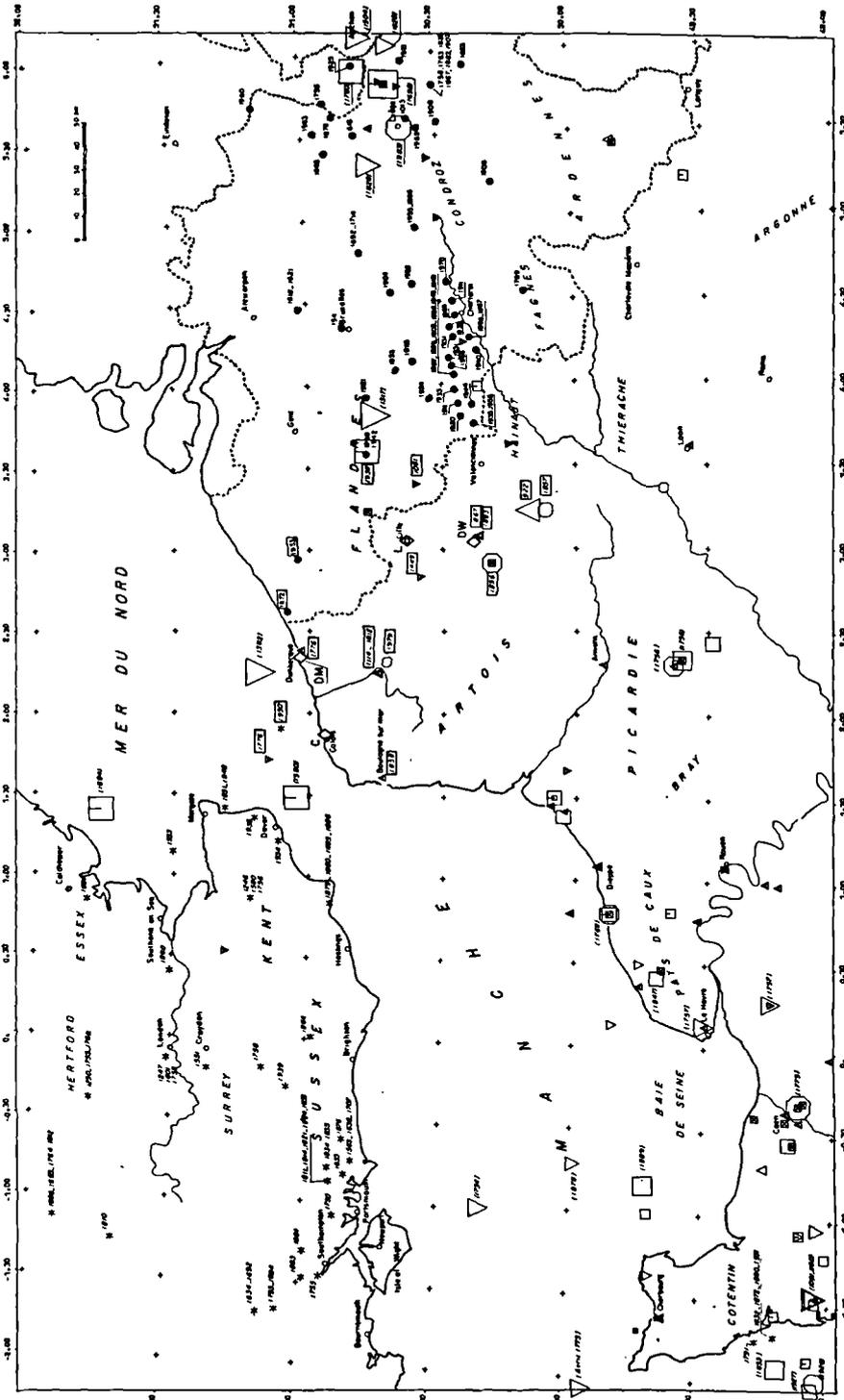
— *le Sud et le Sud-Est de l'Angleterre* : Sussex, Kent et plus au Nord, côtes de l'Essex (séisme destructeur de Colchester de 1884) ;

— *la Manche*, subdivisée en trois zones sismiques : Manche occidentale (à l'Ouest du Cotentin : golfe norman-breton), Manche orientale (particulièrement selon les prolongements de la faille du Bray, du Pays de Caux à l'île de Wight et dans la Baie de Seine), confins Manche/Mer du Nord (détroit du Pas-de-Calais et environs) qui se distinguent par des séismes majeurs d'intensité VII à VIII et de très grande extension macrosismique (ex. : 21 mai 1382 et 6 août 1580, tableau I) ;

| | 21 MAI 1382 | 6 AVRIL 1580 |
|---------------------------|---|---|
| LOCALISATION | Extrémité méridionale de la Mer du Nord (entre Flandres et Kent) 51°25'N ± 15' 2°30'E ± 40' | Détroit du Pas-de-Calais 51°03' ± 05' 1°42'E ± 15' |
| Profondeur focale | 25 à 30 km | 25 km ± 5 km |
| Intensité épicentrale | VII à VIII (M.S.K.) | VII - VIII (M.S.K.) |
| Magnitude équivalente | 5,5 à 6,0 | 5,6 ± 0,3 |
| Rayon moyen de perception | Supérieur à 400 km | Supérieur à 500 km |

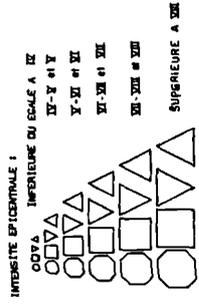
Tableau I. — Estimation des caractéristiques des tremblements de terre majeurs des 21 mai 1382 et 6 avril 1580.

Table I. — Evaluation of the characteristics of the 21st May 1382 and 6th April 1580 major earthquakes.



EPICENTRE INDICATEUR (Fichier SIRENE avant révision)

| LOCALISATION | INTENSITE EPICENTRALE 1 | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|
| | FAIBLE A B | INCERTAINE C |
| FAIBLE A B | ○ | ○ |
| INCERTAINE C D | □ | □ |
| ARBITRAIRE E | ▽ | ▽ |
| INFORMATION EGALE F | △ | △ |



- N.B. Les dates portées sont :
- 1800
 - ▽ 1820
 - * 1720
 - 1804
- Crises sismes mentionnés dans le fichier SIRENE avec une intensité supérieure à II
- Celles des sismes les plus proches des sites
- Critères de sélection utilisés pour la compilation de SIRENE (G.S.P.B.S. et autres)
- Critères des événements signalés dans le fichier belge et japonais de SIRENE
- ◇ SITES INDUSTRIELS CONSIDERES
- C Calais
 - DM Dunkerque Marlysch
 - L Lille-La Madeleine
 - DW Douai-Waziers

Fig. 1a. — Carte de sismicité régionale ; sélection d'épicentres macroseismiques extraits du fichier français SIRENE, des fichiers belge et britannique.

Fig. 1a. — Regional seismicity map ; selection of macroseismic epicenters from the french SIRENE, Belgian and British data files.

— en Belgique, le bassin du Hainaut (activité très régulière, avec des intensités atteignant VII environ), la plaine des Flandres et le Brabant (avec notamment la secousse du 11 juin 1938 : VII à VII-VIII), la région liégeoise (Liège-Aix-la-Chapelle-Cologne) où se succèdent des secousses notables d'intensité VII à VIII, à grande extension (1504, 1692, 1755 et 1756, 1760, 1828 et 1983) ;

— le Nord-Ouest de la France, où la sismicité s'exprime le long des failles majeures délimitant les mégablocs du socle armoricain en Bretagne septentrionale et Normandie occidentale et le long des accidents majeurs NW-SE à WNW-ESE, en Normandie orientale, Picardie et Artois (failles de Bolbec, de la Seine, du Bray, d'Eu, de la Somme et cisaillement Nord-Artois) ; les secousses les plus fortes y atteignent l'intensité VII.

En l'état actuel des réseaux d'enregistrement sismique français (Delhay et Plantet, 1976 ; Massinon, 1985), belge (De Backer, 1984) et britannique (Browitt *and al.*, 1985 ; Neilson and Burton, 1985), les *données instrumentales* sont trop peu nombreuses et entachées souvent d'une trop forte incertitude pour fournir une image représentative de la microsismicité des accidents relevés du Kent à l'Ardenne, même si certains traits soulignés par les données macrosismiques semblent être confirmés.

Pour la région Nord - Pas-de-Calais, le principal résultat ressortant de ce bilan est l'existence d'un axe sismique important se dessinant du Kent à l'Artois et se prolongeant vers l'Est, à travers le Brabant et le Nord du Condroz jusqu'au contact avec le fossé rhénan inférieur (zone de Liège - Aix-la-Chapelle).

III. — ANALYSE SISMOTECTONIQUE RÉGIONALE

Le cadre structural de la région étudiée peut être décrit en distinguant diverses unités tectoniques limitées par des accidents importants (Colbeaux *et al.*, 1980 ; Megnien, 1980), par exemple (*fig. 2A et 2B*) :

— la faille de Bray, la faille de la Seine et les failles NW-SE de la même famille, discontinuités subverticales majeures affectant souvent toute l'épaisseur de la croûte comme l'ont montré les résultats du programme ECORS (Cazes *et al.*, 1985) et qui peuvent être interprétées comme des décrochements hercyniens dextres ;

— la faille du Midi ;

— les accidents de la Manche, d'âge Cadomien (N 70° E) en Manche occidentale, Hercynien (N 90° E) en Manche centrale et tardi-Hercynien (N 130° E) en Manche orientale où ils indiquent des prolongements structuraux des failles NW-SE du Bassin Parisien, en s'infléchissant à l'WNW-ESE aux abords des côtes britanniques, tandis que le jeu décrochant fait progressivement place à des mouvements essentiellement en faille inverse ("transpression structures" de Muirwood, 1985).

La tectonique tertiaire a réactivé des plissements et de nombreuses failles visibles de l'orogène primaire, en particulier le rejeu décrochant dextre des accidents NW-SE et WNW-ESE et le plissement des bassins comme celui du Weald-Boulonnais. Il apparaît finalement que ces blocs structuraux sont séparés par de puissantes zones de cisaillement dont l'activité ou l'influence tectonique ont été pérennes au cours des temps géologiques et semblent se poursuivre actuellement, comme en témoignent la sismicité observée et les indices néotectoniques. Ces derniers se traduisent surtout par des rejeux récents de structures ou d'accidents tardi-hercyniens ; par exemple, le soulèvement important de l'anticlinal du Pays de Bray depuis le Quaternaire ancien (Wyns, 1977) ou l'activité de failles NW-SE et WNW-ESE en Picardie et Artois : failles de la Seine (Dewolf et Kuntz, 1980), de la Somme (Broquet, 1980), de Lille-Dungeness (Colbeaux, 1984), de St-Omer, Desvres, Bruay-en-Artois, Pernes, Ruitz, Bailleul (Fourniguet, 1978). La grande faille des Flandres montrerait également un rejeu plio-quaternaire. Le massif ardennais connaît, lui, un mouvement général de surrection au Plio-quaternaire, qui s'accompagne du rejeu de nombreuses failles (Voisin, 1977).

La "zone faillée du Pas-de-Calais", d'orientation N 30°, jouerait un rôle important dans l'ouverture du détroit au Pléistocène (Colbeaux *et al.*, 1980 ; Smith, 1984).

Dans les autres régions plus septentrionales, Muirwood (1985) souligne trois zones majeures de cisaillement associées à la tectonique récente et actuelle du Nord-Ouest de l'Europe, d'orientation WNW-ESE à NW-SE : zone de Tornquist en Mer du Nord, faille de Dowsing-South Hewett du Norfolk aux Pays-Bas, axe Artois-Kent ou cisaillement Nord-Artois dont il admet un mouvement Pléistocène supérieur.

En conclusion, la répartition des indices néotectoniques par rapport aux blocs structuraux reconnus conduit à deux types de situation :

— des failles à rejeu récent qui sont sub-parallèles aux limites de ces blocs structuraux et statistiquement bien représentées à l'intérieur de ces blocs (par exemple : NW du Bassin Parisien) ;

— des failles à rejeu récent qui constituent les limites mêmes de ces blocs (par exemple : axe Wight-Bray, cisaillement Nord-Artois).

La sismicité s'exprimant selon ces deux catégories de failles tectoniquement actives, deux types d'unités sismotectoniques ont été définies. Elles semblent cependant se limiter, dans toute cette partie nord-ouest de l'Europe, aux accidents cisailants d'orientation intermédiaire par rapport à celle des contraintes principales et aux failles normales sub-parallèles à la contrainte maximale σ_1 et orthogonales à la contrainte minimale σ_3 , soit subméridiennes à NNW-SSE (régime décrochant distensif avec σ_1 et σ_3 horizontales, σ_2 verticale et σ_1 peu supérieure à σ_2 , Philip, 1983). Les rares mécanismes au foyer de séismes récents disponibles n'indiquent que des solutions en failles normales et décrochements, s'organisant de façon cohérente en fonction des directions structurales

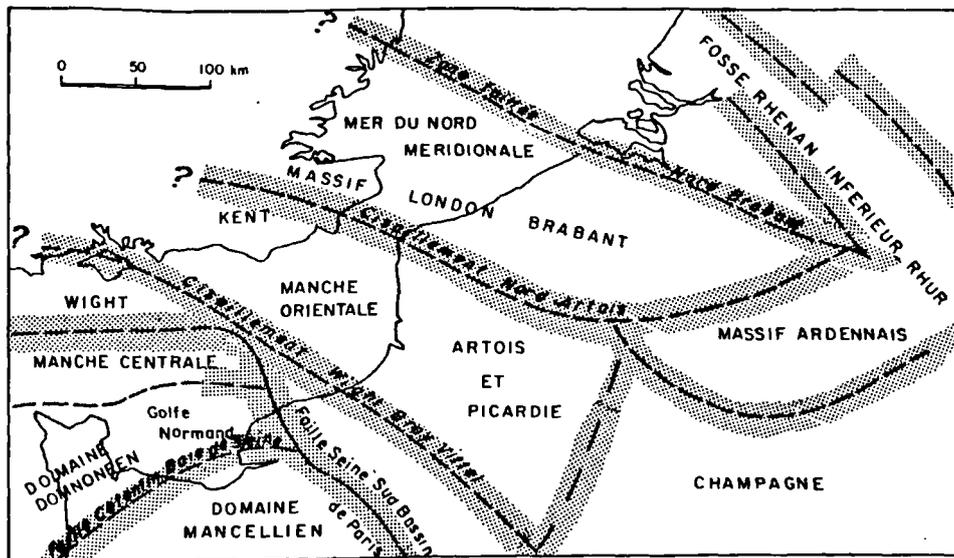
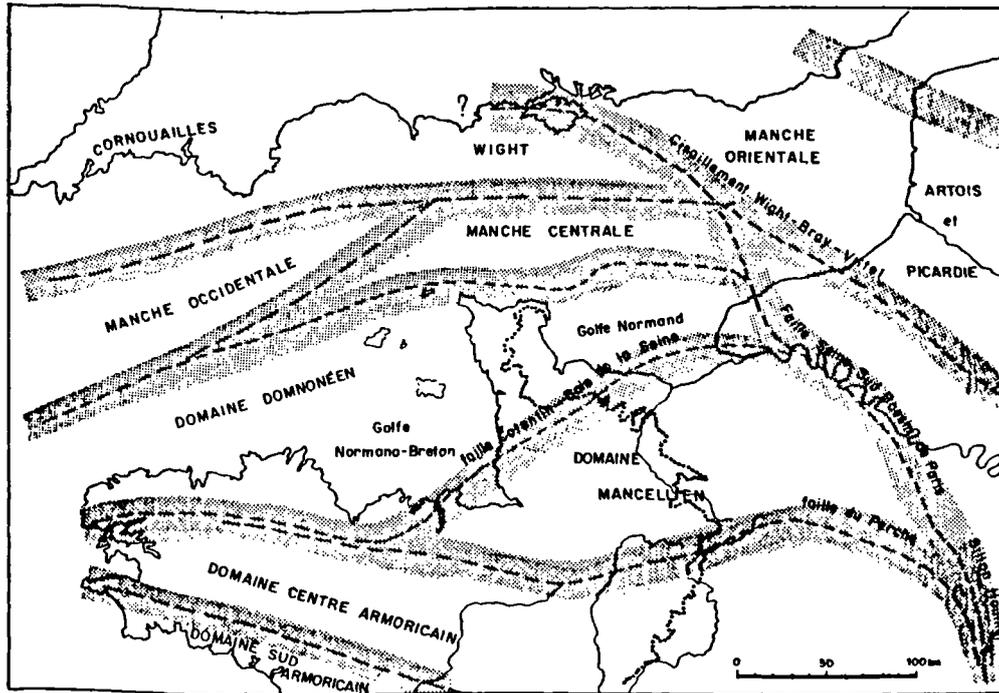


Fig. 2a et 2b. — Représentation schématique des principaux blocs structuraux définis de la Manche occidentale au fossé rhénan inférieur.

Fig. 2a and 2b. — Major structural blocks from the western Channel to the lower Rhenish graben.

connues et de leur orientation par rapport au champ de contraintes actuel (Godefroy, 1980 ; Philip, 1983). Les déformations à allure compressive décrites sur des structures grossièrement WNW-ESE à EW auraient donc plutôt un caractère asismique.

IV. — DÉFINITION D'UNITÉS SISMOTECTONIQUES

A la différence d'autres régions, comme la Provence par exemple, où l'analyse sismotectonique peut être développée avec suffisamment de précision, grâce à la qualité des données néotectoniques recueillies (Terrier, 1990), pour identifier un nombre limité de structures sismogènes et en proposer une classification fondée sur leur mécanisme de déformation actuel (Combes *et al.*, 1989 ; 1990), les incertitudes subsistant sur la localisation des épacentres des secousses majeures et leur association à des accidents tectoniques particuliers conduisent, pour la zone étudiée ici, à retenir plusieurs hypothèses sous-tendant la détermination des S.M.H.V. En particulier, les séismes de référence sont rattachés à des unités sismotectoniques définies soit par des structures actives majeures, soit par des domaines tectoniques homogènes (fig. 3 et tableau II). A chacune de ces unités sismotectoniques est associée une sismicité caractéristique (fréquence et intensité des secousses, mécanisme à la source), décrite

notamment, en termes déterministes, par le séisme maximal connu.

V. — APPLICATION AUX SITES INDUSTRIELS DU NORD - PAS-DE-CALAIS ET CONCLUSIONS

Parmi les unités sismotectoniques définies ne sont retenues, pour la détermination des niveaux d'agression sismique à considérer sur les sites industriels à haut risque (spectres de réponse des S.M.H.V. et S.M.S.), que celles dont les séismes de référence sont susceptibles d'engendrer les effets maximaux sur les sites. Une sélection est ainsi pratiquée sur la base des caractéristiques focales des séismes de référence pour identifier les couples (magnitude maximale, distance focale minimale au site envisageable) conduisant aux intensités les plus élevées sur les sites. Ces dernières sont évaluées par des modèles appropriés d'atténuation de l'énergie rayonnée par les sources sismiques considérées. Les spectres de réponse des S.M.H.V. et S.M.S. ont ensuite été calculés en tenant compte des caractéristiques géologiques et géotechniques propres à chaque site (Mouroux, 1989).

Pour la région Nord - Pas-de-Calais, les unités sismotectoniques déterminantes et les séismes maximaux leur étant associés sont décrits sur le tableau III. Il est à remarquer que si, dans la région Nord - Pas-de-Calais, l'aléa sismique ne justifie pas (en termes économiques d'une analyse coût/béné-

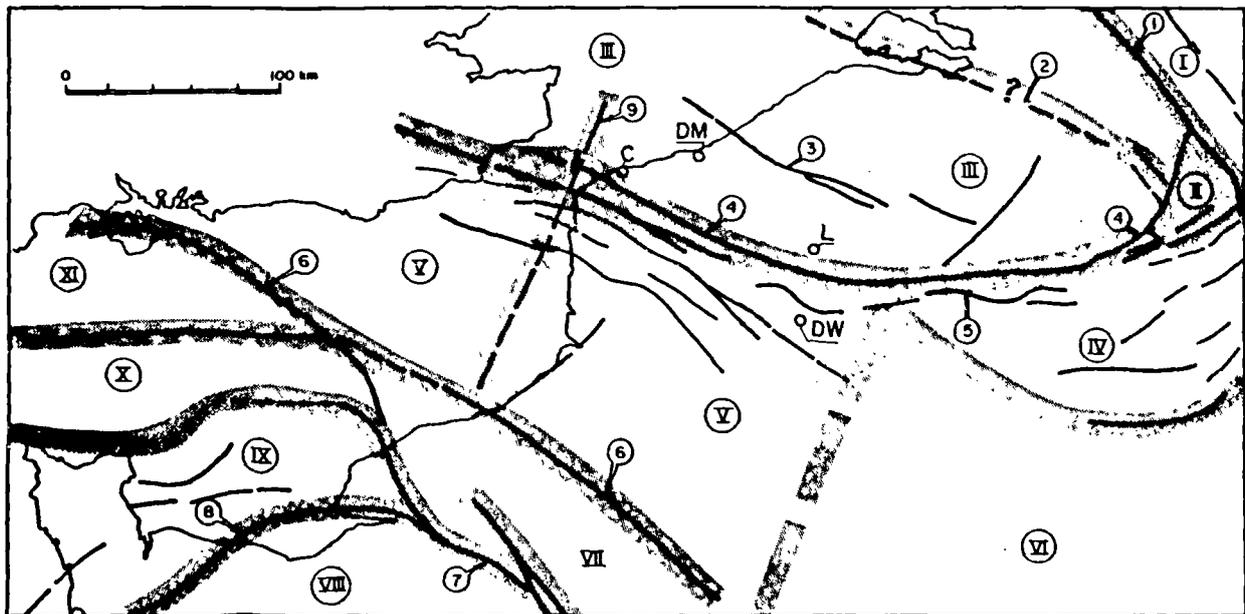


Fig. 3. — Unités sismotectoniques considérées de la Manche au fossé rhénan inférieur.

Fig. 3. — Seismotectonic units individualized from the western Channel to the lower Rhenish graben.

| UNITES SISMOTECTONIQUES (Domaines et structures sismogènes) | Numérotation | Déformations tectoniques récentes | Sismicité associée |
|---|--------------|---|---|
| Fossé Rhénan Inférieur | I | Failles normales quaternaires | Oui (Cf. AHORNER, 1983) |
| Zone Liège-Aachen | II | Zone de transition entre Fossé Rhénan Inférieur et cisaillement majeur Kent-Artois et ses prolongements orientaux | Fréquence élevée de secousses notables (intensités VII à VIII) : 1504, 1692, 1755, 1756, 1760, 1828, 1925, 1983 |
| Massif London-Brabant et Mer du Nord méridionale | III | Accidents NW-SE : faille Dowsing-South Hewett, faille des Flandres | Intensités maximales de l'ordre de VII à VIII : 1449 ?, 1382 ?, 1938 |
| Massif ardennais | IV | Surrection et rejeu de failles E-W à WSW-ENE | Microsismicité diffuse |
| Manche orientale - Artois-Picardie | V | Cisaillement Nord-Artois, cisaillement Wight-Bray-Vittel (WNW-ESE à NW-SE) et zone faillée du Pas-de-Calais (NNE-SSW) - Famille d'accidents NW-SE en Artois et Picardie | 6 avril 1580 (VII - VIII) 1896, 1756 (VII) |
| Est du Bassin Parisien | VI | ? | Négligeable |
| Nord-Ouest du Bassin Parisien | VII | Cisaillement Wight-Bray-Vittel Faille de la Seine | Négligeable en dehors des limites de l'unité |
| Domaine Mancellien | VIII | Faille Cotentin-Baie de la Seine | 1775 (+ VII) |
| Domaine Domnonéen | IX | Failles "Nord-armoricaines" et faille Cotentin-Baie de la Seine - Accidents NE-SW | Intensités VI à VII : 1853, 1889, 1926 |
| Manche centrale | X | ? | Microsismicité faible |
| Zone Dorset-Wight | XI | Rejeux inverses (post-miocène) dans le prolongement de l'axe Wight-Bray | Microsismicité et données historiques (fichiers britanniques) |
| Failles bordières du graben rhénan inférieur | 1 | oui | Oui (Cf. AHORNER, 1983) |
| Zone faillée Nord-Brabant | 2 | ? | Oui (Cf. MUIRWOOD, 1985) |
| Faille des Flandres | 3 | A préciser | 11 juin 1938 |
| Cisaillement Nord-Artois | 4 | oui | 6 avril 1580 ? Autres secousses microsismiques et historiques plus modérées |
| Faille du Midi | 5 | oui | Oui |
| Cisaillement Wight-Bray Vittel | 6 | oui | Oui |
| Faille de la Seine | 7 | oui | Possible |
| Faille Cotentin-Baie de la Seine | 8 | oui (faille d'Arromanches) | Possible |
| Zone faillée du Pas-de-Calais | 9 | oui (Cf. COLBEAUX, 1980) | 6 avril 1580 |

Tableau II. — Proposition de définition d'unités sismotectoniques.

Table II. — Proposal of seismotectonic units.

| Unité sismotectonique | Séisme de référence | Intensité épicentrale | Magnitude équivalente | Profondeur focale | Distance réelle aux sites* | S. M. H. V. | |
|--|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| | | | | | | Distance minimale au sites* | Intensité maximale envisageable sur les sites* |
| Cisaillement Nord-Artois | 6 avril 1580 | VII - VIII | 5.6 ± 0.3 | 25 ± 5 km | 30 à 140 km | 0 à 30 km | VI à VII-VIII |
| Faille des Flandres | 11 juin 1938 | VII - VIII | 5.0 ± 0.3 | 15 km | 40 à 130 km | 20 à 70 km | V-VI à VI |
| Zone faillée du Pas-de-Calais | 6 avril 1580 | VII - VIII | 5.6 ± 0.3 | 25 ± 5 km | 30 à 140 km | 10 à 130 km | V à VII-VIII |
| Fossé Rhénan Inférieur et zone Liège-Aachen | 18 septembre 1692 | VIII - IX | 6.0 ± 0.3 | 15 ± 5 km | 200 à 280 km | 160 à 250 km | < V-VI |
| Massif London-Brabant et Mer du Nord Méridionale | (21 mai 1382) 11 juin 1938 | VII - VIII | 5.0 ± 0.3 | 15 km | 40 à 130 km | 0 à 25 km | VI à VII-VIII |
| Manche orientale, Artois, Picardie | 2 septembre 1896 30 avril 1756 | VII | 4.8 ± 0.1 | 10 km ± 5 km | 15 à 100 km | 0 à 45 km | V à VII |

* Variable selon les sites considérés (non détaillés ici).

