

SOCIÉTÉ
GÉOLOGIQUE
DU
NORD

ANNALES

Tome CIV

1984

1^{er} trimestre

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

Extraits des Statuts

Article 2.

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

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

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

Article 5.

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

Extraits du Règlement Intérieur

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

§ 13. — Seuls les membres ayant acquitté leurs cotisation et abonnement de l'année peuvent publier dans les Annales. L'ensemble des notes présentées au cours d'une même année, par un même auteur, ne peut dépasser le total de 10 pages, 1 planche simill 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 fascicules après décision du Conseil.

Avertissement

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

Tirages à part

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

Cotisations et Abonnements (à la date du 1^{er}-1-1983)

	QUALITE	COTISATION	ABONNEMENT aux Annales	TOTAL
FRANCE et BENELUX	Personnes physiques (2)	25,00 F	120,00 F	145,00 F
AUTRES PAYS	Personnes physiques	25,00 F	135,00 F	160,00 F

Abonnement des non-membres : FRANCE : 270,00 F H.T. — ETRANGER : 315,00 F

Pour tous renseignements et règlements, s'adresser à : Secrétariat S.G.N., Sciences de la Terre,
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex — Tél. 91.92.22 — C.C.P. Lille 5247

ANNALES DE LA SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

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

Tomes I à LXXIX (manquent I, II, V à IX, XVI, XXII, XXXIV à XXXVI, XXXIX à XLIII, XLV, XLVII à LVIII) 190,00 F H.T.
Tomes LXXX à XCV (manque XCI) 246,00 F H.T.
Tomes XCVI et suivants F H.T.

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

(2) Les étudiants qui en font la demande annuelle peuvent, par déduction, bénéficier d'un tarif préférentiel de 60,00 F.

SOCIÉTÉ
GÉOLOGIQUE
DU
NORD

ANNALES

Tome CIV

1984

1^{er} trimestre

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 1984 —

<i>Président</i>	M. V. PRUDHOMME
<i>Premier Vice-Président</i>	M. E. MÉRIAUX
<i>Vice-Présidents</i>	M. H. CHAMLEY M. I. GODFRIAUX
<i>Conseillers</i>	M. J. LEPLAT M. F. THIÉBAULT M ^{me} D. BRICE M. J. CHARVET M. C. DELATTRE M. A. BLIECK
<i>Secrétaire</i>	M. J.M. DÉGARDIN
<i>Secrétaire-Adjoint</i>	M. C. BECK
<i>Directeur de la Publication</i> .	M ^{me} Paule CORSIN
<i>Trésorier</i>	M. l'Abbé TIEGHEM
<i>Archiviste-Bibliothécaire</i>	M. J.L. MANSY

COMITE DE LECTURE

— 1984 —

M^{me} Paule CORSIN, Directeur de la publication
M. J.M. CHARLET
M. Ch. DELATTRE
M. P. CELET
M. I. GODFRIAUX

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

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

Secrétariat : Société Géologique du Nord
Sciences de la Terre, B.P. 36, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
Tél. (20) 91.92.22 (postes 2140 et 2132) — C.C.P. Lille 52-47 Y

Compte rendu de l'activité de la Société

ASSEMBLEE GENERALE DU 4 JANVIER 1984

Présidence de M. J. CHARVET, Président

Cette Assemblée Générale est consacrée au renouvellement du Conseil d'Administration de la Société.

Les résultats du vote sont les suivants :

Président : M. V. Prudhomme, 23 voix.

Premier Vice-Président : M. E. Mériaux, 24 voix.

Seconds Vice-Présidents : MM. H. Chamley, 21 voix ; I. Godfriaux, 20 voix ; A. Blieck, 3 voix.

Conseillers : MM. J. Charvet : 20 voix ; C. Delattre : 19 voix ; A. Blieck : 16 voix ; F. Meilliez : 12 voix.

Secrétaire-adjoint : MM. C. Beck : 22 voix ; F. Meilliez : 1 voix.

Sont donc élus : MM. V. Prudhomme, Président, à l'unanimité ; E. Mériaux, Premier Vice-Président, à l'unanimité ; H. Chamley et I. Godfriaux, seconds Vice-Présidents ; J. Charvet, C. Delattre et A. Blieck, Conseillers ; C. Beck, Secrétaire-adjoint.

Le Conseil d'Administration de la Société pour 1984 se compose donc comme suit :

Président : M. V. PRUDHOMME.

Premier Vice-Président : M. E. MÉRIAUX.

Vice-Présidents : MM. H. CHAMLEY, I. GODFRIAUX.

Conseillers : MM. J. LEPLAT, F. THIÉBAULT, M^{lle} D. BRICE, MM. J. CHARVET, C. DELATTRE, A. BLIECK.

Secrétaire : M. J.M. DÉGARDIN.

Secrétaire-Adjoint : M. C. BECK.

Trésorier : M. l'Abbé TIEGHEM.

Directeur de la Publication : M^{me} Paule CORSIN.

Bibliothécaire : M. J.L. MANSY.

SEANCE ORDINAIRE DU 4 JANVIER 1984

Présidence de M. J. CHARVET, Président

M. J. CHARVET, Président, fait procéder à l'élection de nouveaux membres :

- M. P. DOREMUS, étudiant au Laboratoire de Géologie Stratigraphique, U.E.R. des Sciences de la Terre de Lille I, présenté par MM. J.M. Charlet et J.M. Dégardin.
- M. P. de HEDOUVILLE, étudiant au Laboratoire de Géologie Stratigraphique, U.E.R. des Sciences de la Terre de Lille I, présenté par MM. M. Waterlot et J.M. Dégardin.
- M. J.L. BERT, étudiant au Laboratoire de Géologie Régionale, U.E.R. des Sciences de la Terre de Lille I, présenté par M. M. Waterlot et M^{me} P. Corsin.
- M. B. BROUDOUX, étudiant au Laboratoire de Géologie Structurale, U.E.R. des Sciences de la Terre de Lille I, présenté par MM. J.F. Raoult et B. Clément.
- M. F. GUILLOT, étudiant au Laboratoire de Géologie Structurale, U.E.R. des Sciences de la Terre de Lille I, présenté par MM. J.F. Raoult et J.M. Dégardin.
- M. S. REGNAULT, Assistant au Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences de Fès (Maroc), présenté par M^{lles} D. Brice et J. Drot.

M. CHARVET donne ensuite la parole à M. F. MEILLIEZ, qui présente une conférence sur le thème :

Problèmes de résistance appliquée à la Géomécanique des massifs rocheux.

Communication orale

- T. HOLTZAPFFEL. — Smectites authigènes et glauconitisation dans les argiles du Gault albo-aptien du Boulonnais.

Communication écrite

- C. DOREMUS et J.P. HENRY. — Caractérisation des craies du Nord de la France par porosimétrie au mercure.

SEANCE ORDINAIRE DU 1^{er} FEVRIER 1984

Présidence de M. J. CHARVET, Président sortant

puis de M. V. PRUDHOMME, Président pour 1984-1985

Avant de céder la place à Monsieur PRUDHOMME, Président pour 1984-1985, M. J. CHARVET s'adresse à l'Assemblée en ces termes :

Mesdames, Messieurs, Chers Amis,

Au moment où j'arrive au terme du mandat que vous m'aviez confié, il m'appartient, selon la tradition, de dresser un rapide bilan des activités et de l'évolution de notre société au cours des deux dernières années.

Notre effectif s'est enrichi de 35 nouveaux membres mais nous avons eu à déplorer trois décès : ceux de MM. WATERLOT, PETIT et CORSIN, et le regret d'enregistrer quelques démissions, parfois surprenantes.

Du côté des ouvrages scientifiques que nous éditons, la série des Publications s'est augmentée de 5 nouveaux numéros ; nous attendons avec impatience la parution du n° 11. Est intervenue également la sortie du Mémoire n° XVI sur les tonsteins.

L'animation scientifique des séances et l'alimentation de nos Annales, voilà le point sur lequel j'avais promis de porter mon effort. De ce côté, les résultats sont encourageants mais méritent d'être regardés avec lucidité. En 1982, nous avons publié dans les Annales 29 communications, ce qui est honorable ; toutefois, plus d'une dizaine de ces notes relèvent en fait de la Séance spécialisée sur la Géologie et l'Energie organisée par mon prédécesseur au titre de 1981. En 1983, l'activité a été soutenue puisque 17 communications ont été présentées, compte non tenu de la réunion spécialisée de juin. Les séances les mieux remplies ont été bien entendu celles dévolues à un thème. J'en profite pour remercier chaleureusement les animateurs des séries d'exposés réservés respectivement à la Géologie du Nord, en novembre 1982 et à celle du Briançonnais, en décembre dernier.

Nos débats ont en outre été nourris par 6 conférences portant sur le Japon septentrional, la cordillère sud-caraiïbe du Venezuela, la géologie dynamique du secteur Philippines - Taiwan, la biostratigraphie du Dévonien du Nord de la France, la structure du Japon sud-ouest, les gisements d'or et d'argent de l'Anti-Atlas. Un tel éclectisme est réjouissant a priori car signe de vitalité ; mais il ne faut pas se dissimuler que certains de ces exposés étaient bienvenus pour compléter des séances dont le menu s'annonçait étriqué. Au total, la courbe semble ascendante et j'en suis très heureux ; néanmoins, je crois devoir signaler à mon successeur M. Victor PRUDHOMME et à son Premier Vice-Président M. Emile MERIAUX, la nécessité de rester vigilant dans ce domaine fragile. Mais je voudrais être très clair sur cet aspect des choses : l'alimentation scientifique de nos réunions ne doit pas être considérée comme dépendant avant tout de la bonne volonté du Président et du Conseil. Chacun doit se sentir concerné ; la production scientifique de notre Société, dont c'est la raison d'être, est le reflet du dynamisme global de ses membres. Il y a tout intérêt à entretenir le brassage d'idées le plus large possible, à susciter une émulation profitable à tous. Je le répète, la qualité du contenu de nos Annales est forcément liée, en partie, à la quantité des notes soumises pour publication.

Une caractéristique un peu particulière de nos activités pendant ces deux ans écoulés a été la tenue de réunions à une distance inhabituelle de notre siège lillois. En effet, profitant ou prenant prétexte, comme on voudra, de mon implantation orléanaise, je vous ai invités à visiter, lors des réunions extraordinaires, une première fois la région d'Etampes-Nemours, une seconde fois la Touraine. Surtout, la séance spécialisée *Tectonique cassante en distension et coulissement*, de juin 1983, s'est tenue à Orléans et fut étalée sur deux jours. Je remercie encore le Conseil d'Administration d'avoir donné son agrément à cette innovation.

Avec 40 communications présentées, plus de 120 participants régulièrement inscrits, chacun s'accorde à reconnaître le succès, quantitatif et qualitatif, de cette manifestation qui a projeté un éclairage promotionnel sur notre communauté. Que tous ceux qui ont contribué à sa réussite trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude. Le fascicule correspondant, riche de vingt-six notes, constitue un beau volume et ceci grâce à des aides nécessaires pour ne pas nuire à l'équilibre financier de notre Société. Sur ce terrain des finances, la situation est par ailleurs saine comme nous le confirmera tout à l'heure notre trésorier M. l'Abbé TIEGHEM, que je remercie pour son action permanente dans l'intérêt du bien commun.

En recevant, il y a deux ans, la présidence de la main de mon prédécesseur, José LEPLAT, je me souviens avoir dit accepter, en dépit de mon éloignement, parce que je savais pouvoir compter sur le dévouement efficace de M^{me} Paule CORSIN, déléguée aux Publications, et M. J.M. DEGARDIN, secrétaire. Ce n'était pas, chacun en a conscience, un pari bien hasardeux. Malgré tout, il m'est particulièrement agréable, aujourd'hui, de constater l'entière réalisation de cette prophétie. Je tiens à remercier tout particulièrement ces deux personnes pour leur aide constante, jamais ménagée.

Convaincu de la richesse liée à la diversité, M. Victor PRUDHOMME, je suis particulièrement heureux de remettre entre vos mains le destin de la Société Géologique du Nord, dont le bilan de santé paraît satisfaisant. Professeur dans un lycée lillois, responsable de l'A.P.B.G. régionale, vous êtes bien armé pour conforter ce bilan en développant notamment les activités et productions à finalité pédagogique, destinées entre autres à l'Enseignement secondaire : c'est un aspect auquel je n'ai pu personnellement m'attacher mais qui me paraît important. Vos fonctions vous qualifient tout naturellement pour expliquer, au Conseil qui vous assistera, ce que les Enseignants attendent d'une Société Géologique implantée dans le Nord. C'est donc en toute confiance que je vous transmets le flambeau. En vous souhaitant bonne chance et bon courage pour cette mission, en vous remerciant, ainsi que tout l'auditoire, pour votre attention, je vous invite à prendre la présidence à la fois de la Société et de la séance d'aujourd'hui.

Il cède ensuite la présidence à Monsieur PRUDHOMME qui prononce l'allocution suivante :

C'est un grand honneur que d'être président de la Société Géologique du Nord, un honneur dont, à titre personnel et en toute modestie, je ne me sens pas complètement digne. C'est que je ne suis ni un professionnel de la géologie, ni un utilisateur, ni un enseignant de haut niveau. Je ne fais pas partie de cette élite qui, à des échelons divers fait avancer la Science par apport direct à la découverte. Mon action, auprès de mes collègues du secondaire, auprès de mes jeunes élèves (combien de vocations sont nées, chez nos géologues en culotte courte, de la visite d'une carrière) s'apparente plus à une activité de promotion qu'à une participation à l'édification de la Science. Action très modeste d'un amateur « éclairé » qui tire fierté d'être depuis presque trente ans membre de la Société Géologique du Nord.

Ainsi, au travers de ma personne, sont honorés, d'une part les fidèles de la S.G.N. même ceux qui, isolés à des kilomètres de Lille ou dévorés par des horaires contraignants, ne peuvent se manifester beaucoup, mais attendent les numéros de nos Annales et les reçoivent comme une manne et, d'autre part, les enseignants du secondaire, dont beaucoup d'ailleurs sont membres fidèles de la Société Géologique du Nord.

Mais aussi quelle responsabilité ! Notre société s'enorgueillit d'être l'une des plus anciennes parmi les sociétés de géologie. Seulement, depuis l'époque des fondateurs, les temps ont bien changé : modification de l'environnement scientifique, croissance quasi exponentielle de la connaissance, foisonnement des organismes de recherche, stratégies impliquant de puissants moyens et surtout, partout, contraintes financières.

Que pouvait devenir la Société dans toute cette effervescence ? Le risque était de seulement survivre, de s'enfoncer dans un statut de vieille dame honorable écoutée avec une considération polie.

