

Société
Géologique du
Nord

03 SEP. 1996

ANNALES

Tome 4 (2^me série), Fascicule 3
parution 1996

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

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 des 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 auteur, ne peut dépasser le total de 8 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 du bon à tirer.

Cotisations et Abonnements (à la date du 1^{er}-1-1993)

	QUALITÉ	COTISATION	ABONNEMENT aux Annales	TOTAL
FRANCE et C.E.E.	Personnes physiques ^{(2) (3)}	40,00 F	160,00 F T.T.C.	200,00 F
AUTRES PAYS	Personnes physiques	40,00 F	180,00 F T.T.C.	220,00 F

Abonnement des non-membres : FRANCE et C.E.E.: 365,00 F H.T. — ÉTRANGER : 420,00 F

ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

La vente des Annales s'effectue par tomes entières aux prix suivants. Exceptionnellement, et jusqu'à épuisement du stock, certains fascicules sont en vente séparément.

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 XLI à LXXIX) 50,00 F H.T.

Table 5 (Tomes LXXX à CIX) par table

Esquisse géologique du Nord de la France, par J. GOSSELET, Fascicule IV (Terrains quaternaires) 29,00 F H.T.

Ecorché géologique infra mésozoïque (extrait de « Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France », présentée par G. F. P.A.)..... 50,00 F H.T.

(1) Modification adoptée lors de l'Assemblée Générale

(2) Les étudiants qui en font la demande annuelle

(3) Les membres de l'APBG peuvent bénéficier

4 sur l'abonnement (80 00 F), soit un total de 120.00F
160,00 F

Société
Géologique du
Nord

ANNALES

Tome 4 (2.^me série), Fascicule 3
parution 1996

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 1995 —

<i>Président</i>	M. J. FERRIÈRE
<i>Premier Vice-Président</i>	M. N. CRAMPON
<i>Seconds Vice-Présidents</i>	M ^{me} Cl. DELCAMBRE - BROUSMICHE M ^{lle} B. TESSIER
<i>Conseillers</i>	M. F. ROBAZYNSKI M. F. GUILLOT M. M. DEBUYSER M. C. DUPUIS M. D. VACHARD M. J.N. PROUST
<i>Secrétaire</i>	M. J.F. DECONINCK
<i>Secrétaire Adjoint</i>	M. B. BEAUVIÈRE
<i>Trésorier</i>	M. J.M. DÉGARDIN
<i>Déléguée aux Publications</i>	M ^{me} Paule CORSIN
<i>Bibliothécaire</i>	M. A. TRENTESAUX

Se sont joints au Comité d'organisation scientifique : MM. E. CARLIER, N. CRAMPON et F. LETHIERS

APPORTS DE L'ANALYSE MORPHOSTRUCTURALE À LA CONNAISSANCE DE LA RÉPARTITION DES SYSTÈMES KARSTIQUES EN PAYS CRAYEUX : APPLICATION À LA DÉLIMITATION DE ZONES PRODUCTIVES DANS LE GÂTINAIS (SE du bassin de Paris, France).

Contribution of morphostructural analysis to the knowledge of karstic system in chalk
area. Application to the delimitation of productive area in the Gâtinais
(SE of Paris basin, France).

Par Pierre BRACQ (*), Jean-Pierre COLBEAUX (**) et Norbert CRAMPON (**).

Résumé. — Le Gâtinais est essentiellement une région à vocation agricole et depuis quelques années les besoins en eau pour l'irrigation augmentent fortement. Le substratum de cette région est formé principalement par des calcaires du Tertiaire et par la craie du Crétacé supérieur. De nombreux indices de dissolution, en surface (dolines), en profondeur (vides rencontrés lors de la réalisation de forages) ou tirés de l'interprétation de traçages soulignent la présence vraisemblable du karst. Ces considérations ajoutées à ce que l'on connaît au sujet de la variation rapide des paramètres physiques de l'aquifère crayeux font que la recherche en eau est des plus aléatoire. Le coût élevé des campagnes de forages lié à un taux d'échecs important a entraîné la recherche de nouvelles méthode d'identification du réservoir crayeux dans le but d'optimiser l'implantation des ouvrages. Les outils statistiques et morphostructuraux sont utilisés dans ce sens et montrent qu'il est possible de mieux appréhender certains paramètres. Ces derniers concernent la structure géologique régionale, la répartition des productivités, et permettent également d'établir une zonation où la probabilité d'échec peut être quantifiée. Ceci s'avère être un argument de décision important avant une campagne de reconnaissance généralement coûteuse et parfois infructueuse.

Abstract. — *The Gâtinais is especially an agricol area and since few years the water irrigation needs increase rapidly. The area substratum is mainly constituted by Tertiary calcareous and by the chalk of the Upper Cretaceous. Many features of dissolution, at the surface (sinkholes) and in depth (voids met during drillings) or deduced by the interpretation of tracer tests, increase the idea of karst. If we add these considerations to the fact we know about the fast variation of the physical parameters in the chalky aquifer, we can say that the water research is very aleatoric. The high cost of the drilling campains directly linked to an important number of unproductive wells has induced the research of new methods to indentify the chalky aquifer and thus optimized implantation of boreholes. The morphologic and statistic tools used in this way show it is possible to better apprehend the geologic regional structure and thus the productivities repartition. At the same time, we can establish a zonation in which the probability to found unproductive wells can be quantified. We can thus say that this can be an important argument before the investigation campaing often expensive and sometimes with no result.*

I. — INTRODUCTION

Afin de satisfaire les besoins en eau des cultures en période estivale, le recours à l'irrigation a connu un essor considérable depuis les années 70. Si la surface agricole utilisée tend à se réduire d'année en année, les surfaces irriguées augmentent : dans le Gâtinais oriental, elles ont quadruplé entre 1970 et 1988. Devant la proportion importante d'échecs (débit inférieur à 8 m³/h) observée lors de la réalisation ou de l'exploitation des ouvrages d'eau à

vocation agricole dans la craie de l'Est du Loiret, les organisations agricoles avaient demandé au laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Orléans d'en rechercher la cause et de définir les critères de décision permettant d'opter en faveur de l'utilisation soit des ressources souterraines, soit des eaux superficielles. La présente publication, en s'appuyant sur les résultats obtenus (Lepiller & Lasne, 1990) a pour seul objectif de souligner l'apport complémentaire de l'analyse morphostructurale pour optimiser l'implantation des ouvrages de prélèvement d'eau souterraine.

(*) Université du Littoral, Centre Universitaire de la Mi-Voix, Bat. H. Poincaré, 50 rue F. Buisson BP 699, 62228 Calais.

(**) J.E. 231, Laboratoire d'Hydrogéologie, UFR des Sciences de la Terre, Université des Sciences et Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

Note acceptée pour publication par le Conseil Scientifique le 31 Mai 1996.

II.— PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SECTEUR ÉTUDIÉ.

1) Localisation.

Située au Sud-Est du Bassin de Paris entre la Loire et la Seine, la zone, d'une superficie de 4000 km², regroupe trois régions naturelles essentiellement vouées à l'agriculture et à l'élevage : le Gâtinais de l'Est, la Puisaye et le Pays-Fort (fig. 1). La Loire traverse cette région dans sa partie méridionale. Elle sépare le Pays Fort au Sud (point culminant 273m) de la Puisaye au Nord. Cette dernière s'étend jusqu'à une ligne Nogent-sur-Vernissons_Melleroy, au Nord de laquelle on trouve le Gâtinais. La Puisaye culmine entre 188m à l'Ouest, au niveau de la limite des bassins versants de la Loire et de la Seine, et 217m au Sud-Est.

Plus au Nord, le Gâtinais est séparé en deux par le Loing. A l'Ouest s'étendent les plaines du Solin, du Puiseaux et du Vernisson, faiblement inclinée vers le Nord entre 125m à Nogent-sur-Vernisson et 90m à Montargis. A l'Est (Gâtinais de l'Est), des plateaux s'élèvent rapidement au-dessus de la vallée du Loing pour culminer entre 171m dans l'angle Nord-Est du département, et 203m, dans la région de St Maurice sur Aveyron. Le relief, peu accidenté, confère au paysage l'aspect d'un plateau entaillé par les cours d'eau sur quelques dizaines de mètres. Ces rivières sont, du Nord au Sud, le Betz, la Cléry, l'Ouanne, l'Aveyron et le Milleron. Au Sud, c'est la Loire qui marque le paysage.

Hormis les principaux cours d'eau déjà cités, dont l'alimentation est soutenue par les nombreuses sources drainant l'aquifère de la craie, le réseau hydrographique est peu développé mais collecte dans certains secteurs une fraction importante de la lame d'eau efficace.

2) Contexte géologique.

a) Les formations présentes.

Le substratum de la région est formé par les dépôts carbonatés d'âge Cénomaniens à Campaniens qui affleurent dans les vallées ou à la faveur de rejets de failles. Au Nord de la Loire, ce sont des faciès essentiellement crayeux, parfois indurés ("castine") et seule la partie terminale du Crétacé supérieur correspond à un faciès silico-alumineux (Lasne, 1992). Ce dernier type de faciès est beaucoup plus développé au Sud de la Loire et correspond soit à des gaizes soit à des spongolithes. Ces terrains sont recouverts par les formations continentales tertiaires, constituées tantôt de matériaux remaniés du Crétacé supérieur, tantôt de formations fluviatiles d'âge Eocène à Oligocène ou de calcaires palustres et lacustres oligocènes. L'ensemble du recouvrement peut atteindre une quarantaine de mètres d'épaisseur. Les dépôts burdigaliens sont faiblement représentés dans ce secteur (fig. 1).

b) Structure.

Les différentes couches géologiques sont globalement inclinées de 2 à 5° vers le Nord-Ouest. Des failles sub-méridiennes verticales à compartiment Ouest surélevé, en général, découpent le secteur. Elles affectent le bâti hercynien et ont rejoigné au cours du Crétacé et au cours d'une période post-Tertiaire voir Actuelle. En effet, l'établissement des cours d'eaux et le relief qui en résulte ne

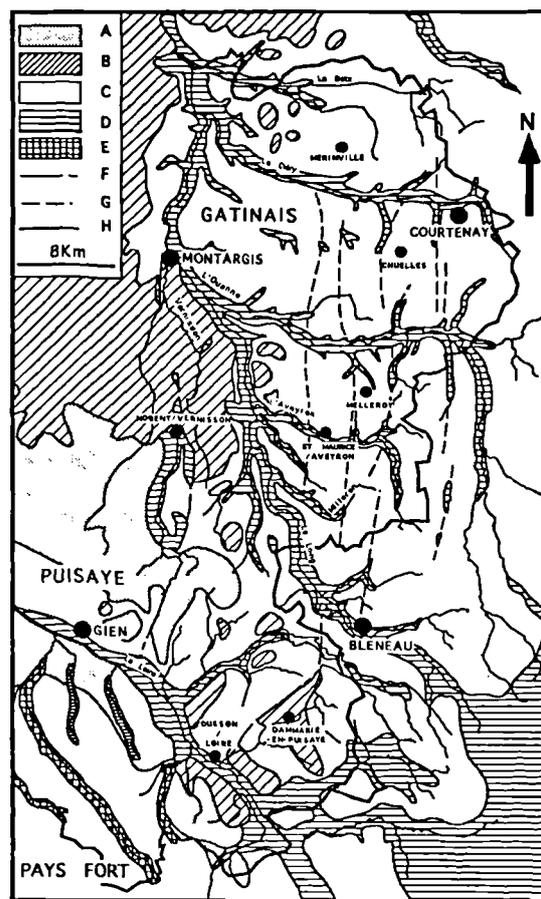


Fig. 1. — Carte géologique schématique de la région. A : Miocène (Burdigalien-Helvétien), sables et argiles. B : Eocène-Oligocène, calcaires lacustres et marnes. C : Eocène-Paléocène, complexe argilo-sableux à silex. D : Cénomaniens-Campaniens, craie à silex. E : Cénomaniens-Turonien moyen, faciès silico-alumineux. F : failles cartographiques. G : failles reconnues par forages pétroliers. H : limite de département (Lasne, 1992).

Fig. 1. — Scheme of the geologic map of the area. A : Miocene (Burdigalian-Helvetian), sand and mud. B : Eocene-Oligocene, lacustrine chalk and marly chalk. C : Eocene-Palaeocene, mud-sandy complex with flint. D : Cenomanian-Campanian, chalk with flint. E : Cenomanian-Middle Turonian, silico-alumina facies. F : faults recognized on maps at 1/50 000. G : faults recognized by petroleum wells. H : limit of department (Lasne, 1992).

semblent pas indépendants des accidents Nord-Sud (Lasne, 1992). On note également la présence de dômes anticlinaux développés dans les formations du Lias, du Kimméridgien et du Néocomien, principalement dans la région de Chuelles-Chateaufort. Ces anticlinaux sont orientés Est-Ouest et ENE-WSW et ont influencé l'implantation de certaines rivières comme par exemple la partie aval de l'Ouanne (fig. 1). L'origine de ces anticlinaux peut être discutée. En effet, la région est découpée par une série d'accidents sub-méridiens qui ont vraisemblablement fonctionné en décrochement en plus de la composante verticale déjà remarquée par l'étude des forages. Si on se réfère aux travaux de Soula (1984), on remarque qu'il est possible de générer sur un modèle, en cisaillement et à partir d'un socle structuré, des plis et chevauchements. Sans aller jusque là, les anticlinaux observés dans la région de Chuelles-Chateaufort, pourraient correspondre à des plis de second ordre développés le long de failles, suite au jeu en décrochement des failles sub-méridiennes suggérant ainsi

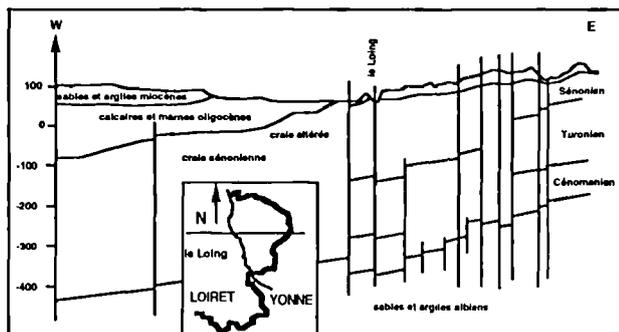


Fig. 2. — Coupe transversale de la couverture mésozoïque des feuilles Bléneau et Courtenay indiquant les principales failles subméridiennes repérées aux niveaux d'horizons sismiques : toit du Turonien, base de la craie, toit du Néocomien et toit du Kimméridgien et au niveau du Sénonien, in Lasne, 1992.

Fig. 2. — Transversal cross-section of the mesozoic cover on the maps of Bléneau and Courtenay showing the main submeridional faults observed on seismic horizons : Top of the turonian, chalk basement, tops of the Neocomian and Kimmeridgian and on Senonian in Lasne, 1992.

une activité tectonique plus ou moins continue mais effective suivant les directions Nord-Sud du Jurassique à l'actuel (fig. 2).

III. — HÉTÉROGÉNÉITÉ DE L'AQUIFÈRE CRAYEUX.

Les études menées (Lepiller & Lasne, 1990; Lasne, 1992) sur la productivité des forages (264) ont abouti à la définition de zones de productivité (fig. 3).

Les reconnaissances en vue de l'exploitation de l'aquifère crayeux doivent tenir compte des contraintes imposées par les caractéristiques hydrauliques du réservoir : forte hétérogénéité de l'aptitude de la craie à fournir l'eau et risque d'échec non négligeable.

Par conséquent, dans les zones de type I, où la couverture tertiaire grève fortement le flux hydrique alimentant le réservoir crayeux, il est peu opportun de poursuivre la recherche d'eau par forage. La mobilisation de la ressource souterraine est vouée à l'échec dans la plupart des cas.

En zone II, la craie débarrassée de sa couverture bénéficie d'une alimentation mixte par l'infiltration des précipitations efficaces et par les pertes des cours d'eau issus de la zone I. On peut y poursuivre les tentatives de captage avec succès tout en ayant à l'esprit que l'échec est possible et l'obtention d'un débit élevé peu probable.

En zone III, l'organisation des écoulements en systèmes karstiques atteint son plein développement. L'amélioration du taux de réussite passe par l'acquisition de toutes les données permettant de définir les limites du système, de préciser le degré de développement et la géométrie du réseau de drainage, enfin d'évaluer son impact sur les propriétés hydrauliques du milieu.

En zone IV, la sollicitation de l'aquifère des calcaires tertiaires surmontant la craie, lorsque leur épaisseur est suffisante, réduit le risque d'échec ou améliore la

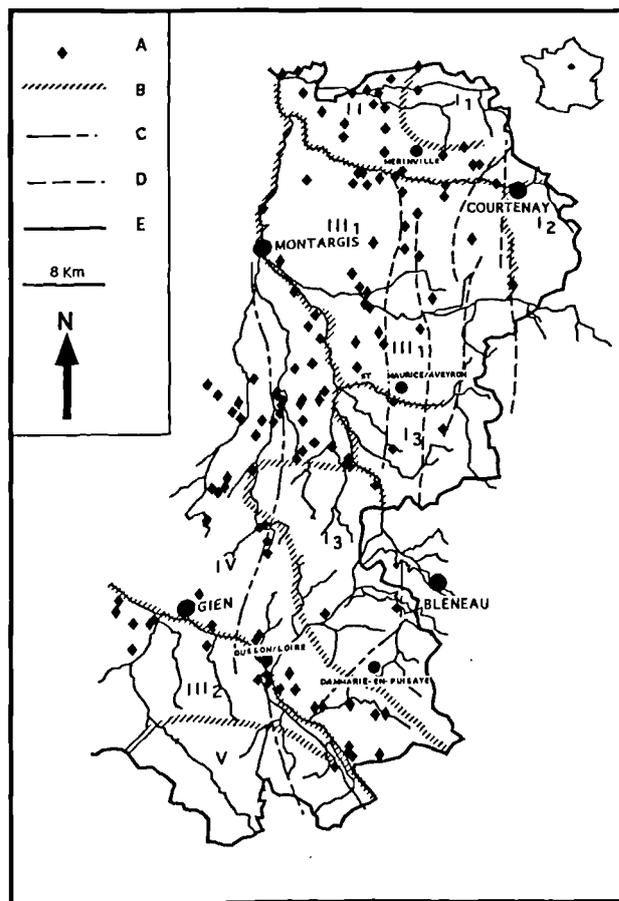


Fig. 3. — Carte des zones productives A : forage productif (> 20 m³/h), B : limite de zone, C : failles cartographiques, D : failles reconnues par forages pétroliers, E : limite de département (Lepiller et Lasne, 1990).

Fig. 3. — Map of the productive areas, A : productive well (> 20 m³/h); B : limit of area, C : faults recognized on maps at 1/50 000; D : faults recognized by petroleum wells; E : limit of department (Lepiller et Lasne, 1990).

productivité des ouvrages. Le recours à la ressource souterraine peut donc se poursuivre avec succès.

En zone V, les faciès présentés par la craie compromettent fortement l'espoir de capter une ressource satisfaisante en eau souterraine.

IV. — ANALYSE MORPHOSTRUCTURALE.

L'utilisation des données du relief dans les études géologiques est pratiquée depuis très longtemps, notamment en France (Daubrée, 1879). L'observation de la morphologie des terrains est une des méthodes classiques pour localiser et reconnaître les déformations souples (plis) ou cassantes, de même que les caractères des organisations hydrographiques renseignent sur la nature et les structures des terrains environnants (Coque, 1988). L'utilisation des photo aériennes et plus récemment des images satellites (Scanvic et Weecksteen, 1978; Ozer *et al*, 1988; Dutartre *et al*, 1990) a permis d'étendre le champ des observations. Ainsi des corrélations sont possibles entre les données

morphologiques, la structure géologique et les directions d'écoulement d'une région ou d'un secteur, ce qui n'apparaissait pas toujours évident à l'échelle de l'affleurement. Par contre, l'analyse morphologique d'anomalies, par exemple dans la disposition des terrasses fluviales, marines, ou dans la pente des cours d'eau, permet de mettre en évidence des déformations récentes (Colbeaux *et al.*, 1978).

1) Les talwegs.

La craie du bassin de Paris affleure largement et constitue un matériau dont le modelé morphologique enregistre assez fidèlement les directions de fracturation. Colbeaux & Sommé (1981, 1985) ont également montré, dans la craie turono-sénonienne du Nord de la France, qu'il existait une convergence entre les traits géomorphologiques et les données structurales tirées de l'interprétation des sondages et de la fracturation, que ce soit dans une zone à substrat crayeux sous faible couverture quaternaire ou dans des zones urbanisées ou à couverture post-crétacée importante.

De façon générale, les régions de craie sont entaillées par de très nombreuses vallées, parfois à écoulement pérenne, mais le plus souvent, ce sont des vallées sèches occasionnellement utilisées par les eaux de ruissellement lors de violents orages et parfois par des exurgences épikarstiques. Il a été démontré maintes fois (Small, 1972; Colbeaux *et al.*, 1978, 1980, 1981, 1988; Sommé, 1988; Calba, 1980; Bracq, 1992) qu'il existait une bonne adéquation entre leur orientation et la structuration tectonique.

Les méthodes que nous avons développées (Bracq *et al.*, 1992a, 1992b; Bracq, 1992; Delay *et al.*, 1991, 1992; Delay & Bracq, 1993) concernaient essentiellement le Nord-Ouest du Bassin de Paris, il était intéressant de vérifier leur validité dans une autre région. L'abondance des données disponibles dans le Gâtinais permettait de confronter les différentes approches utilisées.

La digitalisation des informations morphologiques concerne 15 cartes à 1/25 000 (liste : fig. 4) ce qui représente une surface de plus de 4300 km² pour 9175 segments de vallée (fig. 5).

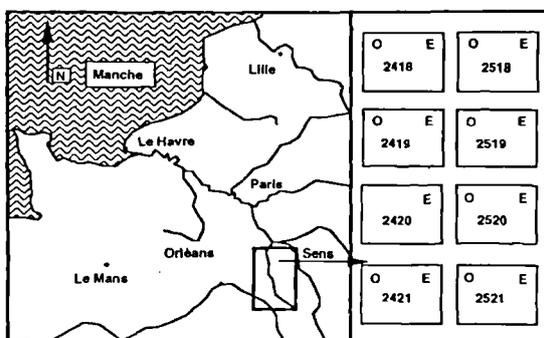


Fig. 4. — Carte de localisation du domaine d'étude et des cartes au 1/25 000 digitalisées.

Fig. 4. — Localisation map of studied area and maps at 1/25 000 digitalised.

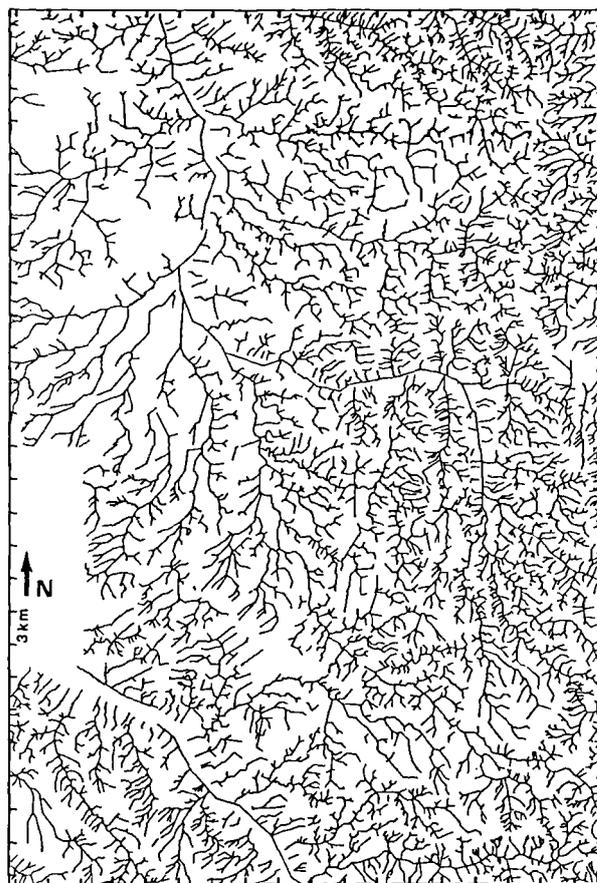


Fig. 5. — Carte des traits morphologiques digitalisés.

Fig. 5. — Map of digitalized morphologic features.

2) Les indicateurs karstiques.

A ce niveau, nous pouvons formuler quelques remarques et hypothèses concernant la répartition des dolines et l'existence de formes endokarstiques développées. Bakalowicz (1977, 1979) distingue deux types d'infiltration, l'une rapide conduit en profondeur des eaux très agressives et favorise la mise en place de l'endokarst, l'autre plus lente contribue essentiellement à la genèse des formes karstiques de surface et de subsurface. D'après nos observations tant sur le terrain qu'à partir de l'étude des indices morphologiques relevés sur les cartes topographiques, nous pouvons mettre en évidence dans le Gâtinais et le Sénonais deux zones distinctes. La première montre de nombreuses dolines (formes exokarstiques), les traçages effectués sont négatifs ou donnent des vitesses maximales de l'ordre de 30 à 35 m/h pour une distance maximale de 9000 m et aucun réseau pénétrable n'a été découvert jusqu'à présent. Dans la seconde, on observe très peu d'indices exokarstiques, par contre le développement de l'endokarst y est très important, citons par exemple la reconnaissance d'une rivière souterraine située à 60 m de profondeur. Les données de Salperwyck (1990) sur le bassin des reculées de la Seille (Jura) permettent de faire également cette constatation. Quatre réseaux karstiques, le Gouffre des Frites, le réseau de la Borne-aux-Casots, la Grotte de Bobignon et le réseau des Grottes du Dard ayant respectivement un développement de 333, 10511, 197 et 1428 m sont "installés" dans des secteurs à faibles densité

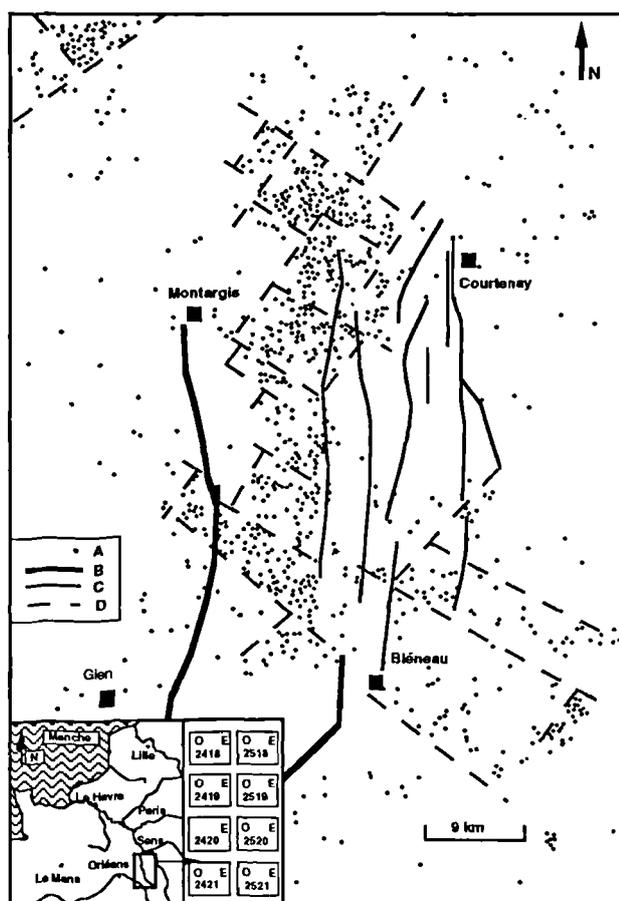


Fig. 6. — Carte de synthèse (A : doline, B : faille cartographique, C : faille reconnue par forage, D : limite de zone à forte densité de dolines.