Tableau III. — Unités sismotectoniques retenues pour la détermination des S.M.H.V. sur les sites industriels du Nord - Pas-de-Calais.

Table III. — Seismotectonic units considered for the S.M.H.V. determination at the industrial facilities sites of Nord - Pas-de-Calais region.

fice) l'application de règles parasismiques de construction destinées aux ouvrages courants (Despeyroux et Godefroy, 1986), sa description en termes déterministes conduit, par contre, à retenir des niveaux d'agression sismique tout à fait significatifs pour les installations à haut risque, conformément aux principes de sûreté maximale recherchée dans ce cas. Il faut souligner cependant que cette étude (la première de ce type entreprise à cette échelle dans cette région) a mis en évidence de nombreuses incertitudes aux différentes étapes de l'évaluation de l'aléa sismique :

- détermination des caractéristiques focales des secousses historiques majeures et répartition de l'activité sismique,
- caractérisation des déformations tectoniques récentes et actuelles (type, amplitude, âge),
- identification et classification des structures sismogènes.

Ainsi, si cette première approche a souligné le rôle probablement essentiel de certains systèmes de failles dans l'activité tectonique et sismique récente et actuelle, comme le cisail-

lement Nord-Artois, la zone faillée du Pas-de-Calais et la faille des Flandres, plusieurs hypothèses restent envisageables pour le rattachement à l'une ou l'autre de ces structures de tremblements de terre majeurs anciens, tels ceux du 21 mai 1382 ou 6 avril 1580 par exemple.

Les éléments déjà recueillis témoignent de l'activité de ce secteur et justifient donc un approfondissement des connaissances qui ne pourra résulter que de la collaboration d'équipes pluridisciplinaires de spécialistes belges, britanniques et français :

- dans le domaine de la sismicité historique, par une homogénéisation des bases de données existantes,
- dans celui de la sismicité instrumentale, par un renforcement des réseaux d'enregistrement dans ces secteurs,
- enfin dans celui de la néotectonique, par la mise en œuvre d'une panoplie de méthodes d'investigation complémentaires et "indirectes" (interprétation d'images satellitaires, analyse morphostructurale, comparaison de profils de nivellement).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) AMBRASEYS N. and MELVILLE C. (1983). — Seismicity of the British isles and the North sea. Imperial College of Science and technology, report for London center for marine technology, sept. 1983.
- 2) BROQUET P. (1980). — Les fractures du bas-pays picard : mouvements anciens et récents, liaison avec une tectonique profonde. *Bull. inf. géol. Bassin Paris*, Vol. 17, n° 4, pp. 5-10.
- 3) BROWITT C.W., TURBITT T. and MORGAN S.N. (1985). — Investigation of British earthquakes using the national monitoring network of the British geological survey, in : Earthquake engineering in Britain, *Proc. of the conf. held at the Univ. of East Anglia*, Thomas Telford, London, pp. 33-47.
- 4) BURTON P.W., MUSSON R.M. and NEILSON G. (1984). — Studies of historical British earthquakes, vol. 1, report n° 237, Global seismology unit. *British geological survey*, sept. 1984.

- 5) CAZES M., TORREILLES G., BOIS C. *et al.* (1985). — Structure de la croûte hercynienne du Nord de la France — Premiers résultats du profil ECORS — *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 8, t. I, n° 6, pp. 925-941.
- 6) COLBEAUX J.P., DUPUIS C., ROBASZYNSKI *et al.* (1980). Le détroit du Pas-de-Calais : un élément dans la tectonique des blocs de l'Europe Nord-occidentale. *Bull. Inf. Géol. Bassin Paris*, Vol. 17, n° 4, pp. 41-84.
- 7) COLBEAUX J.P. (1984). — L'évolution structurale du Sud de la Belgique et du Nord de la France : sa relation avec la dérive des continents ; quelques hypothèses. *Bull. Soc. Belge Géol.*, t. XCIII, fasc. 1/2, pp. 71-78.
- 8) COMBES P., GODEFROY P., GOULA X. *and al.* (1989). — An example of the contribution of neotectonic data to an engineering geology study : the assessment of seismic hazard at the "high risk" industrial facilities sites of the Bouches-du-Rhône département (France) (Submitted to Tectonophysics).
- 9) COMBES P. GODEFROY P., GOULA X. *et al.* (1990). — Evaluation déterministe de l'aléa sismique en Provence occidentale — in : Guide de construction parasismique des installations industrielles, D.R.I.R./PACA, Marseille (sous presse).
- 10) DE BACKER A. (1984). — Seismicity of Belgium ; catalogue of earthquakes revised on 1984/03, Centre de géophysique interne, Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles.
- 11) DELHAYE A. et PLANTET J.L. (1976). — Sismicité générale de la France. *BSGF*, 7, t. XVIII, n° 5, 1095-1102.
- 12) DESPEYROUX J. et GODEFROY P. (1986). — Nouveau zonage sismique de la France en vue de l'application des règles parasismiques de construction et de la mise en œuvre des plans d'exposition aux risques (P.E.R.). *La Documentation Française*, Paris, 147 p.
- 13) DEWOLF Y. et KUNTZ G. (1980). — Présomptions de rejeux plio-quaternaires ou quaternaires d'anciens accidents en Basse Normandie, du Perche à la Vallée de la Seine. *Bull. Inf. Géol. Bassin Paris*, Vol. 17, n° 4, pp. 15-19.
- 14) FOURNIGUET J. (1978). — Carte néotectonique de la France et notice — Document inédit "Projet sismotectonique", BRGM.
- 15) GODEFROY P. (1980). — Apport des mécanismes au foyer à l'étude sismotectonique de la France. *Bull. BRGM*, 2^e série, section IV, n° 2, p. 119.
- 16) GODEFROY P., THIRION S., LAMBERT J. et CADIOT B. (1980). — Informatisation du patrimoine de sismicité historique de la France, *Bull. BRGM*, 2^e série, section IV, n° 2, pp. 139-145.
- 17) GODEFROY P. et LEVRET A. (1985). — Nature et définition de l'aléa sismique, in *Génie Parasismique*, V. DAVIDOVICI (éd.), Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 159-177.
- 18) GODEFROY P. et LEPLAT J. (1987). — Contribution à l'étude des dangers d'installations industrielles à "haut risque" sur les sites de Calais, Dunkerque-Mardyck, Lille-La Madeleine et Douais-Waziers ; prise en compte de l'aléa sismique — Vol. 1 (P. GODEFROY) : résumé et principaux résultats de l'étude, 65 p. ; Vol. 2 (P. GODEFROY) : sismicité et sismotectonique, 161 p. ; Vol. 3 (J. LEPLAT) : le cadre géologique, 23 p. — Rapport BRGM 87 SGN 867 NPC, décembre 1987.
- 19) GODEFROY P. (1989a). — Risque sismique, construction et aménagement en Provence. *Science Technique Technologie*, n° 9, avril 1989, pp. 17-28.
- 20) GODEFROY P. (1989b). — Aléa sismique : définition et méthodes d'évaluation ; philosophie de la protection et réglementation, in : Guide de construction parasismique des installations industrielles. Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche Provence - Alpes - Côte d'Azur (sous presse).
- 21) GODEFROY P. et LEVRET A. (1990). — Création and management of a data base devoted to historical and contemporary macroseismicity in France ; various applications in engineering seismology, in : Recent advances in earthquake engineering and structural dynamics — Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (en préparation).
- 22) GOULA X. et GODEFROY P. (1985). — Evaluation de l'aléa sismique régional ; zonage à petite échelle, in : *Génie parasismique*, V. DAVIDOVICI (éd.) — Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 207-221.
- 23) MANSOT J. (1987). — Politique de l'administration en matière de protection parasismique des établissements industriels à haut niveau de risque — Centre de formation et de documentation sur l'environnement industriel (C.F.D.E.) — Stage n° 23.87 Paris, 8/9 déc. 1987.
- 24) MASSINON B. et VOGT J. (1985). — Sismicité historique et sismicité instrumentale, in : *Génie parasismique*, V. DAVIDOVICI (éd.), Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 179-186.
- 25) MEGNIEN C. (1980). — Tectogénèse du Bassin de Paris : étapes de l'évolution du bassin. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7, t. XXII, n° 4, pp. 669-680.
- 26) MOUROUX P., LEPLAT J. et GENTIER S. (1989). — Contribution à l'étude des dangers d'installations industrielles à haut risque de la région Nord - Pas-de-Calais. Calcul des spectres de réponse élastiques des S.M.H.V. et S.M.S. — Rapports BRGM 89 SGN 695 NPC, 89 SGN 247 NPC, 89 SGN 713 NPC, 89 SGN 714 NPC, 89 SGN 715 NPC, 89 SGN 739 NPC, 89 SGN 740 NPC, 89 SGN 741 NPC, 89 SGN 742 NPC.
- 27) NEILSON G. and BURTON P.W. (1985). — Instrumental magnitudes of British earthquakes, in : *Earthquake engineering in Britain*. Thomas Telford Ltd, London, pp. 83-87.
- 28) PHILIP H. (1983). — La tectonique actuelle et récente dans le domaine méditerranéen et ses bordures, ses relations avec la sismicité — Thèse de doctorat d'Etat, U.S.T.L. Montpellier, déc. 1983.
- 29) PRINCIPIA MECHANICA Limited (1982). — British earthquakes, report for Central Elec. Gen. Board, June 1982.
- 30) Règle fondamentale de sûreté R.F.S. n° 1-2c (1981). — Détermination des mouvements sismiques à prendre en compte pour la sûreté des installations nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression. Ministère de l'Industrie, Direction de la qualité et de la sécurité industrielles, Service central de sûreté des installations nucléaires, réf. SIN n° B5149/81, 1^{er} octobre 1981.
- 31) SMITH A.J. (1984). — Structural evolution of the English Channel region — *Ann. Soc. Geol. Nord*, CIII, pp. 253-264.
- 32) SOILS MECHANICS Limited (1982). — Re-assessment of U.K. seismicity data. Report for Central Elec. Gen. Board, August 1982.
- 33) TERRIER M. (1990). — Néotectonique en Provence : aspects méthodologiques, applications aux études d'aléa sismique — Thèse de l'Université de Provence, Aix-Marseille I.
- 34) WYNS R. (1977). — Tectonique récente dans l'Ouest du Bassin de Paris : méthodes d'étude et bilan des déformations plio-quaternaires. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7, t. XIX, n° 5, pp. 1093-1101.

Simulation d'une pollution aux environs d'un dépôt de déchets

Simulation of ground-water pollution near a waste disposal site

par P. VAN BURM (*), M. VAN CAMP (*), L. LEBBE (*) (**),
K. WALRAEVENS (*) (**) et W. DE BREUCK (*)

Résumé. — Les dépôts de déchets occupent une place importante dans l'aménagement du territoire. Le Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie de l'Université de Gand a réalisé plusieurs études dans le cadre de l'implantation ou l'assainissement de décharges. La modélisation mathématique démontre l'importance de la connaissance de données fiables concernant la stratification et les caractéristiques hydrogéologiques des environs de dépôts de déchets.

Abstract. — *Waste disposal sites are an important aspect of regional planning. The Laboratory of Applied Geology and Hydrogeology studied several cases concerning the planning or cleanup of waste disposal sites. Mathematical modeling reveals the importance of a proper knowledge of stratification and hydrogeological characteristics of the surroundings of waste disposal sites.*

I. — CONTEXTE

Les dépôts de déchets occupent une place importante dans l'aménagement du territoire. L'implantation de nouvelles décharges ainsi que l'assainissement de décharges abandonnées nécessitent en Flandre depuis une dizaine d'années des investigations géologiques et hydrogéologiques approfondies. La protection contre la pollution des eaux souterraines est aujourd'hui un aspect à prendre en considération.

En Flandre la gestion des déchets est le domaine de la Société Publique des Déchets pour la Région Flamande qui est une administration avec personnalité civile créée en 1981.

Les objectifs de la Société sont :

- diminuer la production des déchets,
- stimuler la récupération et le recyclage,
- organiser l'élimination des déchets résiduels.

Une des tâches prioritaires de la Société est d'assainir la situation existante en matière de décharges. Les décharges les plus nuisibles pour l'environnement ont été fermées tandis que les exploitants des autres décharges ont été sommés

d'effectuer des travaux d'assainissement dans un délai déterminé. Un des aspects à étudier dans ce contexte est l'hydrogéologie.

Dans ce cadre le Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie de l'Université de Gand a étudié plusieurs zones de décharge ; elles sont toutes situées sur ou dans des terrains meubles du Quaternaire et du Tertiaire. Dans les cas où la modélisation mathématique est souhaitable une connaissance approfondie de la stratification et des paramètres hydrauliques est exigée. Ceci demande un nombre suffisant de forages et d'essais appropriés, ce qui sera expliqué à l'aide d'un cas concret.

II. — COMPOSITION DE L'ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE

En général l'étude hydrogéologique en relation avec les zones de décharge se compose de plusieurs phases :

Première phase

- Consultation des archives, rassemblement, interprétation et élaboration des données disponibles :
 - données historiques concernant la décharge,

(*) Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie, Université de Gand, Krijgslaan 281, S8, B-9000 GENT, Belgique.

(**) Fonds National de Recherche Scientifique (Belgique).

Note présentée lors du Colloque "Géologie et Aménagement Régional" des 26 et 27 avril 1989 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 6 décembre 1989.

- données géologiques et hydrogéologiques,
- photos aériennes.

Deuxième phase

- Définition de la stratification :
 - prospection géo-électrique (sondages et traînées),
 - essais de pénétration (C.P.T.),
 - sondages et diagraphies.
- Détermination de l'écoulement et de la qualité des eaux souterraines :
 - installation de piézomètres,
 - mesures piézométriques,
 - prises d'échantillons,
 - analyses chimiques.

- Détermination des paramètres hydrauliques :
 - Essais de pompage.

Troisième phase

- Simulation des écoulements et de la pollution à l'aide de modèles mathématiques.

III. — EXEMPLE

En 1984-1985 l'hydrogéologie aux environs d'une décharge industrielle, composée principalement de sels de calcium, a été étudiée. Le but était la mise en place de mesures visant à réduire la pollution des eaux souterraines.

La décharge, d'une trentaine de mètres de hauteur, occupe une superficie d'environ 65 ha. Les déchets ont été transpor-

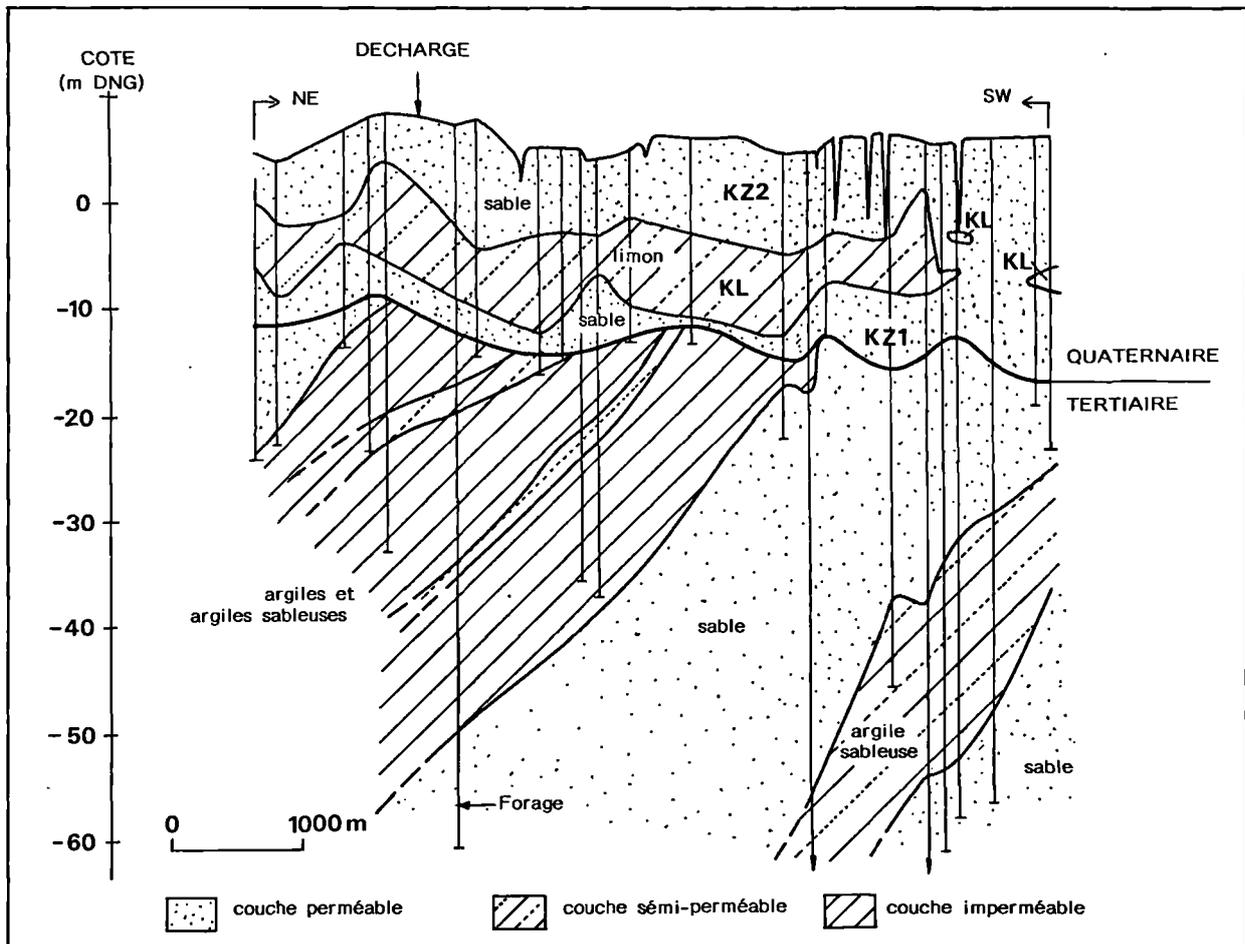


Fig. 1. — Coupe géologique NE-SW traversant la région étudiée.

Fig. 1. — Geological cross-section of the studied area.

tés et déposés au moyen d'eau de canal (pollué). L'endroit est situé sur un ancien cordon dunaire qui domine de 3 à 4 m la plaine environnante.

Les résultats d'un grand nombre d'essais de pénétration et de forages géotechniques étaient disponibles. Ceux-là démontraient l'existence de trois couches subhorizontales quaternaires, de haut en bas (fig. 1) :

1° Sable fin par endroits limoneux (couche "KZ2"), épais de 6 à 13 m, renfermant plusieurs intercalations tourbeuses.

2° Limons et limons sableux et tourbeux, épais d'environ 6 m (couche "KL").

3° Sable fin ou moyen, localement graveleux et atteignant 3 m d'épaisseur (couche "KZ1").

La couche KZ1 repose sur des argiles raides et des argiles sableuses tertiaires (Eocène) dont l'épaisseur dépasse 20 m.

Une campagne de reconnaissance par forages (une quarantaine) et la mise en place de puits d'observation a été réa-

lisée dans et autour du dépôt. Les mesures piézométriques ont montré un écoulement des eaux à partir de la décharge vers les canaux environnants. La surface libre est située entre 0,5 m et 2 m de profondeur.

Les analyses montrent que les eaux non polluées ont une minéralisation totale d'environ 500 mg/l. Les eaux influencées par la décharge sont saumâtres (jusqu'à 12 g/l). On retrouve aussi certains micro-polluants.

Les paramètres hydrauliques ont été déterminés par trois essais de pompage quoique certains auteurs, comme par exemple Freeze & Cherry (1979), posent que ces essais ne sont pas nécessaires dans le cadre d'études de pollution (quelques essais de puits devraient suffire). Un premier essai a été effectué dans la couche KZ2, un second dans KZ1 (fig. 2), le troisième dans la décharge même. Les rabattements observés dans KZ1 et KZ2 durant les deux essais ont été interprétés simultanément avec un modèle mathématique (inverse) développé par Lebbe (1985, 1988). Aussi les rabattements mesurés dans la décharge ont été interprétés de façon semblable. Le modèle permet de calculer un grand nombre de paramètres hydrauliques (fig. 2).

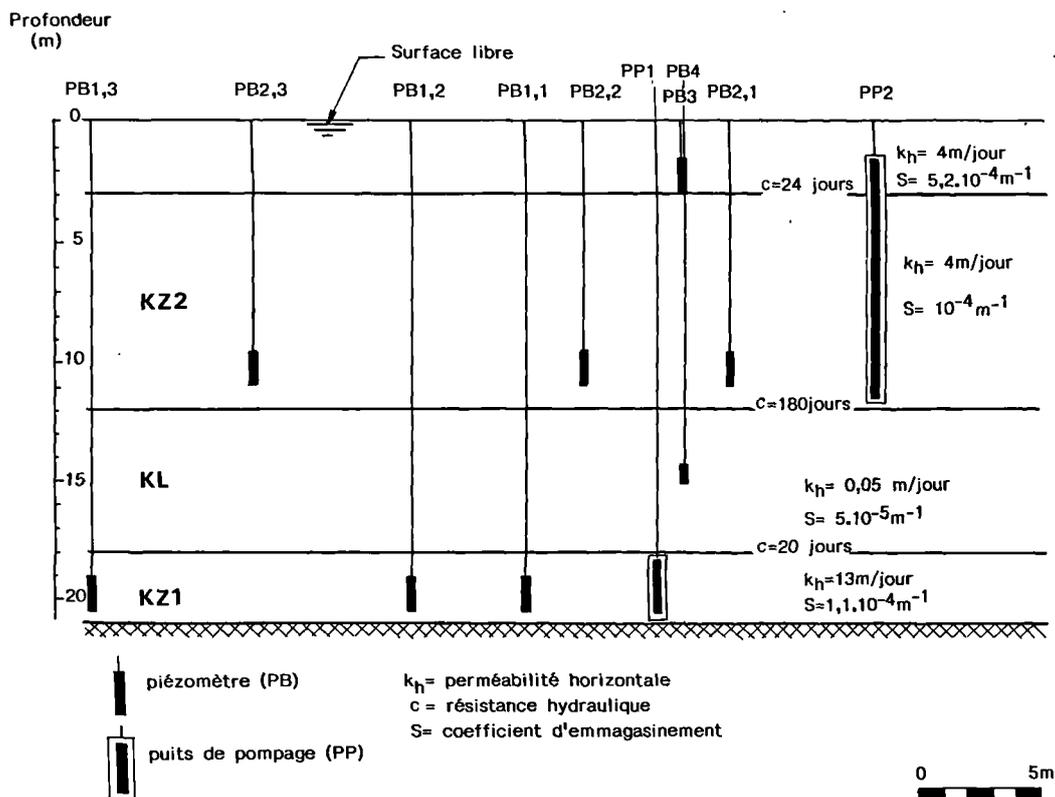


Fig. 2. — Place des puits de pompage et piézomètres utilisés pour les essais de pompages.

Fig. 2. — Pumping wells and observation wells used for the pumping tests.

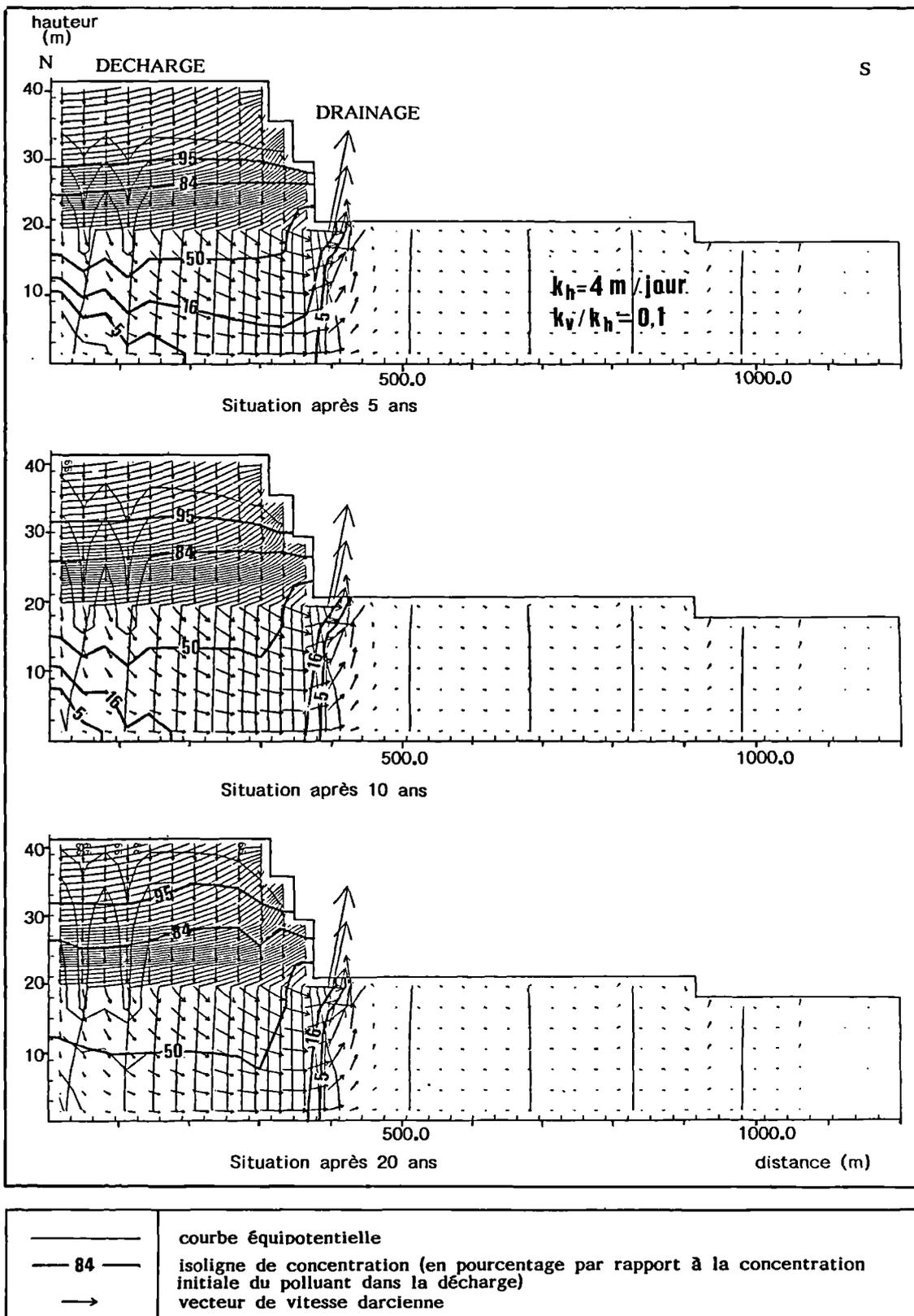


Fig. 3. — Simulation de l'évolution de la pollution en ignorant la stratification du terrain.