Cela n'a pas été le cas. La société est toujours bien vivante et même rayonnante. Nous devons ce résultat à tous les présidents qui m'ont précédé et qui se sont attachés à appliquer des solutions réalistes s'intégrant dans quelques idées-forces que je rappelle ici :

— *Nécessité du cadre régional.*

L'héritage est sans doute considérable. Déjà, du temps de Gosselet, à la lecture des premiers numéros des Annales, on a l'impression qu'il avait déjà tout vu, tout décrit, tout pensé. Et tous ceux qui l'ont suivi, ont, eux aussi, contribué à construire une géologie du Nord si exhaustive qu'on a pu un moment la croire complète et comme achevée ! Mais quelle science est jamais achevée ? Le travail ne manque pas : revoir les données anciennes, intégrer celles fournies par les techniques actuelles, repenser les explications, construire des modèles et élaborer des éclairages locaux suggérés par les hypothèses récentes. Sans compter qu'il reste encore beaucoup à trouver. Pour l'amateur sur le terrain, c'est à chaque pas que se posent des questions. Et s'il s'y trouve avec des élèves, vous pouvez être certain que le galopin de 4^{me} n'a pas son pareil pour en poser et de celles qui vous embarrassent le plus !

Souvent, la réponse sera trouvée dans la documentation, presque toujours dans cette somme irremplaçable que sont nos Annales. Mais que de questions encore sans réponse !

— *Ne pas pour autant tomber dans un étroit régionalisme.*

La Géologie se veut et se doit planétaire. Il me paraît très heureux de trouver dans un même numéro par exemple un article concernant le Famennien de l'ouest du Canada voisinant avec un article sur l'Holocène de la Pointe aux Oies. Un équilibre est à maintenir.

— *La qualité des séances*, combinant la présentation de travaux inédits, les informations régionales et l'appel à des conférenciers pour des thèmes plus synthétiques ou questions d'actualité.

— *L'ouverture vers les enseignants du secondaire.*

Ma candidature et mon élection à la Présidence sont un signe tangible de l'importance attachée par la Société Géologique du Nord à cette ouverture. Celle-ci n'est d'ailleurs pas une nouveauté. Quand, il y a une quinzaine d'années, les enseignants du secondaire se sont trouvés, de par les programmes, confrontés à une difficile approche de la géologie locale jusqu'alors négligée, il a suffi de prendre contact avec l'Université et avec la Société Géologique du Nord pour qu'une aide nous parvienne, qui, à l'initiative de M. BONTE, prit la forme d'un fascicule « Géologie du Nord », lequel alors nous a rendu d'incalculables services.

La société a également édité, à l'usage des enseignants des séries de diapositives très utiles et très demandées.

Les enseignants ont encore bien des besoins que nous essaierons de définir et si possible de satisfaire.

Il leur faut aussi, sous peine de se fossiliser eux-mêmes dans un message pétrifié, être en contact avec la science en marche, celle qui se cherche, qui se définit, se reprend, se corrige, s'élargit. Où trouver ce genre d'ouverture mieux qu'à la Société Géologique du Nord, où se rencontrent théoriciens et praticiens, universitaires et ingénieurs, stratigraphes et tectoniciens, morphologues et géochimistes, spécialistes et « amateurs ».

Lourde responsabilité ! J'abuserai inévitablement de l'inlassable dévouement de M^{me} CORSIN, de Monsieur DEGARDIN, de M. l'Abbé TIEGHEM et de tous les membres du Conseil. Je compte aussi beaucoup sur l'aide de Monsieur le Premier Vice-Président MERIAUX. J'aurai besoin de toutes les compétences et de toutes les bonnes volontés.

M. l'Abbé TIEGHEM, trésorier, présente ensuite à l'Assemblée l'exercice financier 1983 : les comptes de la Société sont acceptés à l'unanimité des présents.

Puis M. V. PRUDHOMME fait procéder à l'élection d'un nouveau membre :

M. C. LEFEVRE, Professeur au Laboratoire de Pétrologie, U.E.R. des Sciences de la Terre de l'Université de Lille I, présenté par MM. P. Celet et B. Clément.

Communications orales

C. DOREMUS et J.P. HENRY. — Caractérisation des craies du Nord de la France par porosimétrie au mercure.

P. ARNOULT et J. MANIA. — Mécanisme du transport des pollutions de la nappe de la craie de l'Artois et du Cambrésis (Nord de la France). (*Communication présentée par J. Fiévet.*)

RECTIFICATIFS

**Sur une dalle à empreintes de pas lacertoïdes
du Houiller du Bassin du Nord-Pas-de-Calais**

par P. DOLLÉ, A.F. DE LAPPARENT et C. MONTENAT

Ann. Soc. Géol. Nord, t. XC, p. 63-68

Au lieu de lire p. 67, fin du paragraphe III : " L'échantillon-type est conservé au Musée de la Houille, rue Malus, Lille ", lire " L'échantillon-type est conservé dans la collection particulière de Monsieur P. Dollé ".

* * *

**Mise en évidence, par des faunes de Brachiopodes,
de l'extension des formations dévoniennes dans la boutonnière d'Immouzer du Kandar
(Sud de Fès, Maroc)**

par D. BRICE, A. CHARRIÈRE, J. DROT et S. REGNAULT

Ann. Soc. Géol. Nord, t. CIII, p. 445-458

Rectificatif :

A la p. 457, Pl. XII, fig. 18, remplacer Ak. 57 par Zl. 3.

Addendum :

Le matériel décrit est déposé dans les collections de Paléontologie de l'Institut de Géologie de Rennes, Université de Rennes I, Avenue du Général Leclerc, 35042 Rennes Cedex.

LISTE DES MEMBRES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

ÉTABLIE AU 1^{ER} DÉCEMBRE 1984

ACCARIE Hugues, Centre de Géologie Générale Minière, 35, rue Saint-Honoré, à 77305 Fontainebleau Cedex.
AMEDRO Francis, 24, rue de Nottingham, à 62100 Calais.
ANGELIER Jacques, Université P. et M. Curie, Laboratoire de Géodynamique, 4, Place Jussieu,
à 75230 Paris Cedex 05.
ANSART-LELIEVRE, Tour de l'Europe, 215, 3, Boulevard de l'Europe, à 68100 Mulhouse.

BABIN Claude, Laboratoire de Géologie, Avenue Le Gorgeu, à 29283 Brest Cedex.
BACCHUS, Professeur, Impasse de l'Observatoire, 59000 Lille.
BADILLET Guy, 8, rue de l'Alboni, à 75016 Paris.
BALOGÉ Alain, Université de Madagascar, EESP, B.P. 4031, à Antananarivo (Répub. Démocr. de Madagascar).
* † BARROIS Charles, Membre de l'Institut.
* BARROIS C.E., à Fontaine-les-Grès 10170 Méry-sur-Seine.
* † BARROIS Jean.
BARTA Laszlo, Laboratoire des Sciences de la Terre, B.P. 347, à 51862 Reims Cedex.
BATTIAU-QUENEY Yvonne, Assistante, 8, Allée des Tuileries, 566, Avenue de la République, à 59800 Lille.
BAUDET James, La Moulière, à Gouttières 63390 Saint-Gervais-d'Auvergne.
BAZOT Gérard, Ingénieur-Géologue, Le Mas Dellon, Vallabrègues, à 30300 Beaucaire.
BEAUCHAMP Jacques, Dépt. Sciences de la Terre, Université Cadi Iyad, Faculté des Sciences, Boulevard de Safi,
à Marrakech (Maroc).
BEAUMONT Claude, Directeur général du B.R.G.M., 3, avenue Sainte-Marie, à 92370 Chaville.
BEAUVAIS Louise, Chargée de Recherche au C.N.R.S., Laboratoire de Paléontologie, 4, Place Jussieu,
à 75230 Paris Cedex 05.
BECK Christian, U.E.R. Sciences de la Terre, Université de Lille I, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
BECKARY Sophie, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Paléobotanique, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
BECQ-GIRAUDON Jean-François, 10, rue du Grenier-à-Sel, à 45000 Orléans.
BELHIS Amor, 7, Cité Sainte-Barbe, à 62110 Hénin-Beaumont.
BELTAN Laurence, Institut de Paléontologie, Muséum d'Histoire Naturelle, 8, rue de Buffon, à 75005 Paris.
BERQUER-GABOREAU Claudine, Laboratoire de Géologie régionale, U.E.R. Sciences de la Terre,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
BERT Jean-Louis, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie Stratigraphique,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
BEUGNIES Alphonse, Professeur à l'Université Polytechnique de Mons, 7, rue de Houdain, à 7000 Mons (Belgique).
BEUN Noël, Université de Picardie, Département de Géologie, 33, rue Saint-Leu, à 80039 Amiens Cedex.
BIAYS Pierre, Professeur, 5, Allée des Résédas, à 59700 Marcq-en-Barœul.
BIGEY Françoise, Université P. et M. Curie, Laboratoire de Paléontologie des Invertébrés, 4, Place Jussieu,
à 75230 Paris Cedex 05.

Les noms des Membres à perpétuité sont précédés d'un astérisque, ceux des Membres à vie de deux astérisques.

- BLAISE Bertrand, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Géologie Structurale, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- BLANCHET René, Université de Bretagne Occidentale, Avenue le Gorgeu, à 29283 Brest Cedex.
- BLIECK Alain, Université de Lille I, Sciences de la Terre. B.P. 36, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- BLONDEAU Alphonse, Université P. et M. Curie, Laboratoire de Géologie des Bassins sédimentaires, 4, Place Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
- BOGDANSKI M., Immeuble des Instituteurs, Avenue du Golf, à 14800 Deauville.
- BONTE Antoine, Professeur Emérite, 11/2, rue Calmette. Bois de Gruson, à 59152 Chérens.
- BOREL A., Directeur de l'Institut Supérieur d'Agriculture. rue du Pont, à Auchy-les-Orchies. 59310 Orchies.
- BOUQUILLON Anne, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Sédimentologie, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- BOUROZ Alexis, Ing. Civ. Mines, Chairman int. Subc. Carb. Strat. (Int. Un. Geol. Sc.), ancien Ing. en Chef Serv. Géol. Gis. Charb. France, 106, avenue Félix Faure, à 75015 Paris.
- BOUROUILH Robert, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Avenue Philippon, à 64000 Pau.
- BOUYX Emmanuel, Institut de Géodynamique, Université de Bordeaux III. Bât. de Géologie. Avenue des Facultés, à 33405 Talence Cedex.
- BRICE Denise, Faculté libre des Sciences, 13, rue de Toul, à 59046 Lille Cedex.
- BROUDOUX Bruno, Université de Lille I, Sciences de la Terre. Laboratoire de Géologie Structurale. à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- BROUSMICHE Claudine, Maître-Assistante, Laboratoire de Paléobotanique, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- BRUNEEL Jean-Claude, à Crochte 59380 Bergues.
- BUREAU Dominique, Université P. et M. Curie, Géotectonique, Laboratoire de Géodynamique, 4, Place Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
- CADET Jean-Paul, Professeur, Faculté des Sciences, à 45100 Orléans Cedex 02.
- CAPELLE Hervé, Université de Lille I, Sciences de la Terre. Pétrologie, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- CARLIER Eric, Université des Sciences et Techniques, U.E.R. des Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie Appliquée, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- CELET Paul, Professeur de Géologie, Laboratoire de Géologie dynamique, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- CHALARD Jacques, Ingénieur Géologue, 65, rue d'Arleux. à 59500 Douai.
- CHAMLEY Hervé, U.E.R. Sciences de la Terre, Lab. Sédimentologie et Géochimie. à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- CHARLET Jean-Marie, Ingénieur à la Faculté Polytechnique de Mons, 7, rue de Houdain, à 7000 Mons (Belgique).
- CHARVET Jacques, Professeur, Faculté des Sciences, à 45100 Orléans Cedex 02.
- CHAUVE Pierre, Faculté des Sciences, Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée. Place Leclerc, à 25030 Besançon Cedex.
- CHOPINEAUX Bernard, Assistant, 194, rue de Fontenay. à 94300 Vincennes.
- CHOROWICZ Jean, Université de Paris VI, Département de Géologie Structurale, 4, Place Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
- CHOTIN Pierre, Université P. et M. Curie, Dép. de Géotectonique, Géologie structurale, 4, Place Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
- CLÉMENT Bernard, Maître-Assistant, Sciences de la terre, Laboratoire de Géologie Stratigraphique, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- COEN Michel, Institut de Géologie, Laboratoire de Paléontologie, 3. Place Louis Pasteur, à B-1348 Louvain-la-Neuve.
- COLBEAUX Jean-Pierre, Assistant, Université de Lille I, U.E.R. Sciences de la Terre, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- CONIL Raphaël, Professeur, Institut de Géologie, 3, place Louis Pasteur, à B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique).
- CONRAD Jacqueline, Faculté Sciences St-Jérôme, Laboratoire de Sédimentologie, à 13397 Marseille Cedex 13.
- COQUEL Robert. Maître-Assistant, Université de Lille I, Lab. de Paléobotanique, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- CORSIN Paule, Professeur. Univ. de Lille I, Laboratoire de Géologie régionale, 10 A, rue du Capitaine Michel, à 59000 Lille.
- COULON Hervé, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Pétrologie, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- COULON Michel, Faculté des Sciences de Reims, Laboratoire de Géologie, à 51062 Reims Cedex.
- COUREL Louis, Université de Dijon, Institut des Sciences de la Terre, 6, Boulevard Gabriel. à 21100 Dijon.
- COURTY Georges. Maître-Assistant, Université de Lille I. Laboratoire de Géologie Stratigraphique, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

COUSIN Michel. Géologie structurale, Université de Paris VI, 4, Place Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
CRAMPON Norbert, Département de Génie Civil, I.U.T., Béthune, rue du Moulin à Tabac, à 62408 Béthune.
CRASQUIN Sylvie, Laboratoire de Paléobotanique, U.E.R. Sciences de la Terre, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
CROUZEL Fernand, Professeur, 31, rue de la Fonderie, à 31068 Toulouse Cedex.
CUIR Pierre, 7, Avenue du 18 Juin, à 59790 Ronchin.