Fig. 6. — Synthesis map (A : sinkholes, B : faults recognized on maps at 1/50 000, C : faults known by drilling, D : limit of the high density sinkhole area.

de dolines. La question qui se pose pour les phénomènes karstiques est de connaître l'influence de l'épaisseur et de la nature du recouvrement. 1022 dolines et 137 références toponymiques évoquant l'existence de phénomènes karstiques ont été relevées. Ces indicateurs ont des altitudes moyennes comprises entre 130 et 150 m. La réalisation d'une carte de répartition des dolines permet d'observer une disposition structurée des données de type karstique. En effet on observe des zones à très forte densité (fig. 6) cotoyant des zones à très faible densité mimant des dominos.

Dans le Gâtinais et le Sénonais, l'épaisseur du recouvrement et sa nature (mis à part les dépôts tertiaires de cette région, et encore ce n'est pas certain car on observe pratiquement aucune doline là où les formations tertiaires sont de nature carbonatée alors que l'on s'attendait, en toute logique, à en trouver) ne semblent pas jouer un rôle significatif. Les secteurs à dolines correspondraient par analogie de comportement aux zones non fracturées (infiltration lente) et les secteurs sans dolines mais à endokarst développé, aux zones fracturées (infiltration rapide). L'origine de ces distinctions est donc à rechercher ailleurs. La cause pourrait être liée au mode de réponse de compartiments de terrains à une sollicitation d'origine tectonique qui peut se réorienter en fonction du bâti

structural existant. Cela pourrait entraîner la surrection de certains compartiments non touchés par la fracturation alors que d'autres restés à un même "niveau", ou alors bloqués par d'autres pour différentes raisons, auraient subi une fracturation plus intense. Les expériences de modélisation des réseaux de fractures en fonction de contraintes montrent qu'il existe toujours des secteurs non affectés et on observerait la même chose à une échelle différente. Ce sont ces nuances qui conditionnent la nature des écoulements karstiques.

Une autre hypothèse peut être avancée, celle d'une microfracturation plus importante au niveau des zones à forte densité de dolines qui serait absente dans les zones à faible densité. En conséquence de quoi il y aurait dans les premières zones une dispersion des points d'absorption qui irait dans le sens d'un développement des formes exokarstiques et dans les secondes une concentration des eaux de ruissellement vers quelques points privilégiés d'absorption assurant la formation d'un endokarst notable.

V. — MISE EN ÉVIDENCE D'UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES: LES CASIERS.

Nous posons comme hypothèse que les compartiments, définis auparavant, sont limités par des failles probables de directions N 30-50 et N 110-130 compatibles avec les failles N-S reconnues par forages pétroliers si on admet pour ces dernières un jeu ou rejeu récent avec une composante décrochante ajoutée à la composante verticale mise en évidence par ces mêmes forages. Si on étudie la disposition des surfaces productives des champs pétrolifères de Chateaurenard, nous constatons qu'elles sont limitées par des failles et que leur altitude décroît d'Est en Ouest à l'intérieur de chaque compartiment (coupe W-E, fig. 7). Une autre coupe orientée Nord-Sud (fig. 7) montre une décroissance de l'altitude de ces gisements vers le Nord. On observe donc une série de blocs limités par des failles essentiellement orientées N-S (les failles W-E, n'apparaissant pas) et ayant un pendage de quelques degrés vers l'WNW. Ces observations sont corrélables avec l'organisation des secteurs à forte densité de dolines qui semblent s'inscrire à l'intérieur de blocs et le nombre de dolines est plus important globalement vers l'Est que vers l'Ouest. Les zones à forte densité sont donc les portions structurellement hautes des blocs.

Les failles potentielles tracées à partir des limites du réseau de dolines puis confrontées au réseau de talwegs montrent qu'il existe une très bonne corrélation et la réinterprétation structurale de la région (fig. 8) ne semble pas être imaginaire. La répartition de ces différents linéaments, déduits de l'analyse du réseau hydrographique, sous la forme d'histogrammes soit en nombre (A, fig. 9), soit en longueurs cumulées (B, fig. 9) fait apparaître quatre classes principales : N 00-10, 50-60, 80-90, 170-180 et deux classes secondaires d'orientation N 30-50 et N 120-130. La fracturation (C, fig. 9) relevée dans le Coniacien et le Santonien entre la Cléry et l'Ouanne (Lasne, 1992) s'organise principalement suivant la direction N 00-10 et de manière plus secondaire suivant les directions N 110-120 et N 160-170. Les correspondances entre les deux approches ne sont pas trop mauvaises mais il faut rappeler que l'analyse des linéaments se fait à partir de 193 éléments alors que pour la fracturation nous ne disposons que de quarante mesures. Cet ensemble de blocs a pu se soulever

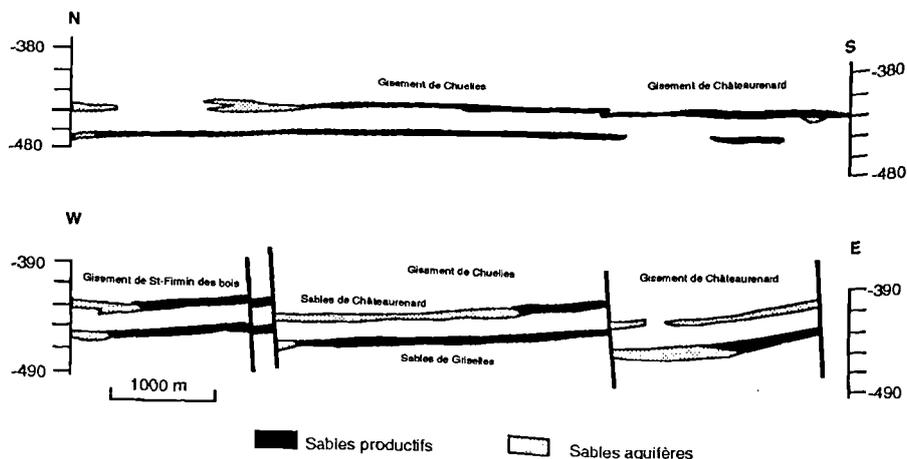


Fig. 7. — Coupes à travers les champs pétrolifères (d'après Bernard et al, 1963; in Lasne, 1992).

Fig. 7. — Cross sections through the petroleum fields (according to Bernard et al, 1963; in Lasne, 1992).

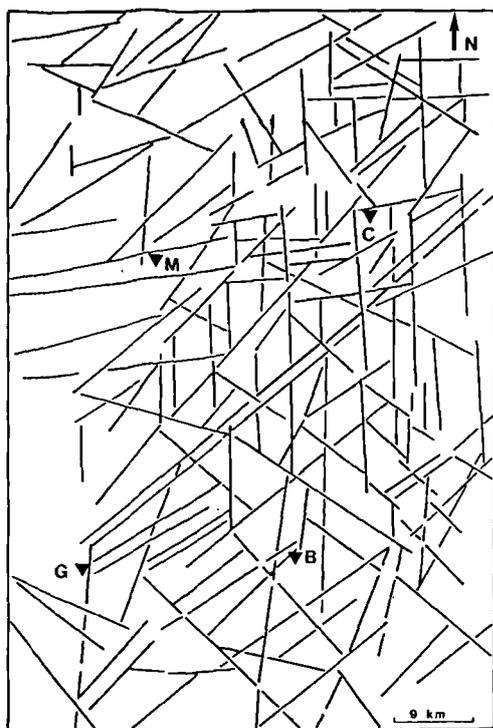


Fig. 8. — Carte structurale interprétée à partir des données morphologiques (M : Montargis, G : Gien, B : Bleneau, C : Courtenay).

Fig. 8. — Structural map deduced from the morphologic data (M : Montargis, G : Gien, B : Bleneau, C : Courtenay).

récemment permettant au karst de se développer (réajustement d'un équilibre perturbé) et d'être toujours visible en surface (dolines). Nous assimilons les compartiments à des casiers hydrogéologiques (Bracq *et al*, 1992b) dont les limites latérales sont des failles, la limite inférieure, un imperméable quelconque et la limite supérieure est dans ce cas l'altitude à partir de laquelle l'eau passe d'un casier à l'autre. Cette limite supérieure peut être

liée à l'altération plus ou moins prononcée des zones faillées près de la surface topographique. En fait, si on admet l'existence des casiers, on est en présence d'un tel élément limité par des failles et s'intégrant dans un ensemble plus vaste qui pourrait être le système aquifère selon la définition de Margat (1978; Système aquifère : c'est l'ensemble du champ spatial continu dans lequel les effets de diverses impulsions naturelles ou artificielles, plus ou moins localisées et continues ou non dans le temps peuvent se propager librement et par conséquent influencer le fonctionnement hydraulique. C'est un système physique fini dans lequel les réactions à des actions projetées sont prévisibles, localisables et quantifiables). Les bords des casiers peuvent être étanches ou à perméabilité très réduite ou alors permettre le passage de l'eau, par débordement et/ou par l'intermédiaire de drains. On observerait ainsi une mosaïque de blocs inclinés vers le Nord-Ouest, ceci dans un champ de contraintes actuel en extension orienté Nord-Est-Sud-Ouest entraînant l'ouverture des failles ou des fractures NW-SE. Ces deux facteurs structuraux conditionneraient les écoulements qui s'effectuent préférentiellement vers le Nord-Ouest. Les écoulements pourraient également suivre la bordure Ouest de ces casiers avant de se diriger vers un exutoire quelconque, il serait donc probable qu'on puisse obtenir un débit assez important si un forage était implanté à cet endroit. Si l'on prend en compte la nature lithologique de la région, on remarque évidemment qu'elle influence la répartition des forages productifs. Là où le recouvrement tertiaire est épais et peu perméable, on aura une forte proportion de forages secs comme par exemple au Nord de la Cléry, si par contre le recouvrement est peu épais et/ou perméable, les forages productifs seront en proportion dominante.

Il est à noter que les forages productifs portés sur la figure 3 ont un débit supérieur à 20 m³/h. La répartition de ces forages n'est pas tout à fait aléatoire. En effet, 68% sont localisés à l'extérieur des zones à forte densité de dolines, ce qui fait que la probabilité de trouver un forage productif à l'intérieur de ces zones est relativement faible à moins d'avoir la chance de forer directement dans un drain karstique. L'analyse poussée des éléments morphologiques permettrait vraisemblablement de définir des secteurs à forte probabilité pour la réussite des forages d'eau même dans des zones considérées comme très défavorables actuellement.

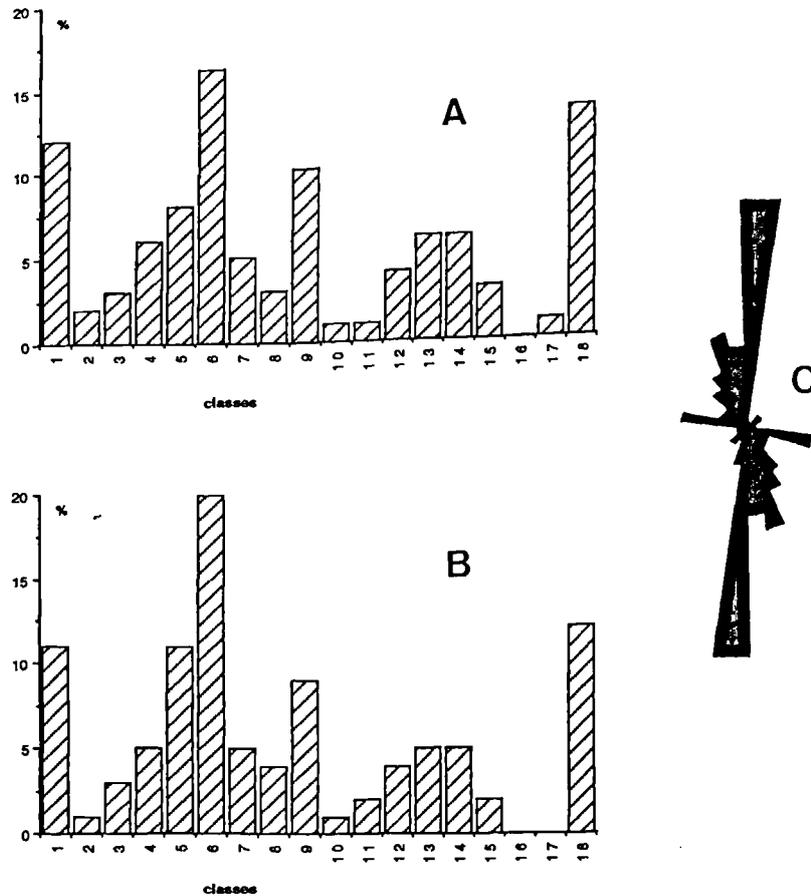


Fig. 9. — Histogrammes des linéaments déduits de l'interprétation du réseau hydrographique, en nombre (A) en longueurs cumulées (B) et comparaison avec la fracturation (C).

Fig. 9. — Histogram of lineament deduced by the interpretation of the hydrographic network, in number (A), in cumulated lengths (B), and comparison with the fracture net (C).

VI. — CONCLUSION.

A partir de l'analyse morphostructurale, il est possible de préciser l'extension des zones de productivité définies dans cette région (Lepiller & Lasne, 1990) par exemple, la zone II (fig. 6) serait plus réduite car la partie Ouest comporte un certain nombre de dolines (ou mardelles) et sa limite passerait vraisemblablement plus vers l'Est. Les zones I3 et III1 peuvent être étendues vers l'Ouest car l'information morphologique traduit une certaine homogénéité qui se répercute vraisemblablement sur les conditions hydrodynamiques. On peut affecter une

probabilité de réussite (débit supérieur à 8 m³/h) à un ouvrage en fonction de sa localisation géographique. Rappelons que, d'après l'analyse de la figure 6 il semble aléatoire de poursuivre des recherches en eau dans tous les secteurs à forte densité de dolines s'il n'y a pas d'études hydrodynamiques poussées de manière à déterminer exactement la position des drains karstiques. En ce qui concerne l'existence des casiers hydrogéologiques, les travaux récents de Gaviglio *et al* (1993) abondent dans le même sens, en prouvant qu'il y a une réduction importante de la porosité et une diminution de la taille moyenne des pores lorsqu'on se rapproche des surface de discontinuité matérialisées dans ce cas par des failles normales.

BIBLIOGRAPHIE

BAKALOWICZ M. (1977). — Relations entre la dynamique des eaux du karst et les processus de karstification. *Proc. 7th Intern. Speleol. Congress*, Sheffield, pp 10-12.
 BAKALOWICZ M. (1979). — Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doc. Etat. Univ. Paris VI. 269 p.

BRACQ P, HANICH L, DELAY F, et CRAMPON N. (1992a) - Mise en évidence par traçage d'une relation rapide entre la surface et les eaux souterraines, liée à des phénomènes de dissolution dans la craie du Boulonnais (Nord de la France). *Bull. Soc. géol. France*, t. 163, 2, pp 195-203.

- BRACQ P., COLBEAUX J.P., MAQSOU D., DELAY F. et CRAMPON N. (1992b). — Vers une nouvelle définition du concept de bassin versant en pays crayeux fracturé à partir de l'étude hydrogéologique du système aquifère des Sources de la Lys: 5ème coll. "Hydro. en Pays Calcaire", Proceedings, Neuchâtel, Suisse. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, 1, pp 77-87.
- BRACQ P. (1992c). — Effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux: apports de l'analyse morphostructurale. Thèse, Univ. Lille I 262 p.
- CALBA F. (1980). — Hydrogéologie du karst crayeux du Pays de Caux (France). Etude de deux bassins. Thèse 3ème cycle, Paris VI.
- COLBEAUX J.P. et SOMME J. (1981). — Fracturation du substrat crayeux et géomorphologie dans le Nord de la France. Exemple de la feuille de Desvres à 1/50 000. *Bull. Ass. Fr. Et. Quaternaire*, 1, pp 33-39.
- COLBEAUX J.P. et SOMME J. (1985). — Signification des analyses de linéaments dans le Nord de la France. *Hommes et Terres du Nord*, pp 195-200.
- COLBEAUX J.P., LEPLAT J., PAEPE R. et SOMME J. (1978). — Tectonique récente dans le Nord de la France et le Sud de la Belgique; exemple de la plaine de la Lys (feuille d'Hazebrouck à 1/50 000). *Ann. Soc. Géol. Nord*, t XCIII, pp 179-188.
- COLBEAUX J.P., DUPUIS CH., ROBASZYNSKI F., AUFFRET J.P., HAESAERTS P. et SOMMÉ J. (1980). — Le détroit du Pas-de-Calais: un élément dans la tectonique de blocs de l'Europe nord-occidentale. *Bull. Inf. Géol. Bassin Paris*, 17, pp 41-54.
- COLBEAUX J.P., SOMMÉ J. et TUFFREAU A. (1981). — Tectonique quaternaire dans le Nord de la France: l'apport du gisement paléolithique de Biache-saint-Vaast. *Bull. Ass. Fr. Et. Quaternaire*, 3-4, pp 183-192.
- COLBEAUX J.P., SOMMÉ J. et TUFFREAU A. (1988). — Le gisement paléolithique moyen de Biache-Saint-Vaast (Pas-de-Calais). *Mém. Soc. Préhist. Fr.*, Paris, 21, pp 61-67.
- DAUBREE A. (1879). — Etudes synthétiques de géologie expérimentale. t 1, Dunod, Paris, 478 p.
- DELAY F., BRACQ P. et de MARSILY G. (1991). — Traitement informatisé de linéaments morphostructuraux. Mise en oeuvre et perspectives d'application à l'Hydrogéologie. Séance spécialisée "Objets géologiques", *Soc. Géol. France., International stereology soc.*, sp. vol., Paris, pp 21-24.
- DELAY F., BRACQ P. et COLBEAUX J.P. (1992). — Cartographie numérique de linéaments morphostructuraux: exemple d'application à l'Hydrogéologie de la craie du Nord de la France. *Bull. Soc. géol. France*, 163, 3, pp 345-352.
- DELAY F. et BRACQ P. (1992). — Analysis of the spatial distribution of morphological features applied to the needs of hydrogeology, *Geosciences & Computers*, 19, 7, pp 965-980.
- GAVIGLIO P., CHAYE D'ALBISSIN M., BERGERAT F. et VANDYCKE S. (1993). — Modifications de texture dans la craie au contact de failles normales: un exemple de graben dans le bassin de Mons (Belgique). *Bull. Soc. géol. France.*, 164, 4, pp 565-575.
- LASNE E. (1992). Etude de la structure et du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique d'un système hydrologique karstique en milieu crayeux. Conceptualisation et modélisation de ce milieu à triple porosité. Exemple du système des Trois-Fontaines, Saint-Loup-de-Genois, Loiret. Thèse, Univ. Orléans, 437 p.
- LEPILLER M. et LASNE E. (1990). — Contribution à l'étude de la productivité des forages à l'amélioration de l'exploitation des ressources en eau de la craie. Exemple du Gâtinais, de La-Puisaye et du Berry (Sud du Bassin Parisien-France). Inédit.
- MARGAT J. (1978). — Définition des systèmes aquifères des pays de craie du Nord de du bassin parisien (Artois, Normandie, Picardie, Champagne). Coll. Régional. ROUEN. "Hydrogéologie de la craie du Bassin de Paris". *B.R.G.M. Orléans*, pp 409-414.
- POREL G. (1988). — Transfert de soluté en aquifère crayeux. Causes de modifications des résultats de traçages. Thèse 3ème cycle. Univ. Lille I, 327 p.
- SALPERWYCK M. (1990). — Structure et réponses hydrochimiques d'un système karstique de plateau (bassin des reculées de la Seille, Jura). *Ann. Sc. Univ. Besançon*, Mém. hors série n°10, 242 p.
- SMALL R.J. (1972). — The study of landforms. A textbook of geomorphology. Cambridge Univ. Press. 486 p.
- SOMME J. (1988). — Géomorphologie de la zone terminale du Tunnel sous la Manche dans le Nord de la France. *Hommes et Terres du Nord*, 1988, 3, pp 155-161.
- SOULA J.C. (1984). — Genèse de bassins sédimentaires en régime de cisaillement transcurrent: modèles expérimentaux et exemples géologiques. *Bull.Soc.belge Géol.*, 93, fasc. 1-2, pp. 83-104.

**ANALYSE MULTICRITERES D'UNE REGION DU NORD DE LA FRANCE
(BAPAUME).
IMPORTANCE DU CONTEXTE MORPHOSTRUCTURAL SUR LE DEBIT DES
CAPTAGES D'EAU POTABLE OBTENU DANS L'AQUIFERE CRAYEUX**

**Multicriteria analysis of France Northern country (Bapaume).
Morphostructural context importance on the productivity of boreholes located in
chalk aquifer**

par Thierry BONNET (*)(**), Jean-Pierre COLBEAUX (*)(***), Pierre BRACQ (*)(****)

Résumé. — En région Nord-Pas de Calais, l'aquifère crayeux fournit 97% de l'alimentation en eau potable. Toutefois, cet aquifère, considéré comme homogène à l'échelle régionale, ne l'est plus lorsque l'on s'intéresse à la productivité des ouvrages de captage. Pourtant implantés sur des sites apparemment similaires, ces captages ont des productivités très variables. Les causes de ce phénomène ont été recherchées.

Une analyse multicritère (morphostructurale, géologique et hydrogéologique), prouve à ce stade de l'étude, que les paramètres morphostructuraux ont une grande importance. En effet, dans une région typique du pays crayeux, seules les vallées alignées le long de linéaments morphologiques à fort développement (Linéaments Morphologiques Régionaux) sont productives. Ces vallées, dont l'existence est liée à la structure des terrains, comportent systématiquement sur leurs versants de fortes densités de rideaux. Néanmoins, ces résultats devront être validés sur d'autres régions du pays crayeux, afin d'y trouver confirmations, infirmations, nouvelles pistes de travail.

Abstract. — In the Nord Pas-de-Calais area, chalk aquifer contributes to 97% of the water supply. Considered as homogeneous and isotropic at the regional scale, this aquifer doesn't present the same characteristics when we analyze the productivity of the boreholes. However located on apparently similar sites, these boreholes show very variable productivities. The reasons of this phenomena have been searched.

A multicriteria analysis (morphostructural, geological and hydrogeological) proves at this stage of the study that morphostructural parameters have a great importance. Indeed, in a typical chalky country, only valleys which are superposed on large morphologic lineament (Regional Morphologic Lineament) are groundwater-productive. These valleys, of which presence is due to structural features of formations, show systematically high densities of lynchets on its slopes. Nevertheless, these results should be proved on a larger area in view to find some confirmations and new work's ideas.

I. — INTRODUCTION.

L'analyse morphostructurale, ou l'utilisation des données de relief dans les études géologiques, est une méthode peu coûteuse d'investigation reconnue depuis longtemps (Daubrée, 1879). Cependant, le véritable développement de cette démarche apparaît vers les années 1950 avec l'interprétation par photographie aérienne, et s'affirme dans les années 1980 sous l'impulsion conjointe de la Géographie Physique et des Sciences de la Terre.

Aujourd'hui l'utilisation des données du relief donne des résultats intéressants en hydrogéologie et semble être très prometteuse pour la compréhension du fonctionnement de l'aquifère crayeux du Nord du bassin de Paris.

Les opérations de recherche d'eau dans cet aquifère visent à découvrir les sites capables de produire de l'eau en quantité suffisante vu les demandes croissantes, et en qualité acceptable au regard des problèmes actuels de pollution (nitrates, pesticides, métaux lourds...). Toutefois, de nombreuses observations soulignent l'extrême hétérogénéité des débits obtenus pour des captages situés dans un contexte géologique et morphologique apparemment similaire.

Une évaluation, nécessaire vu la variabilité des données collectées, des incertitudes liées à la procédure d'essai de débit, destinée à connaître la productivité d'un ouvrage et une analyse multicritères du milieu physique ont été réalisées afin de tenter de comprendre ce phénomène d'hétérogénéité de productivité.

(*) J.E. 231-Hydrogéologie, Structure et Matériaux des Milieux Carbonatés, U.S.T.Lille, Bat. SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex.

(**) UFR Géographie, U.S.T. Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex

(***) UFR Sci. Terre, U.S.T. Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex

(****) Université du Littoral, Centre Universitaire de la Mi-Voix, Bat. H. Poincaré, 50 rue F. Buisson BP 699, 62228 Calais.

Note acceptée pour publication par le Conseil Scientifique le 31 Mai 1996.

II. — METHODOLOGIE : DEFINITION DU PROTOCOLE DE TRAVAIL.

Les résultats devant avoir une certaine validité statistique, il convient d'étudier le maximum de cas d'implantation de captages. Néanmoins, les limites de l'étude structurale imposent la restriction à une "zone-test" : définir le cadre structural de captages trop dispersés eut été trop fastidieux, une période de travail d'un an ayant été fixée pour cette première approche du problème .

A) CHOIX D'UNE RÉGION.

Le nombre de captages doit cependant être le plus élevé possible et la région choisie la plus simple possible d'un point de vue hydrogéologique. L'étude d'une zone où l'aquifère crayeux est à nappe libre, non recouvert de formations peu perméables d'âge Tertiaire et/ou Quaternaire marin, non soumis à des phénomènes de drainage, permet en effet de s'affranchir de complications (captivité, bilan d'alimentation complexe) pouvant gêner l'analyse multicritère prévue.

La région de Bapaume (territoire de la feuille géologique à 1/50 000), située au Sud de l'Arrageois, s'est avérée être la zone recherchée (fig. 1). La géologie y est apparemment simple : l'aquifère est composé des assises crayeuses du Crétacé supérieur, Turonien et Coniacien-Santonien, et repose sur les niveaux peu perméables des marnes du Turonien moyen. La craie est recouverte de limons quaternaires (au sens de la carte géologique) atteignant parfois 5m d'épaisseur. Les bassins versants de l'Authie et de l'Ancre prennent naissance sur ce plateau crayeux, entaillé par de nombreuses vallées sèches.

B) CHOIX DU PARAMÈTRE CARACTÉRISANT L'ESSAI DE DÉBIT.

De nombreuses méthodes d'interprétation des pompages d'essai existent, chacune poursuivant un but précis. Ici seules nous intéressent celles utilisées pour la définition de la productivité d'un ouvrage et la mesure des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère. Cependant la plupart des essais de débit disponibles n'ont pas été réalisés de manière suffisamment rigoureuse pour permettre le calcul dans les règles des transmissivités et des coefficients d'emménagement. De plus, l'utilisation de l'expression de Theis (1935) est encore courante pour ces calculs bien que les caractéristiques de l'aquifère crayeux, milieu non isotrope non homogène, rendent problématique son application.