Fig. 3. — Simulation of the ground-water pollution : case without stratification.

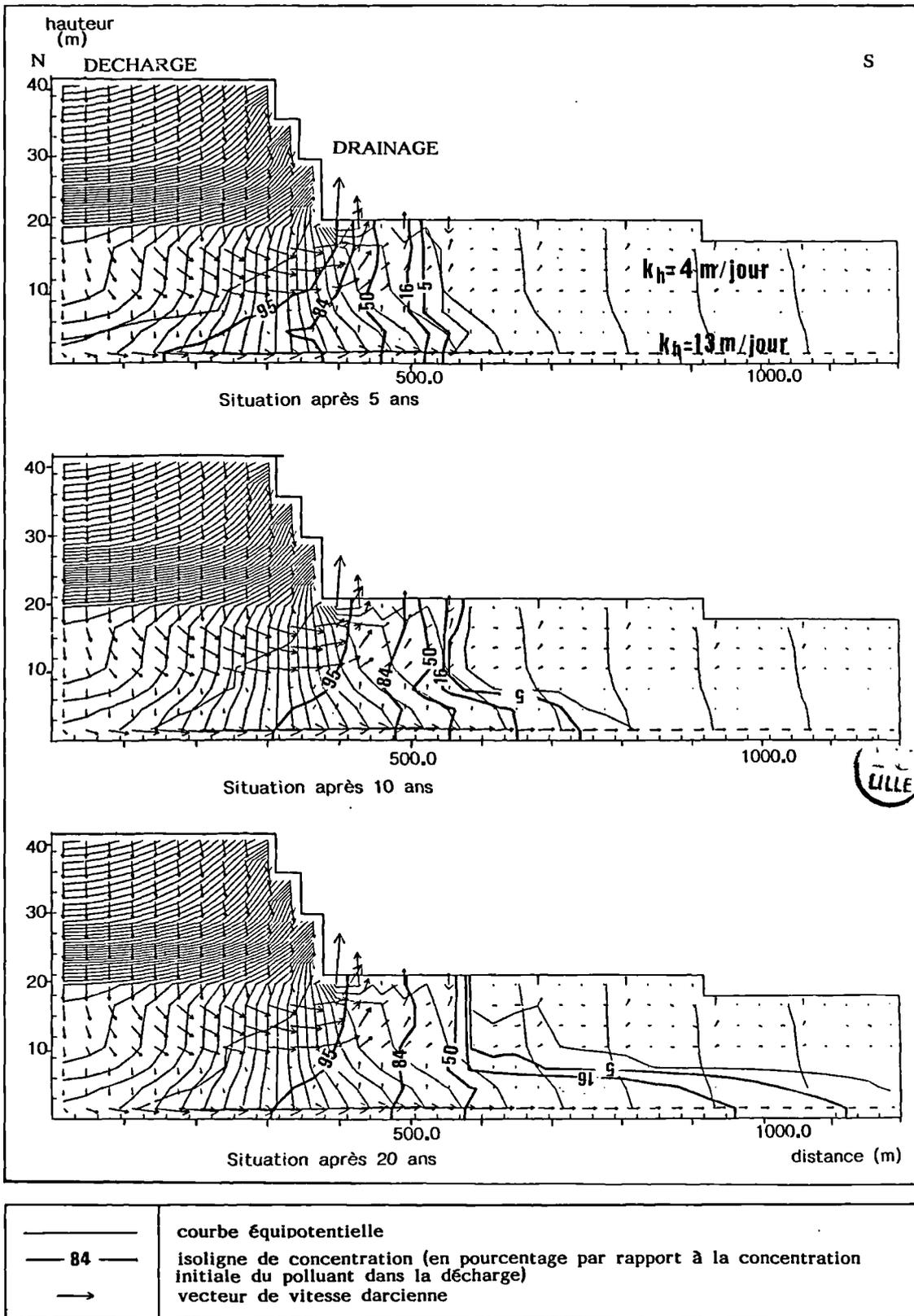


Fig. 4. — Simulation de l'évolution de la pollution en tenant compte de la stratification du terrain.

Fig. 4. — Simulation of the ground-water pollution : case with stratification.

Pour calculer le mouvement de la masse d'eau polluée ainsi que pour évaluer l'effet d'un drain longitudinal installé à 3 m de profondeur, un autre modèle mathématique a été utilisé. Il s'agit d'un modèle de l'United States Geological Survey (Konikow & Bredehoeft, 1978). Le modèle a été adapté par Lebbe (1983) et permet ainsi de traiter dans un plan vertical l'écoulement d'eaux de différentes densités. Les résultats sont représentés dans les figures 3 et 4.

Comme la décharge est située sur le sommet du cordon dunaire, leurs crêtes de partage se confondent. La limite septentrionale verticale est supposée imperméable. La limite inférieure coïncide avec le sommet du substratum imperméable (argile tertiaire). Le flux imposé sur la décharge est 2 900 mm/an (eau polluée = 100 %, densité = 1,008). Sur la zone environnante le flux s'élève à 300 mm/an (eau non polluée = 0 %, densité = 1).

Comme condition initiale on suppose que la décharge est remplie d'eau polluée (= 100 %). L'aquifère avoisinant est rempli d'eau non polluée. L'évolution de la qualité est calculée pour une période de 20 ans. Dans les figures 3 et 4 les potentiels sont représentés par des courbes équipotentielles, les vitesses darciennes par des vecteurs et la qualité (relative) par des courbes d'égal pourcentage d'eau polluée par rapport à la concentration initiale du polluant dans la décharge.

Le maillage comprend 38 colonnes de 31,6 m de largeur. La hauteur de chaque maille est de 3 m. La décharge consiste en 7 couches ; la perméabilité des 3 couches inférieures est plus petite que la perméabilité dans les couches supérieures comme l'a révélé l'essai de pompage dans la décharge.

Une première série de calculs a été faite en ignorant la stratification des couches quaternaires. L'aquifère a une perméabilité horizontale de 4 m/jour. La figure 3 représente les situations après 5, 10 et 20 années. Remarquons que le drainage est efficace et intercepte les eaux polluées en provenance de la décharge.

La deuxième série de calculs tient compte de la stratification du Quaternaire. Sur le substratum argileux repose la couche perméable KZ1 épaisse de 3 m et avec une perméabilité de 13 m/jour. La couche KL a une épaisseur de 6 m et une perméabilité verticale de 0,02 m/jour. KZ2, épais de 9 m, a une perméabilité horizontale de 4 m/jour. Le rapport perméabilité verticale/perméabilité horizontale est égal à 0,05.

La figure 4 illustre que dans ce cas la pollution n'est pas totalement interceptée par le drainage. L'eau polluée se déplace rapidement dans la formation KZ1 plus perméable. Ce fait a été observé dans les piézomètres.

Pour capter les eaux saumâtres dans la couche KZ1 des puits de pompage ont dû être installés.

IV. — CONCLUSION

Uné étude hydrogéologique poussée visant l'assainissement d'un endroit pollué par les eaux d'une décharge a démontré l'importance de données fiables concernant la stratification du sous-sol.

Le mouvement d'une masse d'eau polluée et l'effet d'un drain longitudinal ont été étudiés dans le plan vertical à l'aide du modèle mathématique de Konikow & Bredehoeft adapté. Les calculs faits en ignorant la stratification (deux couches sableuses séparées par une couche limoneuse moins perméable) démontrent qu'un drain intercepte les eaux polluées. Les calculs faits en tenant compte de la stratification illustrent que dans ce cas la pollution n'est pas totalement interceptée.

Le modèle mathématique n'est efficace que s'il représente correctement la stratification et les caractéristiques de l'aquifère. En ignorant cette information le modèle peut même mener à des mesures d'assainissement incorrectes.

RÉFÉRENCES

- 1) FREEZE R.A. and CHERRY J.A. (1979). — Groundwater. 604 p. New Jersey : Prentice-Hall.
- 2) KONIKOW L.F. and BREDEHOEFT J.D. (1978). — Computer model of two dimensional solute transport and dispersion in groundwater. 90 p. U.S. Geol. Survey Techniques of Water Resources Inv. Book 7, Chap. C2.
- 3) LEBBE L. (1983). — Mathematical model of the evolution of the fresh water lens under the dunes and beach with semi-diurnal tides. Proceedings of the 8th Salt-Water Intrusion Meeting, Bari. Geologica Applicata e Idrogeologica, Vol. XVIII, Parte II, 211-238.
- 4) LEBBE L. (1985). — Bepaling van de vertikale doorlatendheid uit pompproefgegevens door middel van een eindig-verschil methode gekombineerd met een gevoeligheids- en een niet lineaire regressie-analyse. Colloque National Com. Belg. Géol. Ingénieur. Liège 1985. 3.56-3.78.
- 5) LEBBE L. (1988). — Uitvoering van pompproeven en interpretatie door middel van een invers model. 563 p. Gent : Rijksuniversiteit (Aggregaatsproefschrift).

L'évolution de la distribution des eaux douces et salées dans la nappe libre de la plaine maritime aux environs de la frontière belgo-française

The evolution of the distribution of fresh and salt water in the phreatic aquifer of the coastal plain around the Belgian-French border

par L. LEBBE (*) (**), K. WALRAEVENS (*) (**), P. VAN BURM (*) et W. DE BREUCK (*)

Résumé. — La nappe libre de la plaine maritime est caractérisée par la présence d'eau salée à des profondeurs variant de moins de 2 m à 25 m. Aux environs de la frontière belgo-française la nappe libre est située dans des dépôts d'âge quaternaire. La base du réservoir est formée par l'argile yprésienne, qui y atteint une épaisseur dépassant les 100 m. L'épaisseur des dépôts quaternaires varie de 35 m sous la plage à 3 m à une dizaine de km vers le sud.

Une investigation, comportant quelques dizaines de forages avec diagraphies, une centaine d'analyses chimiques d'échantillons d'eau, ainsi que des mesures piézométriques ont permis de dresser un tableau de l'écoulement de l'eau souterraine et de son évolution hydrochimique.

Quelques profils sous la plage illustrent clairement les rapports entre le mouvement de l'eau douce et de l'eau salée, aussi bien dans des conditions naturelles que dans des conditions influencées par l'homme, notamment par des captages d'eau dans les dunes. Une coupe hydrogéologique à travers toute la plaine maritime illustre la situation actuelle dans les polders et les dunes. Des modèles mathématiques ont été appliqués à ces phénomènes. Ceux-ci ont permis e.a. de reconstituer l'évolution de la répartition eau douce/eau salée et de préconiser un meilleur système de drainage favorisant un dessalement du sous-sol aussi bien dans les dunes que dans les polders.

Summary. — *The unconfined aquifer in the coastal plain is characterized by the presence of salt water at depths varying between 2 and 25 m. Around the Belgian-French border the unconfined aquifer is located in sediments of Quaternary age. The base of the groundwater reservoir is formed by the Ypresian Clay which has here a thickness of more than 100 m. The thickness of the Quaternary sediments varies between 35 m under the beach and 3 m at 10 km to the south.*

An investigation, containing some tens of borings with borehole loggings, a hundred groundwater analysis and a number of hydraulic head measurements, allows us to describe the groundwater flow and the evolution of the groundwater quality.

A few resistivity profiles under the beach illustrate the relation between the fresh and the salt water flow in natural flow conditions as well as conditions influenced by man as for example the pumpage of groundwater in the dunes. A hydrogeological profile through the coastal plain illustrates the present situation under the polders and the dunes. Mathematical models have been applied to these phenomena. They simulate the evolution of the salt-fresh water distribution and an alternative drainage system which causes a desalinisation of the groundwater reservoir under the dunes and the polders.

I. — INTRODUCTION

Dans le cadre de l'étude de l'intrusion de l'eau salée dans les nappes côtières Custodio (1988) a cité sept cas de tests réels où on a fait un grand nombre d'observations sur le terrain. Parmi ces cas il a cité la nappe de la plaine côtière occidentale de la Belgique. Cette étude a commencé par une prospection géoélectrique d'après la disposition de Wenner (De Breuck *et al.*, 1974). Les résultats de cette prospection

ont permis de dresser une carte des profondeurs de l'interface entre l'eau salée et l'eau douce (fig. 1). L'écoulement et la qualité de l'eau souterraine ont été étudiés en détail dans les dunes à l'ouest de De Panne (Lebbe, 1978). Dans cette étude la répartition de l'eau salée, saumâtre et douce a été détectée par des diagraphies de résistivité et par des analyses chimiques de l'eau. Lors de cette étude il est apparu que sous la plage une lentille d'eau salée se trouvait au-dessus de l'eau douce.

(*) Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie, Institut Géologique, Université de l'Etat à Gand, Krijgslaan 281, B-9000 Gand, Belgique.

(**) Fonds National de Recherche Scientifique (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 phénomène remarquable a été étudié par des forages et des diagraphies de résistivité en disposition de grande normale (Lebbe, 1981, 1983). Ainsi cinq profils de résistivité, perpendiculairement à la côte, ont été relevés. La répartition des différentes eaux, que l'on peut déduire de ces profils, est expliquée par des simulations de l'évolution de la lentille d'eau douce sous les dunes, la plage et la mer.

A l'intérieur de la plaine maritime l'écoulement et la qualité de l'eau souterraine ont aussi été étudiés par des recherches intensives sur le terrain. Le programme comprenait des forages, des diagraphies, des essais de pompage et des mesures du niveau d'eau et de la résistivité de l'eau dans les puits d'observation. A l'aide de ces observations et à l'aide des données paléogéographiques et historiques l'évolution de la répartition de l'eau douce sous les dunes anciennes d'Adinkerke et Ghyvelde et les alentours a été simulée sur ordinateur (Lebbe & Pede, 1985). De cette simulation on peut déduire que l'eau douce, qui s'infiltre dans les polders, est drainée directement dans la partie superficielle de la nappe. L'eau salée dans la partie inférieure de la nappe par contre ne se déplace quasiment pas et ne change guère de qualité. Une méthode alternative de drainage pourrait favoriser un dessalement de la nappe libre. Cette alternative de drainage est simulée par le modèle mathématique.

II. — PROFIL DE RÉSISTIVITÉ A TRAVERS LA PLAINE MARITIME FLAMANDE

Les résistivités sont mesurées par des diagraphies en disposition de grande normale (AM = 1 m, électrode annulaire Ø 40 mm) dans les forages ayant un diamètre qui varie entre 90 et 100 mm. Par conséquent la résistivité apparente ou mesurée correspond presque à la résistivité réelle. Dans le profil de résistivité on distingue sept groupes de résistivité (fig. 2). La résistivité de la zone non saturée et du substratum n'est pas prise en considération. La zone saturée est principalement constituée de sédiments sableux. Pour cette raison le facteur de formation ne change pas beaucoup autour de la valeur moyenne de 3,2. Il existe une relation empirique entre la résistivité de l'eau, ρ_w (en Ωm à la température de 11°C) et la minéralisation totale de l'eau, TDS (en mg/l) :

$$\rho_w = 10\,000/\text{TDS}.$$

La relation entre la résistivité des sédiments, ρ_t (en Ωm), et la minéralisation totale de l'eau, TDS (en mg/l) devient ainsi :

$$\rho_t = 32\,000/\text{TDS}.$$

Ceci permet d'établir un rapport entre les groupes de résistivité des sédiments et les groupes de qualité de l'eau de De Moor & De Breuck (1969) (tableau I).

| Groupe de résistivité | Résistivité des sédiments, ρ_e (en Ωm à 11°C) | Groupe de qualité de l'eau | Résistivité de l'eau, ρ_w (en Ωm à 11°C) | Minéralisation totale (mg/l) |
|-----------------------|--|----------------------------|---|------------------------------|
| G' | > 160 | G, très douce | > 60 | < 200 |
| W' | 160 - 80 | W, douce | 60 - 30 | 200 - 400 |
| V' | 80 - 40 | V, modérément douce | 30 - 15 | 400 - 800 |
| F' | 40 - 20 | F, faiblement douce | 15 - 7,5 | 800 - 1600 |
| A' | 20 - 10 | A, modérément saumâtre | 7,5 - 3,75 | 1600 - 3200 |
| B' | 10 - 5 | B, saumâtre | 3,75- 1,88 | 3200 - 6400 |
| C' | 5 - 2,5 | C, très saumâtre | 1,88- 0,94 | 6400 -12800 |
| S' | 2,5 - 1,25 | S, modérément salée | 0,94- 0,47 | 12800 -25600 |
| Z' | < 1,25 | Z, salée | < 0,47 | > 25600 |

Tableau I. — Relation entre les groupes de résistivité des sédiments et les groupes de qualité de l'eau de De Moor & De Breuck (1969).

Table I. — Relation between the sediment-resistivity groups and the water-quality groups of De Moor & De Breuck (1969).

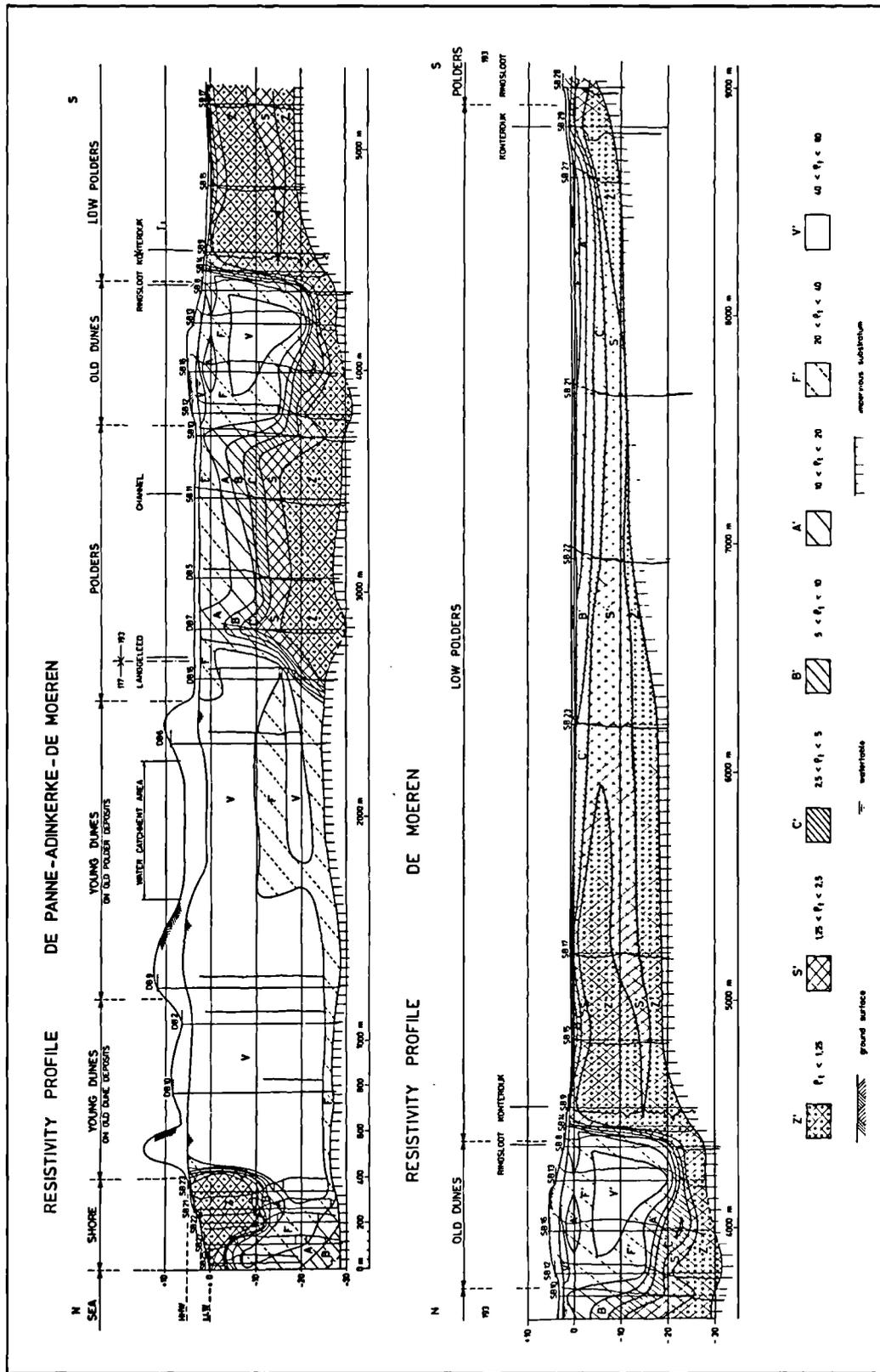


Fig. 2. — Profil de résistivité à travers la plaine maritime près de la frontière belgo-française (Lebbe, 1978 ; Bolle, 1983 et Van Haute, 1984) (ρ_1 est la résistivité des sédiments en Ωm).

Fig. 2. — Resistivity profile through the coastal plain near the Belgian-French border (Lebbe, 1978 ; Bolle, 1983 and Van Haute, 1984) (ρ_1 is the resistivity of the sediments in Ωm).

Le profil de résistivité illustre la répartition des différentes eaux dans la nappe libre. Sous la plage une lentille d'eau salée est trouvée au-dessus de l'eau douce. L'eau salée s'infiltré sur la haute plage pendant les marées hautes. Sous la basse plage il y a un suintement d'eau salée. L'eau douce, que l'on trouve sous l'eau salée et qui s'écoule des dunes vers la mer, devient de plus en plus minéralisée en direction de la mer. A la hauteur de la ligne des marées basses la partie inférieure de la nappe libre contient de l'eau saumâtre.

Dans les dunes récentes une partie de l'eau de pluie alimente la nappe libre. La teneur moyenne en chlorure de l'eau de pluie, mesurée pendant une période de trente mois, était de 12,0 mg/l. La teneur moyenne en chlorure de 27 échantillons d'eau douce, recueillis dans les dunes récentes, était de 32,5 mg/l. De ces valeurs on peut conclure qu'environ 40 % de l'eau de pluie s'infiltré (Lebbe, 1978). Ainsi on a estimé la vitesse d'infiltration à 280 mm par année. Cette vitesse d'infiltration a également été estimée par l'élaboration du bilan d'eau du sol pendant une période de vingt ans (1957-1977) par la méthode de Thornthwaite & Mather (1955) où l'évapotranspiration potentielle a été déduite des données hydrométéorologiques de Koksijde par la méthode de Penman (1952) (Lebbe, 1978). Par cette infiltration d'une partie de l'eau de pluie sous les dunes récentes une lentille d'eau douce y est formée. Cette lentille d'eau douce atteint l'argile yprésienne à une profondeur de trente à quarante mètres. Les dunes récentes peuvent être subdivisées en deux zones : une zone septentrionale située au-dessus des dunes anciennes et une zone méridionale, recouvrant des dépôts de replat sableux. Dans la zone septentrionale la lentille deau douce est plus ancienne que dans la zone méridionale. Ces différences se reflètent dans la minéralisation de l'eau. Dans la zone septentrionale la minéralisation est moins élevée (entre 200 et 500 mg/l) que dans la partie méridionale (entre 400 et 800 mg/l). Près de l'argile yprésienne il y a une zone mince avec de l'eau un peu plus minéralisée.

Dans les polders (le paysage des replats sableux recouverts), entre les dunes récentes de De Panne et les dunes anciennes de Ghyvelde-Adinkerke, l'eau salée se trouve dans la partie inférieure de la nappe libre et l'eau douce dans la partie supérieure. Entre les deux on trouve une zone de transition comprenant de l'eau saumâtre d'une épaisseur moyenne de douze mètres. Sous les canaux de drainage cette zone de transition est plus épaisse et se trouve à des niveaux moins profonds à cause de l'écoulement ascendant. A certains endroits l'eau saumâtre atteint la surface libre.

Dans les dunes anciennes la lentille d'eau douce n'atteint pas l'argile yprésienne ; elle y a une forme asymétrique. A cause du captage d'eau dans la zone septentrionale des dunes anciennes la lentille d'eau douce y est moins épaisse que dans la zone méridionale.

Dans la zone septentrionale des Moères l'eau salée remplit la nappe libre sur toute son épaisseur. L'eau salée que l'on rencontre à partir de la surface libre influence la végétation. Dans la zone méridionale des Moères une mince couche d'eau douce se trouve au-dessus de l'eau saumâtre. Dans cette dernière zone on trouve même de l'eau salée dans la partie inférieure de la nappe libre.

III. — PROFILS DE RÉSISTIVITÉ SOUS LA PLAGE

Cinq profils ont été établis perpendiculairement à la côte (fig. 3). Le premier, K0, est situé à la frontière belgo-française, les autres, K1, K2, K3 et K4 à 1, 2, 3 et 4 km de la frontière (fig. 1). Dans ces profils on peut distinguer trois zones. Une zone avec une résistivité supérieure à 20 Ω m correspond à des sédiments remplis d'eau douce. Une zone avec une résistivité comprise entre 2,5 Ω m et 20 Ω m est constituée de sédiments remplis d'eau saumâtre et une zone avec une résistivité inférieure à 2,5 Ω m comprend des sédiments remplis d'eau salée.

A la frontière belgo-française (profil K0), où l'écoulement naturel de l'eau douce des dunes vers la mer n'est pratiquement pas influencé par le captage d'eau à De Panne, on trouve sous la plage de l'eau salée au-dessus de l'eau douce. Entre l'eau douce et l'eau salée on a une zone d'eau saumâtre. L'épaisseur de celle-ci varie entre deux et six mètres. La zone d'eau douce augmente en épaisseur et l'eau douce devient de plus en plus minéralisée en direction de la mer. Les profils K1 et K2 montrent une répartition de l'eau semblable. Dans la partie inférieure de la nappe libre la minéralisation de l'eau augmente plus vite en direction de la mer. Sous la basse plage on a même un biseau d'eau saumâtre. Dans les profils K3 et K4, devant la partie urbanisée de De Panne et devant le captage d'eau, l'écoulement de l'eau douce vers la mer est très fortement diminué ou même renversé. La répartition des eaux y est complètement différente de celle des autres profils. Sous la haute plage on a seulement un biseau d'eau douce dans la partie inférieure de la nappe libre. Sous la basse plage la nappe libre est complètement remplie d'eau salée et saumâtre.

IV. — MODÈLE MATHÉMATIQUE DE L'ÉVOLUTION DE LA LENTILLE D'EAU DOUCE SOUS LES DUNES, LA PLAGE ET LA MER

L'évolution de la lentille d'eau douce a été calculée d'après le modèle de Konikow & Bredehoeft (1978). Ce modèle bi-dimensionnel a été modifié de telle façon que l'on peut traiter l'écoulement dans un plan vertical en tenant compte des densités différentes de l'eau (Lebbe, 1983). Ce modèle a été testé à plusieurs problèmes qui avaient été traités semi-analytiquement par "la méthode des vortex" (Lebbe, 1984 ; Peters, 1983a et 1983b).