DALINVAL André, Ingénieur Géologue, résidence Saint-Rémy, rue de Loffre, à Lewarde 59287 Guesnain.
DANLOUX Joël-Marc, 6, Place L. Comerre, à 59132 Trélon.
DATCHARRY Bernard, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie Structurale,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
DAVID Louis, Professeur à la Faculté des Sciences de Lyon, Départ. Sciences de la Terre, 15-43, Boulevard du
11 Novembre, à 69621 Villeurbanne Cedex.
DEBAERE Jean-Pierre, 67, Avenue Becquart, à 59130 Lambersart.
DEBRABANT Christian, H.B.N.P.C., 139, rue J.B. Corot. à Cuincy 59500 Douai.
DEBRABANT Pierre, Professeur, Université de Lille I, Laboratoire de Géochimie Sédimentaire,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
DEBUYER Michel, rue des Moulins, à Autingues, 62610 Ardres.
DECOMMER Henri, 51, Boulevard Rose, à 78300 Poissy.
DECONNINCK Jean-François, Laboratoire de Sédimentologie-Géochimie, U.E.R. Sciences de la Terre,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
DECROUZÉ Danielle, Muséum d'Histoire Naturelle, C.P. 284, à CH-1211 Genève 6 (Suisse).
DÉGARDIN Jean-Marie, Assistant, Université de Lille I, Laboratoire de Géologie Stratigraphique,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
DEGRUGILLIERS Patrick, 50, route d'Oppy, à Neuvireuil 62580 Vimy.
** DEHAY Charles, Professeur à la Faculté de Médecine et de Pharmacie, Cité Hospitalière, à 59000 Lille.
DE HEDOUVILLE Pierre, 5, rue de la Fontaine, à 52190 Eclaron.
DELANCE Jean-Henri, Institut des Sciences de la Terre, 6, Boulevard Gabriel, à 21100 Dijon.
DELATTRE Charles, Professeur, Université de Lille I, Laboratoire de Géologie régionale,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
DELBART Robert, à Saint-Josse-sur-Mer 62170 Montreuil.
DELEAU Paul, Professeur Honoraire, Quartier Saint-Pons, à 06650 Le Rouret.
DELHAYE René, Pharmacien, 1, rue du Général Barbot, à 62000 Arras.
DELMER André, Ingénieur au Corps des Mines et au Service Géologique de Belgique, 16, Avenue Colonel Daumerie,
à Bruxelles (Belgique).
DE LUCA Patrick, Université Mohammed V, Cité Ibn Sina, immeuble 8, apt. 20, à Rabat-Agdal (Maroc).
DERCOURT Jean, Professeur de Géologie, Université de Paris VI, Tour 14-15, 4, Place Jussieu,
à 75230 Paris Cedex 05.
DEROO Gérard, Chemin du Clos Saint-Martin, à 78620 L'Etang-la-Ville.
DERYCKE Fernand, Service Géologique de Belgique, 13, rue Jenner, à B. 1040 Bruxelles (Belgique).
DESCHAMPS Guy, 3, rue du Commissaire Martin, à 59700 Marcq-en-Barœul.
DESCHAMPS Marc, Professeur, Lycée Turgot à Paris, 71, rue de Neuilly, à 93250 Villemonble.
DESPEYROUX Yves, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Sédimentologie, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
DESPREZ Noël, Ingénieur B.R.G.M., B.P. 6009, à 45018 Orléans Cedex.
DESTOMBES Jacques, Ingénieur Géologue, Directeur des Mines et de la Géologie, à Rabat (Maroc).
DE WEVER Patrick, Université P. et M. Curie, Géologie, Tour 14-15, 4, Place Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
DEZOBRY Claude, Professeur, 30, Résidence Van Gogh, à Cuincy, 59500 Douai.
DEZWARTE Jean, 98, rue L. Guislain, à Nomain 59310 Orchies.
DHONDT Annie, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Département de Paléontologie, 29, rue Vautier,
à 1040 Bruxelles (Belgique).
DIDON Jean, Maître-Assistant, Université de Lille I, U.E.R. Sciences de la Terre, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
DIEUDONNE André, B.R.G.M./S.G.R., à Lezennes 59260 Hellemmes-Lille.
** DOLLÉ Pierre, Ingénieur-Géologue, 48, rue des Belles-Feuilles, à 75116 Paris.

- DÔREMUS Christian, Bureau d'Etude Géoméca, 5, rue du Faubourg d'Arras, à 59000 Lille.
DOREMUS Pascal, Université de Lille I, Sciences de la Terre. Laboratoire de Géologie Stratigraphique.
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
DOUBINGER Jeanne, Laboratoire de Géologie et de Paléontologie. Université de Strasbourg. 1. rue Blessig.
à 67074 Strasbourg Cedex.
DROT Jeanine, Institut de Paléontologie, 8. rue de Buffon. à 75005 Paris.
DUBREUIL Marcel, Laboratoire de Géologie historique, 38, Boulevard Michelet, à 44037 Nantes Cedex.
DUDRESNAY Renaud, Ingénieur-Géologue, Service Géologique du Maroc. 5. rue Ahmed Arabi (ex rue Kuhn).
à Rabat-Agdal (Maroc).
DUMON Paul. Ingénieur des Mines, Géologue. 3, rue de la Petite Triperie, à 7000 Mons (Belgique).
DUPUIS Christian, Faculté Polytechnique de Mons, 7, rue de Houdain, à 7000 Mons (Belgique).
DURAND DELGA Michel, Université Paul Sabatier, Géologie méditerranéenne, 38, rue des 36 Ponts,
à 31078 Toulouse Cedex.
DURMISHI Cerciz. E.N.S.G.. B.P. 452, 94, Avenue De Lattre de Tassigny. à 54000 Nancy.
- ELMI Serge, 32, rue Michel Dupeuble, à 69100 Villeurbanne.
- FABRE Jean-Pierre, Ingénieur-Géologue, C.R.Z.A., Université des Sciences, Place Bataillon, à 34060 Montpellier Cedex.
FERGUSSON Josette, Professeur, 167, Avenue Pottier, à 59130 Lambersart.
FERRANDON Alain, Ingénieur-Géologue, 48. Cours Camon. à 64000 Pau.
FERRIÈRE Jacky, Maître-Assistant, Université de Lille I, Laboratoire de Géologie Dynamique.
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
FEYS R.. Ingénieur-Géologue au B.R.G.M., 53, Boulevard Saint-Michel, à 75005 Paris.
FIEVET Joël, 6, rue des Prairies. à Courchelettes 59500 Douai.
FIRTION F., Maître de Conférences, Université de Sarrebrück, Saurenhaus Kleiner Bartenberg Eichendorfstrasse.
à Sarrebrück, D-6601 Scheidt (Allemagne).
FLEURY Jean-Jacques, Maître-Assistant, Université de Lille I, Laboratoire de Géologie stratigraphique,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
FOUCHER Jean-Claude, Laboratoire de Géologie, Moulin de la Housse. B.P. 347, à 51062 Reims Cedex.
FOULON Janine, Université de Lille I, Sciences de la Terre, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
FOURCADE Eric, Département de Géotectonique, Laboratoire de Géologie structurale, Tour 26. 1^{er} étage. 4. Place
Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
FOURRIER Hervé. Pédologue à l'Institut Supérieur d'Agriculture, 7/17, rue Henri Dunant, à 59000 Lille.
- GANTOIS Joseph. Ingénieur à la S.A.D.E., 4, rue Gambetta, à 59350 Saint-André.
GARCIA-ALCALDE Jenaro-Luis, Université d'Oviedo, Paléontologie. à Oviedo (Espagne).
GAVERIAUX, 14, les Hitsons, rue Jules Guesde, à 62800 Liévin.
GEHU, Professeur à l'U.E.R. de Pharmacie, Hameau de Hendries. à 59270 Bailleul.
GEUKENS Fernand, Professeur. 132, Chaussée de Tervuren, Hévelé. à Louvain-la-Neuve (Belgique).
GEYS Jooris F., Jan Moorkensstraat, 24, à B. 2600 Berchem (Belgique).
GILBIN Bernard. Professeur au Lycée de Tourcoing. 27. rue du Peintre Grau, à 59200 Tourcoing.
GILLOT Pierre-Yves, C.E.A.; Institut de Recherche Fondamentale. U.G.-C.F.R, à 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.
GODEFROID Jacques, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique. Département de Paléontologie, 29, rue
Vautier, à 1040 Bruxelles (Belgique).
GODFRIAUX Ivan, Professeur. Faculté Polytechnique de Mons. 7. rue de Houdain, à 7000 Mons (Belgique).
* † GOSSELET Jules, Membre de l'Institut. Fondateur de la Société Géologique du Nord.
GOUILLARD Maurice, 50, Avenue des Lilas. à 59800 Lille.
GOUJET Daniel, Muséum National d'Histoire Naturelle. Institut de Paléontologie, 8, rue de Buffon. à 75005 Paris.
GUILLOT François, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie Structurale.
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

- HACQUAERT Armand, Professeur, Université de Gand, Krygslaan 271. à B-9000 Gent (Belgique).
HAMOUMI Naïma. Poste principale de Meknès, à Meknès (Maroc).
HARIELLE Christian, 46 bis, rue du 4 Septembre, à 24290 Montignac.
HAUDOUR Jean, Ingénieur-Géologue, à Yronde 63270 Vic-le-Comte.
HEITZ Jean-Marie, 17, Avenue Suzanne, à 59110 La Madeleine.
HENRY Jean-Louis, Université de Rennes, Institut de Géologie, Laboratoire de Paléontologie et Stratigraphie, B.P. 25 A, à 35042 Rennes Cedex.
HERVOUET Yves, Université Mohammed V. B.P. 1014, à Rabat (Maroc).
HIVET, 272, rue des Trois-Pierres, à 59150 Wattrelos.
HOLTZAPFFEL Thierry, Laboratoire de Sédimentologie, U.E.R. Sciences de la Terre, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
HOLVOET Robert, Directeur de l'Institut Saint-Jude, 10, rue Denis-Papin, à 59280 Armentières.
HOUDART Gérard, Ingénieur C.U.D.L., 25, rue Racine, à 59650 Villeneuve d'Ascq.
HOULGATE Eric, 55, rue du Château, à 29200 Brest.
HOYEZ Bernard, Université du Havre, U.E.R. Sciences et Techniques, Place R. Schuman, à 76600 Le Havre.
HUPE Pierre, Professeur, 9, Square Charles Laurent, à 75015 Paris.
- IMBERT, Thierry, Université de Paris XI, Géochimie des Roches Sédimentaires, à 91405 Orsay.
IZART Alain, 8, rue Saint-Armand, à 62930 Wimereux.
- JACOBSHAGEN, Freie Universität Berlin, Institut für Geologie, Attensteinstrasse, 34a, FB 24, W.E. 1, à 1000 Berlin 33 (R.F.A.).
JOLIVET Laurent, Université P. et M. Curie, Laboratoire de Géologie, 4, Place Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
JOLY Bernard, Professeur, 8, rue de Garambault, à 45190 Beaugency.
JOURDAIN-SOYEZ Colette, 5-7, rue Virginie Ghesquière, à 59000 Lille.
- KHATIR Amar, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie Structurale, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- LAINÉ Maryse, 17, rue Kilmaine, à 59300 Valenciennes.
LALLEMANT Siegfried, Université P. et M. Curie, Laboratoire de Géologie, 4, Place Jussieu, à 75230 Paris Cedex 05.
LAPIERRE Henriette, Université de Nancy, Pétrologie, B.P. 236, à 54150 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.
LARHZAL Mohamed, D.G.O.N.C.F., rue Abderrahmal I Vhasiki, à Rabat-Agdal (Maroc).
LASNON Michel, Ingénieur à la S.A.D.E., 4, rue Gambetta, à 59350 Saint-André.
LAUMONDAIS Alain, 4, Allée Claude Monet, à 78160 Marly-le-Roi.
LAURENTIAUX Daniel, Professeur de Géologie à la Faculté des Sciences, B.P. 347, 51062 Reims Cedex.
LAURIN Bernard, Institut des Sciences de la Terre, 6, Boulevard Gabriel, à 21000 Dijon.
LAVEINE Jean-Pierre, Professeur, Laboratoire de Paléobotanique, Université de Lille I, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
LEBRET Patrick, 265, rue de Paris, Ecole Jules Ferry, à 76800 Saint-Etienne-du-Rouvray.
LEFEVRE Christian, Professeur, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Laboratoire de Pétrologie, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
LEGRAND-BLAIN Marie, Tauzia, Route de Bayonne, à 33170 Gradignan.
LEGRAND Fortuné, Géologue, 36, rue Jules Guesde, à 62430 Sallaumines.
LEKKAS Spiridon, Lab. de Géologie et Paléontologie, Université d'Athènes, 46, rue Akadimias, à 143 Athènes (Grèce).
LE MENN Jean, Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Paléontologie et Stratigraphie du Paléozoïque, 6, Avenue Le Gorgeu, à 29283 Brest Cedex.
LEMOIGNE Yves, Professeur, Laboratoire de Biologie Végétale, 43, Bd du 11 Novembre, à 69621 Villeurbanne.
LENTACKER F., Professeur de Géographie, U.E.R. de Géographie, Bât. C, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