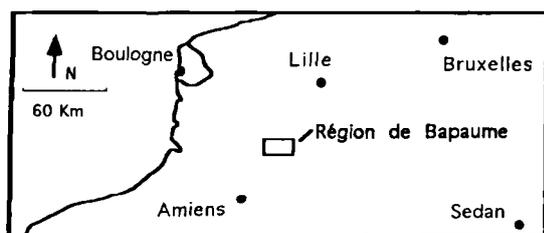


Fig. 1. — Localisation de la région étudiée
Fig. 1. — Location of the studied area

Souvent seuls sont disponibles le débit de pompage et le rabattement en fin de pompage. Le rapport débit/rabattement, ou débit spécifique (en m³.h⁻¹.m⁻¹) est donc le paramètre choisi afin de pouvoir comparer les productivités des différents captages étudiés.

1) Incertitudes liées à l'utilisation du débit spécifique.

Comparer des débits spécifiques entre eux ne se fait pas sans incertitudes, surtout liées d'une part aux conditions techniques de réalisation de l'essai de débit, d'autre part aux caractéristiques du paramètre «débit spécifique» lui-même.

a) Influence des conditions techniques de réalisation de l'essai de débit.

Trois catégories d'incertitudes peuvent influencer la valeur du débit spécifique :

- d'abord cette valeur peut être sous-estimée du fait d'un colmatage du tubage de l'ouvrage lorsque l'essai de débit est effectué alors que le captage existe déjà depuis un certain temps.

- ensuite et inversement, d'après Caous & Roux (1981), le débit spécifique peut être artificiellement amélioré par la réalisation d'une acidification préalable au pompage d'essai.

- enfin, la qualité du pompage peut être mise en cause : en effet une pompe thermique, par exemple, possède un débit de pompage beaucoup moins constant qu'une pompe électrique, ceci induisant une erreur dans le débit de pompage pris en compte dans les calculs.

b) Influence des caractéristiques du paramètre "débit spécifique".

Le débit de pompage a lui-même son importance lorsque l'on calcule un débit spécifique : en effet la relation débit de pompage/rabattement n'est pas linéaire : le débit spécifique diminue corrélativement à l'augmentation du débit de pompage. En bref, plus le débit de pompage sera important, moins le forage semblera productif.

Enfin, il faut savoir si le régime quasi-permanent a été atteint lors de la mesure du rabattement qui a servi au calcul du débit spécifique (le niveau dynamique de pompage doit être stabilisé) : le temps de pompage a donc également son importance.

2) La comparaison de la productivité des captages d'eau : méthode idéale et méthode choisie.

Afin de comparer rigoureusement l'ensemble des essais de débit étudiés sur la région de Bapaume, il eut donc été souhaitable de s'affranchir de ces incertitudes.

De ce fait, n'ont été étudiés que les essais de débit réalisés immédiatement après la foration de l'ouvrage, afin d'éviter les problèmes de colmatage. Néanmoins, les incertitudes liées à l'acidification et à la qualité du pompage n'ont pu être appréciées.

Quant à l'influence des caractéristiques du paramètre "débit spécifique" lui-même, comparer des débits spécifiques relatifs (débit spécifique correspondant à 1m de

rabattement) eut été la méthode idéale (Castany, 1982), mais cette technique suppose la réalisation d'un pompage par palier dont le protocole serait identique pour chaque captage testé. Aussi seuls ont été comparés les débits spécifiques disponibles dont le rabattement utilisé fut mesuré après un minimum de 8 heures de pompage. Castany (1982) fixe la durée minimum idéale d'un pompage longue durée à 42 heures.

La méthode employée ici est donc contrainte par des conditions idéales qui ne sont évidemment jamais réunies lors d'une collecte d'informations. Aussi, les résultats ne sauraient montrer autre chose que des phénomènes pour lesquels les incertitudes énumérées précédemment sont négligeables.

C) CHOIX DES PARAMÈTRES D'ÉTUDE DU MILIEU PHYSIQUE.

De nombreux paramètres du milieu physique pourraient a priori influencer les débits obtenus en captages. Tous n'ont pas encore été étudiés du fait de leur nombre, pour certains du fait de leur complexité. En effet, démontrer la présence et l'influence du karst, par exemple, nécessite un protocole de longs suivis (mesures de débit et de qualité d'eau). L'analyse multicritères est basée sur trois types de paramètres : morphostructuraux, géologiques et hydrogéologiques.

1) Les paramètres morphostructuraux.

Dans l'analyse morphostructurale en pays crayeux, deux paramètres sont classiquement utilisés, à la suite des travaux de Colbeaux & Sommé (1981, 1985), Bracq (1994) : les talwegs et les rideaux.

Le pays crayeux du Nord de la France est entaillé par de très nombreuses vallées, à écoulement pérenne, temporaire ou le plus souvent sèches. Est appelé talweg le linéament matérialisé par le fond de vallée. Les rideaux, très abondants en région, sont définis par Lasne (1890) comme des "dénivellations brusques se présentant sur les versants à faible pente des vallées". De nombreuses publications (de Lapparent 1890, Gosselet 1906, Gentil 1919, Aufrère 1929...) font apparaître des divergences d'opinion quant à leur origine.

Les paramètres de l'analyse morphostructurale permettent d'approcher la structure et la fracturation du matériau crayeux, éléments guidant l'écoulement de la nappe de la craie. En effet, il a été maintes fois démontré (Colbeaux et Sommé 1981, 1985; Colbeaux *et al.* 1978, 1980, 1981, 1988; Sommé 1988; Calba 1980; Small 1972) qu'il existait une bonne adéquation entre l'orientation des talwegs et la structuration tectonique d'une région. L'ensemble des travaux récents (Bracq *et al.*, Inédit) prouvent aujourd'hui qu'une majeure partie des rideaux est bien constituée de craie et qu'il existe une coïncidence parfaite, montrée par des études statistiques, entre les directions de fracturation du matériau crayeux et les directions des rideaux. Bien que leur mode de formation reste à éclaircir, les rideaux sont donc assimilables aux directions de fracturation.

La méthode de travail mise au point par Bracq (1994), basée sur un traitement informatique au moyen de programmes spécifiquement mis au point par Delay *et al.* (1991, 1992), permet d'obtenir un traitement statistique des talwegs et rideaux (directions d'objets par classe

d'orientation, nombre d'objets, longueurs cumulées d'objets).

2) Les paramètres géologiques.

Les caractéristiques lithostratigraphiques et structurales de l'aquifère crayeux, dont la connaissance est basée sur l'étude et l'interprétation des forages et des affleurements, peuvent avoir une influence, d'ailleurs parfois déjà démontrée, sur les débits obtenus en forage.

Ainsi, concernant les caractéristiques lithostratigraphiques, Gosselet (1904) montre qu'un niveau de craie indurée peut servir d'écran hydraulique à l'infiltration vers des couches plus profondes, l'eau circulant au dessus de ce banc induré, les arrivées d'eau à l'origine du débit du captage étant localisées à ce niveau. De même Dollé (1922) décrit dans le Cambrésis (Nord de la France) un niveau de craie qu'il appelle "craie bréchoïde". Cette craie, très aquifère, est à l'origine des bons débits obtenus dans certains forages lorsque ceux-ci la rencontrent.

Concernant les caractéristiques structurales, on connaît depuis longtemps l'influence de la structure des terrains sur les essais de débit ("conditions aux limites de l'aquifère": Dupuit, 1963). Plus précisément, une influence de cette structure sur le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère de la craie a déjà été démontrée :

- Gaviglio *et al.* (1993) montrent qu'il existe une réduction de la porosité et de la taille des pores du matériau crayeux au droit de failles normales étudiées dans le bassin de Mons (Belgique). Ce phénomène crée une barrière à perméabilité réduite modifiant les écoulements souterrains.

- Bracq *et al.* (1992) attribuent une origine structurale à l'inadéquation entre les débits de la source de la Lys (Nord de la France) et l'étendue de son bassin d'écoulement théorique. En fait, les débits de la source proviendraient uniquement d'un compartiment de l'aquifère limité par des failles. Ce type de fonctionnement paraît également exister en haute vallée de l'Escaut (Bonnet, 1995).

3) Les paramètres hydrogéologiques.

Ici, plusieurs phénomènes hydrogéologiques auraient pu être abordés, comme l'écoulement général de la nappe ou la présence du karst. Pourtant, seuls les niveaux piézométriques mesurés dans les captages lors de l'essai de débit ont pu être étudiés. L'influence du niveau piézométrique sur le débit des captages est bien connue : l'ennoiement ou le dénoyage de niveaux productifs de l'aquifère crayeux (fracture développée, niveaux de craie particuliers) en fonction du niveau de la nappe contribue aux variations de productivité des captages.

III. — RESULTATS : APPORTS DE L'ETUDE MULTICRITERES.

Une fois le protocole de travail défini, l'étude multicritères vise à tenter de corrélérer l'ensemble des paramètres aux valeurs de débit spécifique.

Les essais de débit disponibles sur la feuille géologique de Bapaume montrent une grande variabilité : les débits spécifiques oscillent de 0,46 à 616,67 m³.h⁻¹.m⁻¹. Bien

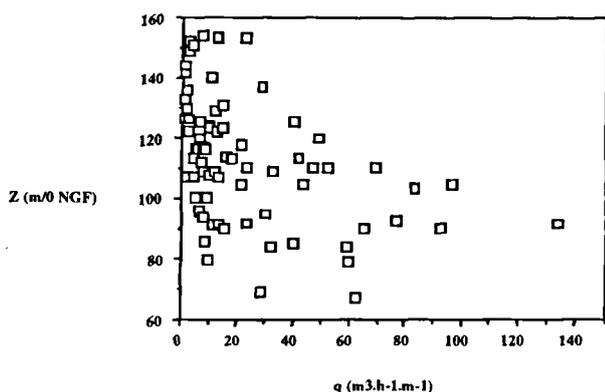


Fig. 2. — Répartition des débits spécifiques q en fonction de l'altitude z d'implantation du captage

Fig. 2. — Specific capacity q distribution when q varies as z, elevation of pumping well implantation

qu'une régionalisation par kriegeage (Matheron, 1970) n'ait pas fourni de résultats plus probants, les essais de débit sont suffisamment bien distribués spatialement pour réussir à les grouper grossièrement.

Le premier travail a porté sur les renseignements "techniques" de chaque ouvrage, ceci afin de détecter d'éventuels effets de structure au sein des données : année de l'essai, entrepreneur, profondeur de l'ouvrage, etc, ont été corrélés aux débits spécifiques. Plusieurs constatations peuvent être faites : les captages implantés après 1950 à moins de 112m d'altitude ont un débit spécifique très variable, alors que celui des captages implantés avant 1950 au dessus de 112m reste faible. La figure 2 montre la répartition des valeurs de débit spécifique (limitées à 150 m³.h⁻¹.m⁻¹ par souci de clarté) en fonction de l'altitude d'implantation du captage : plus l'ouvrage est implanté haut, moins il produit; tandis qu'à plus faible altitude sa productivité est très aléatoire.

En fait, ce dernier groupe de débits spécifiques représente l'ensemble des captages implantés en plateau, l'eau potable étant autrefois distribuée en réseau gravitaire.

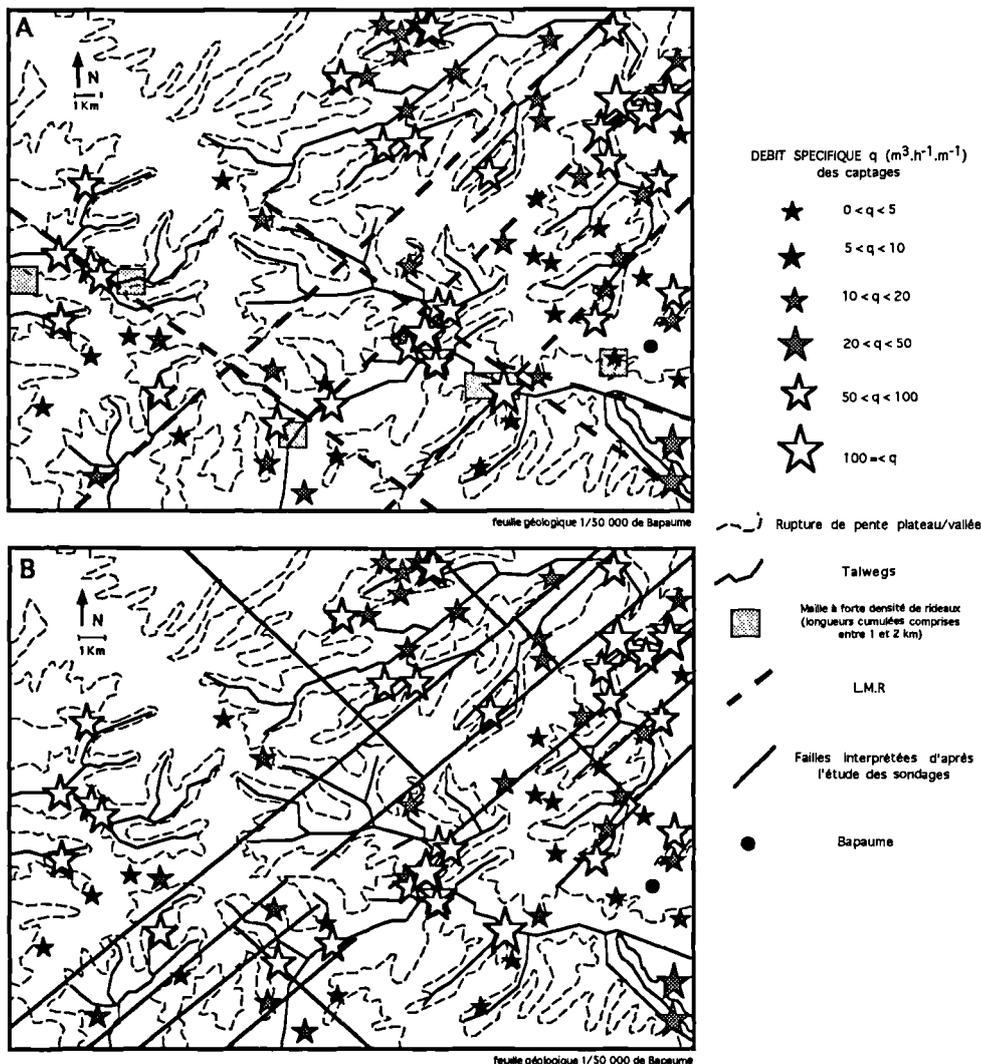


Fig. 3. — A : Utilisation des L.M.R (Linéaments Morphologiques Régionaux) et des rideaux dans la détermination des vallées productives : B : Structure de l'aquifère crayeux et productivité des captages.

Fig. 3. — A : Turning of R.M.L (Regional Morphologic Lineaments) and lynchets for determination of groundwater-productive valleys : B : Structural features of chalk aquifer and productivity of boreh.

La faible productivité de ces ouvrages est en accord avec le fait classiquement admis que la fracturation est moins développée sous les plateaux, fait moins propice à la circulation de l'eau.

A) CONTEXTE MORPHOSTRUCTURAL ET DÉBITS.

Néanmoins, les débits obtenus en vallées restent très variables. Les orientations et les longueurs des vallées et rideaux ont été traités statistiquement. La majeure partie des vallées et rideaux existant sur la feuille géologique de Bapaume sont orientés N30-60°, les directions les moins représentées étant N130-160°. L'orientation des vallées n'apporte qu'une information limitée quand à la répartition spatiale des débits : certaines vallées d'orientation N30-60° sont productives, d'autres ne le sont pas. Les vallées d'orientation N130-160° sont systématiquement productives, mais cette observation ne peut être qu'indicative vu le faible nombre de ces vallées sur le secteur étudié. Les rideaux ont été analysés en longueurs cumulées d'objets par maille d'un kilomètre carré : des mailles à forte densité de rideaux s'individualisent, et se localisent uniquement dans les vallées productives (A, fig. 3).

Ces vallées, observées à plus petite échelle, s'organisent le long de linéaments morphologiques d'extension assez importante (A, fig. 3), de l'ordre de la vingtaine de kilomètres pour les plus restreints : les linéaments morphologiques régionaux (L.M.R). Daubrée (1879) puis Bracq (1994) démontrent qu'il est possible d'interpréter ce genre de linéaments comme des failles.

La structure de l'aquifère crayeux commanderait donc la répartition des vallées productives, les paramètres morphologiques (L.M.R et densité de rideaux) étant l'expression de cette structure. Les fortes densités de rideaux se répartissent le long des failles ainsi interprétées. Il est néanmoins intéressant d'observer que ces rideaux n'y apparaissent pas de façon continue.

B) CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET DÉBITS.

La consultation de différentes archives a fourni 170 coupes géologiques, obtenues en sondage, suffisamment renseignées pour permettre d'interpréter au sein des couches crayeuses des failles se répartissant en deux familles de direction N40-60° et N120-140° (B, fig. 3).

Ces failles, dont seule la composante verticale peut être mise en évidence par cette méthode d'interprétation, découpent le matériau crayeux en blocs surélevés ou affaissés les uns par rapport aux autres. Parallèlement, des mesures de fracturation effectuées dans 10 carrières de la région, montrent par leur homothétie directionnelle avec les failles, le respect à l'échelle locale de cette géométrie «en casier» de l'aquifère crayeux (fig. 4). Cependant, une trop faible densité de plans striés interdit toute reconstitution de tenseurs de contrainte.

Les coupes géologiques permettent également d'identifier un «banc de meule», craie très dure dont l'épaisseur varie de 0,4 à 1,7m lorsque le banc ne se dédouble pas, se situant à la limite du Coniacien et du Turonien supérieur. L'influence de ce banc de craie sur la répartition spatiale des débits n'apparaît pas prépondérante à l'échelle d'observation qu'est la carte géologique à 1/50 000.

Par contre, l'organisation structurale de l'aquifère, déduite de l'étude des sondages, laisse apparaître des zones productives en eau. L'hypothèse d'une répartition par bloc, ou «casier hydrogéologique» (Bracq et al, 1992), pourrait être avancée, mais la corrélation structure/débits spécifiques, toujours étudiée au 50000 ème, montre plutôt une répartition des captages à fort débit le long de certaines failles interprétées des sondages (F.S) (fig. 4).

C) CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE ET DÉBITS.

Afin de compléter ces résultats, le dernier point travaillé a porté sur les rapprochements possibles entre débits spécifiques et épaisseur saturée de l'aquifère ou la profondeur de la nappe par rapport à la surface. Il apparaît en fait qu'aucune des hypothèses pouvant être élaborées dans ce sens ne soit probante. Sur le secteur étudié, il existe des vallées de direction et de longueur relativement identiques, pour lesquelles la profondeur de la nappe est similaire : or des vallées (situées sur des L.M.R) sont productives alors que d'autres ne le sont pas.

IV. — CONCLUSION.

L'étude multicritères sur la région de Bapaume permet de montrer l'influence prépondérante des paramètres morphostructuraux sur les débits obtenus en captages. Plus précisément, ces paramètres révèlent les particularités structurales de l'aquifère crayeux, à l'origine des hétérogénéités de productivité rencontrées.

A ce stade du travail, trois critères permettent de détecter les vallées productives en eau :

- le tracé des linéaments morphologiques régionaux (L.M.R),
- l'interprétation des failles déduites des sondages (F.S).
- le calcul des fortes densités de rideaux.

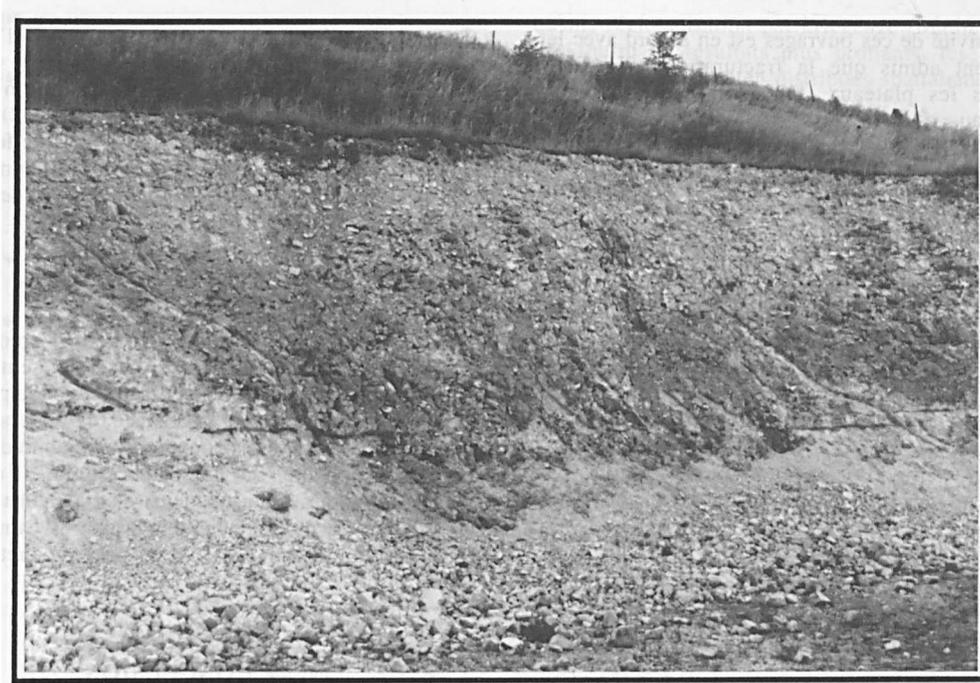
Ainsi, systématiquement pour la région étudiée, une vallée est productive lorsqu'elle fait partie intégrante d'un L.M.R, de fortes densités de rideaux apparaissant le long de ces linéaments.

L.M.R et failles interprétées sont-ils confondus ? En fait il existe plusieurs cas de figure :

- 1 : L.M.R et F.S coïncident
- 2 : un L.M.R ne coïncide pas avec une faille (F.S)
- 3 : une faille (F.S) ne coïncide pas avec un L.M.R

Dans les deux premiers cas, les vallées concernées sont productives, alors que dans le troisième la productivité reste très aléatoire. Si l'on considère que tout L.M.R est l'expression morphologique d'une faille (Daubrée 1879, Bracq 1994), on pourrait penser que, pour le cas 2 défini auparavant, il existe néanmoins une faille dont la composante serait uniquement décrochante : en effet, il existe une telle densité de sondages au droit des linéaments concernés par ce cas que tout rejet relativement important serait visible.

De là, il est possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle le type de faille régirait les zones à forte productivité en eau : une faille à composante décrochante, générant une zone broyée plus ou moins étendue, serait à l'origine d'un milieu où le matériau, densément fracturé, laisserait libre passage aux circulations d'eau.



Orientation de la fracturation
par classe de 10°

Histogramme des mesures

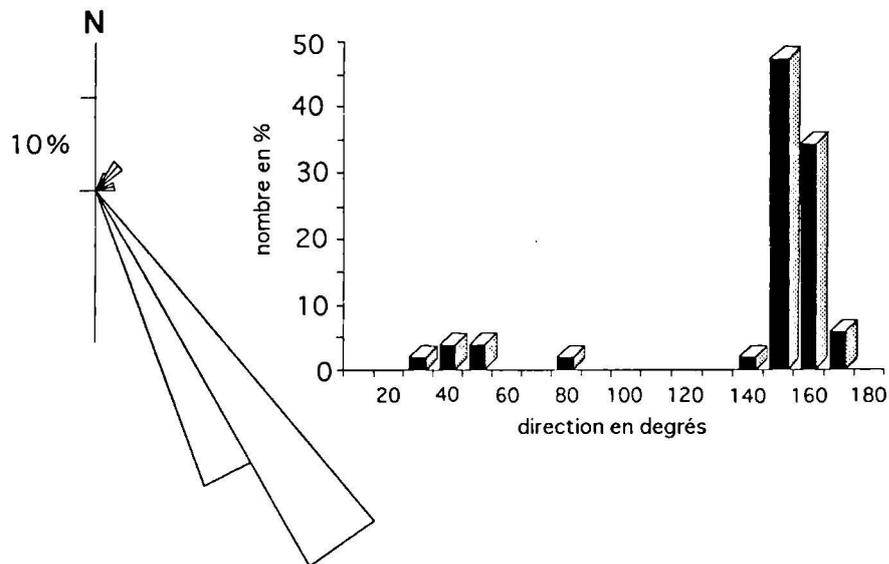


Fig. 4. — Particularités structurales à l'échelle locale : petit graben de la carrière "vallée Guillotte" (orientation : N 140°) et fracturation associée.

Fig. 4. — Structural features at local scale : little ploughed up block of "vallée Guillotte" (orientation : N 140°) quarry and present fractures.

Cette hypothèse de travail laisse un large champs aux investigations futures. Les résultats exposés ici sont en cours de validation sur d'autres régions du pays crayeux, d'autres paramètres sont à l'étude (fracturation et

contraintes des terrains : Vandycke 1992, dissymétrie des vallées, phénomènes karstiques, etc). Des captages productifs implantés en plateau ont aussi été recensés dans d'autres régions : ce phénomène reste également à étudier.

BIBLIOGRAPHIE

AUFRERE L. (1929). — Les rideaux : étude topographique. *Ann. Géogr., Paris*, 38, 529-560.

BONNET T. (1995). — Apports de l'analyse morphostructurale à l'étude hydrogéologique du Haut Escaut. *Bull. Nord Nature*, fasc. 77, 41-42.