Dans le modèle mathématique on considère un plan vertical à travers les dunes, la plage et la mer (fig. 4). La limite méridionale de ce plan coïncide avec la ligne de partage des eaux souterraines dans les dunes. Pour cette raison cette limite est considérée comme imperméable. La limite inférieure du plan du modèle coïncide avec le substratum de la nappe libre, le sommet de l'argile yprésienne. Cette limite est supposée imperméable. Pour la limite horizontale supérieure différentes conditions de limite sont considérées. La partie située sous les dunes est considérée comme une limite à flux constant d'eau douce. La partie située sous la plage et la mer est considérée comme une limite à potentiel constant. Les valeurs du potentiel introduites sont des moyennes observées sous la

plage et la mer (Lebbe, 1981). La limite septentrionale du modèle est située sous la mer. Elle est également considérée comme une limite à potentiel constant. Comme condition initiale on suppose que la nappe est complètement remplie d'eau salée. Au temps initial on suppose que la mer n'inonde plus les nouvelles dunes et que l'eau douce commence à s'infiltrer à une vitesse de 280 mm/an. Premièrement l'évolution naturelle de la lentille d'eau douce est calculée pour une période de cinq cents années. Les résultats des calculs de l'évolution naturelle sont donnés dans la figure 4. Dans cette figure les potentiels d'eau douce sont représentés par des lignes d'égale valeur, les vitesses darciennes de l'eau par des vecteurs et la qualité de l'eau par des lignes d'égale pourcentage d'eau douce.

De la figure 4 on peut déduire la croissance de la lentille d'eau douce sous les dunes, la plage et la mer. Dès le commencement on voit apparaître une languette d'eau sau-

mâtre sous la plage. A travers les âges cette languette s'accroît et descend vers la partie inférieure de la nappe, pendant que le noyau devient graduellement plus doux. Après 320 années la partie inférieure de la nappe est devenue douce. Dans la partie supérieure de la nappe il y a un petit cycle d'eau salée qui s'écoule de la haute plage vers la basse plage. Cette lentille d'eau salée au-dessus de l'eau douce est typique pour un estran à pente douce avec des marées plus ou moins considérables où le sol est perméable et où il y a un écoulement souterrain modéré d'eau douce vers la mer.

Partant du stade final obtenu par la simulation précédente on peut simuler l'influence d'un captage d'eau. Dans cette simulation on suppose qu'on pompe 26 % de la quantité d'eau douce qui s'infiltré dans les dunes pendant la première période quinquennale, 53 % pendant la deuxième période quinquennale et 105 % dès la fin de la dixième année de pompage.

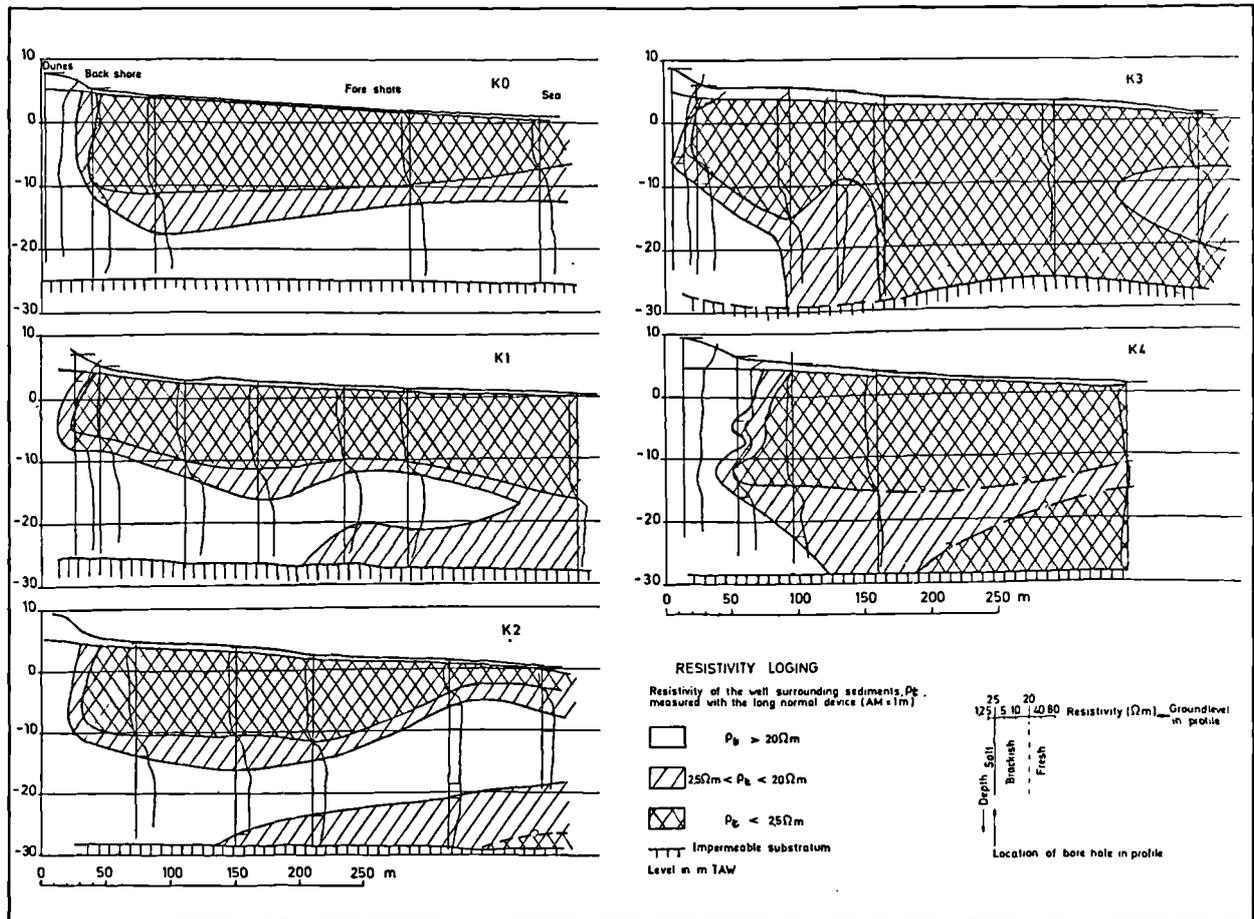


Fig. 3. — Les profils de résistivité sous la plage à De Panne (Lebbe, 1981).

Fig. 3. — Resistivity profiles underneath the shore at De Panne (Lebbe, 1981).

Le captage d'eau douce est situé autour de la ligne de partage des eaux souterraines et dans la partie supérieure de la nappe. Dans la figure 5 les mailles où on pompe sont indiquées par un petit cercle. De cette figure on peut déduire que la lentille d'eau salée sous la plage s'accroît dès que l'on commence à pomper et que l'écoulement d'eau douce vers la mer diminue. Au moment où la quantité pompée dépasse le volume d'eau infiltrée dans les dunes l'eau salée commence à s'écouler vers le captage, au même niveau que l'on pompe. Puisque la vitesse d'écoulement d'eau salée vers le captage est initia-

lement faible et puisque le mouvement descendant de l'eau salée est plus grand, l'intrusion d'eau salée descend. Après un laps de temps l'intrusion d'eau salée poursuit son chemin vers le captage d'eau dans la partie inférieure de la nappe. Au plus près que cette intrusion s'approche du captage, au plus vite elle s'approche de celui-ci.

Dans ce cas le danger de salinisation de la nappe ne dépend pas du niveau moyen de la mer, comme on peut déduire de la littérature (Todd, 1980 ; Bear, 1979 ; etc.), mais dépend

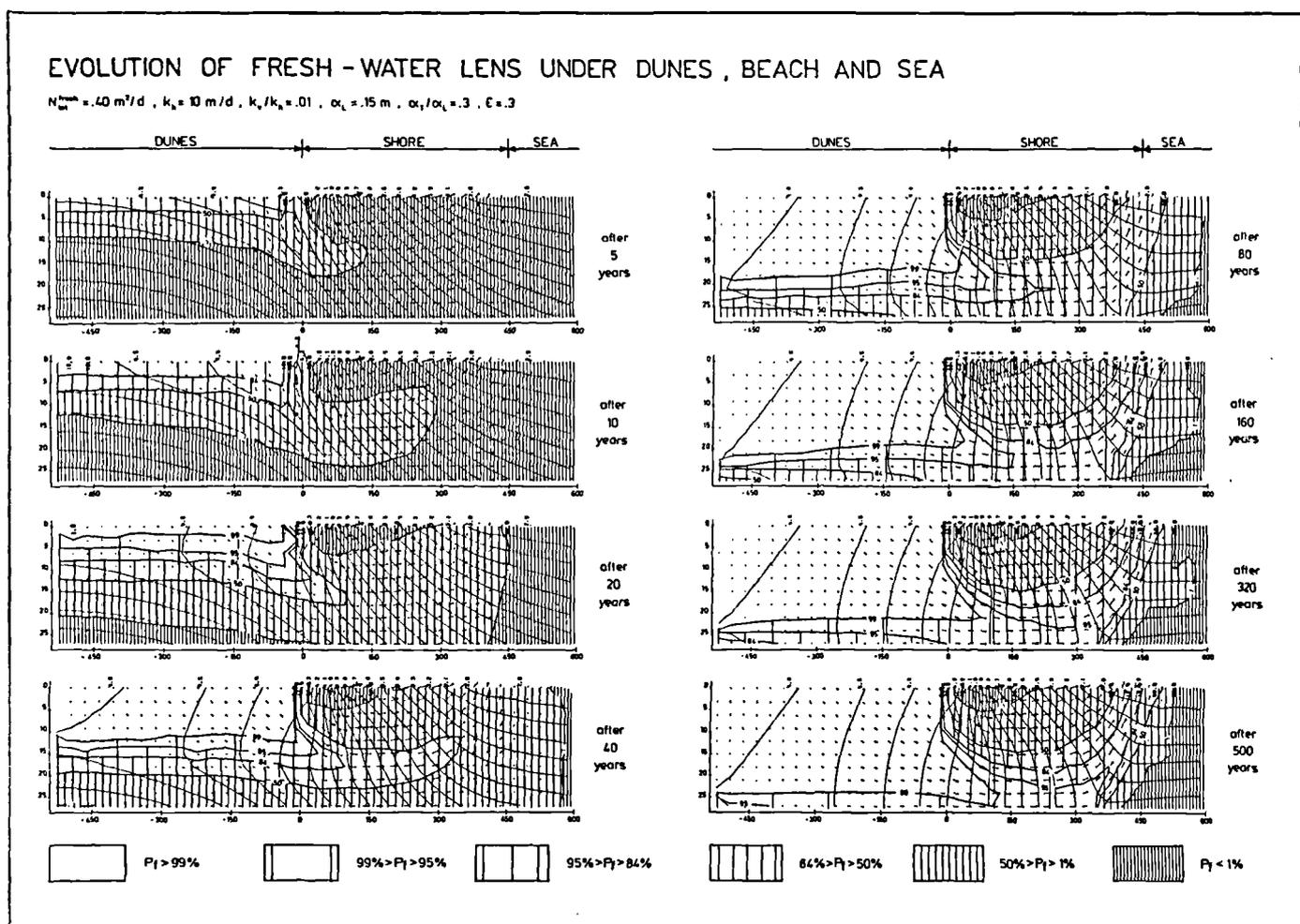


Fig. 4. — Evolution naturelle de la lentille d'eau douce sous les dunes, la plage et la mer calculée d'après le modèle de Konikow & Bredehoeft (1978) qui est modifié pour des densités différentes de l'eau (Lebbe, 1983b).

Fig. 4. — Natural evolution of the fresh-water lens underneath the dunes, shore and sea as calculated with the model of Konikow & Bredehoeft (1978) which was modified so that density-difference effects can be taken into account (Lebbe, 1983b).

de la localisation de la ligne des hautes marées, le niveau et la durée des marées hautes, de la stratification du réservoir souterrain et de la perméabilité verticale et horizontale des couches (Lebbe, 1983). L'intrusion d'eau salée à De Panne est donc due au fait que l'on pompe trop près de la mer avec un débit trop élevé et sur un terrain trop peu étendu.

V. — DRAINAGE ALTERNATIF DES POLDERS

A partir des dunes récentes vers l'intérieur on peut distinguer différents paysages dans la plaine maritime (Moorman, 1951). Du nord au sud on distingue d'abord le paysage des replats sableux recouverts, où les sédiments de l'assise

de Calais se trouvent à faible profondeur, après les dunes anciennes entre Adinkerke et Ghyvelde et après les Moères qui sont des asséchages. Ces paysages se trouvent de part et d'autre de la frontière belgo-française.

Sur la base de recherches intensives sur le terrain comprenant des forages, des diagraphies, des essais de pompage et des mesures du niveau d'eau et de la résistivité d'eau dans les puits d'observation et sur la base de données paléogéographiques et historiques l'évolution de la répartition d'eau douce sous les dunes anciennes d'Adinkerke-Ghyvelde et les alentours a été simulée (Lebbe & Pedé, 1985). Il en résulte que l'eau douce, qui s'infiltré dans les polders, est drainée directement dans la partie superficielle de la nappe. L'eau

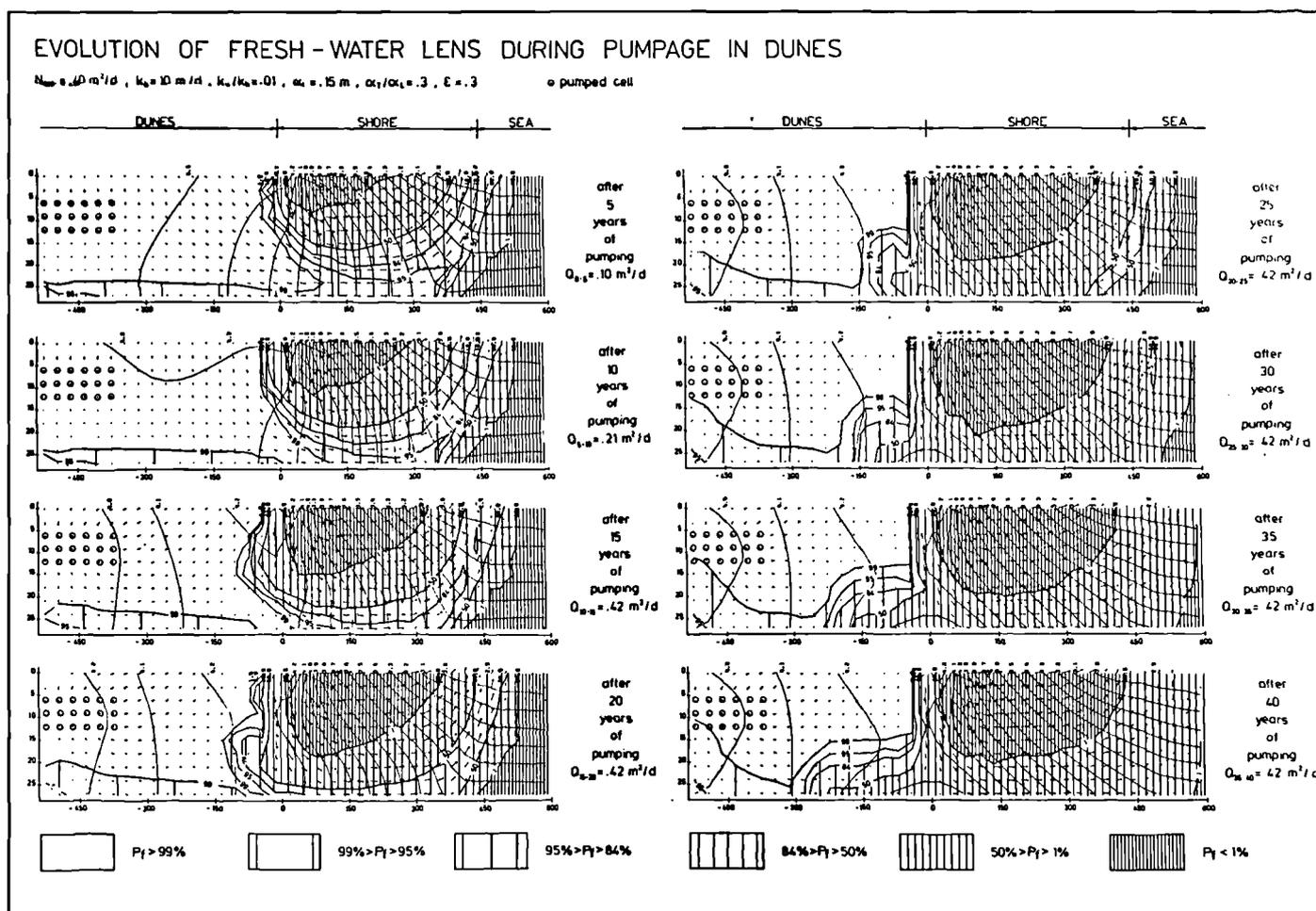


Fig. 5. — Evolution de la lentille d'eau douce sous les dunes, la plage et la mer pendant une surexploitation d'eau douce dans les dunes (Lebbe, 1983b).

Fig. 5. — Evolution of the fresh-water lens underneath the dunes, the shore and the sea during an overpumpage in the dunes (Lebbe, 1983b).

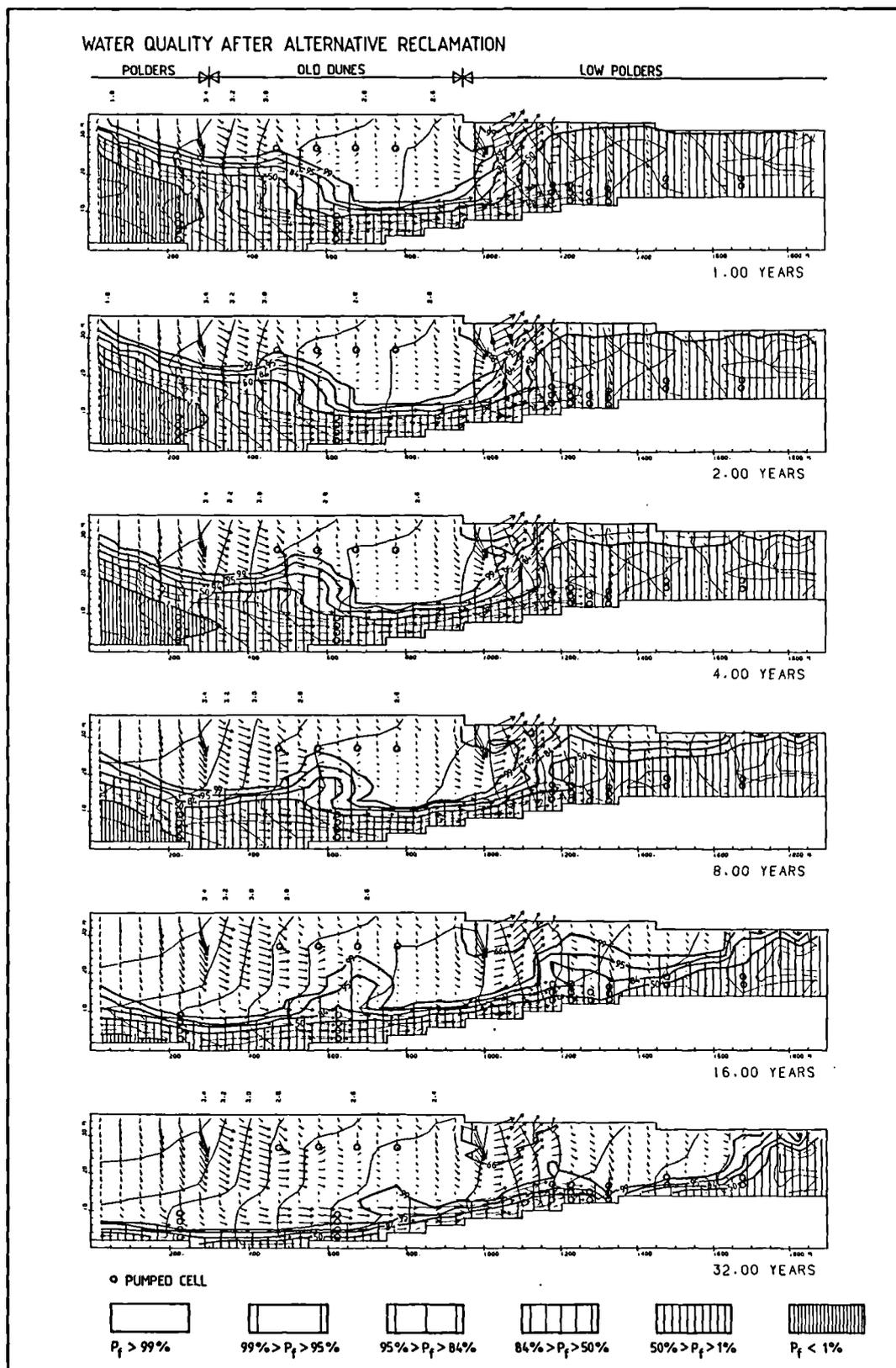


Fig. 6. — Evolution de la distribution des eaux et de l'écoulement dans la nappe phréatique sous les dunes anciennes d'Adinkerke-Ghyvelde et les alentours dès le début d'un drainage alternatif des polders (Van de Walle, 1986).

Fig. 6. — Evolution of the distribution and the flow of fresh and salt water underneath the old dunes of Adinkerke-Ghyvelde and the surroundings starting with an alternative drainage of the polders (Van de Walle, 1986).

salée dans la partie inférieure de la nappe ne bouge presque pas et ne change guère de qualité. Les captages dans des petites lentilles d'eau douce, comme on en trouve sous les dunes anciennes d'Adinkerke-Ghyvelde, provoquent une salinisation à court terme. L'eau salée, présente dans la partie inférieure de la nappe, limite le captage d'eau douce de cette lentille.

Une méthode alternative de drainage des Moères au moyen de puits filtrants placés dans la partie inférieure de la nappe pourrait contribuer à l'évacuation de cette eau salée et au développement de la lentille d'eau douce. L'évacuation de l'eau salée provoquerait un courant descendant dans les polders et en conséquence une infiltration d'eau douce dans la partie inférieure de la nappe. Le pompage d'eau salée permettrait en même temps le contrôle des niveaux de drainage. Après un certain temps on pourrait capter de l'eau douce dans les polders pendant que l'on contrôlerait le niveau de drainage par ce captage.

Les résultats d'une simulation illustrent cette idée de drainage alternatif. Dans ce modèle bidimensionnel on considère un plan vertical à travers le paysage des replats sableux recouverts, les dunes anciennes et la partie septentrionale des Moères. Le réservoir y est constitué de dépôts quaternaires reposant sur un substratum formé par l'argile yprésienne. L'épaisseur varie entre 18 et 36 m. La partie inférieure du réservoir est composée de sable moyen à grossier. Sous la partie méridionale des dunes anciennes la partie inférieure est constituée par un banc de coquilles très perméable. La partie supérieure du réservoir est pour la plus grande partie composée de sable moyen à fin. Entre ces deux couches il y a une couche semi-perméable discontinue. Les perméabilités horizontales des couches perméables et les perméabilités verticales des couches semi-perméables sont déterminées par plusieurs essais de pompage (Van Haute, 1984 ; De Vos, 1985 ; Van de Walle, 1986).

Dans le modèle la limite inférieure coïncide avec le substratum de la nappe libre et est supposée comme imperméable. La limite verticale septentrionale est aussi supposée imperméable car on suppose que l'on pompe avec un même débit aux deux côtés de cette limite. La limite verticale méridionale est supposée comme une limite à potentiel constant. La limite supérieure du modèle est considérée comme une limite à flux constant de l'eau douce à une vitesse de 280 mm/an. Sous les Moères quelques mailles de cette dernière limite ont un potentiel constant.

Comme condition initiale on admet que la répartition de l'eau douce est celle obtenue par la simulation de l'évolution

naturelle, qui correspond d'ailleurs fort bien avec la répartition observée (fig. 2). Pour cette simulation de drainage alternatif on pompe l'eau salée de la partie inférieure de la nappe. Les mailles où on pompe l'eau sont indiquées par un petit cercle (fig. 6). On suppose également que l'on pompe de l'eau douce dans la partie supérieure de la nappe sous les dunes anciennes.

Les résultats de la simulation (fig. 6), exprimés en potentiel d'eau douce, vitesse darcienne et qualité de l'eau sont représentés comme décrit au paragraphe 4. Il en apparaît que la réserve d'eau douce s'accroît sous les polders. Après 32 années presque toute la nappe libre contient de l'eau douce. Seulement près du substratum une mince couche d'eau saumâtre subsiste. Dans la plus grande partie des polders le courant d'eau douce est descendant avec exception de la partie septentrionale des Moères où le courant reste ascendant comme à l'heure actuelle, quoique la vitesse de l'écoulement a beaucoup diminué. Cette simulation démontre clairement que l'on peut dessaler une nappe assez perméable dans un laps de temps relativement court.

VI. — CONCLUSION

Sous la plage près de la frontière belgo-française il y a une lentille d'eau salée au-dessus de l'eau douce. Sous la plage devant la partie urbanisée et le captage d'eau de De Panne il y a seulement un biseau d'eau douce sous la haute plage dans la partie inférieure de la nappe libre tandis que sous la basse plage la nappe libre y est complètement remplie d'eau salée et d'eau saumâtre. Une simulation par modèle mathématique a démontré que cette dernière répartition est due à une surexploitation de la réserve d'eau douce des dunes.