- LEPLAT José, 18, Pavé du Stemberg, à 59126 Linselles.
- LEQUIN Marc, Chemin de la Pradasse, Aygues-Vives, à 31450 Montgiscard.
- LETHIERS Francis, Maître-Assistant, Université de Lille I. U.E.R. Sciences de la Terre, Lab. de Géologie appliquée.
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- LOBOZIAK Stanislas, Chargé de recherche au C.N.R.S., U.E.R. Sciences de la Terre, Laboratoire de Paléontologie.
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- LUCAS Gabriel, Professeur de Géologie, 3, rue Paillet, à 75005 Paris.
- LYBERIS Nicolas, Université P. et M. Curie, Département de Géologie Dynamique. 4. Place Jussieu,
à 75230 Paris Cedex 05.
- LYS Maurice, Laboratoire de Géologie historique, Bât. 504. à 92405 Orsay.
-
- MAGNÉ Jean, 16, rue des Pivoines, à 31400 Toulouse.
- MAGNIEZ Jean-Michel, 51, Avenue Belle Isle, à Saint-Léonard 62360 Pont-de-Briques.
- MAGNIEZ-JANNIN F., Université de Dijon, Sciences de la Terre, 6, Boulevard Gabriel, à 21100 Dijon.
- MAILLOT Henri, Laboratoire de Géochimie sédimentaire, Sciences de la Terre, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- MANIA Jacky, Université de Besançon, Laboratoire de Géologie, 1. Place Leclerc, à 25000 Besançon.
- MANIVIT Hélène, Laboratoire de Palynologie et de Matière organique, B.R.G.M., B.P. 6009, à 45018 Orléans Cedex.
- MANSY Jean-Louis, Laboratoire de Géologie structurale, U.E.R. Sciences de la Terre,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- MARIETTE Henri, Docteur-Vétérinaire, 42, rue de Montreuil. à 62830 Samer.
- MARIN Philippe, Géologue. 9, rue E. Detaille, à 75017 Paris.
- MARION, Professeur, 7, rue du Pré-Brûlé, à 59730 Solesmes.
- ** MARLIÈRE René. Membre de l'Académie Royale de Belgique, Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons,
2, rue Louis Piéard, à 7020 Hyon (Belgique).
- MASCLE Georges, Université de Grenoble, 1, rue M. Gignoux, à 38031 Grenoble Cedex.
- MASSA Dominique, 6, rue J.J. Rousseau, à 92150 Suresnes.
- MASSON François-Xavier, 84, avenue Masson-Beau, à 59190 Hazebrouck.
- MASTRANGELO Annie, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie stratigraphique,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- MEILLIEZ Francis, E.U.D.I.L., Institut de Géotechnique, Université des Sciences et Techniques de Lille,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- MELOU Michel, Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Paléontologie et Stratigraphie du Paléozoïque.
6, Avenue Le Gorgeu, à 29283 Brest Cedex.
- MENNESSIER Guy, Professeur de Géologie, U.E.R. Sciences exactes et naturelles, 33, rue Saint-Leu,
à 80039 Amiens Cedex.
- MERCIER Eric, Laboratoire de Géologie structurale, U.E.R. Sciences de la Terre, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- MERCIER Monique, La Garderie, à Sarzay 36230 Neuvy-St-Sépulchre.
- MÉRIAUX Emile, Professeur, I.U.T., Génie Civil, Avenue des Facultés, Le Bailly, à 80044 Amiens Cedex.
- MERLE Louis, Chef de Travaux, Electricité de France. 20, rue Giroud, à 59500 Douai.
- MEURISSE Marc, 3, rue du Plâtre, à 75004 Paris.
- MIART Emile. Professeur, 35, rue J.J. Rousseau, à 08100 Charleville-Mézières.
- MICONNET Pascal, Laboratoire de Géologie dynamique. U.E.R. Sciences de la Terre,
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- MILHAU Bruno, Laboratoire de Paléobotanique, U.E.R. Sciences de la Terre, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
- MIROUSE Raymond, Professeur, Université des Sciences, Lab. de Géologie, 38, rue des 36 Ponts, à 31400 Toulouse.
- MISTIAEN Bruno, Chemin de Halage, 59930 La Chapelle d'Armentières.
- MONCHY Eugène, 20, rue Raymond Sulliger, à 62680 Méricourt-sous-Lens.
- MONCIARDINI Christian, Service Micropaléontologie, B.R.G.M., B.P. 6009, à 45018 Orléans Cedex.
- MONTENAT Christian, Chercheur C.N.R.S., I.G.A.L., 21, rue d'Assas, à 75270 Paris Cedex 06.
- MOREL Jean-Luc, Université de Paris-Sud, Labo. Géologie Historique. à 91405 Orsay Cedex.
- MORTIER Rudiger, Heide 75 A, à B-3171 Westmeerbeek (Belgique).
- MOUTERDE R., Professeur, Faculté Catholique de Lyon, 25, rue du Plat, à 69002 Lyon.
- MUNAUT André, Professeur à l'Université de Louvain, 4, Place Croix du Sud, à 1348 Louvain-la-Neuve (Belgique).

- OLEJNICZAK Jacques-Daniel, 34, rue Eiffel, à 62300 Lens.
OVTRACHT André, Ministère de l'Energie et des Mines, Div. Recherches Minières, à Rabat (Maroc).
- PAREYN Claude, Professeur de Géologie, Faculté des Sciences, Esplanade de la Paix, à 14000 Caen.
PARIS Florentin, Université de Rennes, Institut de Géologie, B.P. 25 A, à 35031 Rennes Cedex.
PELHATE Annick, Professeur, Université du Maine, Géologie, route de Laval, à 72017 Le Mans Cedex.
PERRET Marie-France, Université P. Sabatier, Lab. de Géologie, Pétrologie, 38, rue des 36 Ponts, à 31400 Toulouse.
PEYBERNES Bernard, Université P. Sabatier, 39, Allée Jules Guesde, à 31062 Toulouse Cedex.
PIERRARD Pierre, 74, Avenue de Fléron, à 1190 Bruxelles (Belgique).
PIETTE Armelle, 36, rue Gosselet à 59000 Lille.
PILLET Jean, Professeur, Le Prieuré de Beaumont, Voie Romaine, à 49000 Bouchemaine-Pruniers.
PLATEVOET Richard, 68, rue de la Fontaine, à Lauwin-Planque 59500 Douai.
PLUSQUELLEC Yves, Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Paléontologie et Stratigraphie du Paléozoïque, 6. Avenue Le Gorgeu, à 29283 Brest Cedex.
POMEROL Charles, Professeur de Géologie, Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Paris, 36, Vieux Chemin de Paris, à 95270 Luzarches.
PONCET Jacques, Université de Caen, Esplanade de la Paix, à 14000 Caen.
PROUVOST Jean, Professeur de Minéralogie, Université de Lille I, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
PRUDHOMME Victor, 7, Allée de la Cerisaie, 59700 Marcq-en-Barœul.
- RACHEBŒUF Patrick, Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire de Paléontologie et Stratigraphie du Paléozoïque, 6, Avenue Le Gorgeu, à 29283 Brest Cedex.
RAMPNOUX Jean-Paul, Professeur, Lab. de Géologie, Centre Universitaire de Savoie, BP 143, à 73011 Chambéry.
RAOULT Jean-François, Université des Sciences et Techniques de Lille, U.E.R. des Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie Structurale, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
RAUSCHER Raymond, Université Louis Pasteur, Institut de Géologie, 1, rue Blessig, à 67084 Strasbourg Cedex.
REGNAULT Serge, Faculté des Sciences, Sciences de la Terre, B.P. 1796, Atlas, à Fès (Maroc).
REWERSKY Jacek, U.E.R. Géographie, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
RICHARD Philippe, B.R.G.M./S.G.N., Avenue Latécoère, à 31000 Toulouse.
RICOUR Jean, B.R.G.M., Domaine de Luminy, Route Léon-Lachamp, à 13009 Marseille.
RINGARD H., Ingénieur, Usines Courrières, 128. route Nationale, à 62420 Billy-Montigny.
RIQUIER Bernard, Professeur de Sciences Naturelles au Lycée Pasteur, 19. Avenue du Maréchal Leclerc, à 59110 La Madeleine.
ROBARDET Michel, Université de Rennes, Institut de Géologie, Avenue du Général Leclerc, B.P. 25 A, à 35032 Rennes Cedex.
ROBASZYNSKI Francis, Département de Géologie, Faculté Polytechnique de Mons, 7, rue de Houdain, à 7000 Mons (Belgique).
ROBERT Pierre, Université de Picardie, Département de Géologie, 33, rue Saint-Leu, à 80039 Amiens Cedex.
ROBILLARD Dominique, Esso-Rep, 213, Cours Victor-Hugo, à 33321 Bègles.
ROHART Jean-Claude, Professeur, 60, rue du Sud, à 59140 Dunkerque.
RUEDA GAXIOLA James, Monte Alban, 272 B, à Mexico 12 D.F. (Mexique).
- SARROT REYNAULT DE CRESSENEUIL, Faculté de Grenoble, 11, Bd Gambetta, à 38000 Grenoble.
SARTENAER P., Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, 29, rue Vautier, à Bruxelles (Belgique).
SEVRIN Geneviève, Université de Lille I, Sciences de la Terre, Laboratoire de Géologie Structurale, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
SOMMÉ Jean, 119 B, rue de la Rianderie, à 59700 Marcq-en-Barœul.
SOULIEZ Gaston, B.R.G.M./S.G.N., B.P. 6009, à 45060 Orléans Cedex.
SOUQUET Pierre, 5, rue Mondran, à 31400 Toulouse.
STYZA André, Chemin de Thélus, à 62580 Vimy.
SUTER Gabriel, Les Clausonnes, à 06410 Biot.

- TAMAIN Guy, Les Millepertuis A1, Avenue de Berry, à 91940 Les Ulis.
TEETEN Michel, 1/14, rue J. Giraudoux, La Croisette, à 59000 Lille.
TELLIEZ Hervé, 13, La Verte Rue, à 59830 Cysoing.
TERMIER Geneviève, 131, Avenue de Versailles, à 75016 Paris.
TERMIER Henri, 131, Avenue de Versailles, à 75016 Paris.
THIÉBAULT François, Université de Lille I, Laboratoire de Géologie structurale, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
TIEGHEM Gilbert, 18, rue Lamartine, à 59280 Armentières.
TSOFLIAS Pendelis, 11, rue Melsovon Paleo-Faliro, à Athènes (Grèce).
- VACHARD Daniel, Institut Catholique de Paris, I.G.A.L., 21, rue d'Assas, à 75270 Paris Cedex 06.
VADET Alain, Vétérinaire, Conservateur adjoint du Musée de Boulogne. 47, Bd Survin, à 62200 Boulogne-sur-Mer.
VAN DEN MERSCH Marie-Claude, 2, rue de l'Espérance, à 59800 Lille.
VAN DE WALLE-LANDRU Simone, 100, rue Jean Jaurès, à 62800 Liévin.
VERRIEZ Jean-Jacques, Assistant, Laboratoire de Géologie Dynamique, à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
VETTER Pierre, 4, Allée F. Mistral, à 31400 Toulouse.
VIESLET Jean-Louis, Institut de Géologie, Laboratoire de Paléontologie, 3. Place Louis Pasteur,
à B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgique).
VINCHON Charlotte, B.R.G.M., Laboratoire Minéralogie-Geochemie-Analyses. B.P. 6009, à 45018 Orléans Cedex.
VOISIN Léon, Professeur, 8, rue A. Neyrac, 08100 Charleville-Mézières.
VRIELYNCK Bruno, Université Claude Bernard, Dépt Sciences de la Terre, Bât. 402, 27-43, Boulevard du
11 Novembre, à 69622 Villeurbanne Cedex.
- WAGNER Robert H., E.N. Carbonifera del Sur, Peñarroya-Pueblonuevo, à Cordoba (Espagne).
WAROQUIEZ, Ingénieur à la Société des Eaux de Cambrai, 11, rue du Château d'Eau, à 59400 Cambrai.
WATERLOT Michel, Professeur, Laboratoire de Géologie Stratigraphique, Université de Lille I.
à 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.
WILLEFERT Solange, 11, Cité de la Garde, à Rabat-Agdal (Maroc).



Considérations sur la sédimentation du Quaternaire terminal en Mer d'Alboran (Méditerranée occidentale)

New data on the late Quaternary sedimentation in Alboran Sea (Western Mediterranean)

par Patrice COSSEMENT (*), Hervé CHAMLEY (*) et Léo PASTOURET † (**)
(Planche I)

Résumé. — L'étude comparée de trois groupes de constituants sédimentaires, minéraux argileux, foraminifères planctoniques et ptéropodes, dans sept carottes prélevées en Mer d'Alboran, a permis de participer à la reconstitution des paléoclimats continentaux et marins, du Pléistocène supérieur à l'Actuel. Des divergences constatées entre les courbes issues de l'étude des argiles et des foraminifères ont été expliquées notamment par une activité néotectonique de l'arc de Gibraltar. Les foraminifères planctoniques paraissent mieux témoigner des climats anciens que les autres indicateurs.

Les minéraux argileux présentent un assemblage propre à la Mer d'Alboran : smectite d'origine en partie atlantique, illite bien représentée partout, kaolinite et chlorite subordonnées avec dominance de la seconde en période plus fraîche, interstratifiés irréguliers. La sépiolite, minéral réputé fragile, est héritée des roches espagnoles et africaines principalement paléogènes, et transportée jusqu'en milieu marin profond. Aucun indice sédimentologique n'existe en faveur d'une inversion du système de courants au niveau du détroit de Gibraltar, lors du passage du Pléistocène à l'Holocène.

Abstract. — *The comparative study of three groups of sedimentary components, clay minerals, planktonic foraminifera and pteropods, in seven cores collected in the Alboran Sea (Westernmost Mediterranean), permitted to participate to the reconstruction of continental and marine paleoclimates from late Pleistocene to present time. Some discrepancies appear between the curves obtained from clays minerals and from planktonic foraminifera. They have been chiefly interpreted by the neotectonic activity of the Gibraltar Arc. The planktonic foraminifera appear the best indicators of past climates in the area studied.*

The clays minerals of the Alboran Sea include the following species : smectite partly of an Atlantic origin ; illite widely dispersed and abundant ; kaolinite and chlorite, the latter increasing during the cold stages ; random mixed-layers issued from moderate continental alterations. Sepiolite, usually considered as a very fragile species, is inherited from spanish and african outcrops, chiefly of Paleogene age, and eroded and transported into the deep marine environment. There is no sedimentological arguments in favor of the hypothesis of a reversal current system in the strait of Gibraltar at the Pleistocene-Holocene boundary.

I. — INTRODUCTION

La Mer d'Alboran, située à l'extrémité ouest de la Méditerranée, entre le détroit de Gibraltar et le domaine Algéro-Baléares, comprend deux bassins séparés par un relief volcanique (fig. 1). Du fait de sa localisation à

la jonction de domaines géodynamiques et paléocéanographiques très distincts, cette région a fait l'objet de nombreuses études géologiques. Sur le plan sédimentologique, les principales recherches ont porté sur le régime courantologique, ses variations au cours du temps et ses conséquences sur le dépôt, ainsi que

(*) Sédimentologie et Géochimie, E.R.A. 764 C.N.R.S., Université de Lille I, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

(**) 3 GM, Centre Océanologique de Bretagne, B.P. 337, 29273 Brest.

Note présentée le 2 Novembre 1983 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 7 Novembre 1984.

individus $> 160 \mu\text{m}$), des ptéropodes (comptage de l'ensemble des individus présents) et des minéraux argileux et associés (diffraction des rayons X sur pâtes orientées de particules inférieures à $2 \mu\text{m}$, microscopie électronique à transmission) (Cossement, 1983). Les différentes espèces planctoniques et minérales sont principalement étudiées dans un but de reconstitution paléoclimatique, en se référant aux données obtenues précédemment en Méditerranée (Blanc-Vernet *et al.*, 1969; Chamley, 1971; Froget, 1974). On considère ici, à titre d'exemple, les résultats relatifs à une carotte; puis les conditions générales de la sédimentation récente en Mer d'Alboran sont discutées en utilisant l'ensemble des données obtenues.

carottes étudiées, principalement constituée de boues hémipélagiques grises à gris-vert, contenant environ 5 % de fraction sableuse ($> 63 \mu\text{m}$) et 25 % de calcaire. Les niveaux de sédimentation récente sont, comme dans la plus grande partie de la Mer d'Alboran (Vergnaud-Grazzini et Bartolini, 1970), peu nombreux et peu spectaculaires, mais relativement ubiquistes; il s'agit souvent du résultat de courants de densité et célérité faibles à moyennes. Dans la carotte 36 existe, à 110 cm de profondeur, un niveau de sédimentation bien marqué, constitué de petits quartz et coquilles noyées dans la boue (fig. 2 A, B).