- BRACQ P., COLBEAUX J.P., MAQSOU D. A., DELAY F., CRAMPON N. (1992). — Vers une nouvelle définition du concept de bassin versant en pays crayeux fracturé à partir de l'étude hydrogéologique du système aquifère des sources de la Lys. *Séme Coll. "Hydrogéologie en pays calcaire", Proceedings, Neuchâtel, Suisse, Ann. Sc. Univ., Besançon, 1, 77-87.*
- BRACQ P. (1994). — L'effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apports de l'analyse morphostructurale. Thèse Univ. Lille I, *Soc. Géol. Nord, Pub. n°21, 224p.*
- BRACQ P., DELAY F., COLBEAUX J.P. (inédit). — Transmissivity and morphological features in chalky aquifers : a geostatistical approach (soumis pour publication à *Journal of Hydrology*).
- CAOUS J.Y., ROUX J.C. (1981). — Ressources en eaux souterraines de la Picardie (France), *Bull. BRGM, sect III, n°1, p 19-52.*
- CALBA F. (1980). — Hydrogéologie du karst crayeux du pays de Caux (France), Etude de deux bassins, Thèse 3ème cycle, Paris VI, 189p.
- CASTANY G. (1982). — Principes, et méthodes de l'Hydrogéologie, Dunod, 235p.
- COLBEAUX J.P., LEPLAT J., PAEPE R., SOMME J. (1978). — Tectonique récente dans le Nord de la France et le Sud de la Belgique; exemple de la plaine de la Lys (feuille d'Hazebrouck à 1/50 000), *Ann. Soc. Géol. Nord, 93, 179-188.*
- COLBEAUX J.P., DUPUIS CH., ROBASZYNSKI F., AUFFRET J.P., HAESAERTS P., SOMME J. (1980). — Le détroit du Pas-de-Calais : un élément dans la tectonique de blocs de l'Europe nord-occidentale, *Bull. Inf. Géol. Bassin Paris, 17, 41-54.*
- COLBEAUX J.P., SOMME J., TUFFREAU A. (1981a). — Tectonique quaternaire dans le Nord de la France : l'apport du gisement paléolithique de Biache-saint-Vaast, *Bull. Ass. Fr. Quaternaire, 3-4, 183-192.*
- COLBEAUX J.P., SOMME J. (1981b). — Fracturation du substrat crayeux et géomorphologie dans le Nord de la France, exemple de la feuille de Desvres 1/50 000, *Bull. Ass. Fr. d'Et. du Quaternaire, 1, 33-39.*
- COLBEAUX J.P., SOMME J. (1985). — Signification des analyses de linéaments dans le Nord de la France, *Hommes et Terres du Nord, 195-200.*
- COLBEAUX J.P., SOMME J., TUFFREAU A. (1988). — Le gisement paléolithique moyen de Biache-saint-Vaast (Pas-de-Calais), *Mém. Soc. Préhist. Fr., Paris, 21, 61-67.*
- DAUBREE A. (1879). — Etudes synthétiques de géologie expérimentale, T1, Dunod, Paris, 478p.
- DELAY F., BRACQ P., MARSILY G. de (1991) - Traitement informatisé des linéaments morphostructuraux, mise en oeuvre et perspectives d'application à l'hydrogéologie de la craie du Nord de la France. Séance spécialisée "Objets Géologiques". *Soc. Géol. France, International stereology soc., sp. vol., Paris, p22-24.*
- DELAY F., BRACQ P., COLBEAUX J.P. (1992). — Cartographie numérique des linéaments morphostructuraux : exemple d'application à l'Hydrogéologie de la craie du Nord de la France, *Bull. Soc. Géol. France, 163, 3, 345-352.*
- DOLLE L. (1922). — La craie bréchoïde de Solesmes, *Ann. Soc. Géol. Nord, 47, 65-69.*
- DUPUIT J. (1963). — Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux et à travers les terrains perméables, Dunod 2ème éd., Paris.
- GAVIGLIO P., CHAYE D'ALBISSIN M., BERGERAT F., VANDYCKE S. (1993). — Modifications de texture dans la craie au contact de failles normales : un exemple de graben dans le bassin de Mons (Belgique), *Bull. Soc. Géol. France, 164, 4, 565-575.*
- GENTIL L. (1919). — Sur la genèse des formes de terrains appelés rideaux en pays crayeux, *C.R. Acad. Sci., 169, 145-148.*
- GOSSELET M.J. (1904). — Les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France. Fasc. 1, région de Douai, Imprimerie nationale Paris, 141p.
- GOSSELET M.J. (1906). — observations sur les creuses de l'Artois et de la Picardie et réflexions sur l'importance de la dissolution souterraine de la craie, *Ann. Soc. Géol. Nord, 35, 237-243.*
- LAPPARENT DE A. (1890). — Note sur la formation des ressauts de terrain dit rideaux, *Bull. Soc. Géol. France, 1-7.*
- LASNE H. (1890). — Corrélation entre les diaclases et les rideaux des environs de Doullens, *C.R. Acad. Sciences, 111, p 73-74.*
- MATHERON G. (1970). — Structure aléatoire et géologie mathématique, centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, *Rev. Inst. Inter. Stat., 5, 38, 1.*
- SMALL R.J. (1972). — The study of landforms, a textbook of geomorphology, Cambridge Univ. Press, 486p.
- SOMME J. (1988). — Géomorphologie de la zone terminale du Tunnel sous la Manche dans le Nord de la France, *Hommes et Terres du Nord, 1988, 3, 155-161.*
- THEIS C.V. (1935) - The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geoph. Union Trans. 16th ann. meeting, Washington, p 519-524.*
- VANDYCKE S. (1992). — Tectonique cassante et paléo-contraintes dans les formations crétacées du Nord-Ouest européen. implications géodynamiques. Thèse Univ. Paris VI, 210p.

LA CRAIE DU BASSIN ARTOIS-PICARDIE PEUT ELLE ETRE KARSTIFIEE?

The chalk of Artois-Picardie basin could it be karstified?

par A. MAQSOUUD(*), P. BRACQ(**), N. CRAMPON(*) & J.P. COLBEAUX(*)

Résumé. — Souvent méconnus, les phénomènes karstiques, jouent un rôle primordial dans le transport de matières polluantes vers et dans l'aquifère crayeux. Il en est de même pour les réseaux de failles et de fractures. A partir d'observations sur le terrain, il est établi que les phénomènes karstiques sont une réalité dans le Nord de la France. L'application de trois méthodes : étude des débits classés, des courbes de récession et l'analyse corrélatoire et spectrale aux sources de la Lys, nous permettent de confirmer l'existence fonctionnelle de ce karst et d'en caractériser les modalités.

Abstract. — Usually unknown, karstic phenomena take a large part in the transport of pollutants towards the chalk aquifer. It is the same thing for the faults and fractures networks. From on field survey it is proved that the karstic phenomena are a reality in the north of France. The application of three methods to Lys springs: ranked discharges, hydrograph recession, autocorrelation and spectral analysis allows us to confirm the functional reality of this karst and thus to define its modalities.

I. — INTRODUCTION GENERALE

La craie se présente comme une roche relativement homogène et isotrope à l'échelle de l'échantillon macroscopique. Par contre, à l'échelle du terrain, de l'hydrosystème notamment, les terrains crayeux deviennent aquifères par suite de leur fissuration. La fréquence et le degré d'ouverture des fissures conditionnent la gamme des perméabilités et entraîne conjointement une double porosité (matricielle et fissurale). Compte tenu de la connectivité des fissures et, en général de leur étroitesse d'ouverture, cet aquifère contient une véritable nappe, analogue à celle des aquifères poreux, avec une piézométrie et un écoulement d'ensemble lent. Toutefois, des ouvertures plus importantes de fractures, voire leur agrandissement par dissolution, occasionnent des écoulements beaucoup plus rapides mais toujours très localisés.

A l'échelle régionale, la piézométrie est déduite des ouvrages disponibles, implantés en fonction des besoins de prélèvements et plus occasionnellement de piézomètres de contrôle, rarement abondants, aussi les courbes isopièzes, interpolées, ne peuvent généralement pas traduire ce qui devrait apparaître comme "une anomalie piézométrique". Il peut donc s'ensuivre une interprétation erronée du sens des écoulements et plus particulièrement des écoulements rapides. Les manifestations karstiques ne sont pas absentes de ces terrains crayeux, même si elles n'atteignent pas l'ampleur que l'on connaît dans les grands karst européens ou mondiaux. Malgré un certain développement dans les régions comme la Normandie, elles sont souvent discrètes

voire totalement méconnues dans d'autres. Or la présence d'un réseau karstique peut, localement et fortement, modifier les sens et les vitesses d'écoulement des eaux souterraines avec tout ce que cela implique en matière de vulnérabilité et de protection de captages. En milieu crayeux la reconnaissance hydrogéologique passe, en conséquence, par une phase de recherche sur la localisation des manifestations karstiques, l'extension des réseaux, le sens et les vitesses de transport. Identifié de manière certaine en Normandie et dans le Gatinais (Martel, 1894, 1921, Rodet, 1992), le karst reste cependant un accident de la circulation des eaux dans les autres régions de France à substrat crayeux (Crétacé supérieur). La multiplication des reconnaissances du sol et du sous-sol et, parallèlement, des observations de terrain ainsi que des études hydrodynamiques de quelques sources au cours de ces dernières années (Bracq, 1992; Bracq *et al*, 1992a, 1992b; Colbeaux *et al*, 1993; Maqsoud, 1991) prouvent que la craie peut être karstifiée dans le Nord de la France comme dans toute autre région crayeuse.

II. — OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN

1) Les effondrements de terrain

a) Le vallon de Fourdebecques à Wavrans sur l'Aa

Des arrachements de dépôts limoneux alluvionnaires se sont produits en Février 1988 dans une zone de 300 m de long pour une largeur de 10 à 30 m et une profondeur

(*) Université des Sciences et Technologies de Lille, J.E. 231, Bât. SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

(**) Université du Littoral, Centre Universitaire de la Mi-Voix, Bat. H. Poincaré, 50 rue F. Buisson BP 699, 62228 Calais.

Note acceptée pour publication par le Conseil Scientifique le 31 Mai 1996.

maximale de l'ordre de 2,5 m dans ce vallon drainé par un ruisseau. Des encaissements très rapides et profonds de plus de deux mètres peuvent être observés dans le lit même du ruisseau, mais seraient antérieurs aux arrachements décrits. Une forte augmentation du gradient hydraulique dans les alluvions, à la suite de pluies intenses, pourrait être à l'origine de ce qui apparaît comme le déclenchement d'une rapide érosion régressive. Toutefois l'observation détaillée des effondrements de surface, la proximité d'une importante émergence dans la craie à la base de l'un des versants du vallon et l'absence d'accumulation notable de sédiments, à l'aval des arrachements semble être plutôt en faveur d'effondrement de ces mêmes sédiments dans des cavités ou conduits karstiques de la craie sous-jacente, décolmatés par suite d'une variation rapide du niveau de la nappe correspondante.

b) Le haut bassin de la Sensée

La zone où se sont produits les effondrements est située au Sud-Est d'Arras aux environs de la commune de Saint-Léger dans le haut bassin de la Sensée. Le chantier TGV, parallèle à l'autoroute A1, recoupe à cet endroit le cours temporaire de la Sensée à une altitude de +70 m NGF. Les formations géologiques observables, grâce aux travaux, sont essentiellement constituées par la craie sénonienne et par des blocs de grès tendres tertiaires. La surface de la craie est percée par de nombreuses poches de dissolution colmatées par un matériel argilo-sableux quaternaire, des sables tertiaires remaniés et des résidus de dissolution de la craie (argile à silex). La plupart des effondrements se sont produits après la mise en service d'un forage d'eau. L'hypothèse d'une remise en mouvement des terrains, à la suite de pompages, à partir d'anciennes sapes de guerre paraît peu vraisemblable en raison d'une situation en fond de vallée, en zone inondable et pratiquement au niveau de la nappe. Par contre la remise en mouvement de matériaux colmatant des formes exokarstiques paraît plausible. Par ailleurs, le fait que les effondrements (taille maximale: 5 m de diamètre pour une profondeur de l'ordre de 3,5 m) s'alignent sur une direction N 60 et qu'ils ont continué à évoluer même après l'arrêt des pompages, milite également pour un décolmatage d'une structure naturelle vraisemblablement karstique.

2) L'hétérogénéité des terrains crayeux

- Toutes les formations crayeuses ont subi des contraintes tectoniques qui ont engendré des discontinuités (fractures, failles) plus ou moins importantes et nombreuses en fonction de leur position stratigraphique et de leur nature. La stratification même des dépôts engendre une certaine discontinuité renforcée épisodiquement par des hard-grounds et des bancs de craie indurée ou de silex ("Tun" et "Meules"). L'existence de ces discontinuités permet souvent un écoulement préférentiel à leur sommet (fig. 1) et parfois le développement de drains karstiques.

- Des dissolutions : la craie en surface peut être altérée, par la circulation des eaux au niveau des diaclases et des fissures, et donner, lorsque certaines conditions sont réunies, des poches de dissolution.

Ces poches de dissolution, parfois coalescentes, ont près de la surface une forme d'entonnoir et peuvent se prolonger vers le bas par un boyau conique. Une fois l'altération amorcée, elles sont en constante évolution. Leur forme est assez variable mais comprise entre deux types extrêmes (Lasne, 1890), le premier, évasé,

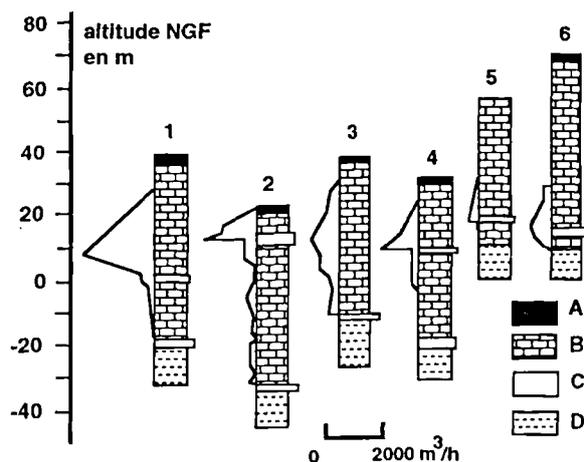


Fig. 1. — Horizons productifs selon Gosselet, 1904 [A : sol. B : craie. C : niveau induré, D : craie marneuse; 1 (fosse 5 de Lens) et 2 (fosse 8 de Courrière) : le long de la vallée de la Souchez; 3 (fosse 1 de Lens) et 4 (fosse 2 de Courrière) : dans les vallons; 5 (fosse 3 bis de Lens) et 6 (fosse 11 de Lens) : en plaine].

Fig. 1. — Productif levels according to Gosselet 1909 [A : Soil. B : Chalk. C : Hardnes level, D : Marly chalk. 1 (shaft 5 at Lens) and 2 (shaft at Courrière) : in the souchez valley. 3 (shaft 1 at Lens) and 4 (shaft 2 at Courrière) : in dry valley; 5 (shaft 3 bis at Lens) and 6 (shaft 11 at Lens) : in plain.

ressemblant à un entonnoir, d'une profondeur généralement inférieure à 20 m, le second, cylindrique, en puits profond peut atteindre une profondeur de 35 m (maximum observé). Lasne (1890) montre que le centre des poches de dissolution se trouve régulièrement déterminé par la rencontre de deux ou d'un plus grand nombre de diaclases. Il a pu observer des poches, parfois très importantes, alignées sur une centaine de mètres, sur une même diaclase.

Le façonnement de cette géomorphologie se serait vraisemblablement opéré vers la limite Pleistocène inférieur- Pleistocène moyen (Sommé, in Colbeaux *et al.* 1993).

- D'autres manifestations de dissolution du milieu crayeux peuvent être observées en différentes places, soit directement, par la présence de formes karstiques telles que dolines, conduits karstiques, soit indirectement par la rapidité des écoulements souterrains.

3) Les indicateurs karstiques

a) Les pertes de ruisseaux

Des pertes peuvent être liées soit à la traversée de failles, soit à des variations dans la nature des couches traversées soit en dernier lieu à des phénomènes karstiques. Certaines sont connues dans la craie du Nord de la France (Leriche, 1909, Vallée de l'Escaut, Cambrésis : elles sont parfois localisées au pied des rideaux qui, selon nous, correspondent à des axes de fracturation). Dans le haut bassin de l'Escaut de véritables pertes permettent l'engouffrement des eaux issues des formations tertiaires (Leriche, 1926).

b) Les dolines

Ces formes sont particulièrement connus depuis longtemps sur le haut bassin des sources de la Lys. Toutefois une analyse des cartes topographiques à 1/25 000

de l'IGN a permis d'en relever 260 (après vérification sur le terrain) sur un tiers de la région Nord-Pas-de-Calais, avec une densité variable d'un secteur à l'autre.

c) *Les débits importants et variables des sources*

En Artois-Picardie, les sources les plus importantes sont souvent situées en tête de vallée humide et donnent naissance à des cours d'eau pérennes. En Artois, la source de la Lys a un débit moyen de 80 l/s et maximal de 500 l/s. Certaines sources à variation rapide de débit (0 à 150 l/s) s'alignent au pied de cuestas soulignant la présence de failles, notamment dans le bassin de l'Authie (d'Arcy, 1969, 1978). En Picardie, Caous & Roux (1981) ont dénombré 42 sources à débit supérieur à 100 l/s, dont deux dépassant 500 l/s. Les sources artésiennes ne sont pas rares non plus, dans les fonds de vallées humides de l'Artois et de la Picardie. Mais la mise en charge peut aussi s'effectuer sous des niveaux moins perméables au sein de la série crayeuse comme en Artois (haute vallée de la Lys) et en Picardie (vallées de l'Ancre et de l'Halluë).

4) **Les manifestations d'écoulement rapide**

a) *Escalles*

En Artois-Picardie, on a localement noté des venues importantes d'eau, liées à des ouvertures appréciables de fractures ou de joints. En l'absence d'observations directes, la limite entre circulation fissurale rapide et circulation karstique est difficile à préciser, ainsi le traçage réalisé à Escalles (Cap Blanc-Nez) en 1989-90 a mis en évidence une vitesse maximale d'écoulement de 53 m/h pour un trajet apparent de 2225 m sous vallée sèche après infiltration à travers 57 m de craie non saturée (Bracq *et al*, 1992a). Cette expérience a montré que les écoulements ont suivi deux directions, N010 puis N110-120 déduites de l'analyse morphostructurale mais qui correspondent également à des familles de fractures connues régionalement. Cette valeur de vitesse est communément relevée lorsque l'injection est effectuée dans la zone non saturée en domaine karstique (Roux, 1978).

b) *Quesques*

Quesques est une petite commune située sur le rebord de la cuesta boulonnaise. A quelques centaines de mètres en arrière de la cuesta que forme la limite d'affleurement de la craie, quelques dolines et bétoires permettent l'infiltration des eaux de ruissellement d'un hameau. Dans les années 90, une injection d'eau de javel dans l'un de ces points d'engouffrement a permis de mettre en évidence une relation avec un captage d'alimentation en eau potable situé en contrebas de la cuesta crayeuse à une distance d'environ 3000 m. L'eau souterraine s'écoule ici à contre-sens des eaux superficielles du bassin versant au sein duquel s'inscrivent les engouffrements cités. Si l'on se réfère aux indications qui nous ont été rapportées après cette expérimentation on peut estimer la vitesse maximale de transfert à 300 m/h avec une injection effectuée dans la zone non saturée. De telles discordances entre bassin versant hydrographique et hydrosystème souterrain ont souvent été mise en évidence dans les secteurs crayeux bien karstifiés, en Normandie notamment (Roux, 1978; Crampon *et al*, 1993) et même dans le Pas-de-Calais pour le bassin de la Hem (El-Ouafi, 1993), pour la Lys (Bracq *et al* 1992b). Si la concordance entre bassin versant hydrographique et

hydrosystème souterrain reste la règle générale, on constate déjà des écarts de plusieurs kilomètres entre les lignes de partage des eaux souterraines et superficielles dans le bassin de la Somme, en Picardie (Caous et Roux, 1981).

5) **Conduits et traces de dissolution observés**

Dans une carrière (Mastaing) exploitant la craie sénonienne, des conduits karstiques d'environ 10 à 15 cm de diamètre ont été observés (fig. 2). Ils sont en général développés le long de plan de discontinuités représentés dans ce cas par des joints (sans déplacement relatif). A Lumbres, des poches de dissolution (fig. 3) mais également des conduits colmatés par des formations sableuses sont observables. En carrière souterraine (Lumbres et la Chapelle Saint-Louis) les indices de karstification correspondent essentiellement à des failles agrandies par dissolution et à des drains karstiques de 15 cm de diamètre développés le long de failles. Des phénomènes de dissolution ont été observés le long des joints de stratification de la craie dans l'Est du Cambrésis (Dollé, 1923). Dans le cas du traçage d'Escalles il est possible d'étayer l'hypothèse de l'existence de phénomènes karstiques car dans une carrière souterraine située à 1500 m à l'Est d'Escalles, et suivant les directions de la fracturation, deux drains karstiques se sont développés avec un diamètre de 150 cm environ pour le plus important (fig. 4). Ce dernier est colmaté par des formations argilo-sableuses qui ont emprisonné des blocs de craie témoins d'effondrements successifs de la voûte du drain.

Ces différentes observations prouvent l'existence d'un karst morphologique, il reste à savoir ce qu'il en est du point de vu hydrogéologique.

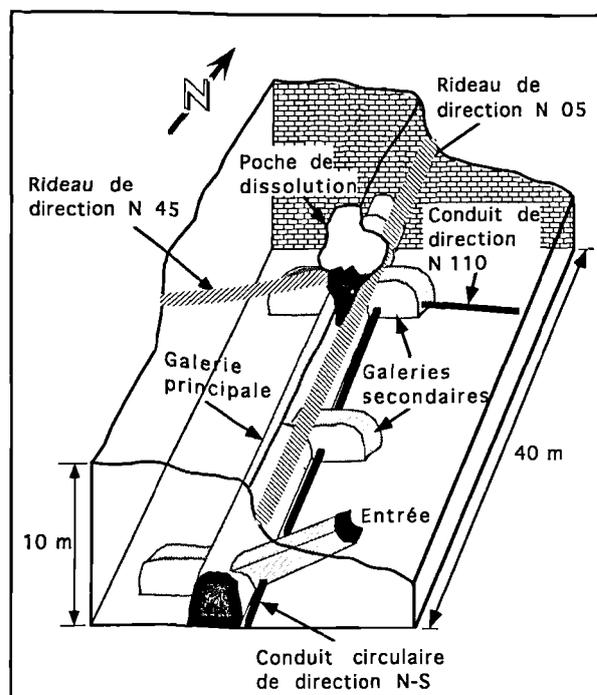


Fig. 2. — Schéma de la carrière de la « Folle Emprise » avec les phénomènes de dissolution observés (Bracq, 1994).

Fig. 2. — Shema of the underground quarry of the "Folle Emprise" with dissolution features observed (Bracq, 1994).

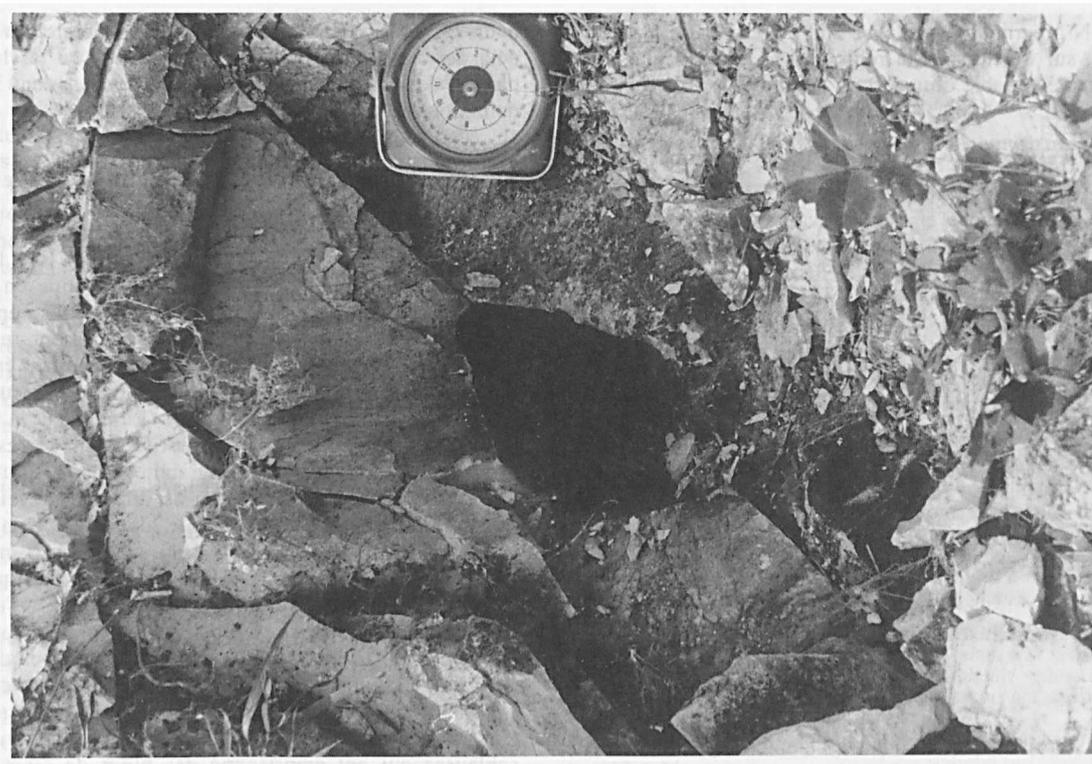


Fig. 3. — Photographie d'un drain karstique de 10 cm de diamètre observé dans la carrière de Mastaing (SW de Valenciennes; Bracq, 1994).

Fig. 3. — Photography of karstic pipe of 10 cm diameter observed in the quarry of Mastaing (SW of Valenciennes).



Fig. 4. — Photographie d'une poche de dissolution dans la craie de la région de Lumbres (SW de Saint-Omer).

Fig. 4. — Photography of dissolution pocket in the chalk of Lumbres area (SW of Saint-Omer).

III. — ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DES SOURCES DE LA LYS

Au cours de ces deux dernières décennies, le karst a fait l'objet d'une attention particulière sur le plan de son organisation et de son comportement hydrologique. De nombreuses études ont été effectuées, sur des sites différents multipliant les observations et les informations. Les progrès réalisés sur la connaissance des écoulements karstiques ont permis d'élaborer de nombreuses méthodes d'étude : débits classés, courbes de recessions et enfin les analyses corrélatoires et spectrales (A.C.S). Elles reposent sur des outils statistiques, appliqués aux données journalières de débits et de pluies en ce qui concerne les A.C.S. Avant de présenter les résultats acquis sur les sources de la Lys, nous allons rappeler brièvement le principe de ces méthodes.

1) Principe des méthodes appliquées aux sources de la Lys

Débits classés : cette étude est faite à partir de la méthode proposée par Mangin (1971). Les courbes de débits classés sont basées sur la répartition du nombre de jours pour des classes de débits mesurés durant un cycle hydrologique, par application d'une loi dérivée de celle de Laplace modifiée. On obtient une droite en reportant en ordonnée les fréquences cumulées sur une échelle de probabilité et en abscisses les valeurs des classes de débits sur une échelle arithmétique ou logarithmique. Toute hétérogénéité dans les débits se traduit par une rupture de pente sur la droite des débits classés.

Courbes de récession : en hydrologie de surface on décompose l'hydrogramme d'un épisode de crue en quatre parties : courbe de concentration, pointe, courbe de décrue et en fin le tarissement (Castany, 1963; Remenieras, 1960). La courbe de récession est la partie décroissante de l'hydrogramme. Tant que l'infiltration se poursuit, après cessation des précipitations on parle de décrue, ensuite c'est le tarissement. L'hydrogramme d'une source peut être abordé de la même façon. On peut donc obtenir des résultats sur le fonctionnement des deux parties de l'aquifère : la zone non saturée par la décrue et la zone noyée par le tarissement. Cette méthode est appliquée depuis longtemps (Schoeller, 1962; Drogue, 1967) et a été reprise ensuite par Mangin (1970). Elle fournit différents paramètres qui vont permettre de caractériser le système :

* Coefficient de vitesse d'infiltration et d'hétérogénéité d'écoulement relatif à la décrue;

* Coefficient de tarissement relatif à la zone noyée;

* Volume dynamique, qui est le volume du karst noyé déterminant l'écoulement et la variation du débit à l'exutoire.

Une classification a été établie pour quantifier le pouvoir régulateur du système et le retard à l'alimentation. Elle permet de comparer le système étudié à des systèmes de références (Mangin, 1975).