Dans les polders l'eau douce, qui s'infiltre, est directement drainée par la partie supérieure de la nappe. L'eau salée dans la partie inférieure de la nappe ne bouge presque pas et ne change guère de qualité. Les captages dans des petites lentilles d'eau douce sous les polders et sous les dunes anciennes d'Adinkerke-Ghyvelde, provoquent une augmentation rapide des chlorures de l'eau captée. L'eau salée, qui se trouve déjà depuis des siècles dans la partie inférieure de la nappe dans les polders, empêche le captage de quantités importantes d'eau douce. Le pompage d'eau salée par des puits filtrants dans la partie inférieure de la nappe permettrait d'accroître la réserve d'eau douce et en même temps de contrôler le niveau de drainage. La réserve d'eau ainsi constituée pourrait même être exploitée après un temps relativement court.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BEAR J. (1980). — Hydraulics of groundwater. 569 p. New York, Mc Graw-Hill.
- 2) BOLLE I. (1983). — Hydrogéologie van de Binnenduinen van Adinkerke en aangrenzende gebieden. 112 p. Gand : Institut Géologique, Université d'Etat (Thèse de licence inédite).
- 3) CUSTODIO E. (1988). — Present state of coastal aquifer modelling : short review in CUSTODIO *et al.* (eds.). *Groundwater Flow and Quality Modelling*, 785-801. Dordrecht, D. Rudel Publishing Company.
- 4) DE BREUCK W., DE MOOR G., MARECHAL R. & TAVERNIER R. (1974). — Profondeur de la surface de séparation entre l'eau douce et l'eau salée dans la nappe libre de la région côtière belge (1963-73). *SWIM4*, annexe-carte.
- 5) DE MOOR G. & DE BREUCK W. (1969). — De freatische waters in het Oostelijk Kustgebied en in de Vlaamse Vallei. *Natuurwet. Tijdsch.*, 51, 3-68.
- 6) DE VOS M. (1985). — Bijdrage tot de hydrogéologie van De Moeren (Veurne) en omliggende gebieden. 137 p. Gand : Institut Géologique, Université d'Etat (Thèse de licence inédite).
- 7) KONIKOW L.F. & BREDEHOEFT J.D. (1978). — Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground-water. *U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Inv.*, Book 7, Chap. C2, 90 pp.
- 8) LEBBE L. (1978). — Hydrogéologie van het duingebied ten westen van De Panne. 164 p. Gand : Institut Géologique, Université d'Etat (Thèse de doctorat inédite).
- 9) LEBBE L. (1981). — The subterranean flow of fresh water and salt water underneath the western Belgian coastal plain. Proceedings of the 7th Salt Water Intrusion Meeting. Uppsala. *Sver. Geol. Unders. Rap. Meddel.*, 27, 193-219.
- 10) LEBBE L. (1983). — Mathematical model of the evolution of the fresh water lens under the dunes and beach with semi-diurnal tides. Proceedings of the 8th Salt-Water Intrusion Meeting, Bari. *Geologica Applicata e Idrogeologica*, Vol. XVIII, Parte II, 211-238.
- 11) LEBBE L. (1984). — Numerische simulatie van grondwaterkwaliteitsproblemen als hulp bij het beheer van de watervoorraden in het Vlaamse kustgebied. *Tijdschrift BECEWA*, nr. 76, 67-88.
- 12) LEBBE L. & PEDE K. (1986). — Salt-fresh water flow underneath old dunes and low polders influenced by pumpage and drainage in the western Belgian coastal plain. *Proceedings of the 9th Salt Water Intrusion Meeting*, Delft, 199-220.
- 13) MOORMANN F.R. (1951). — De bodemgesteldheid van het Oudland van Veurne Ambacht. *Natuurwet. Tijdschr.*, 33, 3-124.
- 14) PENMAN H.Z. (1952). — The physical basis of irrigation control. *Proceedings of the 13th international horticulture Congress*, London, 2, 913-924.
- 15) PETERS J.H. (1983a). — The movement of fresh water injected in salaquifers. Proceedings of the 8th Salt Water Intrusion Meeting, Bari. *Geologica Applicata e Idrogeologica*, Vol. XVIII, Parte II, 145-155.
- 16) PETERS J.H. (1983b). — De stroming van zoet en zout grondwater in een "confined aquifer" berekend met vortexbeleggingen. *Keuringsinstituut Waterleidingsartikelen KIWA, N.V., SWE*, 83002, 1-42.
- 17) TORNTHTWAITE C.W. & MATHER J.K. (1955). — The water balance *Publ. in Climatol.*, VIII, 1, 1-104.
- 18) TODD D.K. (1980). *Groundwater Hydrology*. Second edition. 535 p. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- 19) VAN DE WALLE L. (1986). — Modelstudie gesteund op waarnemingen van stijghoogten en kwaliteit van het grondwater in De Moeren en de Binnenduinen (De Panne - Veurne). 154 p. Gand : Institut Géologique, Université d'Etat (Thèse de licence inédite).
- 20) VAN HAUTTE E. (1984). — Hydrogéologie van De Moeren en de Binnenduinen van Adinkerke. 69 p. Gand : Institut Géologique, Université d'Etat (Thèse de licence inédite).

Protection des nappes - Evacuation des eaux pluviales d'une nouvelle zone urbaine par infiltration : Y a-t-il systématiquement antagonisme ?

The groundwater preservation - The rainwater draining by percolation within new urban area : is it systematically antagonistic ?

par Marcel JOURNEZ (*) et Henri MAILLOT (**)

Sommaire. — La commune d'Annœullin, située au S-W de Lille, a été autorisée à se développer par son Plan d'Occupation des Sols approuvé (POS pour le reste de l'article).

Une Zone d'Aménagement Concertée de 35 ha (ZAC pour le reste de l'article) prévoit, pour la première phase, la construction de 390 logements sur 21 ha.

L'évacuation des eaux pluviales au moment de l'approbation du POS n'a fait l'objet d'aucune étude.

Cette ZAC se situe, dans un secteur de forte vulnérabilité, à l'amont de la nappe de la craie des grands champs captants des Ansereuilles servant à l'alimentation en eau potable d'une grande partie de l'agglomération lilloise.

Lors de l'étude de l'assainissement de la ZAC, il s'avéra que les réseaux de proximité étaient à saturation.

Il n'y avait donc pas d'exutoire proche pour les eaux pluviales. L'infiltration était donc la solution à leur évacuation.

Pour assurer cette fonction dans les meilleures conditions, les dispositifs suivants ont été retenus :

- décantation lamellaire des particules $> 50 \mu\text{m}$ pour les pluies jusqu'à une fréquence de $T = 1$ an ;
- décantation des pluies pour une fréquence $T > 1$ an dans le bassin de rétention étanché et fonctionnant en eau ;
- infiltration alternée dans 2 bassins dont le fond a été recouvert de 1 m de sable propre.

Summary. — *The town of Annœullin is situated to the S-W of the Lille conurbation. Its local plan (referred to as P.O.S. from now on) designates an area of land of 35 ha as the site for a new Development Scheme (Z.A.C.).*

The original local plan did not go into such specific questions as the drainage of rain-water but this Z.A.C. is to be sited in an extremely vulnerable area : it lies upstream of the water-bearing chalk-bed underlying the catchment area from which the water-supplies for the greater part of Lille are obtained.

Moreover the existing rain-water drainage around the site has reached saturation point and no outlet can be found in the vicinity.

The answer therefore, if the rain-water is to be drained off, is to allow it to infiltrate the ground.

The following devices will be used in order to achieve this aim in the most satisfactory way :

- *A settling-chamber fitted with lamellar grids, designed to trap sediments over $50 \mu\text{m}$ and take in normal rainfall (i.e. with period of recurrence $< \text{one year}$) ;*
- *A water-tight settling-basin kept partly filled with water and used in the case of more exceptional rainfall (i.e. with a period of recurrence $> \text{one year}$) ;*
- *Two infiltration-basins used alternately, each with a three-foot sandbed at the bottom.*

(*) Cellule Eau-Environnement, DDE du Nord, 44, rue de Tournai, 59014 Lille Cedex (jusqu'au 31/12/1989).

B & R Conseils, 291, bd Clemenceau, 59700 Marcq-en-Barœul (depuis le 1/01/1990).

(**) Cycle Urbain de l'Eau et Pollution des Eaux, EUDIL, 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.

La commune d'Annœullin située à environ 20 km au S-W de Lille et à 2 km au S du Canal de la Deûle, s'est développée essentiellement autour du carrefour constitué par les CD 41 et 39 (voir plan de situation). Le POS approuvé a prévu une densification au S-E (zone artisanale) et au S-W. C'est dans ce secteur que la ZAC de la Haute-Voie doit être réalisée (fig. 1).

I. — PRÉAMBULE

Le POS qui détermine le devenir des sols d'une commune et qui, une fois approuvé, est opposable aux tiers, comporte un règlement.

Celui-ci définit les règles urbanistiques bien sûr, mais aussi tout ce qui a trait à la concrétisation des intentions du POS.

C'est ainsi que l'article U.A.4. — desserte par les réseaux — prévoit, à l'alinéa 3, pour l'assainissement, les stipulations suivantes :

« ... b) Eaux pluviales. Les aménagements réalisés sur tout terrain doivent être tels qu'ils garantissent l'écoulement des eaux pluviales dans le réseau collectant ces eaux. En l'absence de réseaux, les aménagements réalisés sur tout terrain ne doivent pas faire obstacle au libre écoulement des eaux de ruissellement... ».

Ce sont les seules obligations techniques réglementaires.

II. — PRÉSENTATION DE LA ZAC DITE DE LA "HAUTE VOIE" ET DE SON SITE D'IMPLANTATION

1) Importance

La surface totale de cette ZAC sera d'environ 35 ha, dont 21 ha pour la première tranche qui comportera, à terme, 390 logements (soit 1 000 à 1 200 habitants).

2) Localisation

Elle sera implantée sur un plateau crayeux. Son altitude moyenne est voisine de la cote + 25 NGF.

3) Géologie

Recouvertes par une faible épaisseur de limons quaternaires, en partie décalcifiés (ergeron), les craies blanches sénoniennes altérées (marnettes) sont généralement rencontrées à moins de 2 m de profondeur.

L'épaisseur totale des craies du Sénonien et du Turonien supérieur (voir coupe schématique fig. 2) est voisine de 63 m. Les dièves du Turonien moyen constituent le mur imperméable de la nappe de la craie.

L'ensemble du secteur considéré est intéressé par une gouttière synclinale orientée de Seclin vers Wavrin et s'incurvant vers le S en direction de la fosse des Ansereuilles. Globalement, le pendage des couches crayeuses sous Annœullin est orienté vers le N. Des failles d'orientation S-W/N-E affectent le S de la zone intéressée (Pont-à-Vendin - Le Bac de Wavrin).

4) Hydrogéologie

La zone saturée présente une épaisseur moyenne de 40 m, la surface piézométrique peu profonde était située en Mai 1986 vers 13 m de profondeur.

Les importants pompages de l'eau de la craie réalisés aux Ansereuilles dépriment fortement la nappe de la craie et conduisent à une forte modification de la piézométrie naturelle qui déborde largement des limites de la fosse des Ansereuilles.

Sous la ZAC, l'écoulement de la nappe s'effectue vers le N-E avec un gradient d'environ 5 % et une transmissivité estimée voisine de 10^{-2} m²/s.

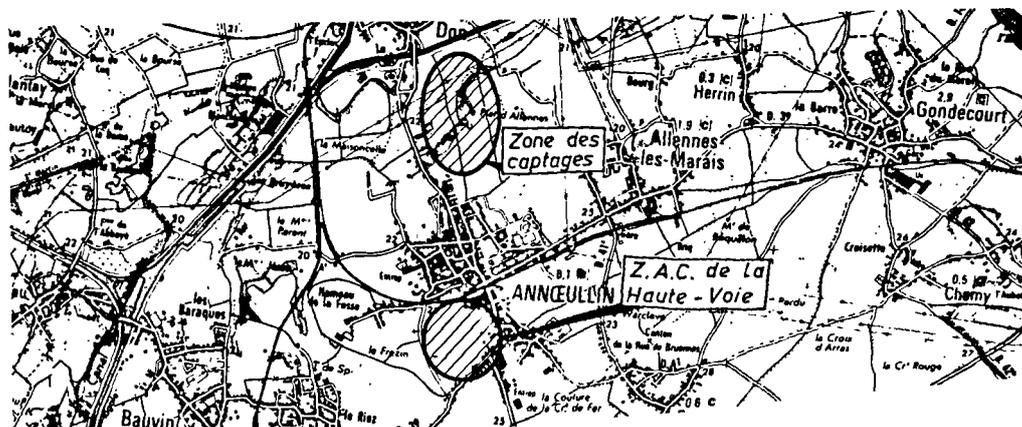


Fig. 1

La nappe est libre, elle le reste sous le champ captant des Anseveilles S (Forages, F 17 à F 24) alors qu'elle devient semi-captive sous les alluvions de la Deûle où les résultats d'une modélisation mathématique suggèrent une drainance en système semi-perméable.

L'eau de la nappe de la craie bénéficie alors de conditions anoxiques favorables aux transformations chimiques importantes, parmi lesquelles on peut citer la dénitrification.

Au total, la ZAC de la Haute Voie à Annœullin est implantée à l'amont de la nappe des grands champs captants des Anseveilles, dans un secteur de forte vulnérabilité de la nappe de la craie, s'expliquant par la quasi-absence du recouvrement, l'altération des têtes de banc de craie en zone non saturée, associées à la faible profondeur du toit de la nappe.

III. — ÉVACUATION DES EAUX DE LA ZAC

1) Problème à résoudre

La desserte des 390 logements de la première tranche de la ZAC se fera par réseaux séparatifs (secteur entièrement neuf).

a) Eaux usées (EU)

La station d'épuration implantée à Annœullin même et alimentée par les réseaux existants permet d'opter pour la collecte gravitaire et le refoulement vers les réseaux de proximité de la ZAC.

Ceci n'était possible que sous la double condition suivante :

- réseaux de collecte EU de la ZAC parfaitement étanches ;
- vigilance extrême au moment des branchements, afin d'éviter les inversions.

b) Eaux pluviales (EP)

Les débits d'EP calculés sur la période d'occurrence décennale, pour cette première tranche, sont d'environ 0,700 m³/s. Suite à une étude menée au moment où la ZAC

prenait forme (1984), il s'est avéré que les réseaux EP de la commune étaient, pour la période d'occurrence précitée, presque à saturation.

Sous peine de travaux importants (la Deûle est située à environ 2 km) venant grever lourdement la charge foncière de la ZAC, l'évacuation de ces eaux n'était donc possible que par infiltration. Cette option était envisageable et même séduisante, du fait même de la faible profondeur à laquelle la craie se rencontrait. Elle posait, néanmoins, le problème de la protection de la nappe contre tout risque raisonnable de pollution.

Pollution potentielle des eaux pluviales

Dans le cas de réseaux séparatifs, la seule source de pollution prévisible est celle provenant du lavage des chaussées. En effet, les différents résidus de la circulation automobile (HC*, métaux lourds — Pb, Zn, Fe, Cu, Cd, Cr, DCO**, MES***) s'accumulent jusqu'à l'arrivée de la pluie, selon la loi suivante (1) :

$$A\% = 1 - e^{-kt} \quad k = 0,2 = \text{Coef. MANING} \\ t = \text{durée de l'épisode sec}$$

Toujours selon ces auteurs (1), la cinétique d'entraînement des particules est fonction de l'équation suivante :

$$E\% = 1 - e^{-kh} \quad h = \text{hauteur de pluie tombée sur Dt}$$

Il ressort de l'examen de la courbe engendrée par cette équation que 85 % de la pollution accumulée est entraînée par les 10 premiers millimètres de pluie.

De nombreux travaux ont démontré (2) que les pollutions d'origine routière étaient essentiellement adsorbées sur les particules supérieures à 50 µm.

Evacuation de l'eau pluviale

La détermination du volume d'un bassin de rétention dépend, les paramètres de surface et de nature de sol de la zone à desservir étant fixés, du débit de fuite.

(*) HC = Hydrocarbures.

(**) DCO = Demande Chimique en Oxygène.

(***) MES = Matières En Suspension.

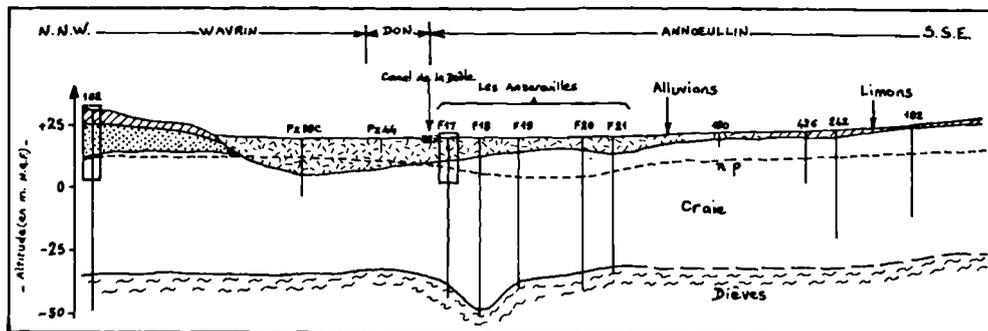


Fig. 2. — Coupe schématique [in (5)]

Dans la craie, selon différents résultats d'essais et constats réalisés, in situ, les vitesses d'infiltration de l'eau peuvent varier entre $50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$ et $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$. Cette variation est induite par la présence éventuelle de failles ou de résidus d'une décantation due à de la rétention-infiltration.

La valeur retenue ($1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{j}$) est celle constatée par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie sur un site expérimental (3).

Le débit de fuite retenu (10 l/s) était conditionné par la surface d'infiltration de 750 m^2 représentant le compromis raisonnable « surface de terrain mis à disposition pour l'évacuation des eaux et volume de rétention ».

2) Dispositifs retenus

a) Eaux usées

• Lors des travaux. — Le réseau du type "étanchéité renforcée" sera suivi de très près par le maître d'œuvre (DDE 59 - Subdivision de Seclin).

La réception des ouvrages se fera par inspection télévisée mais aussi par essais d'étanchéité à l'eau.

• Après la mise en service. — Un contrat de maintenance particulier sera passé entre le SIASOL (Syndicat d'assainissement du S-W de Lille qui doit reprendre dans son patrimoine les ouvrages) et la SEN (Société des Eaux du Nord, compagnie fermière) afin de surveiller les éventuelles erreurs de branchement.

b) Eaux pluviales

Ainsi qu'il l'a été vu au paragraphe III-1 b), le lavage des chaussées génère une pollution dont l'essentiel est adsorbé aux particules supérieures ou égales à $50 \mu\text{m}$.

Le dispositif proposé (fig. 3) a donc eu pour objectif d'arrêter les particules supérieures ou égales à cette dimension.

Il était composé de :

1° Un décanteur lamellaire capable d'arrêter, d'un point de vue théorique, les particules supérieures ou égales à $100 \mu\text{m}$ pour un débit de 350 l/s .

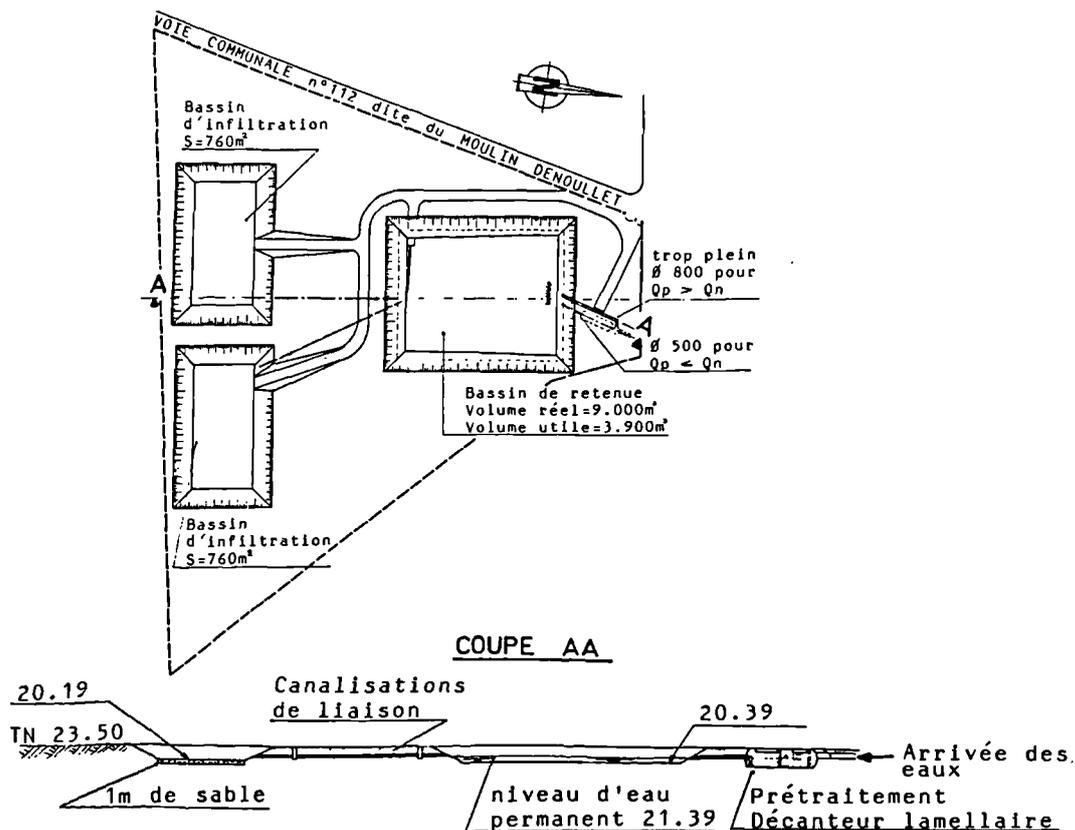


Fig. 3

Le débit a été limité, volontairement à 175 l/s, dans un double objectif :

- accroître le rendement du décanteur du point de vue de la taille des particules,
- faciliter, de ce fait, l'entretien général.

Ce débit de 175 l/s représente le débit de la période d'occurrence annuelle, soit plus de 95 % des pluies répertoriées. Ceci permet de penser que la majorité des événements pluviaux capables d'engendrer les pollutions évoquées au paragraphe III-1 b, par lavage des chaussées, transitera par ce dispositif.

A noter qu'à l'intérieur du décanteur, un dispositif bloquerait la sortie de l'eau en cas d'accumulation intempestive des HC.

2° *Un bassin de rétention*, étanché par le système "Colé-tanche", avec un fonctionnement prévu "en eau".

En effet, le débit supérieur à celui admis dans le décanteur lamellaire arrive sans traitement dans le bassin de rétention. Cet artifice permet de mobiliser toute la surface du bassin pour assurer une décantation complémentaire. Dans cette optique le fond du bassin a été dressé de la même façon qu'un décanteur de station d'épuration.

3° *Deux bassins d'infiltration*, recouvert chacun de 1 m de sable de rivière propre. Leur fonctionnement est prévu en alternance.

Cette précaution est indispensable.

En effet, au bout de quelque temps la capacité d'infiltration du sable est ralentie par le développement d'un film biologique (3). Il est probable que le sable se comporte comme

un lit bactérien à très faible charge ; l'oxygène nécessaire à ce type de fonctionnement étant celui dissous dans l'eau (4).

IV. — PROBLÈMES POSÉS

1) Administratifs

Il conviendrait que les annexes techniques des POS fassent l'objet d'une réflexion afin que le devenir des sols n'amène pas au moment de la réalisation des équipements autorisés des problèmes d'ordre financier importants et (ou) techniques très difficiles à résoudre.

2) Techniques

- Ainsi qu'il l'a été vu, en particulier au paragraphe III, des interrogations subsistent qui ne pourront être levées que par un constat des rendements en décantation et en épuration prévus.

- Les problèmes posés par la réalisation de la ZAC ont permis également de mettre en exergue l'importance cruciale des captages des Ansereuilles. Ce fait, connu bien sûr des spécialistes, a été pris en compte par les décideurs locaux.

Une étude diagnostique a donc été menée par le bureau Saunier-Environnement. Ses conclusions ont mis en évidence l'impact de l'assainissement des Communes du secteur sur la dégradation des eaux souterraines (nitrates).

D'importants travaux devront être réalisés par le SIASOL, syndicat d'assainissement ayant co-financé cette étude avec l'Agence de l'Eau, afin de participer activement à la lutte contre l'augmentation du taux de nitrates dans les eaux souterraines.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) MM. ODDOS et BENNETON (1978, CETE de Lyon).
- 2) Pour le détail complet de la bibliographie, voir le document DRCR - SETRA de décembre 1980.
- 3) Etude de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie sur le site de Flesselles - Somme.
- 4) L'épuration biologique des eaux résiduaires - F. EDELIN.
- 5) Modélisation des écoulements souterrains et transferts de masse - Rapport de synthèse - 87SGN378NPC du BRGM (32 pages et 11 planches hors texte).

Modélisation hydrodynamique des nappes aquifères du socle paléozoïque et du Landénien dans les Flandres belges et française

Hydrodynamic model of the aquifers in the Basement Complex and the Landenian deposits in Belgian and French Flanders

par K. WALRAEVENS (*) (**), P. VAN BURM (*), M. VAN CAMP (*),
L. LEBBE (*) (**), M. DE CEUKELAIRE (*) et W. DE BREUCK (*)

Résumé. — Un modèle mathématique simulant l'écoulement dans les nappes aquifères du Landénien et du Socle paléozoïque a été établi. L'alimentation de ces nappes se fait dans les parties méridionales les plus élevées, qui sont en grande partie recouvertes par l'argile yprésienne. En condition naturelle, l'écoulement horizontal dans les deux nappes est graduellement retardé en conséquence de l'écoulement vertical ascendant dans les régions les plus basses. Les pompages ont profondément changé l'écoulement. Le calage du modèle a démontré que les débits de pompage connus sont sous-estimés de 18 % pour le Massif du Brabant et de 70 % pour le Landénien.

Les données disponibles se sont trouvées insuffisantes pour la déduction des paramètres hydrauliques à l'aide d'un modèle inverse. Il faudra encore des recherches de terrain, afin de préciser les estimations des paramètres hydrauliques et d'améliorer le modèle dans l'avenir.

Abstract. — A mathematical model has been developed for simulating the groundwater flow in the Basement Complex and the overlying Landenian aquifer. Both aquifers are being fed in the southern, relatively high region, where they are most often covered by a thick layer of Ypresian clay. In natural conditions, the horizontal groundwater flow in both aquifers is gradually retarded due to the ascending vertical flow in the lower regions. Groundwater withdrawal has substantially changed the flow pattern. Model calibration has shown the reported discharges to be underestimated by 18 % for the Brabant Massif of the Basement Complex, and by 70 % for the Landenian aquifer.

The available data have proven to be insufficient for the deduction of the hydraulic parameters by means of an inverse model. New field tests will be necessary, so as to define the values of the hydraulic parameters more accurately, and to improve the model in future.

I. — INTRODUCTION

La surexploitation de la nappe captive du Socle paléozoïque en Belgique constitue un problème depuis des dizaines d'années. Le niveau piézométrique de cette nappe s'abaisse continuellement (p. ex. à Waregem, fig. 1). Une exploitation poursuivie au régime actuel conduira à l'épuisement des ressources et à la détérioration de la qualité de l'eau. Les industries du textile et alimentaires dépendantes de ces eaux souterraines en ressentiront les conséquences.

C'est dans ce contexte qu'en 1985 le Ministre de la Communauté flamande responsable a confié une étude hydrogéologique du Socle paléozoïque au Laboratoire de Géolo-

gie Appliquée et d'Hydrogéologie de l'Université de Gand. Le rapport final de la modélisation mathématique a été remis en septembre 1987 (Lebbe *et al.*, 1987). L'hydrochimie de cet aquifère a été interprétée sur la base de l'écoulement d'eau (Van Camp *et al.*, 1989 ; Walraevens *et al.*, 1989).