II. — DONNEES ET INTERPRETATION DE LA CAROTTE 36

1) Pétrographie de la carotte 36.

Prélevée au fond du bassin Ouest d'Alboran, la carotte 36 (longueur 410 cm) est, comme les six autres

2) Les foraminifères planctoniques.

Ils sont variés et ont été rassemblés en trois groupes selon leur affinité vis-à-vis de la température des eaux dans les mers actuelles (fig. 2 C).

— Espèces "d'eaux chaudes" :

Globigerinoides ruber
Globigerinoides sacculifer
Globorotalia truncatulinoides
Globigerinella aequilateralis

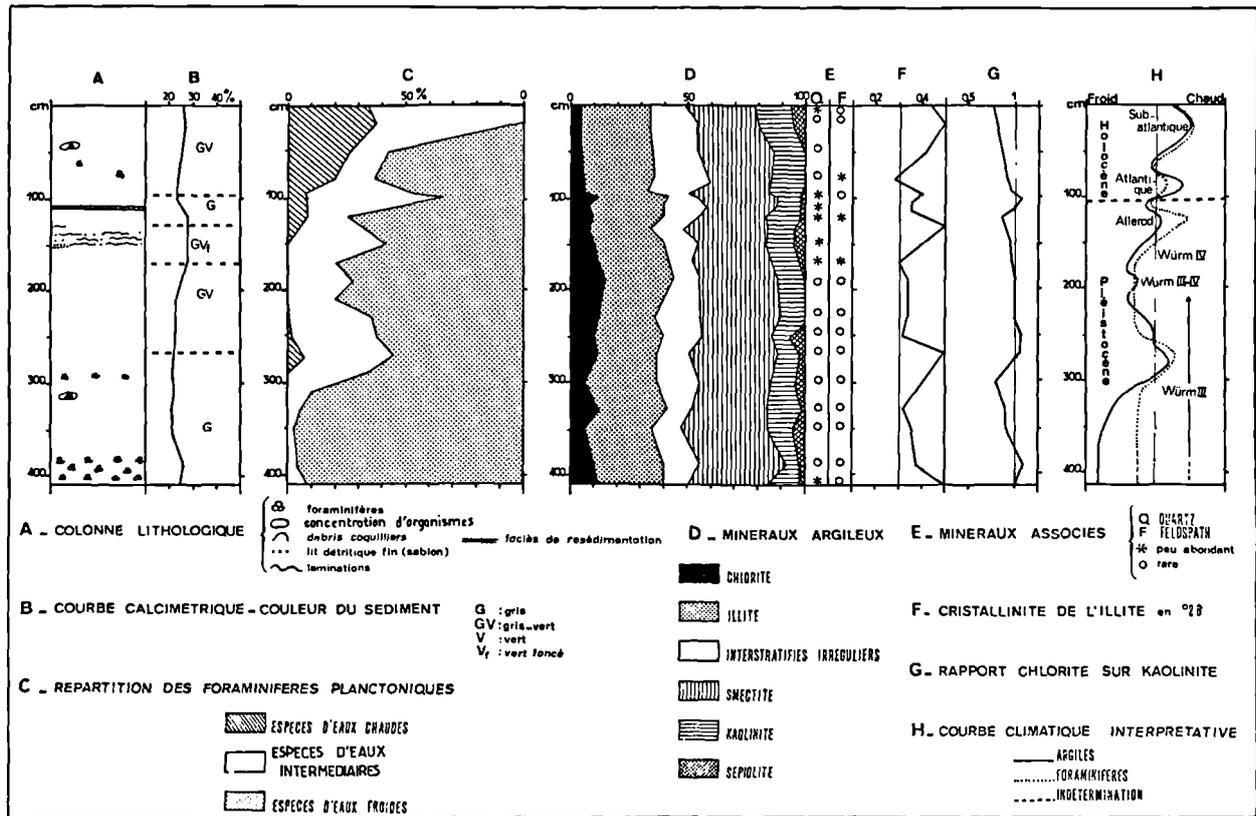


Fig. 2. — Résultats de la carotte 36 (Bassin occidental d'Alboran).

Fig. 2. — Core 36 (western basin). Results.

— Espèces intermédiaires :

Globorotalia inflata
Globigerina bulloides
Orbulina universa

— Espèces " d'eaux froides " :

Globigerina pachyderma
Globigerina quinqueloba
Globorotalia scitula

Une courbe paléoclimatique peut être déduite de la distribution en pourcentage de chaque groupe aux divers niveaux de la carotte (fig. 2 H, trait plein). De 410 à 290 cm de profondeur, le sédiment est très riche en individus de l'espèce d'eau froide *Globigerina pachyderma* (90 % des espèces présentes), associée à *Hyalinea balthica*, foraminifère benthique de hautes latitudes, ainsi qu'à des bâtonnets de pyrite. Les espèces d'eau chaude apparaissent à 290 cm, atteignent 10 % à 275 cm et sont accompagnées d'espèces intermédiaires de caractère plus tempéré (*Globorotalia inflata*, *Globigerina bulloides*). *Globigerina pachyderma* réaugmente à 251 cm, cependant que les espèces d'eau chaude disparaissent, mais que se maintiennent les espèces intermédiaires plus tolérantes au refroidissement (*Globorotalia inflata*). Enfin, à partir de 150 cm un réchauffement important se manifeste, avec la présence et l'augmentation de *Globigerinoides ruber* et *Globigerinella aequilateralis*. Le mètre supérieur de sédiment comprend les assemblages des dépôts actuels de la Mer d'Alboran, avec toutefois des indices de rafraîchissement temporaire à 70 cm.

3) Les minéraux argileux.

Ils comprennent :

1°) l'illite et la smectite dominantes.

2°) la chlorite, la kaolinite et les interstratifiés irréguliers (illite - smectite, chlorite - smectite surtout), subordonnés.

3°) la sépiolite fréquente, en petite quantité (moins de 10 %).

Les minéraux associés sont principalement le quartz et les feldspaths, rares à peu abondants (fig. 2 D et E). Ces minéraux sont essentiellement hérités des terres émergées, ainsi que le montrent l'absence d'évolution continue au long de la carotte, l'indépendance morphologique des espèces (observations sur micrographies), ainsi que l'ensemble des études antérieures effectuées en Méditerranée (Monaco, 1965 ; Chamley, 1971). Des variations d'intensité modeste sont observées au long de la carotte 36 dans l'abondance relative et l'état cristallin des minéraux argileux, étudiés en diffraction des rayons X. Une tentative de chiffrage de ces variations est effectuée, particulièrement à l'aide de la cristallinité de l'illite (largeur en 2θ du pic à 10 Å à mi-hauteur, essai glycolé), et de l'abondance relative de la chlorite par rapport à la kaolinite (rapports des hauteurs à 3,53/3,57 Å, essai naturel) (fig. 2 F et G).

Les résultats obtenus sont associés en vue de tenter d'établir une courbe paléoclimatique relative aux domaines continentaux alluvionnaires, l'illite étant *a priori* d'autant plus mal cristallisée (valeurs élevées de l'indice F) et la chlorite moins abondante (valeurs faibles de l'indice G) que l'hydrolyse est plus intense et le climat plus chaud-humide (cf. Blac-Vernet *et al.*, 1969 ; Chamley, 1971).

On constate que les cristallinités médiocres de l'illite et la diminution relative de la chlorite sont souvent en correspondance (valeurs en opposition), ce qui suggère un enregistrement de climat hydrolysant. Sur les micrographies on observe alors des particules de taille relativement petite et aux contours souvent diffus (Pl. I, fig. 1 et 2, exemple de la carotte 46), cependant que la couleur des vases est relativement claire (gris-vertâtre). La situation inverse s'observe pour les niveaux à illite bien cristallisée et chlorite relativement abondante, où les vases sont gris plus sombre et où les particules de taille relativement grande et aux contours nets sont présentes en plus grand nombre (Pl. I, fig. 3 et 4). Dans certains niveaux toutefois, la correspondance entre les deux critères retenus est peu satisfaisante et la signification climatique est alors douteuse. Une tentative de courbe paléoclimatique fondée sur la minéralogie des argiles et utilisant principalement les données sur la cristallinité de l'illite, est présentée (fig. 2 H, trait pointillé). On observe une bonne correspondance d'ensemble avec la courbe déduite de l'étude des foraminifères, ce qui conforte l'interprétation en termes de climat. Des différences d'intensité s'observent cependant : les effets des changements du climat paraissent souvent exprimés de façon plus intense par les argiles, à l'exception de la partie inférieure de la carotte où la tendance est inverse.

4) Les Ptéropodes.

Ils sont présents de manière épisodique dans la carotte 36, comme dans les autres sondages étudiés. Ils comprennent cinq espèces, dont la signification paléoclimatique repose sur la répartition biogéographique actuelle (Froget, 1974) : *Euclio pyramidata*, *Creseis virgula conica*, *Diacria trispinosa*, *Limacina inflata* sont considérés d'eau chaude, et *Limacina retroversa* d'eau froide. Bien que la rareté des individus n'autorise pas de comptage détaillé, la distribution des deux groupes de Ptéropodes s'accorde avec les courbes climatiques fournies par les foraminifères et les minéraux argileux : *Limacina retroversa* caractérise la période froide de la base de la carotte et chaque réchauffement est marqué par la présence épisodique d'*Euclio pyramidata* et parfois *Diacria trispinosa*.

5) Chronologie des épisodes climatiques.

L'attribution chronologique des épisodes successivement reconnus dans la carotte 36 est indirecte et

fondée, d'une part, sur la coupure majeure Pléistocène/Holocène, d'autre part, sur les courbes climatiques de référence obtenues à terre (Escalon de Fonton, 1967). Divers changements majeurs montrent que la limite Pléistocène/Holocène se situe vers 140 cm de profondeur; l'apparition et le développement des foraminifères d'eau chaude, la baisse par paliers des formes d'eau froide, la présence de ptéropodes méditerranéens, la diminution durable du rapport chlorite/kaolinite et la dégradation marquée de la cristallinité de l'illite, constituent autant d'indices de cette limite qui se trouve vers 12.000 ans B.P., et ont du reste déjà été constatés ailleurs en Méditerranée (Blanc-Vernet *et al.*, 1967; Müller *et al.*, 1974). Par extrapolation, en tenant compte de la vitesse de dépôt déduite de cette coupure majeure (env. 10,5 cm/1.000 ans) et de l'aspect des diverses parties de la courbe climatique, on propose la succession chronologique suivante :

- Würm III, de 410 à 215 cm : climat froid à oscillations modérées, dont la principale se situe à 280 cm.
- Interstade Würm III-IV, de 215 à 175 cm : climat tempéré frais, à courtes oscillations.
- Würm IV, de 175 à 140 cm, moins froid que le Würm III, suivi par le Tardi-Glaciaire marqué par l'apparition de ptéropodes méditerranéens (interstade Alleröd).
- Holocène, de 140 à 0 cm, marqué par une première période chaude, l'Atlantique, puis par un autre optimum climatique vers 2-3.000 ans B.P., le Sub-Atlantique.

III. — DISCUSSION

Divers aspects de la sédimentation du Quaternaire terminal en Mer d'Alboran peuvent être abordés, lorsque l'on prend en compte l'ensemble des données acquises sur les sept carottes étudiées.

1) Comparaison avec la Méditerranée nord-occidentale.

Les données de la carotte la plus orientale de la Mer d'Alboran (n° 46, pénétration 820 cm) sont mises en regard de celles obtenues par Blanc-Vernet *et al.* (1969) dans le bassin Algéro-Baléares sur la carotte 1 MO 67 (41° 52' N, 05° 52' E, pénétration 620 cm), en ce qui concerne les foraminifères planctoniques (fig. 3). On constate une bonne correspondance entre les deux courbes paléoclimatiques obtenues (intensité et amplitude des stades successifs), ce qui conforte l'interprétation chronologique proposée ci-dessus; si cette dernière est bien confirmée, la carotte 46 permet d'atteindre, pour la première fois en Mer d'Alboran semble-t-il, la période charnière entre les deux dernières glaciations européennes (Riss et Würm), c'est-à-dire l'interglaciaire tyrrhénien. La correspondance constatée confirme l'importance du facteur climatique dans la constitution des assemblages de foraminifères planctoniques, et montre la vaste extension géographique de la zone climatique

marine ouest-méditerranéenne. Deux différences secondaires s'observent toutefois :

1°) Le sommet de la carotte 1 MO 67 est plus riche en foraminifères d'eau chaude, ce qui s'accorde avec le gradient thermique croissant constaté d'Ouest en Est dans les eaux de surface lorsqu'on s'éloigne des influences atlantiques (Thunell, 1978) : la Mer d'Alboran apparaît ainsi marquée par une influence mixte, méditerranéenne et atlantique.

2°) L'intervalle sédimentaire attribué au Würm II présente une oscillation de type chaud dans 1 MO 67 (520 cm), non identifiée dans la carotte 46.

2) Expression des variations paléoclimatiques.

Les foraminifères planctoniques paraissent refléter les variations climatiques en Mer d'Alboran de la manière la plus sensible et la plus reproductible; les différentes carottes montrent en effet des courbes très comparables, et des corrélations peuvent être établies (Cossement, 1983). En revanche, les ptéropodes sont présents de manière trop épisodique pour être utilisés de manière quantitative; par ailleurs, on note leur absence ou leur rareté dans les niveaux holocènes, ce qui diffère de la situation habituelle en Méditerranée occidentale (Froget, 1974), et pourrait résulter des conditions hydrologiques propres à la Mer d'Alboran (eaux de surface d'origine atlantique, ou dissolution plus intense des tests aragonitiques en profondeur?). En ce qui concerne les minéraux argileux, leur sensibilité aux changements du climat paraît différer fortement selon la localisation des carottes (voir ci-après, § 4), mais ils traduisent généralement le réchauffement post-glaciaire avant les faunes planctoniques (augmentation précoce de la kaolinite dans toutes les carottes; dégradation précoce de la cristallinité de l'illite dans les carottes 33, 35, 36, 46) : cela peut résulter soit d'un enregistrement plus rapide du changement climatique par les altérations continentales que par les eaux marines (Blanc-Vernet *et al.*, 1975), soit d'une pluviosité accrue à la fin du Würm, contrariant le réchauffement des eaux méditerranéennes (Vergnaud-Grazzini et Bartoli, 1970). Notons que les périodes froides correspondent souvent à une augmentation des foraminifères benthiques, à la fois bathyaux (*Uvigerina mediterranea*, *Hyalinea balthica*, *Pyrgo*, Cibicidés, Buliminidés et Miliolidés divers) et littoraux (Elphydium) : cela suggère une intensification des remaniements sédimentaires depuis l'amont, fréquemment décrite lors des épisodes de stationnement bas du niveau de la mer (Rupke et Stanley, 1974). Par ailleurs, l'association fréquente de Cibicidés et Buliminidés avec des bâtonnets de pyrite, durant les stades froids, paraît résulter de conditions relativement plus réductrices au niveau du fond marin; à ce propos, Van der Zwaan (1980) a constaté l'augmentation de certains foraminifères benthiques (notamment Buliminidés), parallèle à la décroissance de l'oxygène des eaux, en Mer Tyrrhénienne.

mentation argileuse : si une telle influence existe, elle est nécessairement localisée et modérée. C'est l'illite qui tend à augmenter vers l'Est dans la radiale de carottes étudiées (fig. 4), ce qui résulte sans doute d'une contribution accrue à l'alluvionnement depuis les bordures méditerranéennes. Quant à la smectite, elle paraît témoigner, au moins partiellement, de l'influence atlantique sur la sédimentation en mer d'Alboran : d'une part, l'augmentation du minéral dans le bassin occidental s'accorde avec son abondance à l'Ouest de Gibraltar, où il est apporté notamment par le fleuve Guadalquivir (Mélières, 1974) ; d'autre part, on note que les deux carottes relativement déficitaires en smectite (n° 32 et 46) sont les seules situées en dehors du trajet des veines superficielles d'eau atlantique qui se dirigent vers l'Est (*in* Auffret *et al.*, 1974 ; Cossement, 1983).