Analyse corrélatoire et spectrale : c'est une méthode de traitement de données particulièrement bien adaptée à l'étude des séries chronologiques telles que les débits et les pluies. Elle a été spécialement mise au point par Mangin

(1981 a et b, 1982, 1984) et permet de réaliser deux types de traitements:

- Analyse simple : à partir de laquelle on peut décrire les chroniques à l'aide de deux outils :

- Corrélogramme simple : il met en évidence la dépendance des événements entre eux pour des intervalles de temps de plus en plus grands. Il traduit donc un effet mémoire qui sera d'autant plus important que le corrélogramme diminuera lentement.

- Spectre simple : il permet d'identifier les événements périodiques. Dans le cas des débits, il fournit le temps de régulation qui représente la durée de l'influence d'événements pluvieux sur le système ainsi que la mesure de la fréquence de coupure qui correspond à la durée minimale que doit avoir une pluie pour influencer le système.

- Analyse croisée : qui autorise l'étude de la relation pluie-débit. Le corrélogramme croisé permet de comparer simultanément le signal d'entrée au signal de sortie. Si la fonction d'entrée est aléatoire, et si le système est linéaire et invariant, le corrélogramme croisé correspond à la réponse impulsionnelle du système, donc à l'hydrogramme unitaire. Un système bien drainé donne une réponse peu étalée et pointue. La modulation dans le temps du signal d'entrée dépend donc des modalités de drainage du système.

2) Exemple d'étude

Le bassin supérieur de la Lys présente de nombreuses manifestations karstiques. De plus ses sources sont équipées d'un limnigraphe depuis 1972, c'est pour cette raison qu'il a été choisi pour l'application de ces méthodes d'étude.

a) Contexte géomorphologique et géologique

Le bassin supérieur de la Lys fait partie du domaine de l'Artois, il est compris entre les lignes reliant Laires et Beaumetz-les Aires au nord, Ramiéville-Prédefin et Lisbourg au sud-est et le Groseiller-Beaumetz les Aires à l'ouest. Le paysage est assez diversifié, et les éléments dominants sont les plateaux, culminant à 195 m, fréquemment oblitérés par de nombreuses dépressions (dolines) et entaillés par des vallées sèches (fig. 5).

Le substratum de ce bassin est constitué par des dépôts du Crétacé supérieur, sous forme de marnes, de craies marneuses et de craies grises ou blanches. L'ensemble atteint 110 m d'épaisseur.

La structure est marquée par deux familles directionnelles de failles reconnues régionalement : N030-040 et N100-130.

Du point de vue hydrogéologique deux nappes sont nettement individualisées, en raison de l'enrichissement en argile des marnes du Turonien inférieur et moyen, la première est captive dans le Cénomanién et la deuxième, libre, dans le Turonien supérieur et le Sénonien (Caulier, 1974). Elles présentent une évolution similaire (Maqsoud, 1991).

L'exutoire principal est formé par les sources de la Lys (Lisbourg) avec un débit journalier moyen de 80 l/s. Plusieurs effondrements se sont produits à l'exutoire dont le dernier en Février 1984. Une exploration souterraine par

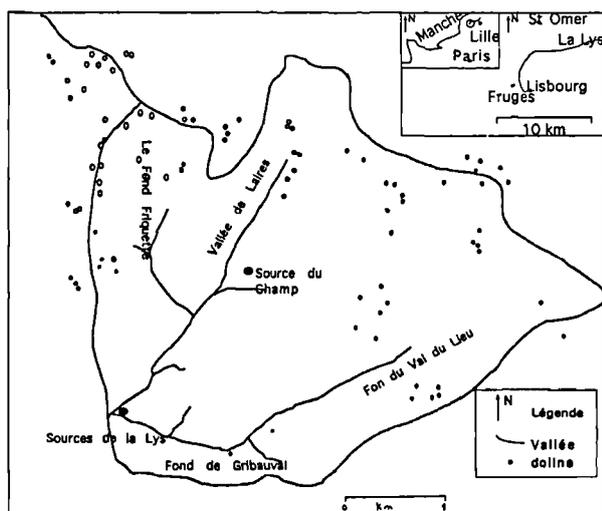


Fig. 5. — Localisation du bassin versant de la Lys ainsi que la répartition des dolines sur ce dernier.

Fig. 5. — The drainage basin of Lys and the repartition of dolina.

plongée aurait permis d'atteindre 10 m de profondeur mais aurait été arrêtée ensuite par des branchages. Dans l'état actuel de nos connaissances, il semblerait que cette source soit essentiellement alimentée par la nappe du Cénomanien et plus accessoirement par celle du Turonien.

Trois autres exutoires, temporaires, sont connus par ailleurs dans le secteur.

b) Données retenues

Les données pluviométriques utilisées pour réaliser les différentes analyses sont celles des stations météorologiques de Fiefs et de Verchin. Les débits sont fournis par la station de Lisbourg gérée par le B.R.G.M. Elle est située à 5 m à l'aval des sources. La période d'étude s'étend sur 19 ans de 1972 jusqu'à 1990.

3) Application des méthodes

a) Analyses des débits classés

Avant d'analyser chaque cycle, un examen rapide montre l'existence d'une très grande variabilité d'un cycle à l'autre du fait du nombre variable des ruptures de pentes.

Analyse de la chronique entière : elle donne de bons résultats en utilisant une relation linéaire entre la variable X et le débit [$F(X) = \text{Prob}(X < x)$ ou $X = a(Q - Q_0)$ a est la pente de la droite et Q_0 est l'abscisse de probabilité nulle].

Avec cette loi apparaît deux ruptures de pentes, correspondant la première à un débit voisin de 105 l/s et la seconde à un débit de 125 l/s (fig. 6).

Aucune rupture de pente n'apparaît pour les débits d'étiage. Ces deux ruptures de pente impliquent que la loi est différente pour les hautes eaux.

L'examen du coefficient de variation pour différentes droites a donné les valeurs suivantes : 0,53; 0,34; et 0,15. Tous les coefficients sont inférieurs à 1 et indiquent une

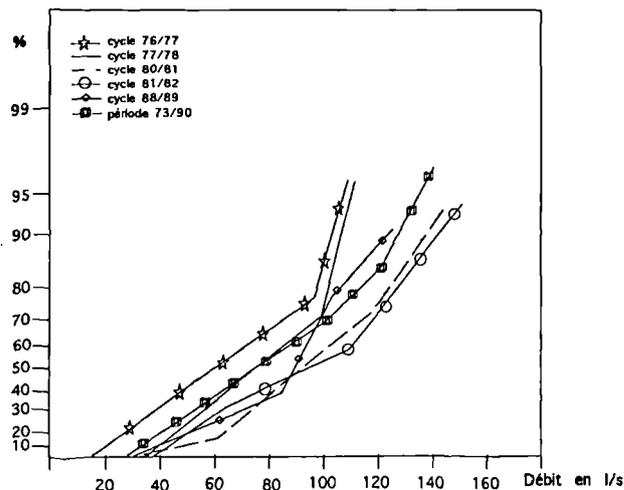


Fig. 6. — Pourcentages cumulés des débits des sources de la Lys.

Fig. 6. — The cumulated percentages of the springs flows of the Lys.

linéarité entre le débit et la variable confirmant ainsi le choix de la loi arithmétique.

D'après Mangin (1975) l'existence de ces ruptures au niveau des débits élevés marque la présence de trop-plein qui entrent en fonctionnement. Pour les différents systèmes étudiés par cet auteur notamment celui du Baget (système karstique développé dans les calcaires arrégeois), la rupture de pente présente sur la courbe des débits de ce système indique le fonctionnement du trop-plein de Las Houtas.

Pour la Lys la première rupture de pente correspond au fonctionnement des sources de la Ferme, ces dernières contribuent à la diminution des débits de la Lys. La seconde rupture de pente se situe pour un débit nettement supérieur au premier et marque un niveau piézométrique très élevé (relation déjà établie entre le débit et le niveau piézométrique de la nappe; Maqsoud, 1991); elle correspond à la mise en fonctionnement de nombreux petits conduits situés en amont du bassin à une altitude de 140 m (sources du Champ) alors que les piézomètres et les puits avoisinants n'ont présenté aucun phénomène de surcharge ou d'artésianisme malgré leur position basse par rapport à ces sources.

Analyse à l'échelle d'un cycle : Comme nous l'avons signalé, il y a une très grande variabilité d'un cycle à l'autre, du fait des ruptures de pente qui affectent la droite des débits classés. Plusieurs cas peuvent être ainsi précisés :

1er cas: droite des débits classés présentant une rupture de pente.

Deux cycles 76/77 et 77/78 sont marqués par la présence d'une seule rupture de pente se produisant sensiblement pour la même valeur de débit (0,105 m³/s) (fig. 6). Au cours de ces deux cycles, le bassin a reçu pratiquement la même quantité de précipitations (879 mm pour le cycle de 76/77 et 852 mm pour le cycle 77/78). Cette quantité de précipitation est loin d'être négligeable mais intervient après le cycle de 1976 qui a été marqué par une forte sécheresse (576 mm) induisant une baisse très importante du niveau de la nappe. La présence d'une rupture de pente ne traduit donc qu'un état exceptionnel du système.

2eme cas: deux ruptures de pentes dont l'une est relative aux faibles débits.

A/ Cycle 80-81 : la première rupture de pente correspond à un débit de 0,06 m³/s, la droite inférieure présente une faible pente par rapport à la droite intermédiaire (fig. 6). Ceci peut être interprété par la formation d'une réserve.

B/ Cycle 81-82 : il présente deux ruptures de pente : la première rupture se situe pour un débit de 0,06 m³/s qui est loin d'être un débit d'étiage et correspond à un pourcentage cumulé de 25% et la seconde correspond à un débit de 0,1075 m³/s (fig. 6).

Après la première rupture de pente, qui se situe dans la partie relative aux faibles débits, on assiste à une diminution du coefficient de la pente "a" (on passe de 13,804 à 8,794). Ceci ne peut être expliqué que par l'apport d'une réserve issue d'un cycle hydrologique antérieur, ce qui confirme l'hypothèse déjà formulée dans le cas précédent. La deuxième correspond au fonctionnement du trop-plein.

Deux ruptures de pentes relatives aux forts débit : le cycle 88-89 présente deux ruptures de pente : la première rupture de pente sur la droite avec augmentation du coefficient "a", suivie plus haut d'une seconde rupture pente avec diminution du coefficient "a" (fig. 6). Ceci peut être interprété par un piégeage d'une réserve lors de la décrue par abandon d'un circuit et qui sera restitué au cours du tarissement pour soutenir son débit d'étiage.

Les sources de la Lys présentent un comportement très variable d'un cycle à l'autre et sont loin de correspondre à des sources de débordement alimentées principalement par l'écoulement de la nappe de la craie. Le fait de la présence de trop-plein, de piégeage, ou restitution de réserves pendant une période donnée du cycle nous permet de confirmer le caractère karstique de ces sources.

b) *Analyses des courbes de récession*

Cette analyse a été effectuée sur 7 courbes individualisées, quant au reste de la chronique, le tarissement n'a pas été atteint. Les valeurs moyennes des différents paramètres obtenus sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

	volume dynamique (m ³)	coefficient d'hétérogénéité	coefficient d'infiltration	coefficient de tarissement
minimum	0,69.10 ⁶	0,0674	5,29.10 ⁻³	3,18.10 ⁻³
moyenne	0,86.10 ⁶	0,018	5,57.10 ⁻³	4,05.10 ⁻³
maximum	0,97.10 ⁶	0,015	10,7.10 ⁻³	5,1.10 ⁻³

Tabl. 1. — Paramètres de l'analyse des courbes de récession.

Table 1. — The analysis parameter of the recession bends.

Le coefficient d'hétérogénéité est différent de zéro mais reste faible alors que le temps d'infiltration est très élevé, ce qui impliquerait la présence d'un ruissellement important

(Mangin, 1971) or aucun ruissellement n'a été observé sur le bassin. Ce retard peut être alors dû aux sédiments tertiaires et quaternaires qui jouent le rôle d'écran et empêchent l'infiltration. La présence de réserves importantes est confirmée par la valeur du volume dynamique qui varie entre 0,69.10⁶ m³ et 0,97.10⁶ m³. Pour reporter le système de la Lys dans la classification de Mangin (1975) deux paramètres supplémentaires ont été calculés à partir de l'analyse des courbes de récession:

Le pouvoir régulateur k : égal au rapport du volume dynamique au le volume de transit. Il traduit l'aptitude de la zone noyée à stocker les précipitations et à les restituer progressivement dans le temps. Plus ce rapport tend vers 1. plus le pouvoir régulateur est élevé.

i : ce coefficient caractérise la forme de l'hydrogramme de décrue et donnera le degré de complexité du système, celui-ci augmentant avec la valeur de "i" qui peut varier de 0 à 1.

En moyenne "i" est égale à 0,96 alors que k est de 0,37.

Si on place les sources de la Lys dans la classification de Mangin (fig.7), l'ensemble des cycles se place dans le domaine IV qui est un domaine complexe karstique sauf le cycle 1976 qui se trouve dans le domaine peu ou non karstique ce qui confirme la complexité de ce système mais que nous expliquerons plus loin.

c) *Analyse corrélatrice et spectrale*

Analyse à long terme :

L'analyse des précipitations réalisée sur la période d'étude n'indique aucune périodicité, même annuelle. Par conséquent on peut considérer que la pluie, pour cette région, présente un caractère quasi-aléatoire sans témoigner de la moindre composante saisonnière.

Le corrélogramme des débits traduit l'existence d'un cycle annuel bien prononcé avec une amplitude dépassant 0,4 (fig. 8). Cette périodicité ne peut pas être imputée à la pluie mais semble plutôt être due au système lui-même.

Analyse à court terme :

La valeur 0,2 du corrélogramme des débits de la Lys, est atteinte au bout de 84 jours : elle souligne un effet mémoire important. Le spectre traduit le même phénomène et montre que cet effet mémoire correspond à un filtrage des hautes et moyennes fréquences au profit des basses. Cet effet serait directement lié au volume des réserves qui sont considérables.

L'analyse en détail des corrélogrammes, en particulier celle des spectres de débit montre une série de variations correspondant aux pluies mais qui sont atténuées. Ceci indique que le système conserve au moins en fréquences une partie de l'information contenue dans les épisodes pluvieux. Ceci est observé dans différents systèmes karstiques et constitue l'une des propriétés du karst où la présence des drains permet un transit très rapide d'une partie des apports.

Comparaison entre les cycles :

En examinant les corrélogrammes des cycles excédentaires, on constate une décroissance rapide, ce qui se traduit par un effet mémoire moyen alors que l'inverse se

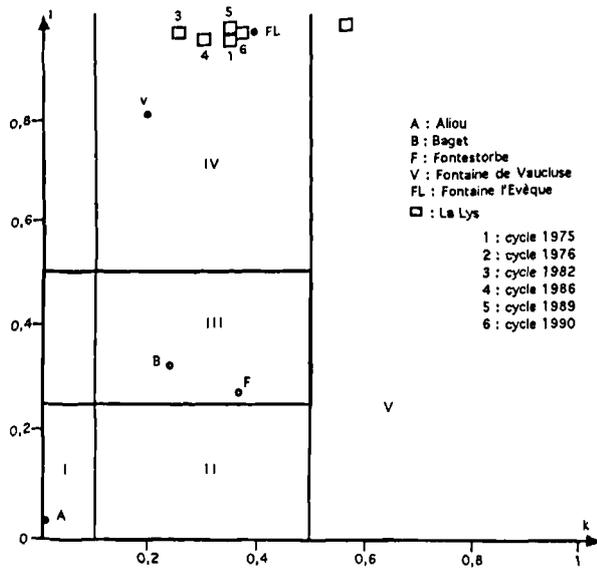


Fig. 7. — Position de la Lys dans la classification de Mangin (1975).
 Fig. 7. — Position of the Lys in the classification of Mangin (1975).

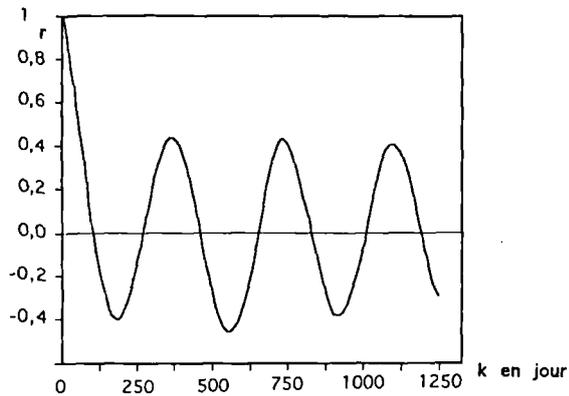


Fig. 8. — Corrélogramme simple à long terme des débits des sources de la Lys.
 Fig. 8. — Simple correlogram of long term of the springs flows of the Lys.

produit pour les cycles déficitaires (fig. 9). Ceci est en contradiction avec ce qui se passe dans les systèmes karstiques classiques, ce qui nous permet de formuler l'hypothèse suivante :

Lors des cycles déficitaires on a un fonctionnement de nappe et les sources sont régulées par la nappe du Cénomaniens et lorsqu'on est en présence d'un cycle excédentaire on a formation de réserves ce qui fait remonter le niveau de la nappe pour atteindre le karst perché dans les assises turoniennes entraînant ainsi une vidange rapide des réserves et par conséquent une diminution de l'effet mémoire.

Cette hypothèse permet d'expliquer l'emplacement du cycle 1976 dans la classification de Mangin.

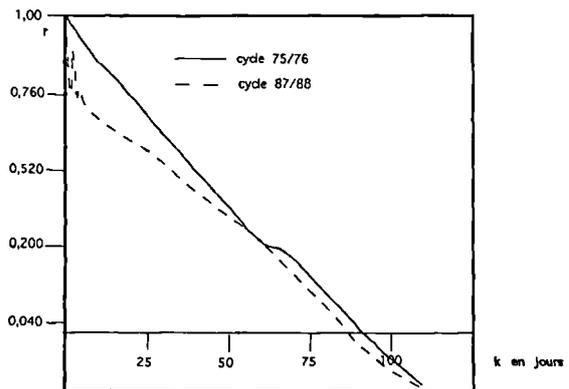


Fig. 9. — Corrélogrammes simples d'un cycle déficitaire (75/76) et d'un cycle excédentaire (87/88) des débits des sources de la Lys.
 Fig. 9. — Simple correlograms of a gap cycle (75/76) and excess cycle (87/88) of the springs flows of the Lys.

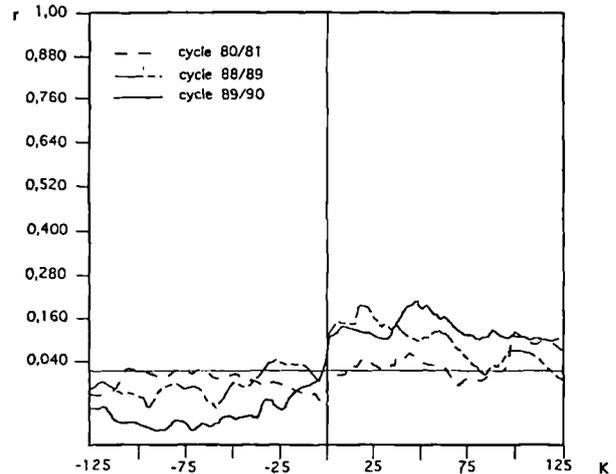


Fig. 10. — Corrélogrammes croisés (pluies-débits) des sources de la Lys.
 Fig 10. — The springs place of the Lys in the classification of Mangin (1984).

Analyse croisée :

Tout comme l'analyse simple, l'analyse croisée montre une très grande diversité de réponses selon les cycles (fig. 10).

Les cycles déficitaires ont une réponse voisine de zéro impliquant l'absence de relation entre les pluies et les débits, alors que les cycles excédentaires présentent une réponse bien prononcée et dédoublée. Ce dédoublement correspond à une réponse composite qui est la preuve de la coexistence d'écoulements à la fois de type nappe et de type karst.

Le corrélogramme croisé correspond à l'hydrogramme unitaire en raison de la fonction d'entrée qui est considérée comme quasi aléatoire. Cet hydrogramme est peu pointu et très étalé.

IV. — CONCLUSION GENERALE

	Effet memoire (j) ra 0.1-0.2	Bande spectrale f de coupure	Temps de régulation en jour	Hydrogramme unitaire
Aliou	Réduit 5	Très large 0.30	10-15	
Baget	Petit 10-15	Large 0.20	20-30	
Fontestorbe	Grand 50-60	Etroite 0.10	50	
La Lys	62-69	Etroite 0.084	65	
Torcal	Considérable 70	Très étroite 0.05	70	

Fig. 11. — Emplacement des sources de la Lys dans la classification de Mangin (1984).

Fig. 11. — The casement correlograms (rains-flows) of the spring of the Lys.

Mangin a établi une classification des systèmes karstiques en se basant sur les différents paramètres calculés à partir de ces analyses et sur la forme des hydrogrammes unitaires (fig. 11). La Lys se place entre le type Fontestorbes, qui présente d'importantes réserves avec un karst noyé très développé où l'organisation du drainage ne crée pas de réelles discontinuités, et le type Torcal, qui renferme une nappe d'imbibition générale avec une organisation de drainage très rudimentaire.

Les nombreuses incertitudes relatives à la reconnaissance des axes de drainage rapide des systèmes karstiques et/ou fracturés dans certaines régions sont fonction d'une histoire hydrogéologique et surtout spéléologique plus ou moins ancienne. Parfois la détermination de ces éléments particuliers n'en est qu'à ses débuts mais se révèle déjà prometteuse, en particulier dans le Nord-Pas-de-Calais (fig: carte générale de localisation des différentes observations).

Cet aspect karstique est corrobé par une approche indirecte, basée sur les analyses du fonctionnement hydrologique aux exutoires, appliquées ici aux sources de la Lys. Dans le système de la Lys coexistent une nappe d'imbibition et une organisation du drainage avec un fonctionnement différent d'un cycle à l'autre suivant l'état de la nappe, constituant ainsi l'une des caractéristiques fondamentales du karst crayeux. Le temps d'infiltration est très important en raison de la présence d'une couverture importante et probablement d'un épikarst. C'est un système disposant d'une réserve très importante permettant d'avoir un débit d'étiage supérieur à 20 l/s même en période de sécheresse.

Les différentes observations effectuées dans le Nord-Pas-de-Calais ainsi que l'étude menée sur les sources de la Lys prouvent l'existence d'un karst fonctionnel dans les assises crayeuses de cette région.

ANNEXE

PRESENTATION DES ANALYSES CORRELATOIRES ET SPECTRALES

1. PRESENTATION DE LA METHODE

L'analyse des séries chronologiques peut être menée soit dans le domaine temporel, on parle dans ce cas d'analyse corrélatrice, soit dans le domaine fréquentiel et on parle alors d'analyse spectrale.

Les séries chronologiques peuvent être analysées soit séparément c'est l'analyse simple, elle se fait par l'intermédiaire du corrélogramme simple et di spectre simple, soit l'une, supposée l'entrée, par rapport à l'autre, supposée la réponse, c'est l'analyse croisée.

1.1 : ANALYSE SIMPLE

1.1.1 Corrélogramme simple

La série chronologique finie (x₁, x₂,...x_n) est d'abord discrétisée, puis le coefficient d'autocorrélation r_k est calculé avec k = 0, 1, 2, ... m avec r_k = 1 lorsque k = 0.

Mangin conseil de prendre comme valeur de troncature (m) m ≤ n/3 (n : la longueur de la chronique). Pour m compris entre n/2 et n/3, les résultats sont altérés. Au delà de n/2, les résultats sont incorrects. Afin de ne pas atténuer l'influence d'une donnée sur l'autre au fur et à mesure de leur éloignement, la meilleurs formule retenue pour calculer le coefficient d'autocorrélation r_k est celle de Jenkins et Watts (1968).

$$r_k = \frac{c_k}{c_0} \text{ avec } c_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})$$

\bar{x} moyenne des x de la série chronologique.

Le corrélogramme met en évidence la dépendance des événements entre eux pour des intervalles de temps de plus en plus grands. Lorsque le corrélogramme tend rapidement vers zéro, il est caractérisé une succession d'événements indépendants les uns des autres, le phénomène analysé peut être considéré comme processus quasi aléatoire. A l'inverse un corrélogramme qui décroît lentement indique un phénomène très structuré et donc une mémoire des événements. Ainsi le corrélogramme traduit un effet mémoire qui correspond à la notion de réserves dans le cas des systèmes hydrologiques.

1.1.2 Spectre simple

Il a été démontré que la transformée du corrélogramme de la chronique était égale à la décomposition de la variance totale dans le domaine fréquentiel. On a donc une approche non biaisée de la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation fournie par

$$s(f) = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{k=m} D_{(k)} r_k \cos 2\pi f_k \right]$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, m$$

$$f: \text{fréquence considérée si le pas choisi est } j, f = \frac{j}{2m}$$

r_k : coefficient d'autocorrélation.

$D_{(k)}$: fonction de pondération nécessaire pour que la fréquence $s(f)$ estimée soit non biaisée.

L'utilisation de ce filtre $D_{(k)}$ est rendue indispensable par l'emploi de la transformée de Fourier qui ne s'applique qu'à des fonctions continues évoluant jusqu'à l'infini. Mangin, après de nombreux essais propose le filtre de Tukey.

$$D_{(k)} = \frac{(1 + \cos \pi \frac{k}{m})}{2}$$

L'analyse spectrale exprime dans le domaine fréquentiel ce dont le corrélogramme rend compte dans le domaine temporel. L'objet de la méthode étant descriptif, la condition de la stationnarité des séries chronologiques n'entre pas en ligne de compte. Le temps t_0 , départ de la chronique, correspond au début du cycle hydrologique. On travaillera sur des cycles et non sur des années civiles. Le spectre simple permet de détecter les différentes composantes séculaires, saisonnières et aléatoires.

1.2 ANALYSE CROISEE

1.2.1 Corrélogramme croisé

Le corrélogramme croisé correspond à la fonction d'intercorrélation entre deux séries chronologiques finies. Il représente la dépendance qui existe entre les entrées (x) et les sorties (y) pour des pas de temps (k) positifs ou négatifs croissants.

$$r_{+k} = r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{S_x \cdot S_y} \text{ avec } C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})$$

$$r_{-k} = r_{yx}(k) = \frac{C_{yx}(k)}{S_x \cdot S_y} \text{ avec } C_{yx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (y_i - \bar{y})(x_{i+k} - \bar{x})$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \text{ et } S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Si la fonction de d'entrée est aléatoire et si le système est invariant, le corrélogramme croisé correspond à la réponse impulsionnelle du système donc à l'hydrogramme unitaire. Un système mal drainé donne une réponse étalée. Un système bien drainé donne une réponse peu étalée et pointue. Il y a modulation dans le temps du signal d'entrée de façon plus ou moins grande.

2. CLASSIFICATION DES SYSTEMES KARSTIQUES

A partir des résultats obtenues sur les systèmes étudiés dans les Pyrénées françaises et en Espagne, Mangin (1982, 1984) a retenu quatre paramètres pour établir une classification des systèmes karstiques : effet mémoire, bande spectrale, temps de régulation et réponse impulsionnelle.