II. — APERÇU GÉOLOGIQUE

La région étudiée (fig. 2) s'étend de l'Escaut occidental et la Mer du Nord jusqu'à l'affleurement du Landénien dans le sud. Cette limite méridionale passe par Calais, St-Omer, Béthune, Lille, d'où elle se poursuit selon une direction ouest-est. La région étudiée est de l'ouest à l'est comprise entre Calais et Alost.

(*) Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie, Institut Géologique, Université de l'Etat à Gand, Krijgslaan 281, B-9000 Gand, Belgique.

(**) Fonds National de Recherches Scientifiques (Belgique).

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

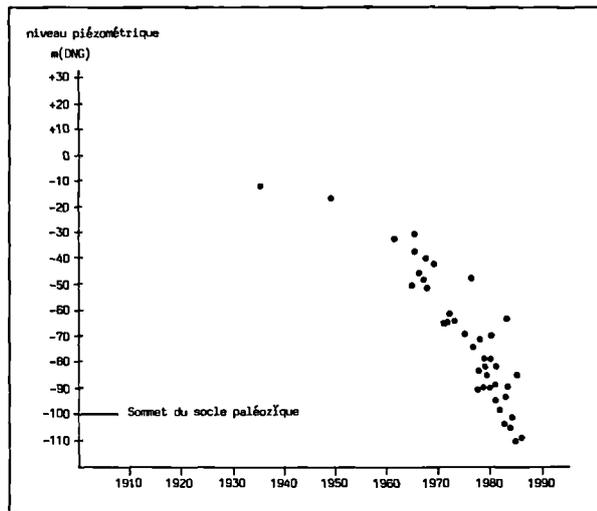


Fig. 1. — Evolution du niveau piézométrique dans le socle à Waregem.

Fig. 1. — Evolution of the piezometric head in the Basement Complex at Waregem.

| Stratigraphie | Schématisation | Résistance hydraulique (jours par mètre de dépôt) | Conductivité hydraulique horizontale (mètres par jour) |
|--------------------------------|----------------|---|--|
| Quaternaire Sables néogènes | Couche 6 | | 4 |
| Argile rupélienne | Couche E | 10 000 | |
| Sables rupéliens et tongriens | Couche 5 | | 3 |
| Argile bartonienne | Couche D | 8 000 | |
| Sables lédopaniséliens | Couche 4 | | 2,77 |
| Argile panisélienne | Couche C | 10 000 | |
| Sable yprésien | Couche 3 | | 2 |
| Argile yprésienne | Couche B | 160 000 | |
| Sable landénien | Couche 2 | | 2 |
| Argile landénienne Crétacé | Couche A | 32 000 | |
| Socle paléozoïque | Couche 1 | | variable |

Tableau I. — Schématisation et paramètres hydrauliques introduits dans le modèle mathématique.

Table I. — Schematisation and hydraulic parameters used in the mathematical model.

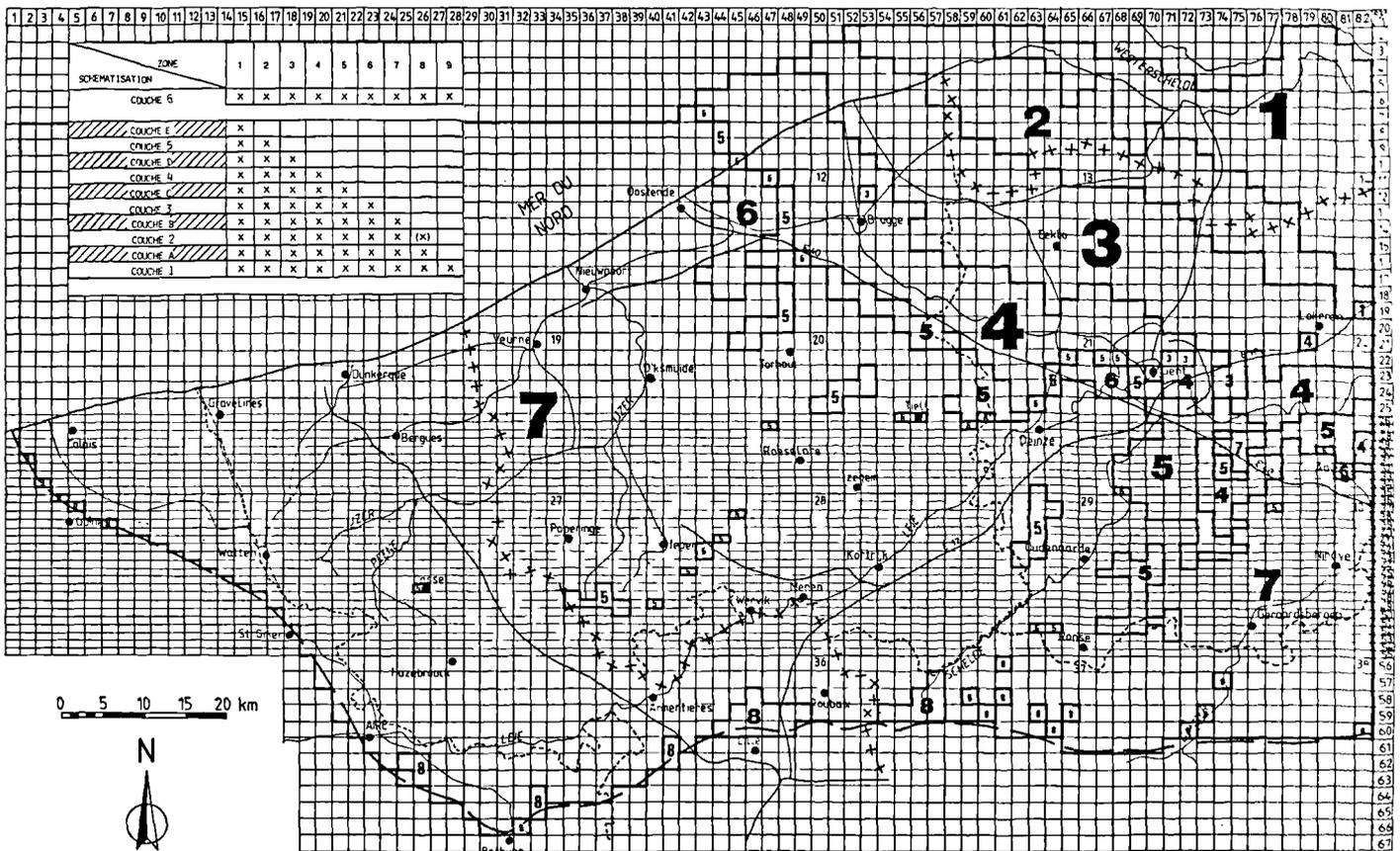


Fig. 2. — Maillage du modèle mathématique et zonation hydrogéologique.

Fig. 2. — Mathematical model network and hydrogeological zonation.

Le Socle paléozoïque dans la région étudiée est composé du Massif du Brabant et, dans le sud central, du Calcaire carbonifère. Dans la plus grande partie de la région le Socle est recouvert de dépôts plus jeunes (fig. 2 et 3). De bas en haut on distingue (tableau I) : les dépôts du Crétacé, l'argile et le sable landéniens, l'argile et le sable yprésiens, l'argile et le sable paniséliens, le sable lédien, l'argile bartonienne, les sables tongrien et rupélien, l'argile rupélienne, les sables néogènes, et finalement les dépôts du Quaternaire. Les couches tertiaires s'inclinent légèrement vers le NNE. Par suite, du sud au nord, on rencontre des dépôts progressivement plus jeunes affleurant sous le Quaternaire (fig. 2).

III. — MODÉLISATION

1) Recherche antérieure

Déjà en 1971, Mania a fait un premier essai de simulation de l'écoulement dans la nappe landénienne. Son modèle analogue électrique était nécessairement bidimensionnel. L'idée ancienne que l'argile yprésienne serait imperméable et que l'alimentation des nappes pourrait seulement se faire dans leur zone d'affleurement, était favorable à une telle approche.

Actuellement on admet que la perméabilité des argiles, quoique très petite, peut être significative, et ne doit pas être négligée. Un pas en avant sur le modèle de Mania (1971) consiste par conséquent en la considération de la troisième dimension.

2) Modèle mathématique et maillage

L'écoulement dans le réservoir a été simulé à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel à différence finie, développé au Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie (Lebbe *et al.*, 1985). Pour des raisons de calcul, on a simplifié le problème en traitant le réservoir d'une façon quasi tridimensionnelle : uniquement les couches perméables sont introduites comme des couches dans le modèle ; les couches semi-perméables sont seulement considérées comme des horizons intercalés. Les conséquences de cette schématisation sont que l'on réduit à moitié le nombre de couches qu'on introduit dans le modèle, et que l'on considère seulement le courant horizontal dans les couches perméables et uniquement le courant vertical dans les couches semi-perméables.

Le maillage adopté est représenté en fig. 2. Il est composé de 83 colonnes et de 67 lignes. Toutes les mailles ont une longueur de 2 km. Dans le nord et dans le sud les mailles

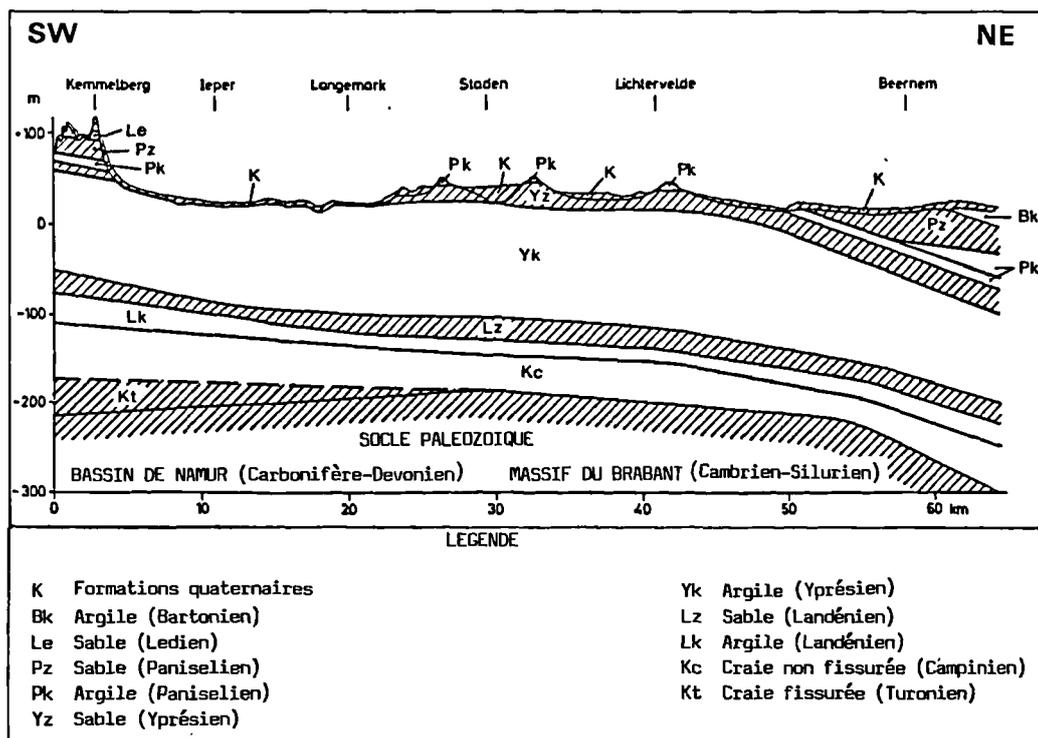


Fig. 3. — Coupe géologique à travers la Flandre Occidentale.

Fig. 3. — Geological cross-section through West-Flanders.

ont une largeur de 2 km, dans la partie centrale elles ont 1 km de largeur. La région considérée comprend une surface de 12.464 km².

3) Schématisation du réservoir

Afin de simuler mathématiquement l'écoulement dans la nappe aquifère du Socle paléozoïque, il est indispensable de considérer également les dépôts supérieurs. Le sous-sol des Flandres belges et française a été subdivisé en six couches perméables (le Quaternaire, l'Oligocène, le Lédéo-Panisélien, l'Yprésien, le Landénien et le Socle) (tableau I), isolées entre elles par des couches semi-imperméables. La partie supérieure du Socle est la couche inférieure du modèle. On admet une limite imperméable en-dessous de cette couche. Au-dessus on considère le Crétacé et l'argile landénienne comme une seule couche semi-perméable malgré la présence de quelques horizons perméables dans les dépôts du Crétacé. L'espace

de temps réduit prévu pour la modélisation mathématique de l'écoulement n'a toutefois pas permis de distinguer les parties aquifères du Crétacé.

Le modèle mathématique compte avec la distribution spatiale de l'épaisseur des différentes couches.

4) Conditions aux limites

Les conditions aux limites de la région modélisée doivent être spécifiées pour chaque couche perméable.

Pour le Socle, en condition sans pompages, on a admis que les quatre limites soient imperméables. En condition de pompage on suppose un écoulement non négligeable à travers la limite méridionale à la suite des prélèvements importants du Calcaire carbonifère particulièrement perméable ; on a choisi une condition à potentiel fixe pour la limite méridionale entre les colonnes 42 et 70. Le potentiel fixe (env. — 40 m) a été dérivé d'après De Roubaix *et al.*, (1979).

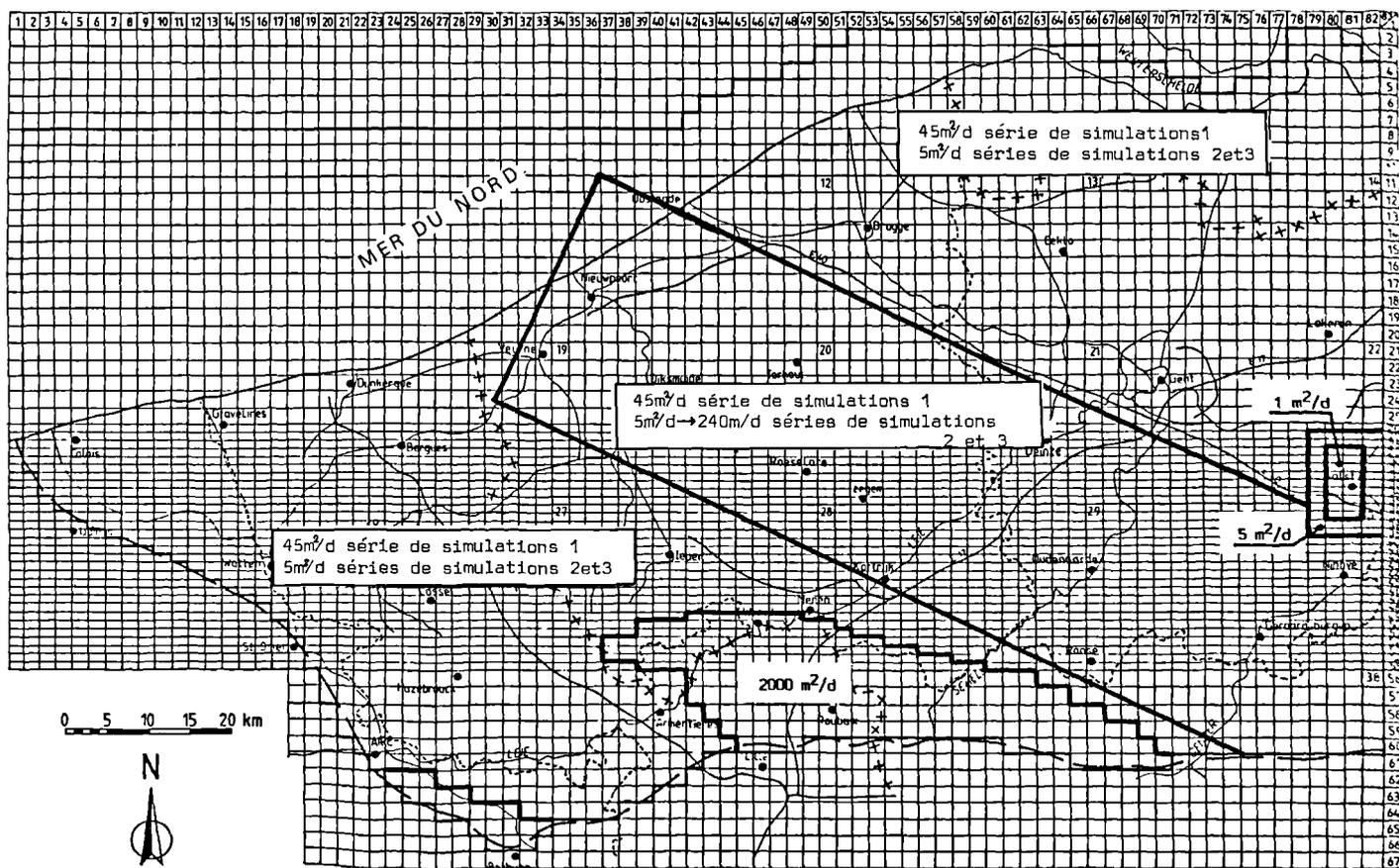


Fig. 4. — Transmissivité du Socle dans les trois séries de simulations.

Fig. 4. — Transmissivity of the Basement Complex in the three series of simulations.

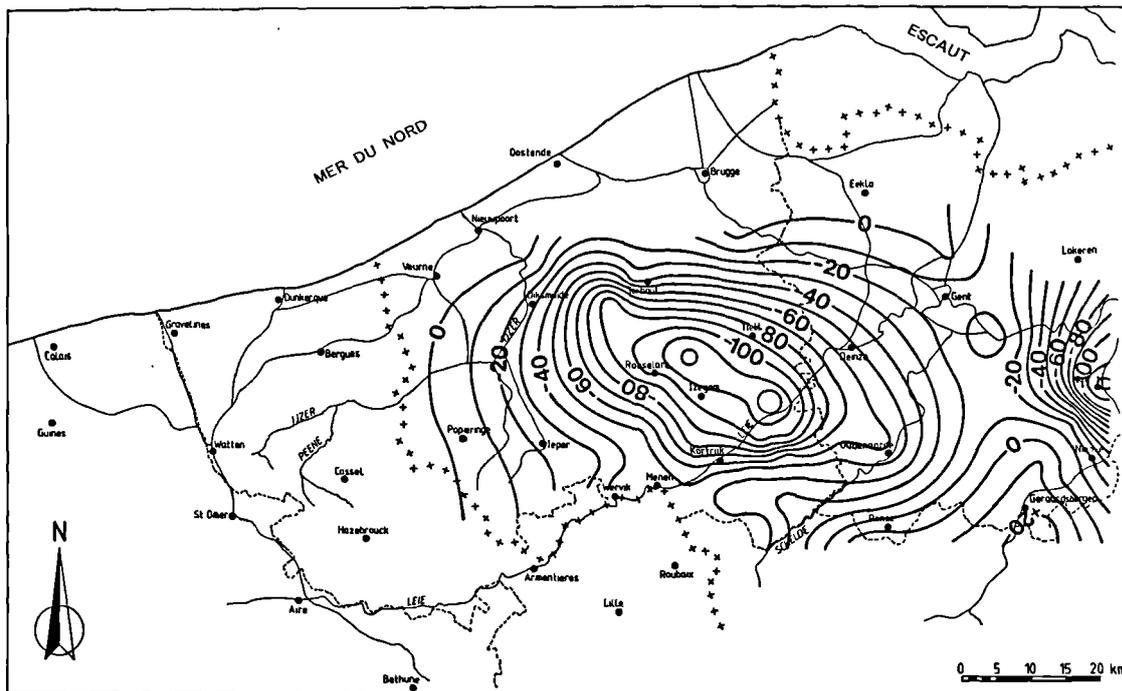


Fig. 5. — Courbes piézométriques du Socle en mai 1986 (en m DNG = Deuxième Nivellement Général).
 Fig. 5. — Piezometric head in the Basement Complex in May 1986 (in m DNG = Second General Leveling).

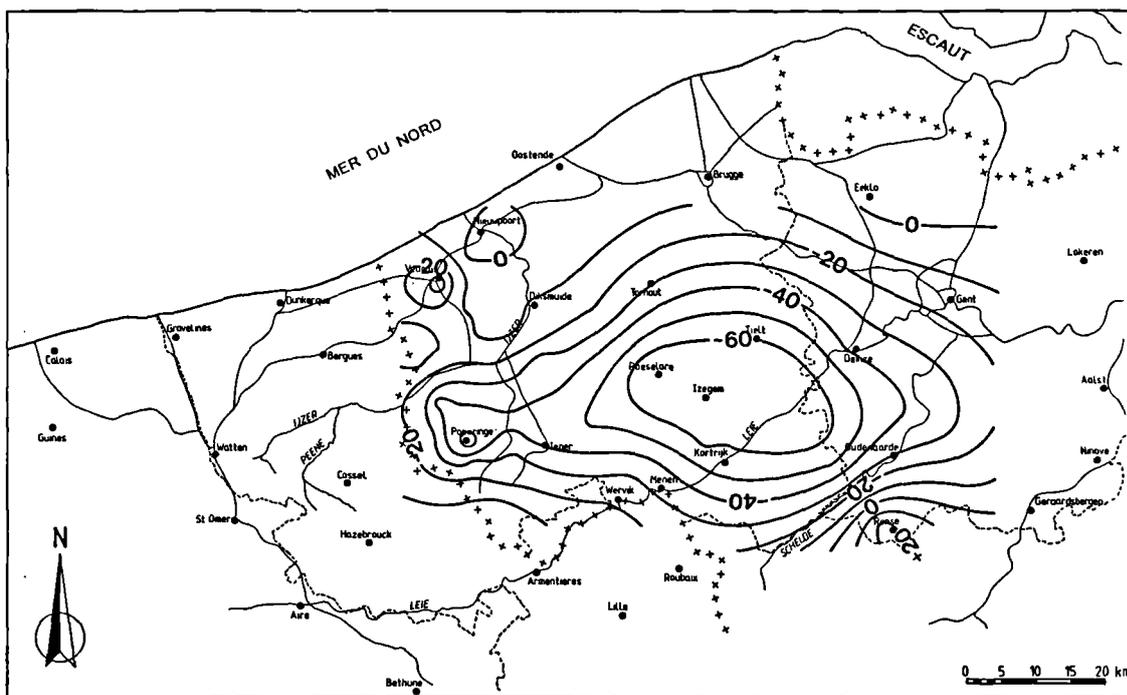


Fig. 6. — Courbes piézométriques du Landénien en mai 1986 (en m DNG).
 Fig. 6. — Piezometric head in the Landénien aquifer in May 1986 (in m DNG).

l'écoulement naturel a été basée sur des mesures piézométriques anciennes. L'écoulement actuel a été simulé à l'aide de levés piézométriques de 1986 dans le Socle et dans le Landénien (fig. 5 et 6 ; Lebbe *et al.*, 1988). Les débits totaux soustraits aux deux nappes et à la nappe lédo-panisélienne pendant l'année 1986 ont été calculés d'après les données enregistrées (tableau II).

Le même ensemble de paramètres hydrauliques produisait des résultats acceptables tant pour la situation avec, que pour celle sans pompages : la simulation de l'écoulement en conditions naturelles fournissait des cartes piézométriques en accordance avec les mesures très anciennes ; la simulation dans laquelle les pompages enregistrés étaient considérés, produisait des cartes piézométriques qui approchent la situation actuelle. Seulement très localement, de grands écarts ont paru. Dans certaines régions les observations indiquent des cônes de dépression importants, tandis qu'il n'y a pas de pompa-

ges enregistrés. C'est évident que des données indispensables manquent dans ces régions. D'ailleurs, c'est bien connu que des prélèvements importants dans le Socle existent dans la région Roulers-Ardoois-Kortemark, où une industrie alimentaire impressionnante s'est développée autour du marché-gare de Roulers. Les chiffres enregistrés des pompages dans cette région constituent sans aucun doute une forte sous-estimation du débit prélevé. Dans la partie occidentale de la Frandre Occidentale les porcheries sont de grandes utilisatrices de l'eau landénienne ; de nombreux prélèvements n'ont jamais été déclarés.

Les écarts très localisés entre les données et les calculs ont été éliminés en adaptant les débits prélevés dans ces régions (fig. 7). Ainsi il a fallu augmenter les valeurs des débits totaux de 70 % pour le Landénien et de 18 % pour le Massif du Brabant. Dans la région de Roulers - Ardoois - Kortemark le captage réel dans le Socle s'élève à quatre fois le débit connu (tableau III) !

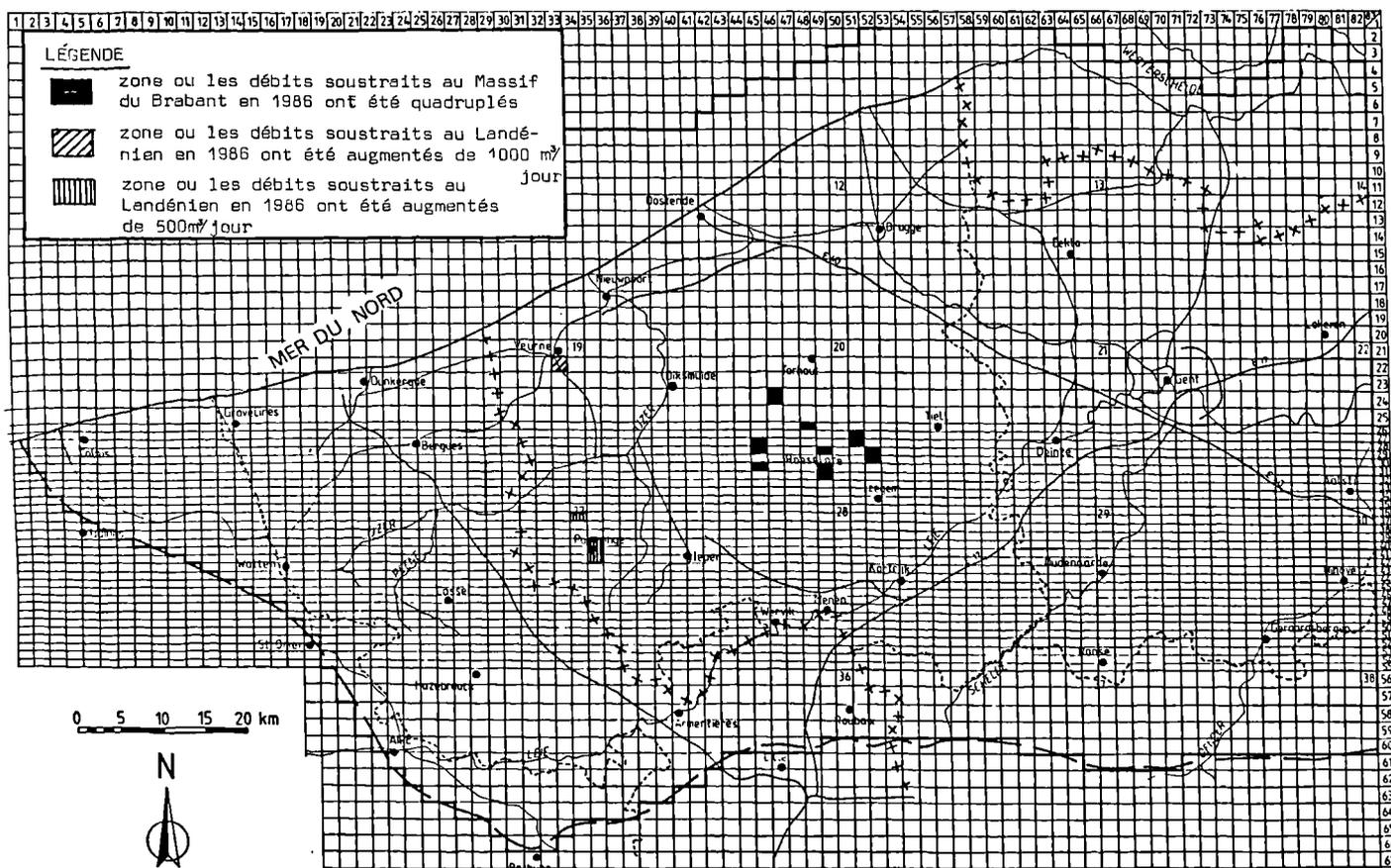


Fig. 7. — Adaptation des débits prélevés du Massif du Brabant et du Landénien en 1986.
 Fig. 7. — Adaption of the discharge rates of the Brabant Massif and the Landénien in 1986.