4) Influences néotectoniques et climatiques.

Les courbes tirées de l'étude des minéraux argileux ne présentent fréquemment qu'une correspondance partielle avec celles obtenues à l'aide des foraminifères, et offrent souvent une précision bien moindre. On observe parfois une cristallinité de l'illite homogène en regard d'associations variables de foraminifères (ex. carottes 33, 110-200 cm ; 46, 150-600 cm), parfois des décalages ou des antagonismes entre données des argiles et des faunes (ex. carotte 32, 0-100 cm et 500-570 cm), parfois encore une correspondance inverse de celle déterminée par le climat entre les indices propres à l'illite et à la chlorite (ex. carottes 46, 600-650 cm ; 35, 70-130 cm et 170-210 cm). La fig. 5 montre, à titre d'exemple, le cas de la carotte 33 (déroit central d'Alboran). Ceci conduit à considérer les successions argileuses comme peu fiables pour la reconstitution des paléoclimats du Quaternaire supérieur en Mer

d'Alboran ; du reste, la comparaison des carottes 46 et 1 MO 67, aisée en ce qui concerne les foraminifères planctoniques (fig. 3), ne permet pas une interprétation claire en ce qui concerne les argiles.

L'explication du témoignage paléoclimatique souvent médiocre constaté pour les argiles détritiques ne paraît pas résider dans les brassages hydrodynamiques importants en Mer d'Alboran, car on ne voit pas bien pourquoi une telle action épargnerait les faunes planctoniques. Une cause plus vraisemblable relève de l'activité néotectonique dans l'arc de Gibraltar. Les minéraux argileux reflètent les facteurs du climat continental (température, humidité, drainage), dans la mesure où les sols et altérations peuvent se développer en équilibre avec ce climat. Si les sols sont érodés de

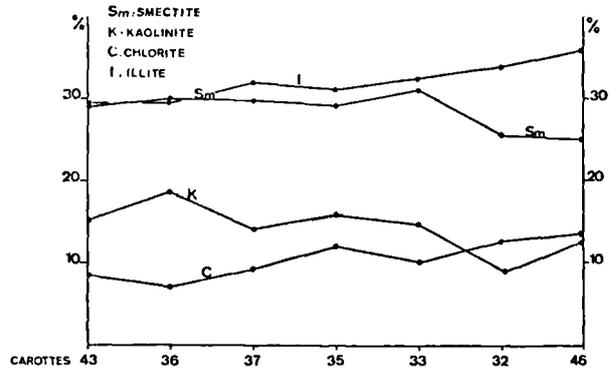


Fig. 4. — Distribution des principaux minéraux argileux en Mer d'Alboran durant l'Holocène (moyenne des valeurs).

Fig. 4. — Holocene distribution of main clay minerals in the Alboran Sea (average values).

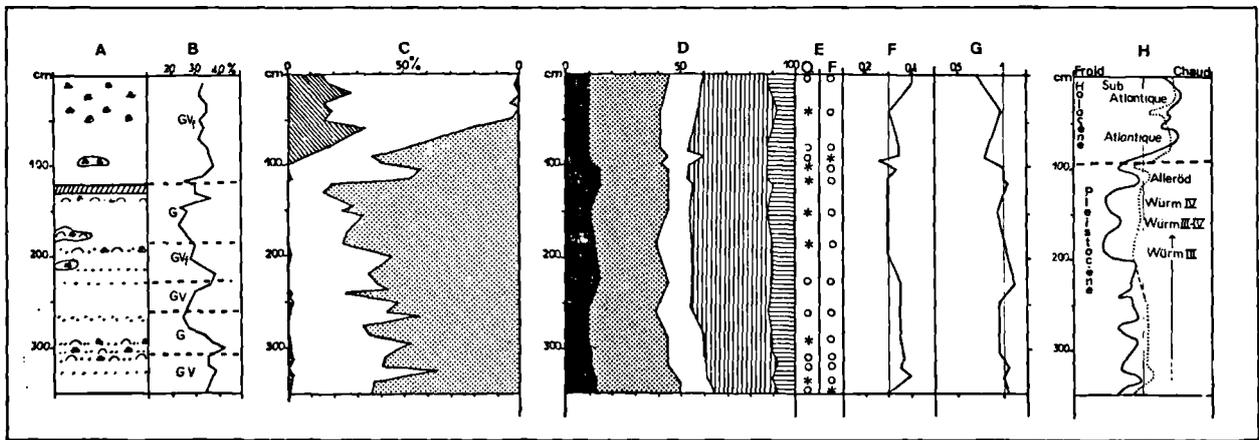


Fig. 5. — Résultats de la carotte 35 (Bassin occidental d'Alboran). (Légende : v. fig. 2).

Fig. 5. — Core 35 (western basin). Results.

manière chronique, par exemple par suite d'une activité néotectonique latente, les argiles apportées aux bassins, en provenance des formations de couverture, n'offrent qu'une image incomplète ou déformée du climat terrestre, les minéraux étant issus à la fois des roches mères et de leurs altérations. Or l'arc de Gibraltar a été le siège de soulèvements néotectoniques importants au cours du Quaternaire (Gigout *et al.*, 1974). Ainsi, depuis 90.000 ans, les lignes de rivage fossiles ont été déformées de manière importante (v. fig. 1, chiffres entre parenthèses). Un argument en faveur de cette explication réside dans le fait suivant : les deux carottes pour lesquelles le message paléoclimatique des argiles détritiques est le mieux exprimé sont celles qui sont situées vers le Sud de la Mer d'Alboran (n° 35 et 36), du côté marocain de l'Arc, où les déformations épeirogéniques ont été les plus modérées (Gigout *et al.*, 1974 ; v. fig. 1).

5) Origine de la sépiolite.

La présence de petites quantités de sépiolite dans les divers sondages de la Mer d'Alboran est inattendue, car ce minéral fibreux est réputé fragile et peu compatible avec un gisement en milieu marin ouvert, sous forte influence terrigène. Présente dans les boues hémipélagiques banales et en dehors de tout confinement chimique, parfaitement dispersée parmi les autres espèces argileuses, en fibres isolées ou en minces faisceaux brisés (Pl. I, fig. 2 et 4), la sépiolite est à l'évidence héritée des terres avoisinantes. On connaissait déjà sa présence, à l'état remanié, dans d'épaisses séries turbiditiques du Paléogène péri-africain (forages du Deep Sea Drilling Project), ou dans des sables littoraux arrachés par les pluies méditerranéennes aux cuestas tertiaires de la région d'Arzew (Algérie) (Froget et Chamley, 1977), mais c'est, semble-t-il, sa première description en milieu marin quaternaire profond et ouvert. Cela conduit à considérer la sépiolite comme un minéral beaucoup moins vulnérable au transport que ce qui est couramment admis, et à la mettre sur le même plan que la palygorskite dont on connaît maintenant la fréquence des gisements détritiques, notamment en Méditerranée (Chamley et Millot, 1975). Les sources de la sépiolite d'Alboran peuvent résider, soit en Afrique du Nord, soit en Espagne, où le minéral est connu dans les dépôts carbonatés et évaporitiques du Tertiaire inférieur et se trouve aussi probablement dans les sédiments du Permo-Trias (Millot, 1964). Un apport par transport éolien, s'ajoutant aux apports temporaires de crues, est probable dans ce domaine aux réseaux hydrographiques peu actifs, comme c'est le cas dans d'autres secteurs de Méditerranée (Tomadin *et al.*, 1983).

6) Problème d'une inversion des courants à la limite Pléistocène - Holocène.

Un débat, engagé dès 1959 par Kullenberg, s'est développé depuis une quinzaine d'années, sur l'éven-

tualité d'une inversion du sens des échanges Atlantique-Méditerranée entre la fin de la dernière période glaciaire et le post-Glaciaire. Huang *et al.* (1972), Huang et Stanley (1974) pensent que, durant le Würm, l'excès de précipitations dans le domaine méditerranéen aurait provoqué une abondance d'eaux peu denses en surface, un gradient des salinités inverse de l'actuel, avec entrée des eaux atlantiques plus denses en profondeur. D'autres auteurs, se fondant sur l'étude des fractions sédimentaires sableuses et sur des calculs de bilan hydrologique, pensent qu'il n'y a pas eu inversion du sens des courants, et qu'au Würm terminal la situation était la même qu'actuellement, avec sortie en profondeur des eaux méditerranéennes denses et entrée en Mer d'Alboran des eaux atlantiques plus légères (Letolle et Vergnaud-Grazzini, 1973 ; Diester-Haass, 1973, 1974). L'étude sédimentologique détaillée effectuée sur la transition Pléistocène-Holocène, à l'aide de sept carottes Polymède II, tend à conforter la seconde hypothèse. Aucun changement important des caractères lithologiques, micropaléontologiques et minéralogiques, susceptible d'être redevable d'une inversion des courants, ne peut être mis en évidence. En particulier la smectite, apportée en quantité notable par les eaux de surface depuis l'Atlantique, ne présente pas de modification notable d'abondance selon la période, ou de gradient de distribution géographique différent entre le Würm et le Post-Glaciaire. L'hypothèse d'une non-inversion du sens des courants après le dernier Glaciaire nous paraît donc la plus vraisemblable.

IV. — CONCLUSION

Les boues hémipélagiques, à rares niveaux de résédimentation, déposées depuis le Würm en Mer d'Alboran, et étudiées dans sept carottes (mission Polymède II), reflètent à des degrés divers les environnements passés, lorsque l'on considère les données des foraminifères planctoniques, des ptéropodes et des minéraux argileux (fig. 6).

— Le climat est particulièrement bien exprimé par les foraminifères planctoniques, les ptéropodes n'étant que localement présents et les argiles de fiabilité variable.

— L'influence atlantique paraît reflétée particulièrement par les smectites, qui présentent un gradient décroissant dans le bassin oriental d'Alboran, et qui sont moins abondantes dans les secteurs situés à l'écart des veines d'eau superficielles entrant en Méditerranée. Par ailleurs, les associations faunistiques du plancton constituent des assemblages d'eaux chaudes, froides et intermédiaires, qui correspondent aux principales masses d'eaux atlantiques et méditerranéennes, d'influence variable selon la période climatique.

— Les influences continentales européennes et africaines ne peuvent pas être distinguées dans la partie

Facteurs	Foraminifères	Pteropodes	Min Argileux
Climat	*	*	* * *
Influence Atlantique	*	*	*
Influence Méditerranéenne	*	-	-
Influences Continentales	*	-	* * * <small>Sépiolite</small>
Néotectonique	-	-	*
Courants	*	*	*

Légende. Témoignage: - nul, * faible, * moyen, * non.

Fig. 6. — Intérêt comparé des foraminifères planctoniques, des pteropodes et des minéraux argileux dans la reconstitution des paléoenvironnements du Quaternaire supérieur en Mer d'Alboran.

Fig. 6. — Compared contributions of planctonic foraminifera, pteropods and clay minerals, to the reconstruction of late Quaternary environments in the Alboran Sea.

centrale de la Mer d'Alboran, du fait de l'existence d'une géologie terrestre peu différente et de brassages hydrodynamiques intenses. La sépiolite représente dans ce bassin un minéral détritique singulier, relativement peu vulnérable au transport et transporté, en partie au moins, par voie éolienne, depuis le Paléogène et sans

doute le Permo-Trias affleurant en Espagne et au Maroc.

— L'expression du climat par les cortèges argileux est fréquemment brouillée par suite de l'activité épeirogénique de l'Arc de Gibraltar, qui contrarie la mise en équilibre des sols avec les facteurs climatiques et provoque une érosion accentuée des roches et altérations immatures. Les secteurs dépendants d'une néotectonique atténuée, comme au large du Maroc, présentent le reflet paléoclimatique le plus fiable.

— L'hypothèse d'une inversion du sens des échanges marins entre Méditerranée et Atlantique, à la limite Pléistocène-Holocène, ne trouve aucun argument dans l'étude entreprise. Les données micropaléontologiques, et surtout minéralogiques, suggèrent au contraire une permanence du régime de type actuel, avec sortie d'eaux méditerranéennes denses en profondeur, et entrée superficielle d'eaux atlantiques.

Remerciements. — Ce travail est dédié à la mémoire de Léo Pastouret, décédé à la suite d'une maladie foudroyante à la fin de l'été 1983, et qui, avec un enthousiasme scientifique inépuisable, s'est particulièrement consacré à la connaissance géologique du domaine de transition entre Méditerranée et Atlantique.

Nous exprimons nos remerciements chaleureux au directeur du Centre Océanologique de Bretagne et au responsable du département 3GM, ainsi qu'à R. Ballenghien, A. Brebion, J. Carpentier, F. Dujardin, R. Kerbrat et P. Récourt.