2.1 EFFET MEMOIRE

Il se calcule à partir du corrélogramme simple. C'est le temps nécessaire pour que le coefficient d'autocorrélation r_k prenne des valeurs comprises entre 0,1 et 0,2. C'est un paramètre traduisant la décroissance plus ou moins rapide du corrélogramme qui fournit une idée quantitative sur l'importance des réserves.

2.2 BANDE SPECTRALE

Elle est définie par la fréquence à partir de laquelle les informations liées à la fonction d'entrée sont totalement filtrées par le système. Au-delà de cette fréquence le spectre des sorties est nul ou assimilable à un bruit de fond. Les fonctions spectrales ne sont donc interprétables que sur la largeur de la bande spectrale. Cette dernière sera d'autant plus large que le système laissera passer plus aisément le signal d'entrée.

2.3 TEMPS DE REGULATION

Il définit la durée d'influence du signal d'entrée et peut être rapproché de la notion de largeur de bande passante en traitement du signal. Il fournit une information sur la longueur de la réponse impulsionnelle. C'est une grandeur proportionnelle à l'importance des réserves car plus ce temps est court, plus l'inertie du système est réduite. On le détermine en prenant la valeur maximale du spectre, que l'on divise par la surface engendrée par la courbe correspondant au spectre, ici cette aire est de 2.

2.4 REPOSE IMPULSIONNELLE

Elle est approchée par le corrélogramme croisé lorsque la fonction d'entrée est considérée comme aléatoire. Cette représentation grossière de l'hydrogramme unitaire est cependant suffisante pour permettre une comparaison des systèmes entre eux : un système bien drainé module très peu les impulsions d'entrée et présente une réponse impulsionnelle pointue et peu étalée alors que le corrélogramme croisé très aplati est caractéristique de systèmes karstiques inertiels possédant des réserves importants.

Ces différents paramètres permettent de classer les systèmes étudiés entre deux pôles (Mangin, 1982) :

- Aquifère avec un effet mémoire faible (corrélogramme égal à 0,1-0,2 à partir de 5 jours), bande spectrale large (filtrage de l'information pluie sensible pour des fréquences supérieures à 0,30), un temps de régulation court (10-15 jours), un hydrogramme unitaire pointu et peu étalé : c'est le **type Aliou**. Il correspond aux aquifères parfaitement drainés, sans réserves, avec un karst noyé réduit aux drains.

- Aquifères avec un effet mémoire considérable (corrélogramme égal à 70 jours), une bande spectrale large (filtrage complet de l'information pluvieuse à la fréquence 0,05), un temps de régulation très long (70 jours), un hydrogramme unitaire arrondi et très étalé : c'est le **type Torcal**. Ce sont les aquifères qui renferment une nappe d'imbibition générale, avec une organisation rudimentaire.

L'étude quantitative des courbes issues des analyses corrélatoires et spectrales permet en outre de percevoir dans le détail comment les réserves d'un système régulent l'information contenue dans le signal d'entrée. Elle représente ainsi un moyen pour discerner les particularités de fonctionnement de systèmes soumis à un même climat, chaque système modulant à sa façon un signal d'entrée identique pour tous.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCY D. d'. (1969). — Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de l'Authie. Thèse 3ème cycle, Paris.
- ARCY D. d'. (1978). — Influence de certaines particularités morphotectoniques de la série crayeuse du Nord de la France sur l'écoulement des eaux souterraines. Coll. Régional. Rouen. Hydrogéologie de la craie du Bassin de Paris. *B.R.G.M.*, Orléans. 5-20.
- BRACQ P. (1992). — L'effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apports de l'analyse morphostructurale. Thèse Univ. Lille 1, Publ. 21, *Soc. Géol Nord*, 244 p.
- BRACQ P., HANICH L., DELAY F. et CRAMPON N. (1992a) — Mise en évidence par traçage d'une relation rapide entre la surface et les eaux souterraines, liée à des phénomènes de dissolution dans la craie du Boulonnais (Nord de la France). *Bull. Soc. Géol. France*, t. 163, 2, 195-203.
- BRACQ P., COLBEAUX J.P., MAQSOU A., DELAY F. et CRAMPON N. (1992b). — Vers une nouvelle définition du concept de bassin versant en pays crayeux fracturé à partir de l'étude hydrogéologique du système aquifère des Sources de la Lys. 5ème coll. "Hydro. en Pays Calcaire", Proceedings, Neuchâtel, Suisse, *Ann. Sc. Univ. Besançon*, 1, 77-87.
- CAOUS J.Y. et ROUX J.C. (1981). — Ressources en eau souterraine de la Picardie (France). *Bull. B.R.G.M.*, sect III, 1, 19-52.
- CASTANY G. (1963). — Traité pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris, 657 p.
- CAULIER P. (1974). — Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques de la région du Nord. Thèse 3ème cycle, Univ. Lille 1, 156 p.
- COLBEAUX J.P., AMEDRO F., BERGERAT F., BRACQ P., CRAMPON N., DELAY F., DUPUIS Ch., LAMOUROUX Ch., ROBZYNSKI F., SOMME J., VANDYCKE S. et VIDIER J.P. (1993). — Un enregistreur des épisodes tectoniques dans le Bassin de Paris: le Boulonnais. *Bull. Soc. Géol. France*, 164, 1, 93-102.
- CRAMPON N., ROUX J.C. et BRACQ P. avec la collaboration de DELAY F., LEPILLER M., MARY G., RASPLUS L. et ALCAYDE G. (1993). — Hydrogeology of the chalk in France. in "Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe". *Oxford University Press*, 113-152.
- DOLLE L. (1923). — Etudes sur les eaux souterraines de la région de Cambrai. 304 p.
- DROGUE C. (1967). — Essai de détermination des composantes de l'écoulement des sources karstiques. Evaluation de la capacité de rétention par chenaux et fissures. *Chronique d'Hydrogéologie*, 10, 43-47.
- EL-OUAFI M. (1993). — Etudes des étages en région crayeuse par l'analyse de tarissement. Application aux bassins de l'Aa, de la Hem, de la Liane et de l'Authie (Nord de la France). Thèse de Doct. Univ. Lille 1. 284 p.
- LASNE M.H. (1890). — Sur les terrains phosphatés des environs de Doullens. Etages Sénonien et terrains superposés. *Bull. Soc. Géol. France*, 3e série, 18, 441-490.
- LERICHE M. (1909). — Observations hydrographiques dans la haute vallée de l'Escaut et dans les vallées affluentes. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 38, 79-85.
- LERICHE, M. (1926). — Les rideaux du Cambrésis et du Vermandois. *Bull. Serv. Carte. Géol. France*, 31, 1926-27, n° 166.
- MANGIN A. (1970). — Contribution à l'étude d'aquifères karstiques à partir de l'analyse de courbes de décrue et de tarissement. *Ann. Spéleol.*, t 25, 3, 581-609.
- MANGIN A. (1971). — Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Ann. Spéleol.*, 26, 2, 283-329.
- MANGIN A. (1975). — Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques., Thèse de Doct. ès. Sciences Univ. Dijon.
- MANGIN A. (1981 a). — Utilisation des Analyses Corrélatoires et Spectrales dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C.R.Acad. Sc.*, Paris, t 293, 401-404.
- MANGIN A. (1981 b). — Apport des Analyses Corrélatoires et Spectrales dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *C.R.Acad. Sc.*, Paris, t 293, 1011-1114.
- MANGIN A. (1982). — Mise en évidence de l'originalité et de la diversité des aquifères karstiques. 3ème Coll. d'Hydrologie en Pays Calcaires, 7-10 Octobre 1982, Neuchâtel. *Ann. Sci. Univ. Besançon*, Mém. n° 1, 159-172.
- MANGIN A. (1984). — Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des Analyses Corrélatoires et Spectrales. *J. of Hydrol.*, 67, 25-43.
- MAQSOU A. (1991). — Etude géomorphologique et hydrogéologique du bassin supérieur de la Lys. Mem. D.E.A. Univ. Lille 1, 70 p.
- MARTEL E.A. (1894). — Les abîmes, les eaux souterraines, les cavernes, les sources, la spéléologie. C. Delagrave Eds., Paris.
- MARTEL E.A. (1921). — Les eaux souterraines de la craie. Nouveau traité des eaux souterraines. Doin Lib. Paris, Chap. X, XI, 334-373.
- REMENIERAS G. (1960). — L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles, Paris, 413p.
- SCHOELLER H. (1962). — Les eaux souterraines. Masson., Paris, 642p.
- RODET J. (1992). — La craie et ses karsts. Thèse de Doc. Etat., Univ. Aix-Marseille II, 560 p.
- ROUX J.C. (1978). — Les écoulements de type karstique dans la craie de Normandie. Coll. régional Rouen, in Hydrogéologie de la craie du Bassin Parisien. *B.R.G.M.*, Orléans. 531-554.

LES OSTRACODES DE L'ILE DE WAIHEKE (MIOCENE INFÉRIEUR, NOUVELLE ZÉLANDE)

Ostracods from Waiheke Island (Lower Miocene, New Zealand)

par Bruno MILHAU (*)

(Planches III et IV)

Résumé. — Dans la région d'Auckland (Northland, Nouvelle Zélande) le Bassin de Waitemata comprend des sédiments autochtones calcaires (Sous-Groupe de Kawau) surmontés par des faciès allochtones à dominante flysch (Sous-Groupe de Warkworth). La faune d'ostracodes récoltée dans les sédiments de base (Sous-Groupe de Kawau) de l'île de Waiheke permet de proposer un âge otaïen (Miocène inférieur de Nouvelle Zélande); la distribution stratigraphique de certaines espèces est donc modifiée. L'analyse paléocéologique conduit à reconnaître différentes associations d'ostracodes: une association très peu profonde à *Ambostracon* et *Quadracythere*, une association littorale à infralittorale dominée par les *Cytherella*, *Trachyleberis*, *Loxoconcha* et *Cytherois*, une association à *Cytherella*, *Phlyctenophora* et *Krithe* caractéristique de milieux infra- à circalittoraux; leur succession dans le temps indique une transgression irrégulière liée à un approfondissement du bassin. La présence de genres préférant aujourd'hui des eaux chaudes (*Callistocythere*, *Cytherelloidea*, *Platella*) et celle d'espèces réputées tropicales (*Hermanites lactea pakaurangia*, *Loxoconcha australis*) suggère l'existence d'un climat tempéré chaud à subtropical. Le polymorphisme observé chez certaines espèces (*Cytherella ballancei*, *Neobuntonia ? oneroensis*, *Ambostracon pumila*, *Cletocythereis bradyi*, *Trachyleberis thomsoni*, *Quadracythere mediaruga*) pourrait être lié à une instabilité hydrochimique du milieu, peut-être due à des upwellings. Pendant le dépôt des sédiments du Sous-Groupe de Kawau, il existait une barrière structurale entre la région de Waiheke sur la bordure nord du Bassin de Waitemata, et les localités situées plus au Sud.

Abstract. — In the Auckland area (Northland, New Zealand), the Waitemata Basin consists of basal autochthonous calcareous sediments (Kawau Subgroup) and turbiditic rocks (Warkworth Subgroup). The ostracod content indicates an age no older than Otaian (Lower Miocene of New Zealand) for the Waiheke Island sediments of the Kawau Subgroup; the stratigraphical range of some species is extended. A palaeoecological analysis leads to the recognition of different associations: a very shallow Ambostracon-Quadracythere association, a littoral to infralittoral Cytherella-Trachyleberis-Loxoconcha-Cytherois association and an infra- to circalittoral Cytherella-Phlyctenophora-Krithe association; their succession suggests an irregular mode of transgression and a deepening sequence. A warm to subtropical climate is proposed because the presence of genera which commonly prefer warm water today (*Callistocythere*, *Cytherelloidea*, *Platella*) or the presence of tropical species (*Hermanites lactea pakaurangia*, *Loxoconcha australis*). The observed polymorphism in certain species (*Cytherella ballancei*, *Neobuntonia ? oneroensis*, *Ambostracon pumila*, *Cletocythereis bradyi*, *Trachyleberis thomsoni*, *Quadracythere mediaruga*) could be related to a hydrochemical instability, partly due to upwelling. During the deposition of the Kawau Subgroup, there was probably a structural barrier between the Waiheke Island area in the northeastern border of the Waitemata Basin and the Humua and Port Waikato localities to the South.

I. — INTRODUCTION

Dans la région d'Auckland (Northland, Nouvelle Zélande) affleurent essentiellement des sédiments d'âge miocène inférieur, constituant le Groupe de Waitemata (Ballance, 1976; Hayward *et al.*, 1989). On y reconnaît des sédiments autochtones à la base, le Sous-Groupe de Kawau (Hayward & Brook, 1984), surmontés par des dépôts turbiditiques, le Sous-Groupe de Warkworth (Ballance, 1976). Les ostracodes ont été étudiés par Milhau (1990, 1993a) et les premiers résultats, pour ce qui est du Sous-Groupe de Warkworth, présentés en 1991 et 1993. L'objet

de cette note est d'analyser la distribution et les associations d'ostracodes dans les sédiments non turbiditiques du Sous-Groupe de Kawau de l'île de Waiheke. Quelques remarques d'ordre paléocéologique sont esquissées.

II. — LITHOSTRATIGRAPHIE

Les sédiments à la base du Groupe de Waitemata (le Sous-Groupe de Kawau) affleurent essentiellement à l'Est et au Sud d'Auckland (Hayward & Brook, 1984) (a. fig. 1). Ils

(*) Faculté Libre des Sciences, Laboratoire de Paléontologie stratigraphique, 13 rue de Toul, 59046 LILLE Cedex. URA 1365.
Note acceptée pour publication par le Conseil Scientifique le 31 Mai 1996.

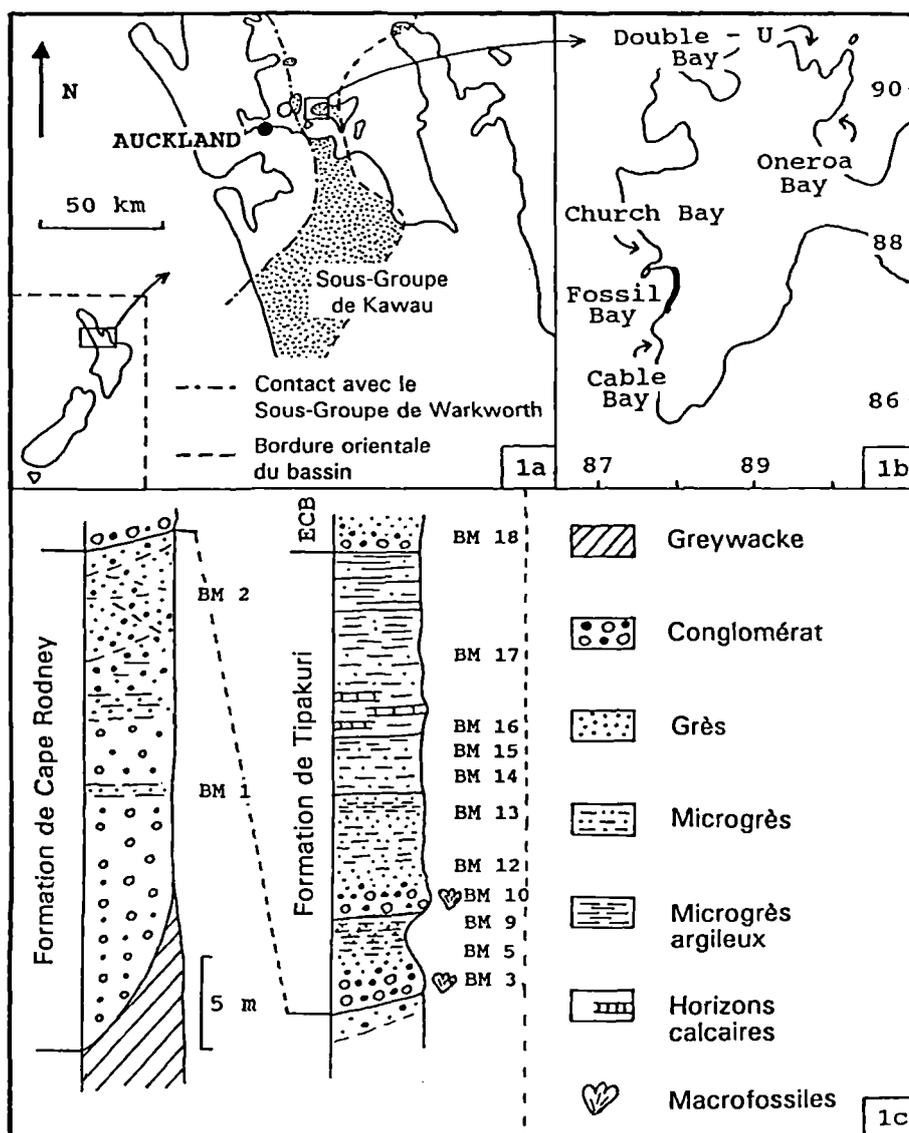


Fig. 1. - Les sédiments à la base du Groupe de Waitemata. 1a: Sous-Groupe de Kawau dans la région d'Auckland. 1b: Principaux affleurements du Sous-Groupe de Kawau sur l'île de Waiheke. 1c: Colonne stratigraphique schématique des sédiments du Sous-Groupe de Kawau à Fossil Bay, et position des échantillons. ECB: Formation de East-Coast-Bay du Sous-Groupe de Warkworth.

Fig. 1. - Basal Waitemata sediments. 1a: Kawau Subgroup extension in the Auckland area. 1b: Main outcrops of Kawau Subgroup sediments on Waiheke Island. 1c: Schematic stratigraphical column of Kawau Subgroup sediments at Fossil Bay and location of samples. ECB: East-Coast-Bay Formation (Warkworth Subgroup).

sont en particulier bien visibles dans deux localités de l'île de Waiheke (b, fig. 1), près de Oneroa Bay et Double-U Bay au Nord et près de Fossil Bay et Cable Bay sur la côte ouest (Hayward & Brook, 1984). La coupe la plus complète est celle de Fossil Bay (Halcrow, 1956), au Sud de Church Bay. De la base au sommet des falaises, trois formations peuvent être reconnues (c, fig. 1).

1) La Formation de Cape Rodney

Il s'agit d'un conglomérat grossier, peu fossilifère, épais d'environ 15 m, parfois faiblement stratifié, avec quelques figures entrecroisées et des passées gréseuses lenticulaires plus ou moins carbonnées. C'est l'unité la plus inférieure du Sous-Groupe de Kawau (Park, 1886),

discordante sur le soubassement mésozoïque de greywackes (Hayward *et al.*, 1989); la surface inférieure est très irrégulière.

2) La Formation des Grès de Tipakuri

Deux unités, séparées par un conglomérat très peu fossilifère de 1,80 m d'épaisseur représentant probablement une interdigitation de la Formation de Cape Rodney, peuvent être reconnues (Hayward & Brook, 1984):

- une unité inférieure de 3 m d'épaisseur, constituée d'un grès conglomératique très (macro) fossilifère (0,60 m) surmonté par un grès calcaire (0,20 m) passant progressivement à un microgrès calcaire puis à un calcaire microgréseux (2 m);

- une unité supérieure de plus de 20 m d'épaisseur, constituée d'un grès conglomératique très (macro) fossilifère (0,50 m) surmonté par un grès calcaire (0,30 m), un microgrès calcaire (2 m) et des microgrès faiblement lités (12 m) contenant occasionnellement de petites lentilles grésocalcaires.

Ces deux unités correspondent au Membre de Oneroa (Hayward & Brook, 1984), l'un des membres définis dans la Formation des Grès de Tipakuri (Sous-Groupe de Kawau).

3) La Formation de East-Coast-Bay

Il s'agit d'un banc de grès jaunâtre, non fossilifère, granoclassé, de 2 m d'épaisseur, représentant probablement le premier banc de la séquence turbiditique du Sous-Groupe de Warkworth (Ballance, 1976).

III. — CONTENU OSTRACODIQUE

Les quinze échantillons de Fossil Bay (BM3 à BM17) ont livré plus de 3500 ostracodes répartis sur plus de 110 espèces (Milhau, 1990). Le tableau I reprend les espèces les plus caractéristiques ainsi que celles décrites récemment (Milhau, 1993a). Beaucoup de taxons sont laissés en nomenclature ouverte. D'autres échantillons (AC1 à AC13; AR1 à AR10 et AR17 à AR25; GS1 à GS5) en provenance des collections des Drs G.Gibson (Université d'Auckland), F.J.Brook et B.W.Hayward (New Zealand Geological Survey) ont permis de reconnaître 15 espèces supplémentaires (signalées par * dans le Tabl. I), non reconnues dans mes propres échantillons.

Deux assemblages ostracodiques (GS6.7), déjà étudiés par Hornibrook en 1952 (New Zealand Geological Survey) et provenant de Oneroa Bay, permettent de reconnaître plus de 450 ostracodes répartis sur 67 espèces; jusqu'à présent, 7 d'entre elles (signalées par * dans le Tabl. I) n'ont pas encore été reconnues dans les affleurements du Sud-Ouest (Milhau, 1990).

Au total, plus de 132 espèces ont donc été signalées dans des échantillons en provenance de l'île de Waiheke, mais 49 d'entre elles n'ont seulement été rencontrées qu'une fois, dans l'un ou l'autre des échantillons. Les deux affleurements (Fossil Bay et Oneroa Bay) permettent l'identification de 83 espèces d'ostracodes reconnues dans au moins deux échantillons différents.

IV. — BIOSTRATIGRAPHIE

En comparant avec les données essentiellement de Hornibrook (1952), Swanson (1969) et Ayress (1993), mais aussi de Chapman (1926), Hornibrook (1953a, 1953b, 1968), Hasibuan (1988) et Ayress & Swanson (1992), l'âge des sédiments ne peut être plus vieux que l'Otaïen:

- absence d'espèces du Waitakien comme *Trachyleberis jilletti*,

- présence de *Trachyleberis retizea* [espèce clé de Hornibrook, 1952] et de *Loxococoncha propunctata*.

A cause de l'absence d'espèces dont la première apparition connue est altonienne ("*Cythereis*" *finleyi*), et même si certaines espèces clés ou abondantes (Hornibrook, 1952) n'ont pas été retrouvées ou sont très rares ("*Bradleya*" *clifdenensis*, *Quadracythere clavata*, *Trachyleberis brevicosta*, *Quadracythere mediaplana*), un âge miocène inférieur, Otaïen, peut être proposé pour ces sédiments, ce qui est compatible avec les données obtenues à partir des foraminifères (Hoskins, 1982; Hayward & Brook, 1984).

Puisque certaines espèces sont trouvées dans les sédiments otaïens de l'île de Waiheke, des modifications de leur répartition stratigraphique doivent être envisagées. *Henryhowella probesioides*, *Loxococoncha australis* et *Hemicythere tarakoensis* apparaissent plus tôt, au moins dans cette région. *Callistocythere obtusa* (une espèce supposée actuelle) et *Vitjasiella duplicispina* (espèce déjà signalée dans l'Altonien par Ayress en 1993) sont trouvées pour la première fois dans le Miocène inférieur, Otaïen. *Limburgina* ? cf. *quadrizea* pourrait correspondre au taxon décrit par Hornibrook (1952) et sa répartition stratigraphique devrait alors être étendue vers le haut, s'il s'avère que mes spécimens ne sont pas remaniés.

V. — ASSOCIATIONS OSTRACODIQUES

Les associations d'ostracodes, dans les sédiments autochtones, non turbiditiques, de la base du Groupe de Waitemata (Sous-Groupe de Kawau) de l'île de Waiheke, permettent de mettre en évidence différents types d'environnements. Il faut cependant être prudent, non seulement parce que beaucoup d'espèces sont encore laissées en nomenclature ouverte ou juste rapportées, parfois avec doute, à des espèces connues, mais aussi parce que nous n'en savons pas encore assez sur leurs biotopes et leurs biocénoses.

1) Echantillons 3 et 4

Les regroupements supraspécifiques (a, fig. 2) indiquent une association à Hemicytheridae, Bairdiidae et Cytherellidae, dominée par *Ambostracon elongata* et *Quadracythere mediaruga*, deux espèces appartenant à des genres dont la répartition est essentiellement littorale (Morkhoven, 1962; Moore, 1971).

Cependant, par le grand nombre d'individus récoltés et une lithologie un peu plus fine, l'échantillon BM4 et son cortège ostracodique semblent davantage correspondre à un milieu littoral un peu plus externe, ce qui est confirmé par l'absence des *Callistocythere*, la présence des Paradoxostomatidae et des Xestoleberididae, ainsi que la prédominance des Hemicytheridae (30 %). Les espèces co-dominantes sont *Ambostracon elongata*, *Quadracythere mediaruga*, *Neobuntonia* ? *oneroensis*, *Cletocythereis bradyi*, *Munseyella* aff. *brevis* et *Bairdoppilata kerryi* qui a été trouvée (Swanson, 1979) entre 3 m and 140 m de profondeur (biocénose) et même jusqu'à 170 m (thanatocénose). Les formes larvaires sont peu nombreuses, les carapaces (25 % du nombre total d'individus récoltés) représentent environ 65 % du nombre d'individus appartenant aux six espèces dominantes et les fragments sont nombreux, en particulier ceux de *Bairdoppilata kerryi* (Tabl. II).

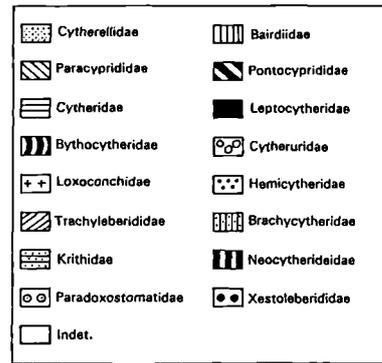
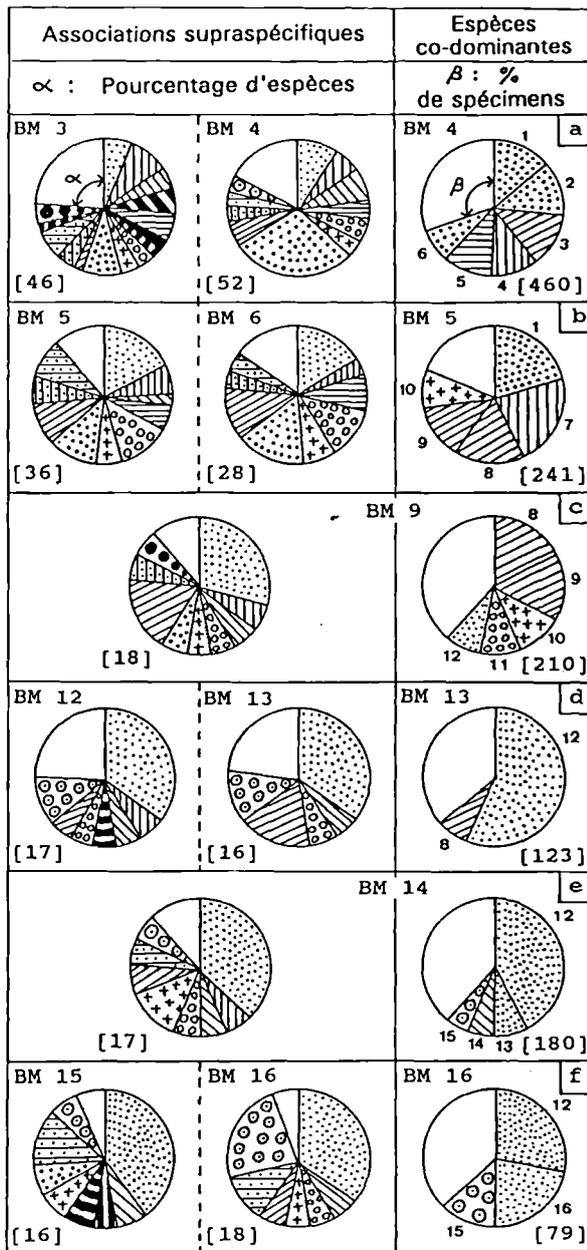


Fig. 2. — Diagrammes circulaires montrant les associations supraspécifiques d'ostracodes et les espèces co-dominantes dans les échantillons de Fossil Bay. [n]: nombre total d'espèces ou d'individus.