7) Résultats des simulations

Seulement les résultats de la première série de simulations (pour le Massif du Brabant homogène et isotrope) seront donnés ci-après.

L'écoulement naturel dans le Socle et dans le Landénien ont été calculés (fig. 8, 9 et 10). Les figures 8 et 9 montrent

| SOCLE (couche 1) | | LANDENIEN (couche 2) | |
|------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| PLANCHE 203 | 778 545 m ³ /an | PLANCHE 194 | 384 820 m ³ /an |
| 204 | 2 641 | 274 | 230 864 |
| 207 | 832 405 | 281 | 646 960 |
| 208 | 225 158 | | |
| 215 | 1 647 606 | | |

Tableau III. — Débits totaux estimés pour 1986, soustraits aux nappes du Socle et du Landénien pour les planches où il a fallu augmenter les débits enregistrés pendant la simulation (pour les autres planches les débits ont été tenus constants).

Table III. — Estimated total discharge rates for 1986, taken from the aquifers in the Basement Complex and the Landenian deposits, for the maps where it was necessary to augment the registered discharge rates during the simulation (for the other maps the discharge rates were held constant).

les courbes piézométriques dans le Socle et le Landénien respectivement. Les flèches indiquent la direction de l'écoulement dans l'aquifère. Les deux figures se ressemblent beaucoup. Les cotes sont les plus hautes dans les régions à la topographie la plus élevée, c'est-à-dire dans la partie sud-est. De là, le courant se dirige vers le nord-ouest. Les zones hachurées de la fig. 10 montrent l'infiltration dans le Landénien à travers l'argile yprésienne. Ces zones à écoulement descendant sont les régions les plus élevées : une large bande oblongue à direction SW-NE, qui s'étend de St-Omer à Cassel, Poperinge et Ypres et alors s'écarte vers Roulers et Tielt, l'interfluve entre la Lys et l'Escaut, celui entre l'Escaut et la Dendre et la région au sud-est de Grammont. Dans ces zones l'infiltration annuelle se monte le plus souvent à moins de 10 m³ par ha. Seulement sous le Mont Cassel, aux environs du Mont Kemmel et localement entre l'Escaut et la Dendre, l'infiltration est plus grande. Dans les zones non hachurées de la fig. 10, il existe un courant ascendant du Landénien vers les couches sus-jacentes, à travers l'argile yprésienne. Ceci est le cas dans les grandes vallées, notamment celles de la Lys, de l'Escaut et de la Dendre, dans la région littorale, au nord des Flandres belges et en Flandre zélandaise. Cet écoulement ascendant s'élève généralement à moins de 2 m³ par ha par an. Pour toute la région, l'écoulement descendant et l'écoulement ascendant s'élèvent tous les deux à 2,5 millions de m³ par an.

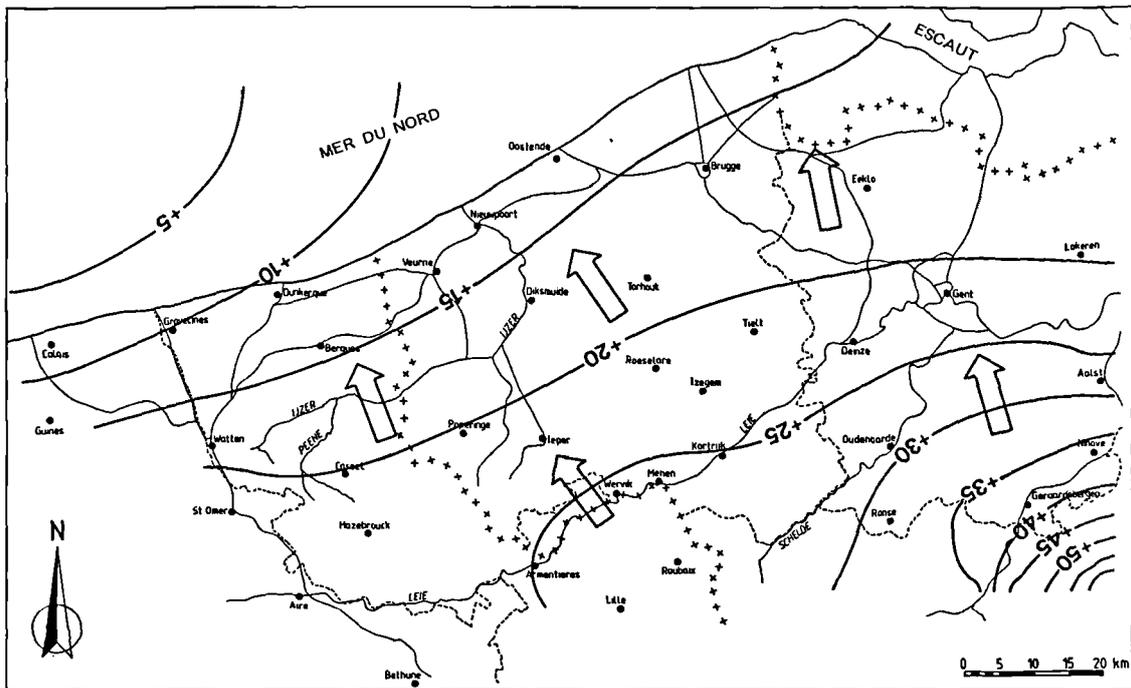


Fig. 8. — Niveaux piézométriques du Socle calculés (situation naturelle) (en m DNG).

Fig. 8. — Calculated piezometric head in the Basement Complex (natural situation) (in m DNG).

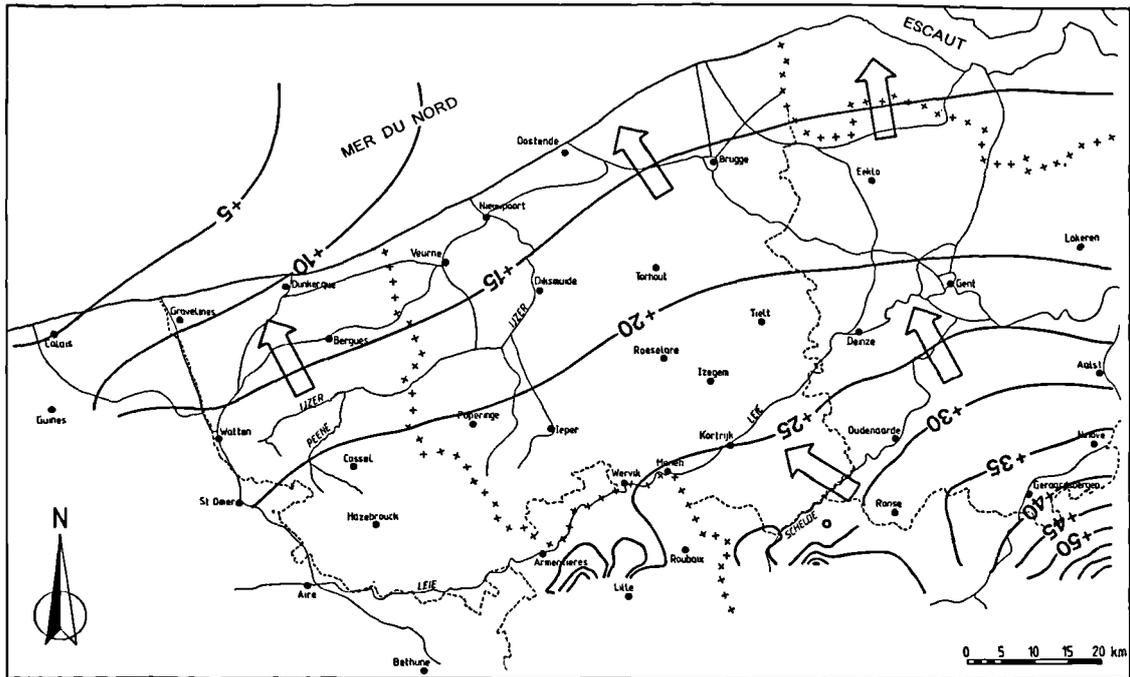


Fig. 9. — Niveaux piézométriques du Landénien calculés (situation naturelle) (en m DNG).

Fig. 9. — Calculated piezometric head in the Landenian aquifer (natural situation) (in m DNG).

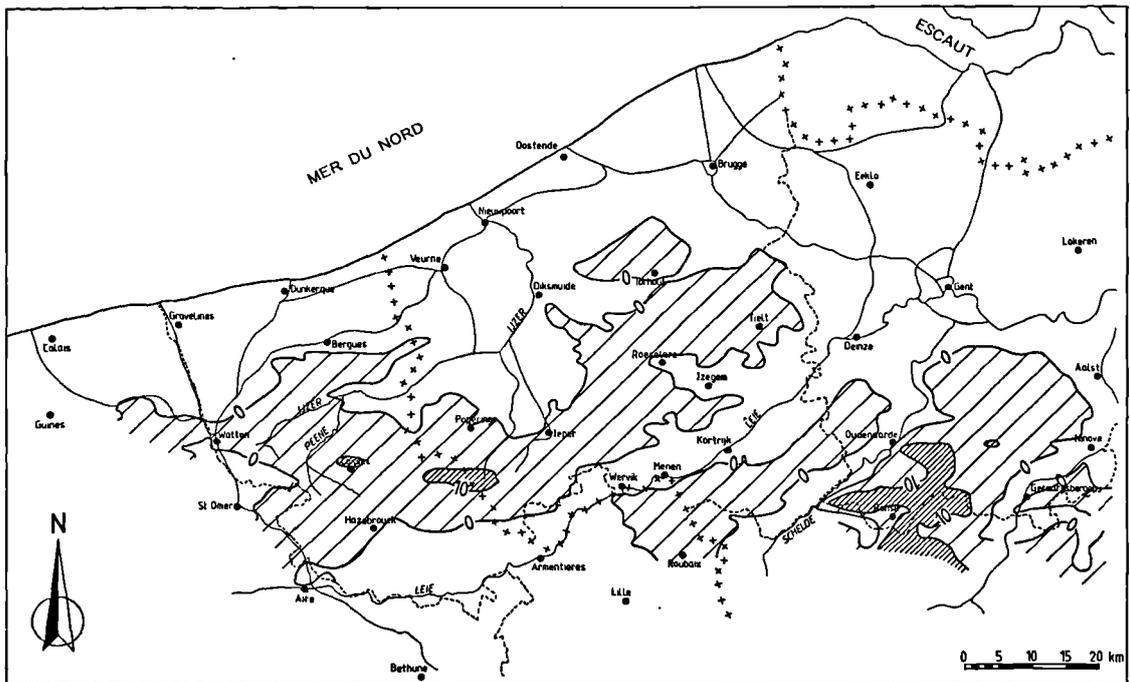


Fig. 10. — Ecoulement à travers l'argile yprésienne (situation naturelle) (en $m^3/ha/an$).

Fig. 10. — Vertical flow through the Ypresian clay (natural situation) (in $m^3/ha/year$).

La situation actuelle est tout à fait différente (fig. 11, 12 et 13). Les pompages ont fait apparaître des cônes de dépression importants. Il existe maintenant une alimentation dans presque toute la région, même dans les vallées de la Lys, l'Escaut et la Dendre. L'infiltration annuelle se monte actuellement à 10 m³ par ha dans une grande partie de la région, et à 18 millions de m³ pour toute la région.

8) Injection artificielle dans le Massif du Brabant

Le modèle mathématique établi a permis de calculer l'influence sur le niveau piézométrique d'injections artificielles. Une injection de 1 million m³ par an dans le cône de dépression le plus important fait monter le niveau piézométrique de 10 m à une distance de 6 km du point d'injection. Une injection d'environ 4,4 millions m³ par an, en partie près de Roulers, en partie entre Courtrai et Audenaarde (fig. 14) produirait une montée de 10 m à Bruges, Eeclo et Renaix.

9) Réflexions

Le premier objet des simulations était de montrer l'importance des écoulements verticaux à travers les couches semi-

perméables pour l'alimentation du Socle. Ceci signifie un progrès substantiel sur le modèle de Mania (1971).

Deuxièmement, on espérait acquérir la compréhension des valeurs des paramètres hydrauliques du Socle et des couches sus-jacentes, partant des données existantes de la piézométrie et des débits prélevés. Il s'est avéré néanmoins que les données sur les débits prélevés étaient insuffisamment vérifiées et que peu de données étaient disponibles au sujet de la piézométrie avant les pompages. Les données compilées ne permettaient donc pas de déduire les paramètres hydrauliques à l'aide d'un modèle inverse (Lebbe, 1988). Il faudra donc déduire les paramètres hydrauliques par d'autres moyens, afin d'améliorer le modèle mathématique. Avec cette intention, plusieurs tests de pompage ont été exécutés depuis lors, par le Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie (Lebbe *et al.*, 1989), qui permettront d'améliorer le modèle dans l'avenir.

Quoique les imperfections du présent modèle soient reconnues, la simulation de l'écoulement naturel a permis d'expliquer la distribution de la qualité d'eau des nappes dans le Socle et dans le Landénien (Van Camp *et al.*, 1989 ; Walraevens *et al.*, 1989).

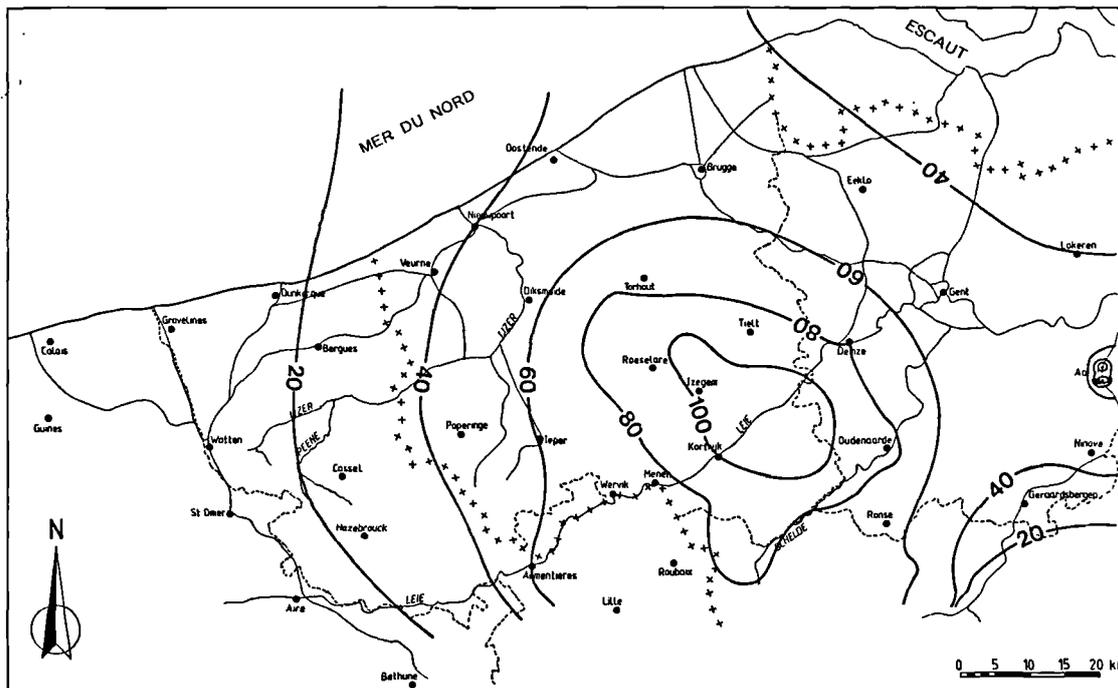


Fig. 11. — Rabattement du niveau piézométrique du Socle dû aux captages avec débits adaptés (en m).

Fig. 11. — Drawdown of the piezometric head in the Basement Complex due to estimated withdrawals (in m).

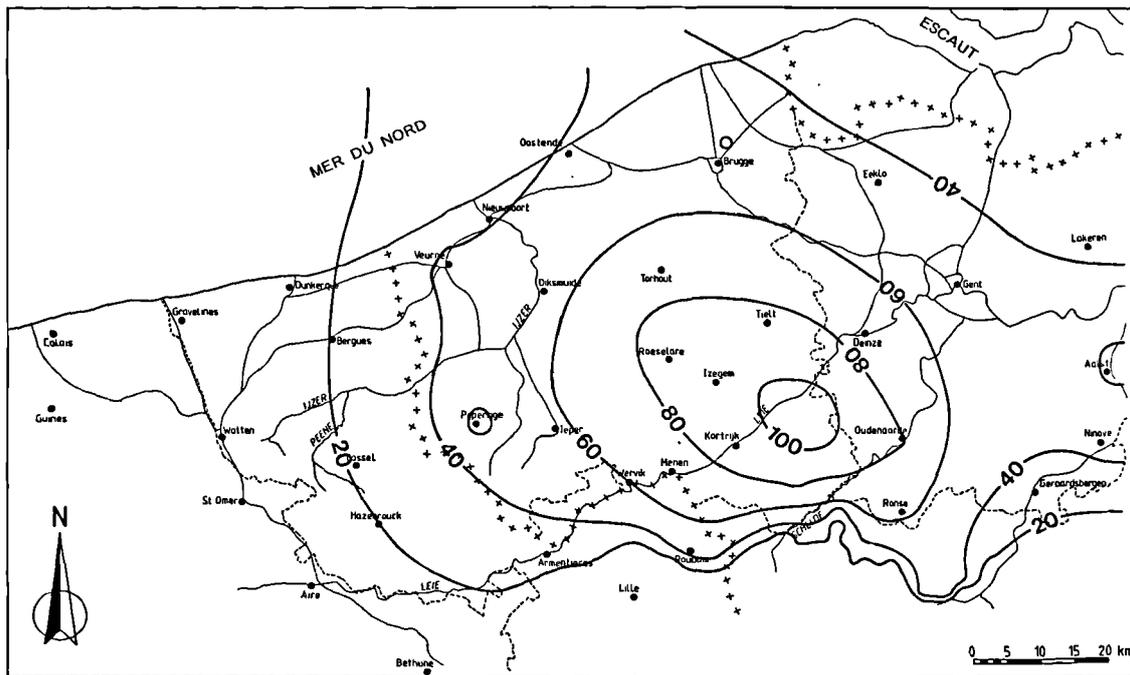


Fig. 12. — Rabattement du niveau piézométrique du Landénien dû aux captages avec débits adaptés (en m).
 Fig. 12. — Drawdown of the piezometric head in the Landenian aquifer due to estimated withdrawals (in m).

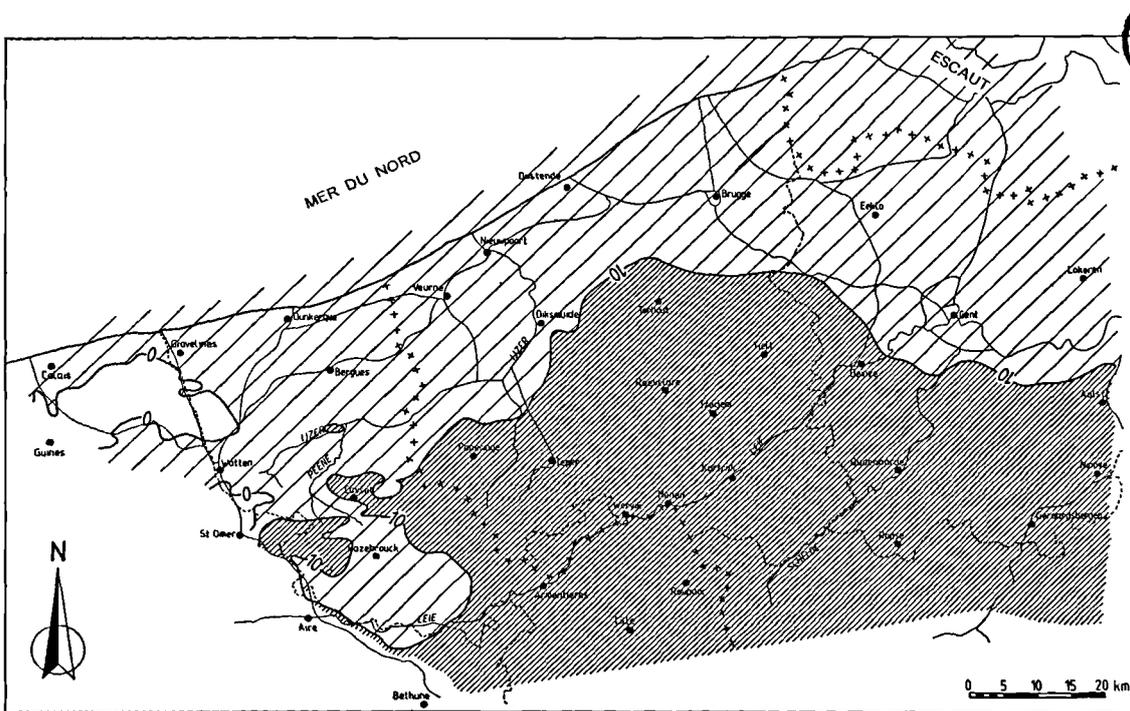


Fig. 13. — Ecoulement à travers l'argile yprésienne en régime de captage ($m^3/ha/an$).
 Fig. 13. — Vertical flow through the Ypresian clay in the case of groundwater withdrawal ($m^3/ha/year$).

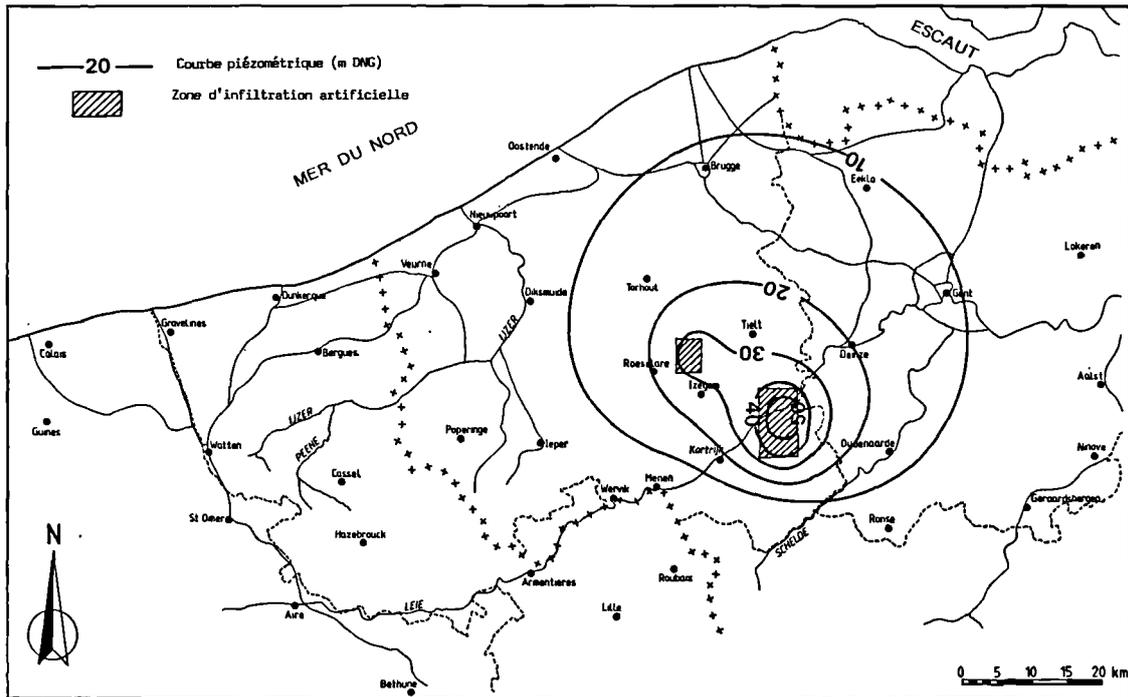


Fig. 14. — Remontée du niveau piézométrique dû à une infiltration artificielle.

Fig. 14. — Ascending of the piezometric head due to artificial infiltration.

IV. — CONCLUSION

Les paramètres hydrauliques du Landénien, du Crétacé, du Socle et des couches d'argile sont peu connus. Les valeurs adoptées pour ces paramètres influencent les résultats du modèle mathématique. Des recherches de terrain seront nécessaires dans l'avenir, afin d'améliorer le modèle.

Les incertitudes concernant les paramètres hydrauliques ne suffisent pas à expliquer des écarts entre les débits connus

soustraits au Socle et au Landénien et ceux que l'on a obtenus par le calage du modèle. Il s'agit de 18 % pour le Massif du Brabant et de 70 % pour le Landénien.

Malgré ses limites, le modèle mathématique constitue un outil important au service de la planification de l'aménagement régional. Ceci est démontré par les simulations d'alimentation artificielle.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) DE ROUBAIX E., DE RYCKE F., GULINCK M., LEGRAND R. et LOY W. (1979). Tournaisis "77"- "78". Effondrements à Kain et évolution récente de la nappe aquifère profonde. *Prof. Paper Service Géol. belge*, 157, 47 p.
- 2) GOM-WEST-VLAANDEREN (1987). — *Hydrogeologische studie van de gespannen watervoerende laag in het Massief van Brabant onder West- en Oost-Vlaanderen. Deelkontraat II. Eindverslag*. 229 p, 29 dossiers, 1 dossier d'analyses chimiques. Bruges : GOM-W-VL (étude établie pour l'Exécutif flamande).