BIBLIOGRAPHIE

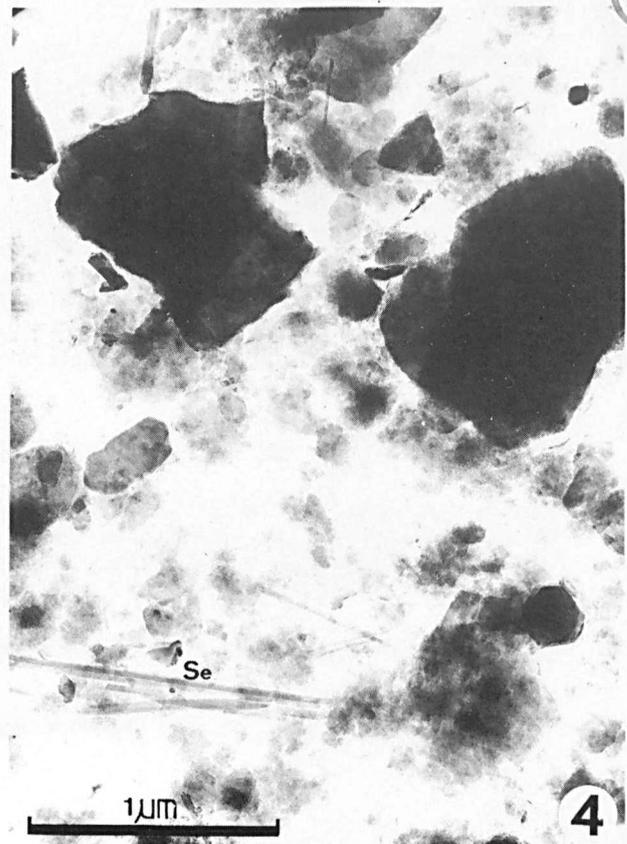
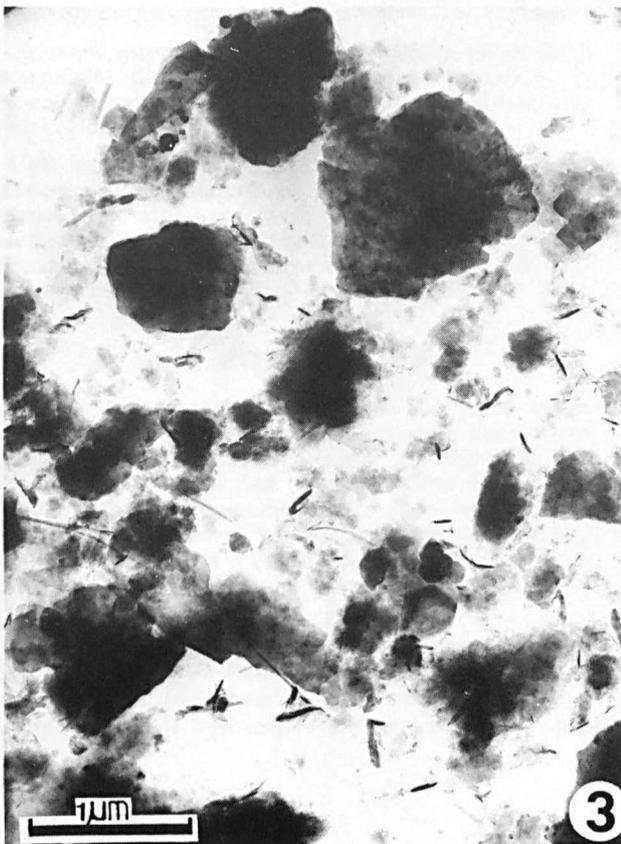
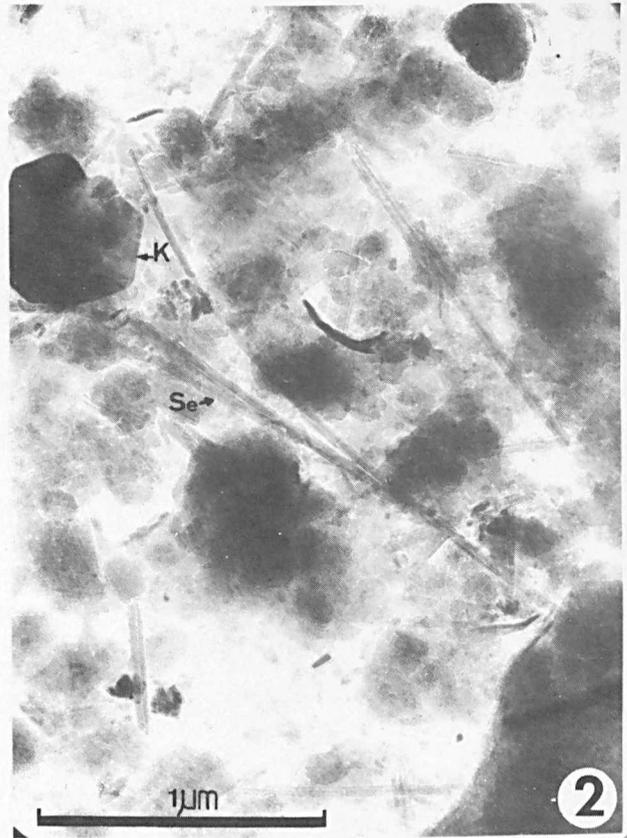
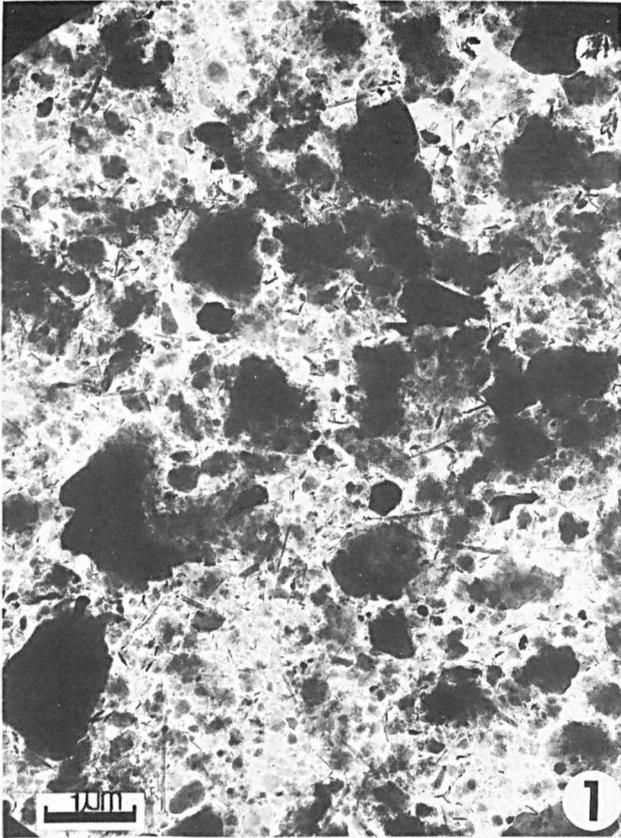
- 1) AUFFRET G.A., PASTOURET L., CHAMLEY H., LANOIX F. (1974). — Influence of the prevailing current regime on sedimentation in the Alboran Sea. *Deep-Sea Res.*, 21, p. 839-849. Pergamon Press.
- 2) BLANC-VERNET L., CHAMLEY H., FROGET C. (1969). — Analyse paléoclimatique d'une carotte de Méditerranée nord-occidentale. Comparaison entre les résultats de trois études: foraminifères, pteropodes, fraction sédimentaire issue du continent. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 6, p. 215-235.
- 3) BLANC-VERNET L., CHAMLEY H., LE BOULICAUT D., FROGET C., MONACO A., ROBERT C. (1975). — Observations sur la sédimentation récente dans la région siculo-tunisienne. *Geol. médit.*, II, 1, p. 31-48.
- 4) CHAMLEY H. (1971). — Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. *Mém. Sci. géol.*, Strasbourg. 35. 225 p.
- 5) CHAMLEY H., MILLOT G. (1975). — Observations sur la répartition et la genèse des attapulgités plio-quaternaires de Méditerranée. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, 281, D, p. 1215-1218.
- 6) COSSEMENT P. (1983). — Recherches sédimentologiques sur le Quaternaire terminal de la Mer d'Alboran. *Mém. D.E.A., Géol. dynamique et pratique*, mention Océanologie, Univ. Lille I, 57 p. dact.
- 7) DIESTER-HAASS L. (1973). — No current reversal at 10 000 B.P. in the strait of Gibraltar. *Mar. Geol.*, 15, p. M1-M9.
- 8) DIESTER-HAASS L. (1974). — No current reversal at 10 000 B.P. in the strait of Gibraltar. A reply. *Mar. Geol.*, 17, p. M1-M17.
- 9) ESCALON DE FONTON M. (1967). — Les séquences sédimento-climatiques du midi méditerranéen du Würm à l'Holocène. Extrait *Bull. Mus. Anthropol. Préhist. Monaco*, 14, p. 125-185.
- 10) FROGET C. (1974). — Essai sur la géologie du précontinent de la Provence occidentale. *Thèse Etat*, Univ. Aix-Marseille, 225 p. + Ann.
- 11) FROGET C., CHAMLEY H. (1977). — Présence de sépiolite détritique dans les sédiments récents du golfe d'Arzew (Algérie). *C.R. Ac. Sc. Paris.*, 285, D, p. 307-310.

- 12) GIGOUT M. CADET J.P., PIERRE G. (1974). — Sur le comportement de l'Arc de Gibraltar au Quaternaire récent d'après les formations littorales. *Deuxième Réunion. Sci. Terre*, p. 187, Nancy.
- 13) HUANG T.C., STANLEY D.J. (1974). — Current reversal at 10 000 years B.P. at the strait of Gibraltar. A discussion. *Mar. Geol.*, 17, p. M1-M7.
- 14) KULLENBERG B. (1952). — On the salinity of water contained in marine sediments. *Medd. Oceanografiska Inst.*, 21, p. 1-38. Göteborg.
- 15) LETOLLE R., VERGNAUD-GRAZZINI C. (1973). — Essai sur l'évolution générale de la Méditerranée pendant les époques glaciaires. *Coll. intern. C.N.R.S.*, 219 : Les méthodes quantitatives d'étude des variations du climat au cours du Pléistocène.
- 16) MELIERES F. (1974). — Recherches sur la dynamique sédimentaire du golfe de Cadix (Espagne). *Thèse Etat*, Univ. Paris VI, 235 p. + Ann.
- 17) MILLOT G. (1964). — *Géologie des Argiles. Altération, sédimentologie, géochimie*. 499 p., Masson.
- 18) MONACO A. (1965). — Evolution de quelques sédiments argileux de la Méditerranée occidentale (entre Carthagène et Mostaganem). *Bull. Soc. géol. France*, (7), VII, p. 521-529.
- 19) MÜLLER C., BLANC-VERNET L., CHAMLEY H., FROGET C. (1974). — Les coccolithophorides d'une carotte méditerranéenne, comparaison paléoclimatologique avec les foraminifères, les ptéropodes et les argiles. *Tethys, Fr.*, 6 (4), p. 805-828.
- 20) PIERCE J.W., STANLEY D.J. (1975). — Suspended-Sediment concentration and mineralogy in the central and western Mediterranean and mineralogic comparison with bottom sediment. *Mar. Geol.*, 19, p. M15-M25.
- 21) RUPKE N., STANLEY D.J. (1974). — Distinctive properties of turbiditic and hemipelagic mud layers in the Algero-Balearic Basin, Western Mediterranean Sea. *Smithsonian Contrib. to the Earth-Sciences*, 13, p. 1-40.
- 22) THIRY M. (1978). — Techniques de diffraction des rayons X. *Ecole Nat. Sup. Mines Paris, C.G.G.M., Lab. Minér.*
- 23) THUNELL R.C. (1978). — Distribution of recent planktonic foraminifera in surface sediments of the Mediterranean Sea. *Marine Micropal.*, 3, p. 147-173.
- 24) TOMADIN L., LENOZ R., LANDUZZI V., MOZZUCATELLI A., VANUCCI R. (1983). — On wind-blown dusts over the central Mediterranean. *Oceanologica Acta*, 7, p. 13-24.
- 25) VALETTE J.N. (1972). — Etude minéralogique et géochimique des sédiments de mer d'Alboran : résultats préliminaires. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, 275, D. p. 2287-2290.
- 26) VANDER ZWAAN G. (1980). — The impact of climatic change on deep-sea benthos. A micropaleontological investigation of a deep-sea core from the S.E. Adriatic. *Paleontology*, Proceedings B83 (4), p. 379-377.
- 27) VERGNAUD-GRAZZINI C., BARTOLINI C. (1970). — Evolution paléoclimatique des sédiments würmiens et post-würmiens en mer d'Alboran. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, (2), 4. p. 324-334.

EXPLICATION DE LA PLANCHE I
MICROGRAPHIES

EXPLANATION OF THE PLATE I
ELECTROMICROGRAPHS

1. — Carotte 46, 30 cm. Assemblage argileux d'affinité chaud-humide dominé par des particules aux contours flous, fragmentés. Quelques fibres de sépiolite, petites kaolinites hexagonales.
1. — Core 46, 30 cm. Clay assemblage of temperate-humid type, with abundant small-sized and fleecy particles. Some sepiolite fibers and small kaolinite hexagons.
2. — Carotte 46, 30 cm. Détail. Noter les fibres de sépiolite (Se) et la kaolinite (K).
2. — Core 46, 30 cm. Detail. Note the presence of sepiolite (Se) and kaolinite (K).
3. — Carotte 36, 250 cm. Assemblage argileux d'affinité froide, dominé par des particules relativement grandes (illite, chlorite) et aux contours nets.
3. — Core 36, 250 cm. Clay assemblage of cold type, with fairly large and well-shaped particles (illite and chlorite sheets).
4. — Carotte 43, 370 cm. *Idem*. Rares fibres de sépiolite.
4. — Core 43, 370 cm. Clay assemblage of cold type, with rare sepiolite fibers.



Le gypse de la région de Safi (Maroc): géologie et sédimentologie Note préliminaire

The gypsum of the region of Safi (Morocco): geology and sedimentology Preliminary paper

par D. BOULANGER † (*), M. LARHZAL (**), et N. BEUN (*)
(Planche II)

Résumé. — La présence d'une importante série gypseuse jurassico-crétacée est l'une des caractéristiques géologiques majeures de la région de Safi (Maroc). A partir de deux zones d'affleurements remarquables que nous replaçons au préalable dans leur cadre géologique, nous décrivons quelques particularités sédimentologiques de la série gypseuse afin d'en aborder, en conclusions, les conditions de dépôt et le cadre paléogéographique.

Abstract. — *One of the main geological characteristics of the region of Safi (Morocco) is its important deposits of gypsum (Jurassic/Cretaceous). Two outcrops are studied; in a first time, they are replaced in their geological frame; then, in a second time, some sedimentologic particularities are described. In the conclusion, we enter upon the conditions of sedimentation and the paleogeographic frame.*

Souvent masqué par de minces dépôts pliocènes et quaternaires (limons, sables, croûtes calcaires), le Mésozoïque subtabulaire (fig. 1) constitue le substratum de la région de Safi (3).

Ces terrains, définis par Roch (7) comme étant jurassico-crétacés, renferment de très épaisses couches gypseuses qui affleurent (avec leur couleur blanchâtre caractéristique) sur la bordure septentrionale des Mouissates, depuis les environs mêmes de la ville de Safi jusqu'aux environs de Youssoufia, 65 km à l'Est.