1) *Neobuntonia ? oneroensis* 2) *Quadracythere mediaruga*
 3) *Cletocythereis bradyi* 4) *Bairdoppilata kerryi* 5) *Munseyella* aff. *brevis* 6) *Ambastracon elongata* 7) *Neonesidea waitematanensis*
 8) *Trachyleberis thomsoni* 9) *Trachyleberis retizea* 10) *Loxoconcha propunctata* 11) *Oculocytheropteron grant-mackieii* 12) *Cytherella chapmani* 13) *Cytherella hemipuncta* 14) *Phlyctenophora zealandica* 15) *Cytherois parallela* 16) *Cytherella ballancei*.

Fig. 2. — Circular diagrams showing supraspecific associations of ostracods and co-dominant species in different samples from Fossil Bay. [n]: total number of species or specimens.

A la suite des travaux d'Oertli (1971), il est raisonnable d'envisager un milieu de dépôt très peu profond, affecté occasionnellement de courants assez forts ayant opéré un tri parmi les individus (absence de juvéniles). Compte tenu du grand nombre de carapaces bien préservées, le taux de sédimentation devait être assez élevé. L'abondance des fragments suggère quelques remaniements.

2) Echantillons 5 et 6

Les regroupements supraspécifiques (b, fig. 2) indiquent une association à Cytherellidae, Hemicytheridae, Cytheruridae et Trachyleberididae, avec quelques Loxoconchidae. Les espèces co-dominantes sont *Neobuntonia ? oneroensis*, *Neonesidea waitematanensis*, *Trachyleberis thomsoni*, *Trachyleberis retizea* et *Loxoconcha propunctata*.

Les genres *Trachyleberis* et *Loxoconcha* ont une répartition essentiellement littorale à infralittorale. L'abondance des fragments de *Neobuntonia ? oneroensis*, suggérant un remaniement, privilégie l'hypothèse d'un milieu infralittoral interne, assez calme (jusqu'à 25 % de larves de *Loxoconcha*), peut-être associé à un herbier (présence de Cytheruridae et communes *Loxoconcha*), et où le taux de sédimentation était très faible (5 % de carapaces) (Tabl. II).

3) Echantillon 9

La faune est dominée par les Cytherellidae (29 %) et les Trachyleberidae (18 %); les Cytheridae et les Krithidae sont absents (c, fig. 2). Les espèces co-dominantes sont *Trachyleberis retizea*, *Trachyleberis thomsoni*, *Oculocytheropteron grantmackieii* et *Cytherella chapmani*.

Echantillons	Specimens	Espèces	Fragments	Carapaces	Juveniles	Ornementés	Grands \geq 0,80	Petits \leq 0,35
n°	nb	nb	%	%	%	%	%	%
BM 3	212	46	35	19	7	54	24	13
BM 4	460	52	45	25	4	60	29	13
GS 6	288	49	/	/	8	69	31	14
GS 7	263	51	/	/	9	74	25	19
BM 5	241	36	7	4	17	44	22	17
BM 6	235	28	10-60	5	5	57	25	11
BM 7	77	24	25	14	5	46	29	8
BM 8	92	10	67?	10	8	50	20	10
BM 9	210	18	21	14	18	33	11	11
BM 10	48	17	59	33	4	65	23	6
BM 11	13	6	30	15	7	33	16	0
BM 12	125	17	11	13	32	29	12	6
BM 13	123	16	9	11	37	37	13	6
BM 14	180	17	7	51	21	24	18	6
BM 15	41	16	15	50	17	19	19	0
BM 16	79	18	15	39	25	22	11	6
BM 17	74	13	16	47	34	23	15	8

Tabl. II. — Données quantitatives sur les ostracodes de l'île de Waiheke.

Table II. — Ostracods from Waiheke Island: quantitative data.

Swanson (1979) et Hornibrook (1952) ont décrit plusieurs espèces actuelles d'*Oculocytheropteron*, *Cytherella* et *Loxoconcha* dans les domaines littoraux à infralittoraux. L'absence des Cytheridae, des *Quadracythere* et de *Neobuntonia ? oneroensis* suggère plutôt un milieu infralittoral. Compte tenu du pourcentage élevé en carapaces (14 % au lieu de 5%, voir Tabl. II), le taux de sédimentation est plus important que celui du milieu précédant; l'arrivée de matériel détritique fin (cf. lithologie) est confirmée par l'apparition de tubercules tripartites chez certains *Trachyleberis thomsoni* (Carbonel, comm. pers.). L'herbier supposé précédemment a peut-être disparu (envasement ?), ce qui expliquerait l'absence des Cytheruridae.

4) Echantillon 10

La lithologie d'une part (conglomérat) et les caractéristiques de la faune ostracodique d'autre part, indiquent qu'il s'agit d'un faciès de remaniement; seules les espèces à tests épais ont résisté (Bairdiidae, Cytheridae, Hemicytheridae). Peu d'individus et peu d'espèces ont été récoltés, mais le nombre de fragments est élevé (60 %) et les formes juvéniles sont rares (Tabl. II). Les carapaces, proportionnellement nombreuses, indiquent un milieu à taux de sédimentation élevé. L'association correspond à celle du premier milieu décrit, et pourrait correspondre à son remaniement.

5) Echantillons 12 et 13

Les regroupements supraspécifiques (d, fig. 2) indiquent une association à Cytherellidae - Paradoxostomatidae; les

Trachyleberidae sont présents mais souvent remaniés (fragments). L'absence de formes typiquement littorales ou infralittorales internes et la prédominance de *Cytherella chapmani*, conduisent à envisager un milieu infralittoral externe, peu affecté par les courants marins et plutôt calme (35 % de formes juvéniles, 10 % de fragments), et où le taux de sédimentation devait être moyen (12 % de carapaces) (Tabl. II). La présence des *Cytherois* pourrait sous-entendre l'existence, pas très loin, d'un peuplement algaire.

6) Echantillon 14

La faune est dominée par les Cytherellidae et les Loxoconchidae (e, fig. 2). Les Paradoxostomatidae (5 %) sont présents et *Cytherois parallela* est l'une des espèces co-dominantes avec *Cytherella chapmani*, *Cytherella hemipuncta* et *Phlyctenophora zealandica*.

Ishizaki (1968) a décrit des espèces de *Cytherois* dans des environnements infralittoraux et Swanson (1979) a signalé une biocénose à *Cytherella hemipuncta* sur le plateau continental externe (environnements infralittoraux à circalittoraux).

Les formes larvaires de *Cytherella chapmani* étant nombreuses et le pourcentage de fragments étant minime, il est raisonnable d'envisager un milieu calme, très peu affecté par l'action des vagues et des courants. Ce milieu infralittoral à circalittoral est confirmé par l'absence totale d'espèces réputées littorales, la présence des genres *Phlyctenophora* et *Neonesidea*, ainsi que l'existence d'une thanatocénose à *Cytherella hemipuncta* (majorité d'adultes plus ou moins usés) et *Cytherois parallela*. En effet les *Cytherois*, qui sont bien souvent des formes semi-parasites par rapport aux algues (mais pouvant facilement être transportées), semblent allochtones en raison de leur population presque exclusivement adulte (tri lors de leur dérive). Le pourcentage élevé de carapaces (51 %) indique un taux de sédimentation important (Tabl. II).

7) Echantillons 15 et 16

On retrouve une association à Cytherellidae et Paradoxostomatidae (f, fig. 2), à laquelle viennent s'ajouter les Kritidae. Les espèces co-dominantes sont *Cytherella chapmani*, *Cytherella bissoni* et *Cytherois parallela*. Par analogie avec les échantillons précédents, il s'agit probablement encore d'un milieu infralittoral à circalittoral. L'abondance relative des Kritidae pourrait indiquer une plus grande profondeur (Whatley & Zhao, 1993). Bien que la corrélation entre le vestibule des *Krithe* et la teneur en oxygène de l'eau soit remise en cause par certains auteurs (Whatley & Zhao, 1993 - Swanson K.M., 1995), la présence de *Krithe swanoni*, qui est ici une *Krithe* de type 1 (Peypouquet, 1977), avec un grand vestibule antérieur et une lamelle interne étroite, pourrait indiquer un faible taux d'oxygène dissous (zone d'oxygène minimum, Guernet & Lethiers, 1989).

8) Echantillon 18

Trois fragments indéterminables d'ostracode ont été trouvés. Puisque le banc est directement surmonté par les premières turbidites du Sous-Groupe de Warkworth, il est concevable d'envisager un milieu de dépôt profond et instable (Milhau, 1990, 1993b).

VI. — REMARQUES PALEOECOLOGIQUES

1) Un approfondissement du bassin

De la base au sommet de la séquence, les associations d'ostracodes mettent donc en évidence un approfondissement progressif du bassin (fig. 3), ce qui est compatible avec la lithologie de plus en plus fine. Il s'agit donc d'une séquence transgressive typique, même si la présence du niveau conglomératique intermédiaire (échantillon 10) indique une reprise de l'érosion (bordure instable, dépôt par gravité) et une transgression procédant par à-coup.

2) Une instabilité hydrochimique

Parmi toutes les espèces reconnues dans les échantillons de l'île de Waiheke, sept d'entre elles se présentent sous différents morphes (Pl. III) dont la répartition (Tabl. III) ne semble pas quelconque le long de la série:

1) la partie inférieure est caractérisée par un grand nombre de spécimens et plusieurs morphes intraspécifiques (formes aggradées, à l'équilibre, dégradées, sensu Peypouquet *et al.*, 1988),

2) l'échantillon 13 est caractérisé par un léger polymorphisme avec surtout des formes à l'équilibre et des formes dégradées.

Des morphologies variables reflètent les caractéristiques et les fluctuations de l'environnement (Babinot *et al.*, 1991 - Swanson, 1995). C'est ainsi qu'il existe des relations entre la variation de l'ornementation des valves et les paramètres hydrochimiques, en particulier l'équilibre des carbonates à l'interface eau-sédiments en fonction des apports organiques, soit d'origine continentale, soit provenant d'upwelling (Peypouquet *et al.*, 1988).

Il est intéressant de noter que, dans notre série, les ostracodes sembleraient privilégier l'hypothèse upwelling, déjà proposée par certains auteurs (Codling, 1970; Crabb, 1971; Weigel, 1976) pour expliquer certaines accumulations glauconitiques dans les sédiments otaiens du Bassin de Waitemata. De tels courants en effet expliqueraient, parmi des associations d'ostracodes typiquement littorales, la présence d'espèces réputées plus profondes, comme *Krithe swansoni* dans les échantillon BM 4 et GS 7, *Phlyctenophora zealandica* et *Bythoceratina robusta* dans les échantillons GS 6 et AR 19, *Bradleya semiarata* et *Bradleya aff. cuneazea* dans l'échantillon BM 4 ou *Bythoceratina* (habituellement un genre infralittoral à bathyal) dans l'échantillon BM 12.

3) Un climat subtropical

Comme l'avait supposé Hornibrook (1952) sur des données uniquement paléontologiques, puis établi ensuite Devereux (1967) sur des données paléontologiques et isotopiques, la Nouvelle Zélande se trouvait, au Miocène inférieur, en bordure de la zone tempérée chaude - subtropicale. Les données isotopiques des sondages D.S.D.P. (Murphy & Kennett, 1984) et les découvertes paléontologiques (Wakefield, 1976; Hayward, 1979; Ballance *et al.*, 1981; Heusser, 1982) ont confirmé un environnement subtropical pour la partie nord de la Nouvelle Zélande au Miocène inférieur, avec un

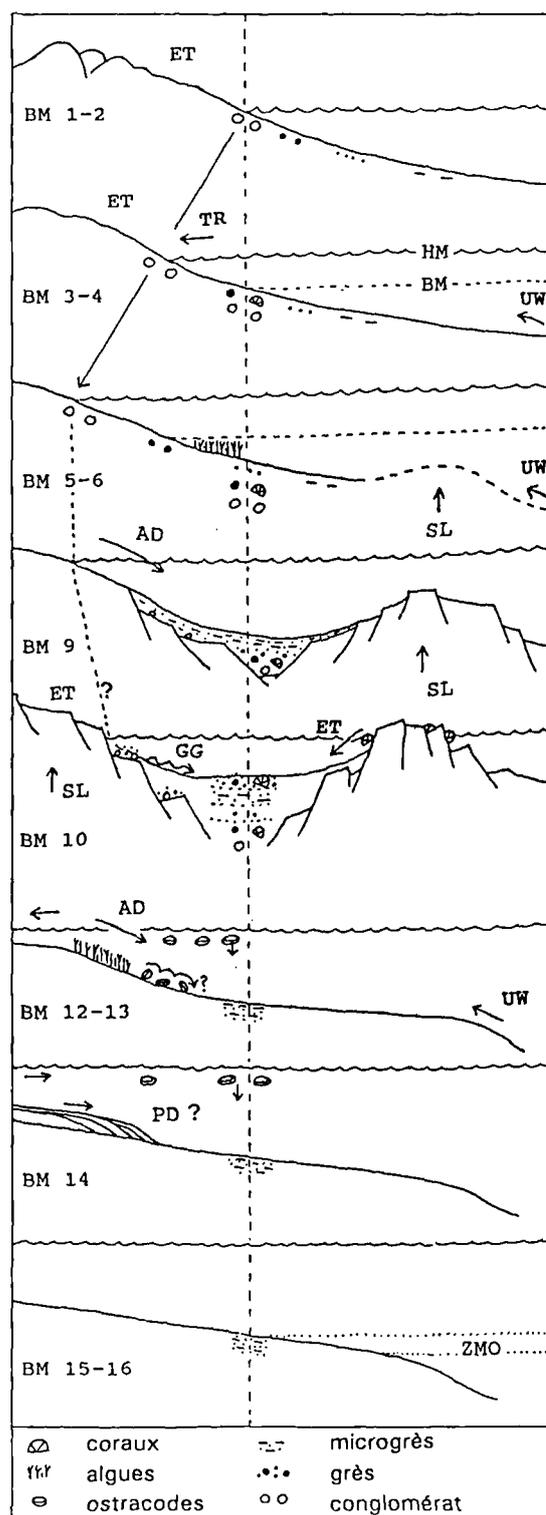


Fig. 3. — Représentations schématiques de l'évolution paléocologique de la bordure orientale du Bassin de Waitemata sur l'île de Waiheke. AD: apport détritique, BM: niveau d'eau à marée basse, ET: érosion, transport, GG: glissement par gravité, HM: niveau d'eau à marée haute, PD: aire pré-deltaïque, SL: soulèvement, TR: transgression, UW: upwelling, ZMO: zone à minimum d'oxygène.

Fig. 3. — Schematic diagrams showing the evolution of the Waitemata Basin eastern border on Waiheke Island. AD: detrital input, BM: low tide, ET: erosion, transport, GG: gravity sliding, HM: high tide, PD: pro-deltaic area, SL: uplift, TR: transgression, UW: upwelling, ZMO: minimum oxygen zone.

	Ambostracon pumila			Cletocythereis bradyi			Neobuntonia ? oneroensis			Cytherella ballancei			Trachyleberis thomsoni		Quadracythere biruga-norcotti		Quadracythere mediaruga		
	Ag	Eq	Dg	Ag	Eq	Dg	Ag	Eq	Dg	Re	Po	Li	Tu	Eq	Li	Ro	Eq	Ro	Eq
BM 3									●				●	○			?		●
BM 4	●	○	●	●	●	●	●	●	●				●	●	●	●	○	○	●
GS 6	●			●			●	●	●	●	○		●	●	●	●	●	●	●
GS 7	●			●			●	●	●	●	○		●	●	●	○	●	●	●
BM 5	○								●	○	○	●		●				●	○
BM 6	●	●		●				●					●					●	●
BM 7		●	●	●				●					●						●
BM 8													●	●					
BM 9				●									●	●					
BM 10								●	?				●						
BM 11													●						
BM 12										●	●				●				
BM 13				●	●					●	●	●	●	●	●				
BM 14													?						
BM 15																			?
BM 16																			
BM 17																			

Tabl. III. — Répartition stratigraphique des différentes morphes d'ostracodes. Ag: forme aggradée, Dg: forme dégradée, Eq: forme à l'équilibre, Li: forme lisse, Po: forme ponctuée, Re: forme réticulée, Ro: forme robuste, Tu: forme tuberculée.

Table III. — Distribution of different morphs of ostracods in Waiheke Island sediments. Ag: aggraded morph, Dg: degraded morph, Eq: standard morph, Li: smooth morph, Po: punctate morph, Re: reticulate morph, Ro: robust morph, Tu: tuberculate morph.

réchauffement à l'Otaïen et un maximum climatique à l'Altonien (Vincent & Berger, 1985), en relation avec des transgressions (Kennett & von der Borch, 1984) sur des continents de plus en plus arides mais cependant soumis à une alternance de conditions semi-arides et humides (Firth, 1930; Jones, 1970; Stein & Robert, 1984).

Ce réchauffement pourrait expliquer la présence de genres réputés tempérés-chauds (Morkhoven, 1962 et 1972, McKenzie *et al.*, 1991) comme *Callistocythere*, *Cytherelloidea*, *Cytherella* (*Platella*) et *Phlyctenophora*, mais aussi la présence d'espèces réputées tropicales

(Hornibrook, 1952) comme *Hermanites lactea pakaurangia* et *Loxoconcha australis* (Pl. IV).

VII. — CONCLUSION

Plus de 132 espèces d'ostracodes sont signalées dans les sédiments carbonatés autochtones otaïens de l'île de Waiheke. La présence d'espèces tropicales et de genres réputés chauds indique l'existence d'un climat tempéré-chaud à subtropical au moment du dépôt du Sous-Groupe de Kawau. Cette étude permet de reconnaître trois associations différentes d'ostracodes caractéristiques de milieux haute énergie et très peu profonds à des milieux plus calmes de plateforme externe. Leur succession est caractéristique d'une séquence transgressive typique, mais procédant par à-coup, doublée d'un approfondissement progressif du bassin. Les variations dans l'ornementation des valves de certaines espèces sont corrélables avec une instabilité hydrochimique peut-être due, tout au moins partiellement, à des upwellings. La figure 3 est une proposition schématique de l'évolution de la bordure nord-est du Bassin de Waitemata, dans la région d'Auckland, pendant le Miocène inférieur et avant l'arrivée des premiers dépôts turbiditiques.

Plusieurs espèces d'ostracodes reconnues dans les échantillons de l'île de Waiheke (bordure Est du bassin) ont été retrouvées dans la région de Port Waikato (bordure Sud-Est du bassin). Néanmoins l'environnement au Sud-Est est légèrement différent en raison de l'abondance des *Cytheralison*, la présence de *Ambostracon* sp. 1, "*Bythocythere*" ? sp. 1, *Cytheralison pravacauda*, *Cytherelloidea* cf. *auricula*, *Henryhowella* cf. *probesioides*, *Trachyleberis* sp. 1, Ostracoda indet. 8 et l'absence de *Neobuntonia ? oneroensis*, *Cletocythereis bradyi*, *Loxoconcha propunctata*, "*Trachyleberis*" *retizea* (signalés par dans le Tabl. I), espèces rencontrées en abondance dans de nombreux échantillons de la bordure Nord-Est. Il pourrait ainsi avoir existé une barrière structurale entre les deux régions (Firth, 1930; Crabb, 1971; Weigel, 1976; Hayward & Brook, 1984; Milhau, 1993b) ce qui expliquerait les différents biofaciès du Bassin de Waitemata.

Remerciements. — Je tiens à remercier les Drs P. CARONEL (Université de Bordeaux), F. LETHIERS (Université de Paris VI), D. BRICE et B. MISTIAEN (Faculté Libre des Sciences de Lille) pour les discussions et critiques constructives. Mes remerciements s'adressent également aux Drs J. GRANT-MACKIE, P. BALLANCE et G. GIBSON (Université d'Auckland, Nouvelle Zélande), ainsi qu'au Dr B. HAYWARD (N.Z.G.S., Lower Hutt), qui ont bien voulu me prêter du matériel de collection. Cette recherche a été financée par l'University Grants Committee d'Auckland (Nouvelle Zélande).

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Lower Miocene sediments form the bulk of the Waitemata Group (Ballance, 1976; Hayward *et al.*, 1989) in the Auckland area (Northland, New Zealand). One can recognize autochthonous basal sediments, Kawau Subgroup (Hayward & Brook, 1984) overlain by turbiditic rocks, Warkworth Subgroup (Ballance, 1976), in which new ostracod-bearing beds have been discovered (Milhau, 1991). The purpose of this paper is to analyse the distribution and the associations of the ostracods within the Kawau Subgroup sediments from Waiheke Island.

Basal Waitemata sediments (Kawau Subgroup) are mainly found East and South of Auckland (Hayward &

Brook, 1984) (a, fig. 1), specially on Waiheke Island (b, fig. 1), near Oneroa Bay and Double-U Bay in the North and near Fossil Bay and Cable Bay on the West coast (Halcrow, 1956), South of Church Bay. Two formations can be recognized (c, fig. 1): the Cape Rodney Formation (Park, 1886), represented by a poorly fossiliferous coarse conglomerate and the Tipakuri Sandstone Formation (Hayward & Brook, 1984), represented by a sequence from highly (macro) fossiliferous conglomeratic sandstones to calcareous and weakly layered silstones. At the top of the cliff, a thick graded bed of non fossiliferous yellow sandstone probably represents the first bed of the turbiditic sequence (Warkworth Subgroup, East-Coast-Bay Formation) (Ballance, 1976).

From Fossil Bay, fifteen samples (BM3 to BM17) yielded more than 3500 ostracod specimens referable to 110 species (Milhau, 1990, 1993a) and a few other samples from different collections (AC1 to AC13; AR1 to AR10 and AR17 to AR25; GS1 to GS5) allowed the recognition of a further 15 species series (indicated o in Tabl. I). From Oneroa Bay, two ostracod associations (GS6 and 7), already studied by Hornibrook in 1952, have yielded more than 450 ostracods referable to 67 species, 7 of them (indicated * in Tabl. I) were not recognized in the southwestern outcrops. All in all, more than 132 species of ostracods have been recorded in samples collected from Waiheke Island (Tabl. I), and 83 species recognized in, at least, two different samples.

By comparison with data mainly from Hornibrook (1952), Swanson (1969) and Ayress (1993), but also from Chapman (1926), Hornibrook (1953a, 1953b, 1968), Hasibuan (1988) and Ayress & Swanson (1992), it can be clearly proposed a lower Miocene, Otaian age for these sediments, which is in accordance with Foraminifera biostratigraphic data (Hoskins, 1982; Hayward & Brook, 1984). Consequently, because they are found in the Waiheke Island Otaian sediments, the stratigraphical range of *Henryhowella probesioides*, *Loxococoncha australis*, *Hemicocythere tarakoensis*, *Limburgina ? quadrazea*, *Callistocythere obtusa* (a presumed actual species) and *Vitjasiella duplicispina* has to be extended.

Ostracod associations (fig. 2) and quantitative data (Tabl. II) allow the characterization of different types of environment. Following Ishizaki (1968), Morkhoven (1962), Moore (1971), Oertli (1971), Swanson (1979), it is possible to presume a very shallow littoral environment for samples 3 and 4, a littoral to inner infralittoral environment, may be in association with a water plant community (presence of Cytheruridae and common *Loxococoncha*) for samples 5 and 6, an infralittoral environment probably with fine detrital material input (appearance of tripartite tubercles on some *Trachyleberis thomsoni*) for sample 9, a very shallow high energy environment for sample 10, an outer infralittoral environment with the proximity of an algal meadow (presence of *Cytheroïds*) for samples 12 and 13, an infralittoral to circalittoral environment for sample 14, an infralittoral to circalittoral environment, probably in the minimum oxygen zone (Guernet & Lethiers, 1989; Whatley & Zhao, 1993) (presence of *Krithe swansoni* which is of Peypouquet's type 1, 1977) for samples 15 and 16, a deep unstable environment for sample 18.

The ostracod associations suggest, from base to top, a progressive deepening of the basin (fig. 3), which is compatible with the overall fining trend of the lithology. It is typical of an irregularly proceeding transgression.

Among all the species recognized in the Waiheke Island section, seven of them appear with different intraspecific morphs (aggraded morphs, "standard" morphs, degraded morphs, sensu Peypouquet *et al.*, 1988) (Tabl. III and Pl. III). This polymorphism is related to environment disturbances (Babinot *et al.*, 1991; Swanson, 1995). For example, they are relationships between the variation of the valve ornamentation and the variation of the hydro-chemical parameters, specially the carbonate equilibrium at the water-sediment interface changing with organic inputs (Peypouquet *et al.*, 1988), either continentally derived or from upwelling origin. The ostracod record could support the upwelling hypothesis. Such currents could explain the presence of supposedly "deeper" ostracod species, among typical littoral associations, such as *Krithe swansoni* in sample BM 4 and sample GS 7, *Phlyctenophora zealandica* and *Bythoceratina robusta* in samples GS 6 and AR 19, *Bradleya semiarata* and *Bradleya aff. cuneazea* in sample BM 4 or *Bythoceratina* (usually an infralittoral to bathyal genus) in sample BM 12. Indeed glauconite accumulations in some Otaian sediments of the Waitemata Basin have been attributed to such currents (Codling, 1970; Crabb, 1971; Weigel, 1976).

As supposed by Hornibrook (1952) on paleontological data only and subsequently established on palaeontological and isotopic data (Devereux, 1967; Wakefield, 1976; Hayward, 1979; Ballance *et al.*, 1981; Heusser, 1982; Murphy & Kennett, 1984), New Zealand was, during lower Miocene time, in a warm-temperate to subtropical zone, with a warming up during the Otaian and a maximum during the Altonian (Vincent & Berger, 1985), in relation with transgressions (Kennett & von der Borch, 1984) upon an increasingly arid continent under alternating wet and dry conditions (Firth, 1930; Jones, 1970; Stein & Robert, 1984). This could explain the presence of warm-temperate genera (Morkhoven, 1962 and 1972, McKenzie *et al.*, 1991) such as *Callistocythere*, *Cytherelloidea*, *Cytherella* (*Platella*) and *Phlyctenophora*, but also the presence of assumed tropical species (Hornibrook, 1952) such as *Hermanites lactea pakaurangia* and *Loxococoncha australis*.