- 3) LEBBE L., VAN CAMP M., et RAMAN B. (1985). — *Hydrogeologisch matematisch model van het Nederlands-Belgisch grensgebied in de omgeving van de Kalmthoutse Heide*. 89 p., 23 pl., 7 tabl. Gand : Université de l'Etat - Laboratoire de Géologie Appliquée (Rapport TGO 81/08b établi pour l'Exécutif flamande).
- 4) LEBBE L., VAN CAMP M., DE CEUKELAIRE M. et VAN BURM P. (1987). — *Hydrogeologisch matematisch model van de grondwaterstromingen in de gedeeltelijk afgesloten watervoerende lagen onder West-, Oost-, Zeeuws- en Frans-Vlaanderen*. 65 p., 40 pl., 21 fig., 11 tabl. Gand : Université de l'Etat - Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie (Rapport TGO 86/53 établi pour le Ministère de la Communauté flamande).
- 5) LEBBE L., VAN CAMP M., VAN BURM P., DE CEUKELAIRE M., WATTIEZ R. et DE BREUCK W. (1988). — *Het grondwater in de Paleozoïsche Sokkel en in het Landeniaan in West- en Oost-Vlaanderen*. *Water* 41, 104-108.
- 6) LEBBE L. (1988). — *Uitvoering van pompproeven en interpretatie door middel van een invers model*. 563 p., 109 fig., 61 tabl. Gand : Université de l'Etat - Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie (thèse d'agrégation des facultés inédite).
- 7) LEBBE L., MAHAUDEN M. et DE BREUCK W. (1989). — *Results of pumping tests in the anisotropic aquifer of the Brabant Massif*. *Bull. Soc. belge de Géologie*, en presse.
- 8) MANIA J. (1971). — *Contribution à l'étude de la nappe des sables landéniens en Flandres franco-belges et dans le Bassin d'Orchies*. 161 p., 10 pl., 29 fig., 43 tabl. Lille : Université des Sciences et Techniques (thèse de doctorat inédite).
- 9) VAN CAMP M., WALRAEVENS K., DE CEUKELAIRE M., VAN BURM P., LEBBE L. et DE BREUCK W. (1989). — *Hydrochemie van de watervoerende lagen in de Paleozoïsche Sokkel, in het Krijt en in het Landeniaan in West- en Oost-Vlaanderen*. *Water* 44, 25-30.
- 10) WALRAEVENS K. (1987). — *Hydrogeologie en hydrochemie van het Ledo-Paniseliaan in Oost- en West-Vlaanderen*. 350 p., 74 pl., 102 fig., 33 tabl., 4 ann. Gand : Université de l'Etat - Laboratoire de Géologie Appliquée et d'Hydrogéologie (thèse de doctorat inédite).
- 11) WALRAEVENS K., VAN CAMP M., DE CEUKELAIRE M., VAN BURM P., LEBBE L., DE BREUCK W., GERARD P. et VERPLAETSE H. (1989). — *Hydrochemisch onderzoek van de gedeeltelijk afgesloten watervoerende lagen van de Sokkel, het Krijt en het Landeniaan onder West-, Oost- en Frans-Vlaanderen*. *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift* 71, 53-73.

La nappe de la craie utilisée comme source froide de pompes à chaleur

The use of the water-bearing chalk-bed as supplier of cold water for heat pumps

par Jean-Paul BOUÉ (*)

Résumé. — La POMPE à CHALEUR "eau-eau" est une machine thermique parfaitement conçue pour extraire une partie de l'énergie thermique contenue dans les eaux souterraines. Envisager son installation sur l'eau de la nappe de la craie dans le Bassin Minier du Nord - Pas-de-Calais ne nécessite qu'une étude de préféabilité simplifiée puisqu'il existe une carte d'orientation et d'exploitation thermique de cet aquifère.

La seule grande question qui subsiste est celle de son insertion dans l'environnement hydraulique de la région.

Les réponses réglementaires et tarifaires qui y sont apportées aujourd'hui se révèlent, dans bien des cas, ou insuffisantes pour protéger l'environnement, ou trop contraignantes pour encourager cette forme originale d'économie d'énergie. Il conviendrait alors de les replacer dans un contexte institutionnel plus large prenant en compte l'ensemble des aménagements du territoire.

Abstract. — *The HEAT PUMP "water-water" is a heat engine perfectly built for extracting a part of the heat energy contained in underground waters. Considering its setting up on the water-bearing chalk-bed of the Nord - Pas-de-Calais Mining District would require only a simplified study since geological maps of heat exploitation of that aquifer already exist.*

The only important remaining question is that of its insertion in the hydraulic environment of the region.

The statutory and tariff answers supplied so far have proved themselves to be, in many cases, either incapable of protecting the environment, or too restraining to promote that new saving device. One should then replace it in a larger context which would take into account the national development.

Il n'est pas encore loin le temps où les formidables activités industrielles installées à la surface du bassin minier du Nord et du Pas-de-Calais puisaient d'énormes volumes d'eau dans l'aquifère crayeux séno-turonien sous-jacent. Associées à une urbanisation démesurée, ces activités, par ailleurs richesses de ce pays, ont provoqué en retour des désordres tant dans l'aménagement du territoire que dans la conservation de la ressource en eau.

Aujourd'hui, la récession industrielle nous donne l'occasion de poser autrement les questions relatives à l'aménagement hydraulique de cette région. L'hydrogéologie peut apporter des éléments de réponse : par exemple, cette ressource cesse d'apparaître aussi dévalorisée, aussi encombrante par endroits, dès qu'on la perçoit comme une réserve d'éner-

gie thermique exploitable par les pompes à chaleur "eau-eau" (cf. Tableau). La pompe à chaleur sur puits simple évacue l'eau utilisée en surface ; cette eau peut alors être traitée. La pompe à chaleur sur doublet hydrothermique réinjecte l'eau dans l'aquifère grâce à un deuxième forage voisin ; la ressource en eau est alors conservée telle quelle.

I. — LE CHAUFFAGE PAR POMPE A CHALEUR "EAU-EAU"

Abaisser la température de 1 m³ d'eau de 1°C en 1 heure c'est récupérer une énergie thermique de 1000 kcal/h. Une pompe à chaleur (PAC) est conçue pour un tel travail. Elle

(*) Ingénieur géologue C.N.A.M.

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

transfère de la chaleur prise à un milieu extérieur "froid", ici l'eau d'une nappe phréatique, vers un milieu où la température est plus élevée, ici l'eau d'un chauffage central traditionnel.

Ce transfert s'effectue par l'intermédiaire d'un fluide thermodynamique qui tourne en *circuit fermé* dans la pompe à chaleur grâce à l'énergie mécanique d'un compresseur. Au niveau des échangeurs, le fluide s'évapore en absorbant la chaleur à l'évaporateur, il la libère en se condensant au condenseur.

D'après le principe de la conservation de l'énergie, la quantité d'énergie reçue par le système ($Q_1 + W$) est égale à la quantité d'énergie restituée (Q_2) $Q_2 = Q_1 + W$.

Or cette énergie recueillie (Q_2) est toujours supérieure à l'énergie réellement dépensée (W) puisque (Q_1) est une énergie "gratuite". Le rendement du système — au sens de Carnot — se trouve donc paradoxalement toujours supérieur à 1 et s'appelle, pour cette raison, le **coefficient de performance** ou **COP**.

Pour une machine travaillant entre une source froide à 11°C et une source chaude à 45°C on peut espérer un COP réel voisin de 4,75 ce qui signifie qu'avec 1 kWh dépensé au compresseur, soit un équivalent calorifique de 860 kcal, on obtient $4,75 \times 860 \approx 4100$ kcal disponibles pour le chauffage (au lieu des 860 kcal, que l'on récupérerait par simple effet Joule dans une résistance électrique).

II. — UNE POMPE A CHALEUR EN ACTION

La Direction Opérationnelle des Télécommunications installait en 1985 un système de chauffage par pompe à chaleur dans ses locaux administratifs, rue R. Lannoy à Lens.

Les contraintes techniques du bâtiment : 14 000 m³ à chauffer quelle que soit la température extérieure comprise entre + 19°C et - 9°C, planchers chauffants à $t^\circ < 25^\circ\text{C}$.

Les caractéristiques de la pompe à chaleur (210 kWh) : 54 kWh puissance absorbée au compresseur. 26,3 m³/h d'eau pris à 11°C, rejetés à 6°C.

$$\text{soit } \frac{26,3 \times 5 \times 1000}{860} = 153 \text{ kWh}$$

énergie récupérée sur l'eau de nappe et t° de condensation 45°C.

Régulation de l'installation : un ballon de 15 m³ stocke cette eau à 45°C pendant les "heures creuses" du tarif EDF.

III. — OÙ PRENDRE L'EAU ? OÙ LA REJETER ?

Dans le but de faciliter les examens hydrogéologiques au stade d'un avant-projet, le Service Géologique Régional a établi un "inventaire pour l'utilisation énergétique de la nappe de la craie (1986)". En un point donné de cette carte, et en se rappelant les imprécisions inévitables d'un tel document, on lit immédiatement deux informations : le débit de l'eau et la profondeur de son gisement. Ces renseignements éliminent d'emblée les projets impossibles.

Pour les autres projets, la notice oriente et précise les examens complémentaires à entreprendre :

— *poursuivre les recherches techniques et économiques* : la réalisation et le coût d'un forage dépendent de la lithologie des terrains à traverser, du matériel à mettre en œuvre, des essais hydrauliques auxquels il faut procéder... On peut remarquer ici que la remise en activité d'un forage abandonné nécessite études et essais, bien sûr, mais prend sans doute mieux en compte l'environnement sur lequel toute intervention provoque un déséquilibre ;

— *s'informer de la législation des eaux* : la création d'ouvrages, les prélèvements et les rejets d'eau sont soumis à une réglementation. D'obligation de déclarations en exemption d'autorisations, le cheminement est complexe car il

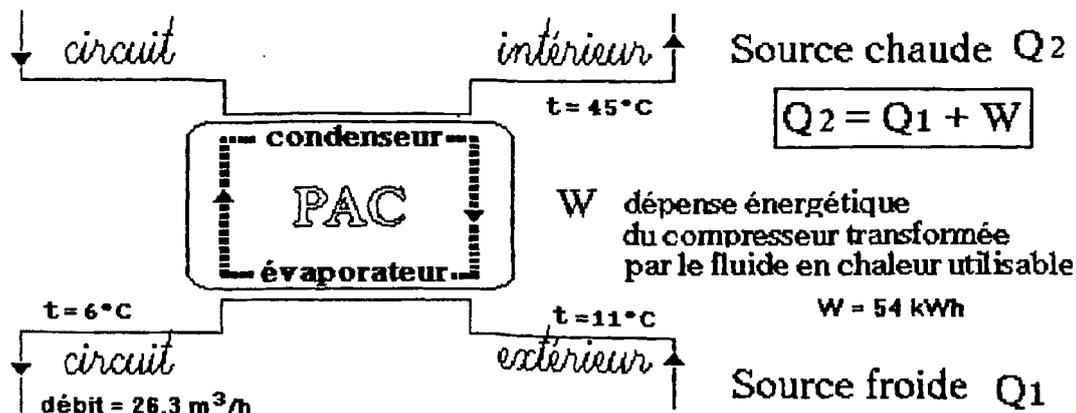


Fig. 1.

n'existe aucune législation spécifique à l'installation des pompes à chaleur sur nappes. Il semble que les adaptations de ces textes réglementaires se fassent au coup par coup.

Pour être plus clairement définies, les taxes de prélèvement et de rejet de ces eaux utilisées thermiquement n'en sont pas mieux adaptées.

IV. — UNE NÉCESSAIRE ÉVOLUTION DE LA LÉGISLATION ET DE LA TAXATION DES EAUX

Deux exemples souligneront l'opportunité qu'il y aurait à réexaminer maintenant cette question, dès lors que des modèles hydrothermiques auraient été construits et expérimentés sur les nappes recevant des pompes à chaleur — à l'exemple de celui réalisé sur la nappe alluviale d'Alsace.

Un exemple de la législation actuelle : réaliser un forage de moins de 10 m de profondeur et y puiser moins de 8 m³/h permet d'alimenter une pompe à chaleur en chauffage indi-

viduel. Cette installation, somme toute banale, n'est soumise aujourd'hui à aucune autorisation ni même à aucune déclaration. Quand le rejet se fait dans la nappe grâce à un deuxième forage il n'y a même aucun périmètre de protection à respecter autour des forages.

Or la prolifération des doublets de forage de ce type ne peut conduire qu'à des désordres dans la ressource thermique de la nappe, à des conflits entre les utilisateurs, à la multiplication des risques de pollution. Tout pour porter un préjudice durable à cette forme d'énergie !

Un aspect de la taxation des eaux souterraines : la prise d'eau dans un aquifère ne donne lieu ni à une taxe de prélèvement ni à une taxe de rejet si elle s'accompagne aussitôt d'une restitution de cette eau (non polluée !) à la nappe. Cette opération considérée comme "blanche" par les Agences financières de Bassin préserve, il est vrai, la ressource ; de ce point de vue elle ne peut qu'être encouragée. A l'inverse,

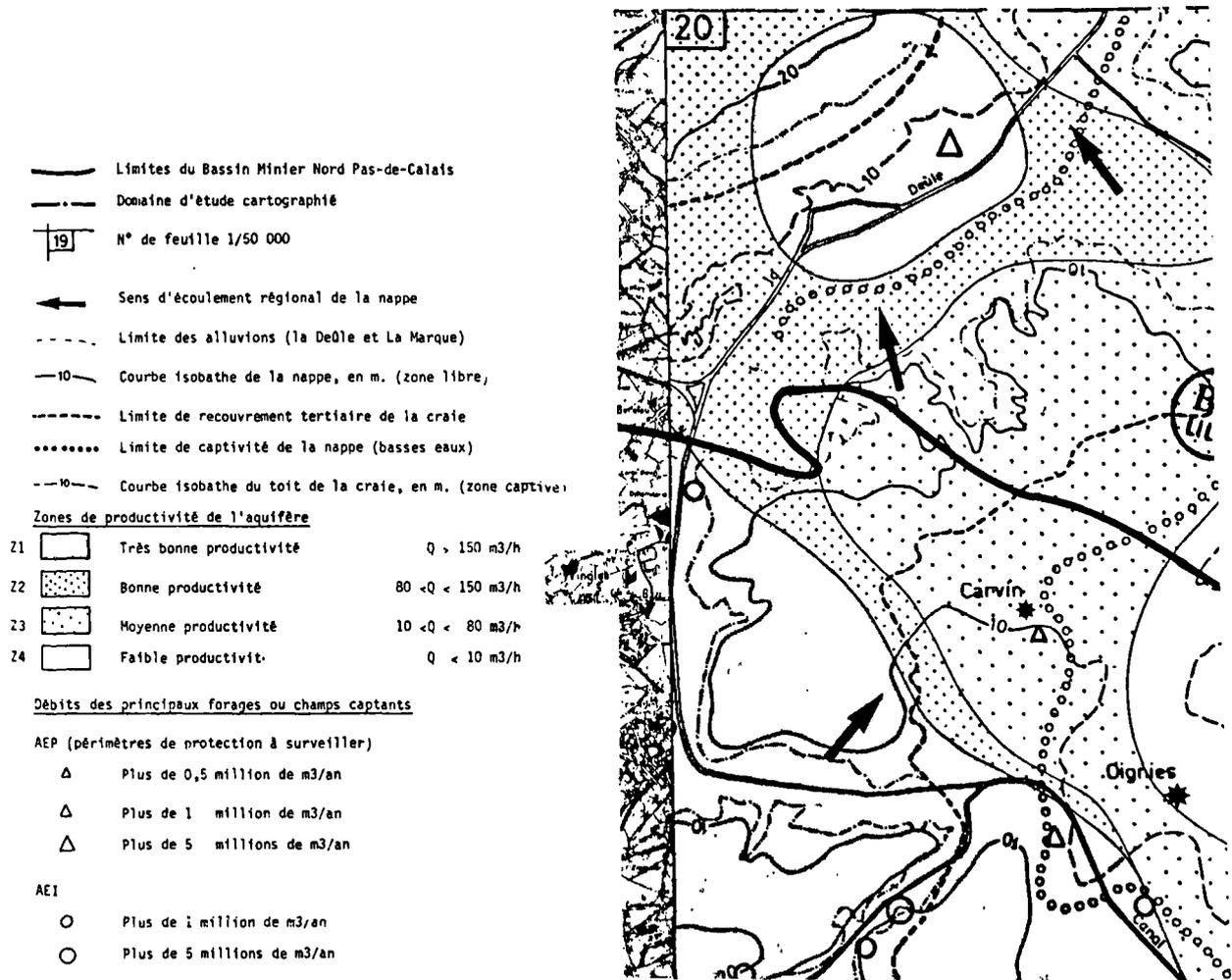


Fig. 2. — Exploitation thermique de l'aquifère crayeux. Carte d'orientation pour le Bassin Minier. Extrait d'un document préparatoire, monochrome (J.-P. BOUÉ, 1985).

Fig. 2. — Map showing thermic development of the aquiferous chalk-bed on the coal field N-PC.

tout prélèvement net entraîne une taxe dissuasive recouvrée par ces organismes.

Pourtant, certaines situations mériteraient une attention et un traitement particuliers. Que penser, en effet, des zones où les énormes prélèvements d'eau autrefois retirés de l'aquifère sont peu à peu abandonnés, laissant la nappe reprendre un état naturel oublié, vieux de quelques décennies ? Jointes aux affaissements miniers, ces remontées d'eaux de nappe font subir à l'urbanisme leurs effets dévastateurs. Là, des pompages aussi intensifs qu'improductifs maintiennent hors d'eau un environnement encore habité (Tableau I).

Il est certainement dommage que des incitations financières ne favorisent pas l'installation de puissantes pompes à chaleur sur ces forages d'exhaure "obligée". Quant aux eaux ainsi évacuées en surface, elles ne deviennent pas obligatoirement encombrantes.

V. — UN "VIEUX PROJET RESTÉ DANS LES CARTONS"...

Le projet d'un "Parc de la Deûle" (1976) avait pour objectif hydrogéologique "la réalimentation massive de la nappe de la craie entre Don et Lille, par réinfiltration d'eaux prélevées en surface et préalablement traitées par épuration naturelle dans des étangs — de lagunage — à créer". Compte tenu des énormes besoins en eau potable de la communauté urbaine de Lille, et connaissant le degré de pollution quelquefois extrême, des eaux de la craie, ce projet abandonné aujourd'hui, semblait séduisant. C'est là que l'installation de pompes à chaleur déversant en surface leurs eaux refroidies auraient pu en tous cas rendre des services irremplaçables : tout à la fois assainir des zones "inondables", aider à l'alimentation des bassins de lagunage, et procurer de l'énergie thermique !

On peut regretter qu'un tel projet, envisagé un moment sur la commune de Wingles (1984), ne se soit pas concrétisé. Que penser également des projets où des réseaux de pompes à chaleur venant en relais des grands pompages industriels déclinants, continueraient d'assurer des barrages hydrauliques souterrains à l'expansion des eaux polluées vers le Nord ?

Serait-il exagéré de dire que les pompes à chaleur pourraient se mettre utilement au service de l'environnement régional ?

CONCLUSION

Le chauffage basse énergie par les pompes à chaleur "eau-eau" devrait trouver sa juste place parmi les techniques de chauffage "économiques" et "non-polluantes". Bien sûr, il ne saurait s'adapter à toutes les situations. Des études régionales hydrogéologiques spécialement dirigées vers l'utilisation thermique des eaux de nappes peu profondes ont été menées ici et là. Elles montrent toutes qu'il est impératif de replacer les projets dans un contexte plus large que celui d'une simple installation de forages.

Seule une structure régionale d'aménagement serait à même d'assurer une gestion harmonieuse des ressources hydrauliques et hydrothermiques de la nappe de la craie.

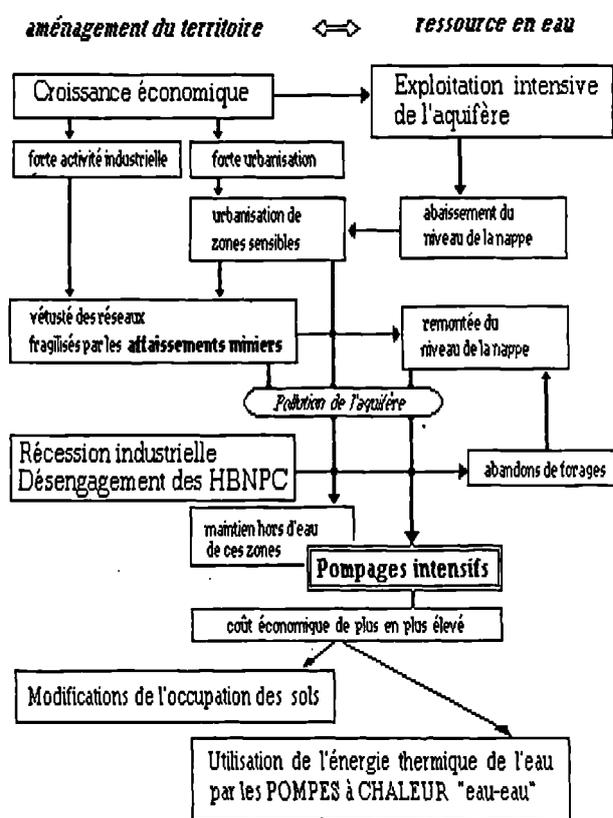


Tableau I

BIBLIOGRAPHIE

- 1) J. BECKELINCK, S. BAILLY, P. CAULIER et E. JOURDAIN (1986). — Bassin minier du Nord - Pas-de-Calais. Inventaire pour l'utilisation énergétique de la nappe de la craie. Carte et notice BRGM.
- 2) J.-P. BOUÉ (1985). — L'eau, un vecteur d'énergie dans le bassin minier du Nord - Pas-de-Calais. Recherches concernant l'exploitation thermique de l'aquifère crayeux par pompes à chaleur. Conservatoire National des Arts et Métiers. Paris.
- 3) R. DUMON et G. CHRYSOSTOME (1983). — Les pompes à chaleur, Masson, Paris.
- 4) J. MARGAT (1984). — L'eau et les pompes à chaleur. Congrès de l'AGHTM. Clermont-Ferrand.

Sont en vente au Siège de la Société :

MÉMOIRES (*)

| | |
|--|----------|
| Tome I , n° 1. – Ch. BARROIS, <i>Recherches sur le terrain crétacé 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 |
| Tome IV , n° 1. – J. GOSSELET, <i>Etudes sur les variations du Spirifer Vermeilli</i> , 1894, 63 p., 7 pl. | 90,00 F |
| Tome VI , 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 et al., <i>Faune siluro-dévonienne 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 |
| Tome VII , n° 1. – P. BERTRAND, <i>Etude des Stipes d'Asterochloena laxa</i> , Stenzel, 1911, 72 p., 6 pl. | 102,00 F |
| Tome VIII , n° 2. – Ed. LEROUX, <i>Le tunnel de l'Ave Maria</i> , 1929, 50 p., 5 pl. | 120,00 F |
| Tome IX , 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 et al., <i>Poissons élasmodontes de Denée</i> , 1926, 23 p., 6 pl. | 96,00 F |
| Tome X , n° 2. – J. LAVERDIÈRE, <i>Terrains paléozoïques des Pyrénées occidentales</i> , 1931, 132 p., 8 pl. | 180,00 F |
| Tome XII . – D. LEMAITRE, <i>Faune des calcaires dévoniens du Bassin d'Anceis</i> , 1934, 268 p., 18 pl. | 336,00 F |
| Tome XIII . – P. BRICHE et al., <i>Flore infraliasique du Boulonnais</i> , 1963, 145 p., 11 pl. | 252,00 F |
| Tome XIV . – G. WATERLOT, <i>Les Gigantotrachés du Siluro-Dévonien de Liévin</i> , 1966, 23 p., 5 pl. | 84,00 F |
| Tome XV . – J. MANIA, <i>Gestion des Systèmes aquifères. Applications au Nord de la France</i> , 1978, 228 p. | 180,00 F |
| Tome XVI . – A. BOUROZ et al., <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 Téthys</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. MISTIAEN, <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)

1^{er} trimestre

| | pages |
|---|-------|
| F. THIÉBAULT. — Avant-Propos | 3 |
| F. MAUROY et F. VAN LAETHEM. — Métro de Lille - Ligne 1 bis. Mouvements du sol autour de l'excavation du tunnel | 5 |
| A. DUWICQUET et Y. HULO. — Dimensionnement des ouvrages de soutènement dans la craie. Problème de l'évaluation des caractéristiques mécaniques de la craie. Exemple du parking souterrain de l'Hôtel de la D.D.E. à Lille | 9 |
| O. ROUZEAU. — Contribution de la télédétection spatiale à la connaissance de l'anomalie thermique du forage géothermique de Condé-sur-Escaut (France) | 15 |
| A. KHATIR et F. GUILLOT. — Géologie structurale et exploitation de carrière en Avesnois (massif ardennais ; Nord, France) | 21 |
| E. MERCIER, A. BOUQUILLON, S. BACROT. — La sédimentation dans deux étangs de la vallée de la Sensée (Nord de la France) | 25 |
| J. RICOUR. — Les friches industrielles et la gestion du sous-sol. Analyses des contraintes à prendre en compte dans le cadre d'un plan de réhabilitation | 33 |
| P. GODEFROY et J. LEPLAT. — Evaluation de l'aléa sismique dans le cadre d'études des dangers d'installations industrielles à haut risque de la région Nord - Pas-de-Calais | 39 |
| P. VAN BURM, M. VAN CAMP, L. LEBBE, K. WALRAEVENS et W. DE BREUCK. — Simulation d'une pollution aux environs d'un dépôt de déchets | 49 |
| L. LEBBE, K. WALRAEVENS, P. VAN BURM et W. DE BREUCK. — L'évolution de la distribution des eaux douces et salées dans la nappe libre de la plaine maritime aux environs de la frontière belgo-française | 55 |
| M. JOURNEZ et H. MAILLOT. — Protection des nappes. Evacuation des eaux pluviales d'une nouvelle zone urbaine par infiltration : Y a-t-il systématiquement antagonisme ? | 67 |
| K. WALRAEVENS, P. VAN BURM, M. VAN CAMP, L. LEBBE, M. DE CEUKELAIRE et W. DE BREUCK. — Modélisation hydrodynamique des nappes aquifères du socle paléozoïque et du Landénien dans les Flandres belges et française | 73 |
| J.P. BOUÉ. — La nappe de la craie utilisée comme source froide de pompes à chaleur ... | 87 |

© 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)