The evolution of the northeastern border of the Waitemata Basin, in the Auckland area, during the Otaian before the first turbiditic deposits, is shown in figure 3.

Many species of ostracods recognized in the Waiheke Island section (eastern border) have also been found in the Port Waikato area (southeastern border), but not all of them (indicated . in Tabl. I). There could have been a structural barrier between the two areas (Firth, 1930; Crabb, 1971; Weigel, 1976; Hayward & Brook, 1984; Milhau, 1993b) which might explain differing biofacies of the Waitemata Basin.

BIBLIOGRAPHIE

- AYRESS M.A. & SWANSON K.M. (1992). - New fossil and recent genera and species of cytheracean ostracoda (Crustacea) from South Island, New Zealand. *New Zealand Natural Sciences*, 18, 1-18.
- AYRESS M.A. (1993). - Ostracod biostratigraphy and palaeoecology of the Kokoamu Greensand and Otekaike Limestone (Late Oligocene to Early Miocene), North Otago and South Canterbury, New Zealand. *Alcheringa*, 17, 125-151.
- BABINOT J.F., CARBONEL P., PEYPOUQUET J.P., COLIN J.P. et TAMBAREAU Y. (1991). - Variations morphologiques et adaptations morphofonctionnelles chez les ostracodes: signification environnementale. *Geobios*, M.S. 13, 135-145.
- BALLANCE P.F. (1976). - Stratigraphy and bibliography of the Waitemata Group of Auckland, New Zealand. *N.Z. Jour. Geol. Geophys.*, 19, 897-932.

- BALLANCE P.F., GREGORY M.R. et GIBSON G.W. (1981). - Coconuts in Miocene turbidites in New Zealand: possible evidence for tsunami origin of some turbidity currents. *Geology*, 9, 592-595.
- CHAPMAN F. (1926). - The Cretaceous and Tertiary Foraminifera of New Zealand with an appendix on the Ostracoda. *N.Z.G.S. Paleont. Bull.*, 11, 1-119.
- CODLING A.P. (1970). - Waitemata rocks of Hobson bay - Mission bay area, Auckland. *B. Sc. Thesis*, Auckland University (non publié).
- CRABB P.L. (1971). - Bryozoan zoarial palaeoecology of the Waitemata Group. *M. Sc. Thesis*, Auckland University (non publié).
- DEVEREUX I. (1967). - Oxygen isotope paleotemperature measurements on New Zealand Tertiary fossils. *N.Z. Jour. Sci.*, 10, 988-1011.
- FIRTH C.W. (1930). - The geology of the Northwest portion of Manukau county, Auckland. *Trans. Proc. N.Z. Inst.*, 61, 85-137.
- GUERNET C. & LETHIERS F. (1989). - Ostracodes et recherche des milieux anciens: possibilités et limites. *Bull. Soc. Géol. France*, 5, 577-588.
- HALCROW H.M. (1956). - The geology of Waiheke Island. *Roy. Soc. N.Z., Trans. and Proc.*, 84, 51-69.
- HASIBUAN A.R. (1988). - Ostracode fauna from Pakaurangi Formation Waitakere Group, Northland. *M. Sc. Thesis*, Auckland University (non publié).
- HAYWARD B.W. (1979). - Eruptive history of the early to mid Miocene Waitakere volcanic arc, and palaeogeography of the Waitemata basin, northern New Zealand. *Jour. Roy. Soc. N. Z.*, 7, 99-111.
- HAYWARD B.W. & BROOK F.J. (1984). - Lithostratigraphy of the basal Waitemata Group, Kawau subgroup (new), Auckland, New Zealand. *N.Z. Jour. Geol. Geophys.*, 27, 101-123.
- HAYWARD B.W., BROOK F.J. et ISAAC M.J. (1989). - Cretaceous to middle Tertiary stratigraphy, paleogeography and tectonic history of Northland, New Zealand. in B. Sporli and D. Kear (Eds). *Geology of Northland. Roy. Soc. N. Z., Bull.*, 26, 47-63.
- HEUSSER L.E. (1982). - Palynology of selected Neogene samples from holes 594 and 594A, Chatham Rise. *Init. Reports. D.S.D.P.*, Washington, 90, 1085-1092.
- HORNIBROOK N. de B. (1952). - Tertiary and recent marine Ostracoda of New Zealand. *N.Z.G.S. Paleont. Bull.*, 18, 1-82.
- HORNIBROOK N. de B. (1953a). - Some New Zealand marine Ostracoda useful in stratigraphy. *Trans. Roy. Soc. N.Z.*, 81, 303-311.
- HORNIBROOK N. de B. (1953b). - Appendix on Ostracoda in WELLMAN H.W. The geology of the Geraldine subdivision. *N.Z.G.S. Bull.*, 50, 1-72.
- HORNIBROOK N. de B. (1968). - A handbook of New Zealand microfossils. *D.S.I.R. Information Series*, 62, 1-136.
- HOSKINS R. H. (1982). - Stages of the New Zealand Marine Cenozoic: a synopsis. *N.Z.G.S. Report*, 107, 1-74.
- ISHIZAKI K. (1968). - Ostracodes from Uranouchi Bay, Kochi Prefecture, Japan. *Science report, Tohoku University, Sendai, Serie 2 (Geol.)*, 37, 131-163.
- JONES B.G. (1970). - Paleontology and paleoecology of Pakaurangi Point, Kaipara, New Zealand. *Trans. Roy. Soc. N.Z., Earth Sci.*, 7, 137-176.
- KENNETT J.P. & VON DEN BORCH C.C. (1984). - Southwest Pacific Cenozoic paleoceanography. *Init. Reports. D.S.D.P.*, Washington, 90, 1493-1514.
- MILHAU B. (1990). - Les Ostracodes du Bassin de Waitemata (Miocène inférieur) de la région d'Auckland (Nouvelle-Zélande). Systématique - Paléoécologie - Paléogéographie. *Thèse Université des Sciences et Techniques de Lille Flandre Artois* (non publié).
- MILHAU B. (1991). - Découverte de bancs à Ostracodes dans les flyschs du Bassin de Waitemata (Miocène inférieur, Northland, Nouvelle-Zélande): incidences paléogéographiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 313, 1349-1355.
- MILHAU B. (1993a). - Nouveaux Ostracodes du Miocène inférieur de Nouvelle-Zélande. *Geobios*, 26, 161-200.
- MILHAU B. (1993b). - Le Bassin de Waitemata (Miocène inférieur, Nouvelle-Zélande). Paléoécologie (Ostracodes) et Paléogéographie. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, 2, 81-89.
- McKENZIE K.G., REYMENT R.A. et REYMENT E.R. (1991). - Eocene-Oligocene Ostracoda from South Australia and Victoria, Australia. *Rev. Esp. Paleont.*, 6, 135-175.
- MORKHOVEN F.P.C.M. van (1962-63). - Post-Palaeozoic Ostracoda. Their morphology, taxonomy and economic use. *Elsevier Publ., Amsterdam*, 1, 1-204, 2, 1-478.
- MORKHOVEN F.P.C.M. van (1972). - Bathymetry of recent marine Ostracoda in the northwest gulf of Mexico. *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.*, 23, 241-252.
- MOORE R.C. (1971). - Treatise on invertebrate paleontology. Part Q, Arthropoda 3, *Geol. Soc. Am. and Univ. Kansas Press*, 1-442.
- MURPHY M.G. & KENNETT J.P. (1984). - Development of latitudinal thermal gradients during the Oligocene: oxygen-isotope evidence from the southwest Pacific. *Init. Reports. D.S.D.P.*, Washington, 90, 1347-1359.
- OERTLI H.J. (1971). - The aspect of Ostracode faunas. A possible new tool in petroleum sedimentology. In H.J.Oertli (Ed). *Paléoécologie des Ostracodes. Colloque Pau 1970. Bull. Centre Rech. Pau - SNPA*, 5 Suppl., 1-953.
- PARK J. (1886). - Waitemata, Eden and Manukau counties. On the Kaipara district. *N.Z.G.S. Rep. Geol., Exploration (1885)*, 17, 147-170.
- PEYPOUQUET J.P. (1977). - Les Ostracodes et la connaissance des paléo-milieux profonds. Application au Cénozoïque de l'Atlantique nord-oriental. *Thèse doctorat*, Université de Bordeaux (non publié).
- PEYPOUQUET J.P., CARBONEL P., DUCASSE O., TOLDERER-FARMER M. et LETE C. (1988). - Environmentally cued polymorphism of Ostracodes. In T. Hanai et al. (Eds). *Evolutionary Biology of Ostracoda. Developm. Palaeont. Stratig.*, 11, 1003-1019.
- STEIN R. & ROBERT R.S. (1984). - Cenozoic evolution and significance of clay associations in the New Zealand region of the South Pacific. *Init. Reports. D.S.D.P.*, Washington, 90, 1225-1236.
- SWANSON K.M. (1969). - Some Lower Miocene Ostracoda from the middle Waipara district, New Zealand. *Trans. Roy. Soc. N. Z. Earth. Sci.*, 7, 33-48.
- SWANSON K.M. (1979). - The marine fauna of New Zealand: Ostracods of the Otago shelf. *N. Z. Ocean. Inst. Mem.*, 78, 1-56.
- SWANSON K.M. (1995). - Strategies for, and evolutionary implications of, carapace conservation in some living, benthic, marine Ostracoda. *Senckenbergiana Lethaea*, 75, 193-213.
- VINCENT E. & BERGER W. (1985). - Carbon dioxide and polar cooling in the Miocene: the Monterey hypothesis. In Sundquist & Broecker (Eds). *The carbon cycle and atmospheric CO₂: natural variation, Archean to present. Am. Geophys. Union Monogr.*, 32, 814-836.
- WAKEFIELD L.L. (1976). - Lower Miocene paleogeography and molluscan taxonomy of Northland, New Zealand. *Ph. D. Thesis*, Auckland University (non publié).
- WEIGEL V.H. (1976). - The Waitemata Group in South west Auckland. *M. Sc. Thesis*, Auckland University (non publié).
- WHATLEY R. & ZHAO Q. (1993). - The *Krithe* problem: a case history of the distribution of *Krithe* and *Parakrithe* (Crustacea, Ostracoda) in the South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 103 (3/4), 281-297.

EXPLICATION DES PLANCHES (+)

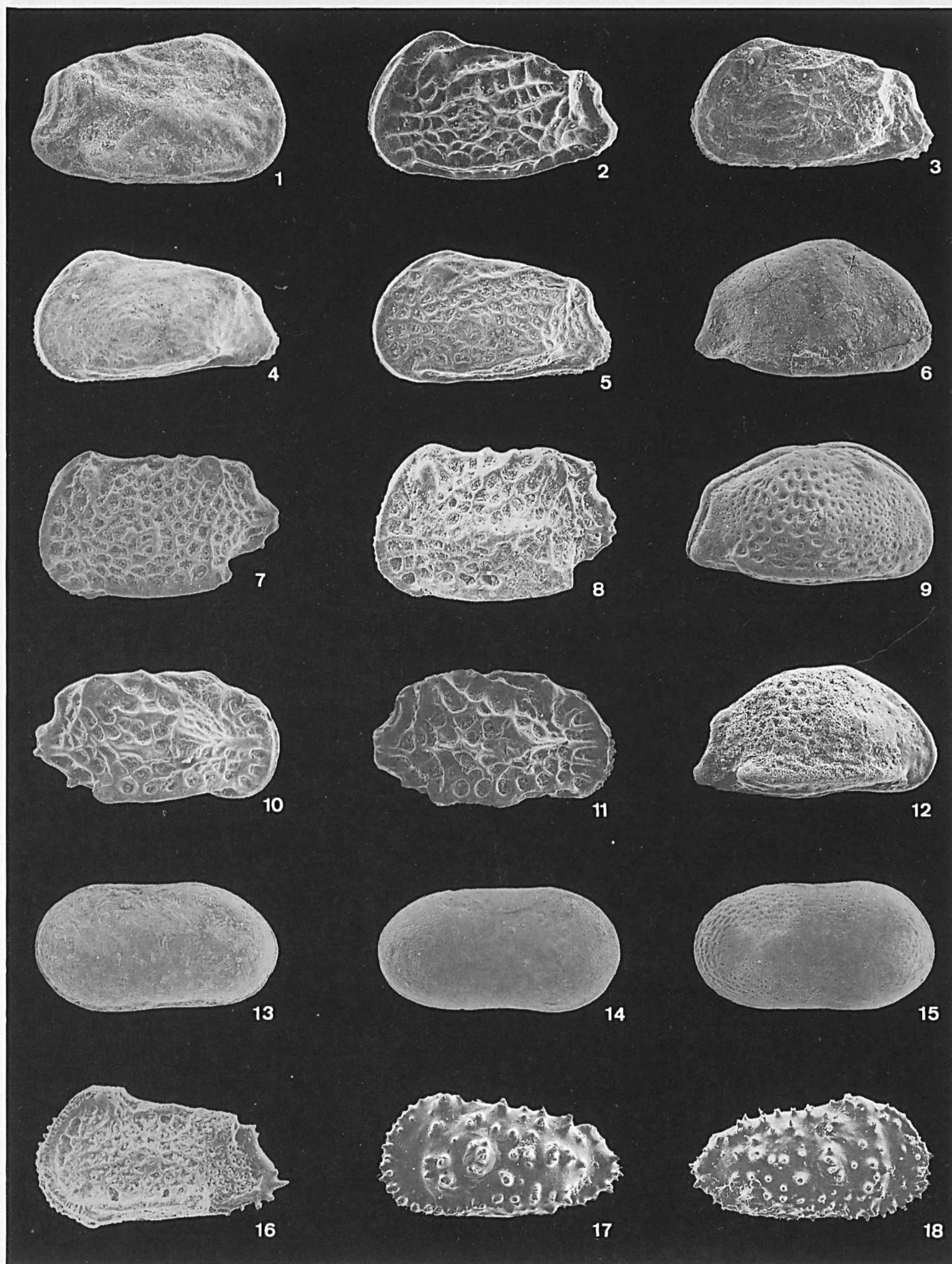
PLANCHE III

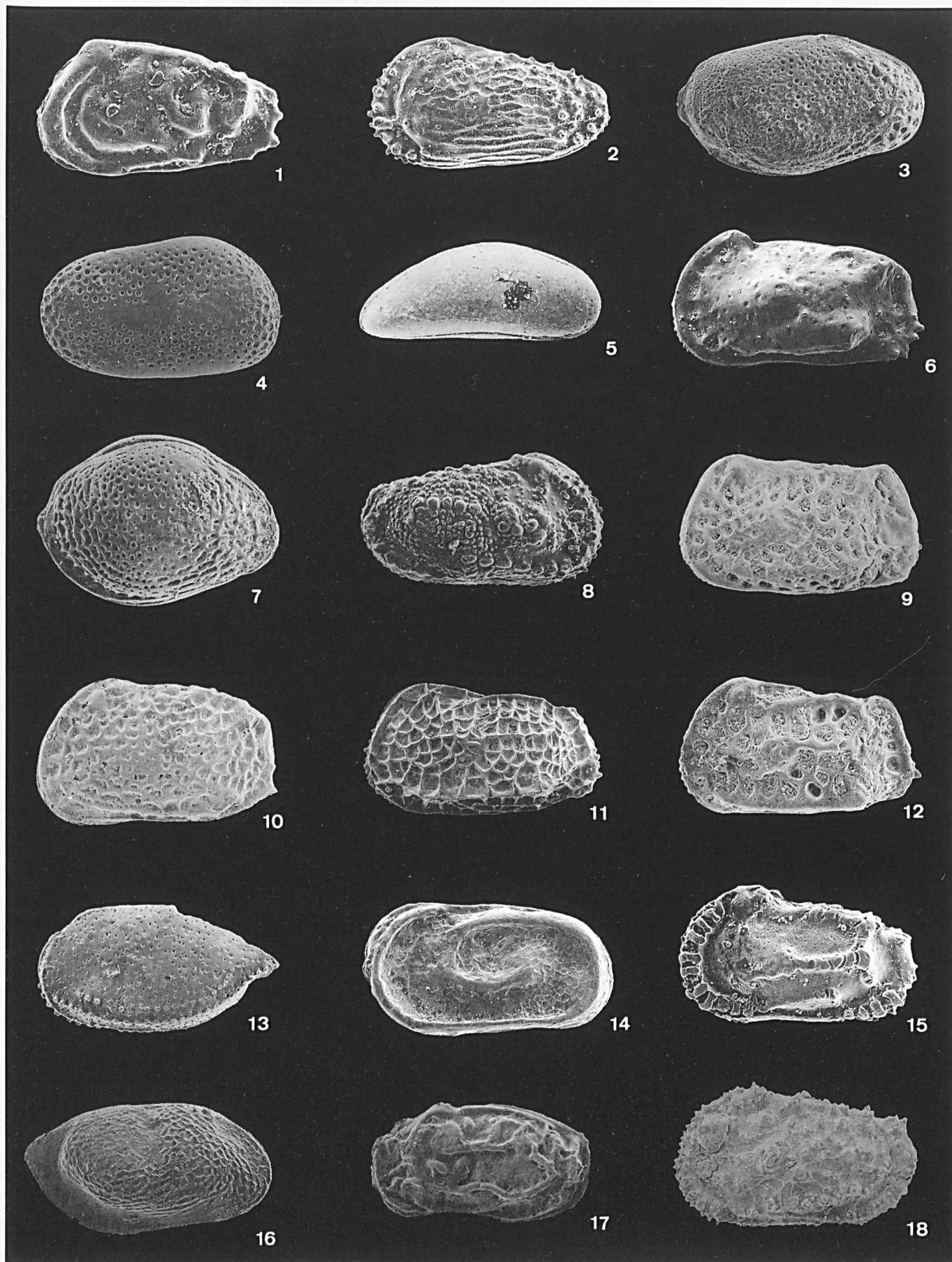
- Fig. 1-3. — *Ambostracon (Patagonacythere) pumila* (Brady, 1866).
1: VD, COFLS211. Gr.=80, morphe robuste.
2: VG, COFLS212. Gr.=100.
3: VG, COFLS213. Gr.=85, morphe agradée.
- Fig. 4-5. — *Ambostracon (Patagonacythere) elongata* Milhau, 1993.
4: VG, AU067. Gr.=70, morphe agradée.
5: VG, AU068. Gr.=60.
- Fig. 7-8. — *Quadracythere mediaruga* Hornibrook, 1952.
7: VG, COFLS214. Gr.=70, morphe sans carène, juvenile ?.
8: VG, COFLS215. Gr.=55.
- Fig. 10-11. — *Quadracythere* gr. *biruga-norcotti* Hornibrook, 1952-Briggs, 1972.
10: VD, COFLS216. Gr.=60.
11: VD, COFLS217. Gr.=55, morphe robuste.
- Fig. 6,9,12. — *Neobuntonia ? oneroaensis* Milhau, 1993 (= ? *N. airella* McKenzie, Reyment and Reyment, 1991).
6: VD, COFLS218. Gr.=60, morphe lisse.
9: VD, AU076. Gr.=60.
12: VD, AU081. Gr.=60, morphe robuste.
- Fig. 13-15. — *Cytherella ballancei* Milhau, 1993.
13: VG, COFLS219. Gr.=70, morphe lisse.
14: VD, AU015. Gr.=70, morphe ponctuée.
15: VG, AU012. Gr.=75, morphe réticulée.
- Fig. 16. — *Cletocythereis bradyi* Holden, 1967. VG. COFLS220. Gr.=60.
- Fig. 17-18. — *Trachyleberis thomsoni thomsoni* Hornibrook, 1952.
17: VG, COFLS221. Gr.=45.
18: VD, COFLS222. Gr.=50, morphe avec tubercules tripartites.

PLANCHE IV

- Fig. 1. — *Munseyella* aff. *brevis* Swanson, 1979. VG, COFLS223. Gr.=110.
- Fig. 2. — *Trachyleberis retizea* Hornibrook, 1952. VG, COFLS204. Gr.=90.
- Fig. 3. — *Loxoconcha propunctata* Hornibrook, 1952. VD, COFLS209. Gr.=60.
- Fig. 4. — *Cytherella hemipuncta* Swanson, 1969. VG, COFLS224. Gr.=75.
- Fig. 5. — *Phlyctenophora zealandica* Brady, 1880. VD, COFLS225. Gr.=50.
- Fig. 6. — *Hermanites lactea packaurangia* (Hornibrook, 1952). VG, COFLS226. Gr.=45.
- Fig. 7. — *Loxoconcha australis* Brady, 1880. VD, COFLS227. Gr.=75.
- Fig. 8. — "*Henryhowella*" cf. *probesioides* (Hornibrook, 1952). VD, COFLS228. Gr.=75.
- Fig. 9. — *Quadracythere* cf. *longazea* Hornibrook, 1952. VG, COFLS229. Gr.=60.
- Fig. 10. — *Hemicythere tarakoensis* Hornibrook, 1952. VG, COFLS230. Gr.=70.
- Fig. 11. — *Bradleya* cf. *aoteaoroa* Briggs, 1972. VG, COFLS231. Gr.=80.
- Fig. 12. — *Quasibradleya ? aff. cuneazea* (Hornibrook, 1952). VG, COFLS232. Gr.=65.
- Fig. 13. — *Vitjasiella duplicispina* Ayress, 1993. VG, COFLS233. Gr.=60.
- Fig. 14. — *Cytherelloidea auricula* (Chapman, 1914). VG, COFLS234. Gr.=55.
- Fig. 15. — "*Actinocythereis*" *zeacristata* (Hornibrook, 1952). VG, COFLS235. Gr.=60.
- Fig. 16. — ? *Bythocythere* cf. sp. 1 Whatley & Downey, 1983. VD, COFLS236. Gr.=80.
- Fig. 17. — *Callistocythere* sp. VG, COFLS203. Gr.=85.
- Fig. 18. — "*Henryhowella*" *rugibrevis* (Hornibrook, 1952). VG, COFLS237. Gr.=60.

(+) Tous les spécimens figurés sont déposés dans la Collection d'Ostracodes de la Faculté Libre des Sciences (COFLS) ou dans la collection de l'Université d'Auckland (AU). Les abréviations utilisées sont: VD, vue latérale de la valve droite; VG, vue latérale de la valve gauche. All the figured specimens are deposited in the Collection of Ostracods of the Faculty of Sciences of Lille (COFLS) or in the Auckland University Collection (AU). Abbreviations are: VD, external lateral view of a right valve; VG, external lateral view of a left valve.





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 Pennsylvanie</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 Verneuilli</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 élasmobranches 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'Ancenis</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 gènèse 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
« 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
« Géologie et aménagement régional » (T. CIX, fasc. 2).....	T.T.C. 250,00 F
« Le Nord et son environnement géologique. » (T. 2, 2 ^{me} série, fasc. 1).....	175,00 F

PUBLICATIONS (*)

Publication N° 1. — J. CHOROWICZ, <i>Etude géologique des Dinarides le long de la transversale Split-Karlovac (Yougoslavie)</i>	130,00 F
Publication N° 2. — J. CHARVET, <i>Essai sur un orogène alpin : Géologie des Dinarides au niveau de la transversale de Saravejo (Yougoslavie)</i>	150,00 F
Publication N° 3. — J. ANGELIER, <i>Néotectonique de l'arc égéen</i>	140,00 F
Publication N° 4. — J.J. FLEURY, <i>Les zones de Gavrovo-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 Héliénides externes en Péloponnèse méridional</i>	185,00 F
Publication N° 7. — P. DEWEVER, <i>Radiolaires du Trias et du Lias de la Thétyss</i>	180,00 F
Publication N° 8. — J. FERRIERE, <i>Paléogéographie et tectoniques superposées dans les Hellénides internes : les massifs de l'Othrys et du Pélion (Grèce continentale)</i>	185,00 F
Publication N° 9. — H. MAILLOT, <i>Les Paléoenvironnements de l'Atlantique sud : Apport de la géochimie sédimentaire</i>	130,00 F
Publication N° 10. — Cl. BROUSMICHE, <i>Les Fougères sphéroptériennes du Bassin Houllier 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, analyses diffractométriques et détermination</i>	T.T.C. 90,00 F
Publication N° 13. — J.L. MANSY, <i>Géologie de la Chaîne d'Ormineca 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
Publication N° 17. — F. DELAY, <i>Etude et cartographie géologiques du Massif pyrénéen de l'Agly ; traitement informatique des microanalyses chimiques</i>	T.T.C. (les 3 fasc.) 360,00 F
Fascicule 1, <i>Le Massif nord-pyrénéen de l'Agly (Pyr. Or.). Evolution tectono-métamorphique</i>	T.T.C. 150,00 F
Fascicule 2, <i>Etude d'un système de traitement informatique des microanalyses chimiques</i>	T.T.C. 110,00 F
Fascicule 3, <i>Carte géologique en couleurs au 1/25000 du Massif nord-pyrénéen de l'Agly (Pyr. Or.)</i>	T.T.C. 150,00 F
Publication N° 18. — A. KHATIR, <i>Structuration et déformation progressive au front de l'allochtone ardennais (Nord de la France)</i>	T.T.C. 150,00 F
Publication N° 19. — C. LAMOUROUX, <i>Les mylonites des Pyrénées. Classification. Mode de formation. Evolution</i>	150,00 F
Publication N° 20. — G. MAVRIKAS, <i>Evolution Crétacé-Eocène d'une plate-forme carbonatée des Héliénides externes. La plate-forme des Ori Valtou (Massif du Gavrovo), Zone de Gavrovo-Tripolitza (Grèce continentale)</i>	150,00 F
Publication N° 21. — P. BRACQ, <i>Effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apport de l'analyse morphostructurale</i>	150,00 F
Publication N° 22. — N. FAGEL, <i>Flux argileux du Néogène au Quaternaire dans l'Océan Indien Nord, mise en évidence et interprétation</i>	150,00 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.

IRIS - LILLIAD Université Lille 1

SOMMAIRE

Tome 4 (2^{me} série), Fascicule 3

parution 1996

	pages
Pierre BRACQ, Jean-Pierre COLBEAUX et Norbert CRAMPON. — Apports de l'analyse morphostructurale à la connaissance de la répartition des systèmes karstiques en pays crayeux : application à la délimitation de zones productives dans le Gatinais (SE du Bassin de Paris, France).....	83
Thierry BONNET, Jean-Pierre COLBEAUX et Pierre BRACQ . — Analyse multicritères d'une région du Nord de la France (Bapaume). Importance du contexte morphostructural sur le débit des captages d'eau potable obtenu dans l'aquifère crayeux	91
Abderkabir MAQSOU, Pierre BRACQ, Norbert CRAMPON et Jean-Pierre COLBEAUX. — La craie du bassin Artois-Picardie peut elle être karstifiée?	99
Bruno MILHAU. — Les ostracodes de l'île de Waiheke (Miocène Inférieur, Nouvelle Zélande).....	111

© 1996 *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'auteurs.

Imprimé en France (Printed in France)