I. — INTRODUCTION

Les études détaillées de terrain que nous avons effectuées ont été volontairement limitées à deux zones d'affleurements, l'une située à une quinzaine de km au Nord de la ville de Safi (dans la falaise de la plage de Lalla-Fatma, anciennement citée dans la littérature sous le nom de "Lièvre volage"), l'autre située à une quarantaine de km à l'Est de Safi, aux environs de Sidi-Mohamed-Tijji (dans les Mouissates).

En effet, ces deux zones nous ont paru particulièrement caractéristiques et favorables à l'étude de la série gypseuse puisque, dans les deux cas, on peut observer cette série et ses relations avec son encaissant.

Les autres carrières de la région de Safi ne montrent généralement que des coupes partielles et du reste très comparables aux précédentes (4). La netteté des affleurements, soit dans la falaise de Lalla-Fatma, soit dans les carrières de la région de Sidi-Tijji, nous a permis d'observer les successions lithologiques et d'en tirer quelques conclusions quant aux conditions de dépôt de ces formations.

II. — LA PLAGE DE LALLA-FATMA

Elle présente un intérêt tout particulier puisque c'est le seul endroit dans les environs immédiats de Safi où l'on puisse observer les rapports de la formation gypseuse avec son toit et son mur.

(*) Université de Picardie, U.E.R. des Sciences Exactes et Naturelles, Faculté des Sciences, Département de Géologie, 33, rue Saint-Leu, 80039 Amiens Cedex.

(**) Boujniba, par Khouribga (Maroc).

Note présentée le 2 Novembre 1983 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 7 Novembre 1984.

1) Cadre géologique.

La série stratigraphique locale (6) se présente de la façon suivante, de bas en haut :

- à la base, un banc de calcaires jaunes qui, dans les falaises de Safi, formerait le toit du Jurassique ;
- plus haut, les "calcaires inférieurs", blancs ou jaunes, datés du Valanginien, représentés au port de Safi par un banc de 5 à 10 m d'épaisseur ;
- au-dessus, les "argiles à *Exogyra couloni*", datées de l'Hauterivien inférieur, qui ont une épaisseur de 60 m. Elles contiennent des bancs de calcaires jaunes fossilifères de un à quelques mètres de puissance ;

— enfin, au sommet, les "calcaires de Dridrat", massifs et parfois dolomitiques, qui forment la corniche de la falaise de Safi. Leur épaisseur peut atteindre 50 m ; ils ont été datés de l'Hauterivien supérieur.

C'est dans les "calcaires inférieurs" que vont s'intercaler, un peu plus au Nord, des niveaux gypseux de plus en plus importants.

Si l'on étudie plus en détail ces "calcaires inférieurs" près de la rampe d'accès à la plage (soit la partie Sud de la falaise), on observe de bas en haut :

- des calcaires gris très marneux surmontés d'une séquence d'environ 60 cm constituée de conglomérats puis de calcaires jaunes massifs ;

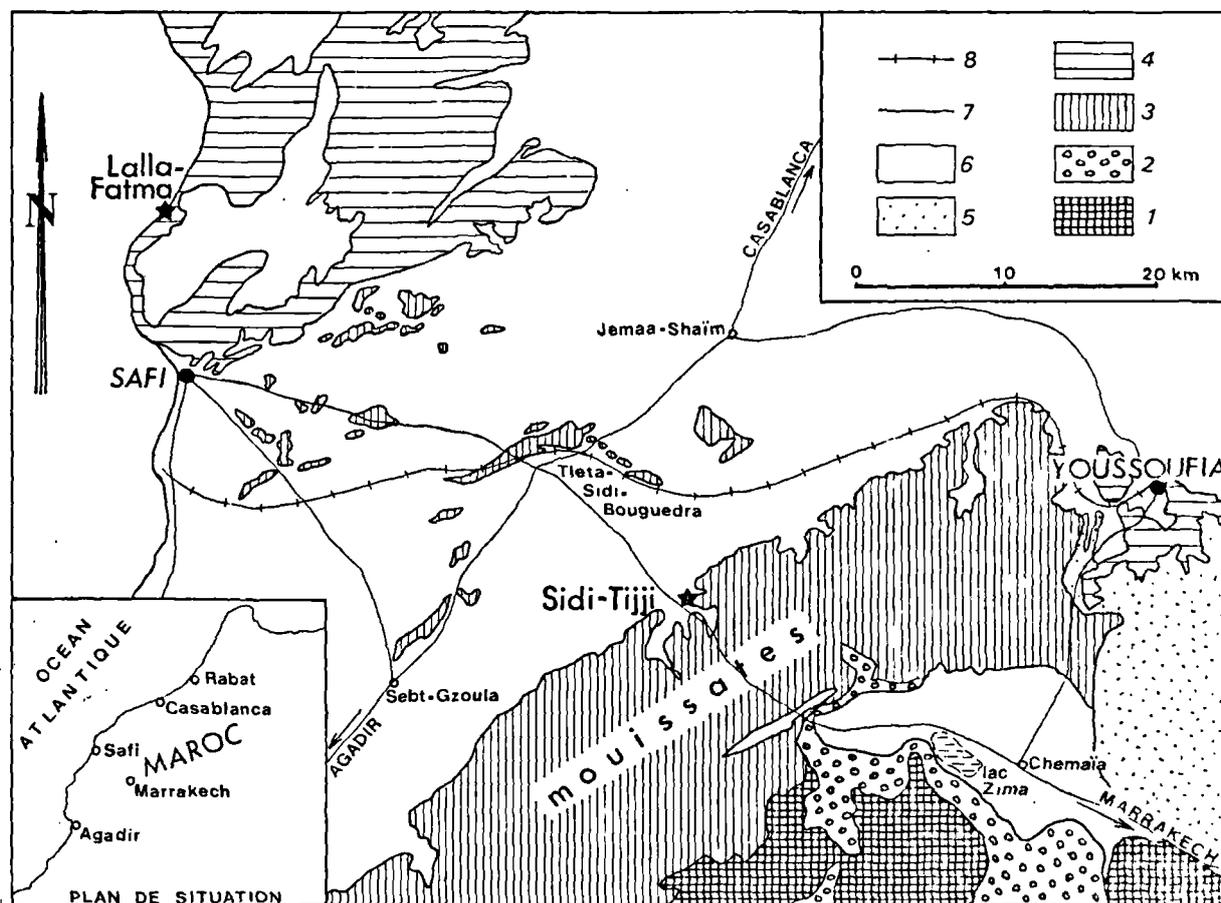


Fig. 1. — Carte géologique schématique de la région de Safi-Youssoufia [d'après Gigout, 1954 (3)].
1, Paléozoïque. — 2, Permo-trias. — 3, Jurassique. — 4, Crétacé. — 5, Eocène. — 6, Plio-quaternaire. — 7, routes principales. — 8, voies ferrées.

Fig. 1. — Schematic geological map of Safi-Youssoufia region [according to Gigout, 1954 (3)].
1, Palaeozoic. — 2, Permo-triassic. — 3, Jurassic. — 4, Cretaceous. — 5, Eocene. — 6, Pliocene-Quaternary.
7, main roads. — 8, railway track.

- des marnocalcaires gris-bleu montrant une grande quantité de traces tubulaires jaunes (terriers) surmontés par une nouvelle séquence calcaire débutant par une calcarénite montrant un granoclassement et des stratifications entrecroisées à la partie supérieure ;
- des calcaires bréchiques plus ou moins carriés au-dessus desquels on peut observer des calcaires en fines plaquettes passant vers le haut à des calcaires sableux ;
- des marnes à "terriers", puis des calcaires sableux, enfin un gros banc de calcaires plus massifs présentant de nombreuses géodes tapissées de calcite (correspondant en général à des Bryozoaires branchus dont on peut quelquefois reconnaître la structure dans les parties résiduelles).

Ces différents niveaux des "calcaires inférieurs" sont souvent fossilifères ; ils sont riches en Huîtres et autres Lamellibranches, en Brachiopodes et en Bryozoaires ; quelques-uns des bancs de calcaires sableux renferment une grande quantité d'Oursins ; quelques Blemnites et Ammonites s'y rencontrent parfois.

Une étude en plaques minces a montré la présence de coprolithes de Crustacés dans les niveaux à "terriers" et l'existence de lamines et de bird-eyes très caractéristiques dans les calcaires marneux.

C'est donc en remontant vers le Nord que des bancs de gypse de plus en plus épais et nombreux vont apparaître et, entre eux, on pourra observer, d'une part, les différents termes de la série des "calcaires inférieurs" que nous venons de décrire et, d'autre part, des intercalations d'autres faciès, notamment un niveau de calcaires oolithiques. De plus, signalons la présence, dans des calcaires marneux situés plus au Nord, entre deux bancs de gypse massif, de débris d'os parmi lesquels quelques vertèbres sont reconnaissables.

L'ensemble de cette série est affecté d'un léger pendage vers le Sud : on va donc voir, dans la partie Nord de la falaise où la série est plus complète, s'intercaler entre les bancs les plus inférieurs de gypse des dolomies noires ou vert foncé plus ou moins cristallines et des niveaux de marnes vertes montrant, à la surface des bancs, de remarquables figures polygonales de dessiccation (Pl. II, fig. A).

Cette série a été affectée de légers mouvements latéraux ayant amené des glissements bancs sur bancs et des petites ondulations, parfois faillées, à déversement vers le Sud : elles sont bien visibles dans la série gypseuse mais s'amortissent plus ou moins dans les horizons marneux.

2) Le gypse.

Le gypse se présente sous différents faciès.

Le plus courant est représenté par des bancs métriques de gypse saccharoïde blanc à rosé montrant de nombreux nodules ovoïdes de gypse recristallisé (2). Ceux-ci sont généralement répartis dans la masse du banc (Pl. II, fig. B) mais présentent dans certains cas

une tendance au litage et au "granoclassement". Des plaques minces de gypse saccharoïde ont parfois montré la présence de très petits cristaux à fort relief disposés suivant le litage et qui semblent être de la barytine. Les bancs de gypse saccharoïde sont affectés, au moins dans leur partie supérieure, par des fentes, probablement de dessiccation, colmatées par des cristaux centimétriques de gypse jaune.

Certains niveaux montrent des aspects qui suggèrent des conglomérats : en effet, à la base de certains bancs, on peut observer des rognons de gypse cimentés par un peu de marnes vertes ; ils passent à leur partie supérieure à du gypse massif lité (Pl. II, fig. C).

Certains faciès montrent une structure de "gypsarénite" tandis que d'autres niveaux présentent des stratifications entrecroisées de gypse granuleux dans une matrice de marnes vertes.

Dans la partie Nord de la falaise, on voit également à la base de certains bancs de calcaires beiges plus ou moins marneux, outre des lamines et des slumps, des lits de nodules de gypse saccharoïde blanc dispersés dans la matrice carbonatée ; ces nodules, parfois disposés en un seul niveau à la base des séquences calcaires, occupent parfois le tiers ou la moitié inférieure du banc.

Si certains de ces nodules paraissent avoir subi une croissance diagénétique leur donnant une structure de type "chicken wire", d'autres semblent avoir une origine "détritique" incontestable.

III. — REGION DE SIDI-MOHAMED-TIJJ

La meilleure coupe et la plus accessible nous a semblé celle que l'on peut observer dans la carrière aujourd'hui abandonnée située au Nord de la route Safi-Marrakech, près du Marabout de Sidi-Tijji (1).

1) Cadre géologique.

L'ensemble de la formation gypseuse régionale (qui se prolonge vers le SW et le NE dans les Mouissates) se présente sous la forme d'une masse sensiblement horizontale dont l'épaisseur est de l'ordre de 40 m.

Cette horizontalité générale n'exclut pas de petites ondulations à amplitude faible ; ainsi, vers l'ENE, la formation gypseuse s'enfonce sous les niveaux marneux du Crétacé inférieur probable (qui constituent les collines situées immédiatement à l'Est de Sidi-Tijji) pour ressortir plus loin encore dans les environs de Youssoufia.

Le mur de la formation gypseuse, visible sur le chemin d'accès à la carrière et dans ses environs, est constitué de calcaires parfois silicifiés ou oolithiques et dont certains bancs montrent des faciès rappelant ceux des "calcaires inférieurs" de Lalla-Fatma.

2) Le gypse.

La série débute par des bancs métriques de gypse gris, stratifié, prenant souvent un aspect noduleux ("griotteux") soit aux épontes du banc, soit sur toute son épaisseur (Pl. II, fig. D). Des niveaux de marnes vertes, avec des passées de gypse fibreux parallèles à la stratification, séparent les bancs de gypse; les fibres, perpendiculaires aux épontes, souvent tordues (légers déplacements bancs sur bancs), présentent une ligne de séparation qui n'est jamais au milieu de la passée mais le plus souvent vers le tiers inférieur.

Des nodules monocristallins de taille variant de 1 à 4 cm environ et identiques à ceux observés à Lalla-Fatma (2) sont présents presque partout avec une densité variable et parfois, semble-t-il, avec une tendance au "granoclasement". Les directions cristallographiques de ces nodules, soulignées par les clivages parfaits, sont absolument quelconques.

Toujours à la base de la série, quelques niveaux montrent des petits lits centimétriques de gypse brun foncé plus cristallin alternant avec des passées souvent plus fines de gypse saccharoïde blanc: les cristaux bruns semblent écartés à leur partie supérieure, au contact du gypse blanc.

Plus haut dans la carrière, bien visible dans sa partie Sud, une poche de dissolution remplie d'une brèche à blocs de gypse emballés dans des argiles, forme une sorte de mur vertical épargné par l'exploitation; les couches gypseuses et marneuses situées de part et d'autre n'ont subi ni déformations, ni rejet: il s'agit donc d'une ancienne fracture ouverte que la dissolution a pu agrandir.

A gauche de ce "mur", on peut observer la partie supérieure de la formation gypseuse.

Au-dessus de deux bancs de gypse blanc saccharoïde massif, le premier de 30 cm d'épaisseur, le second de 5 cm, on remarque des niveaux ondulés de gypse granuleux, probablement détritique, séparés et soulignés par de minces passées de gypse fibreux blanc, le tout ayant une quarantaine de centimètres d'épaisseur. Les plaques que l'on peut dégager présentent en surface un aspect caractéristique de ripple-marks; les rides s'amortissent progressivement et, après de larges ondulations, l'ensemble se termine par des couches sensiblement horizontales dont la tranche présente un aspect concrétionné dû très probablement à l'action d'algues encroûtantes (Pl. II, fig. E). Au-dessus, un niveau de gypse saccharoïde massif gris clair est très comparable à ceux situés au-dessous des niveaux ondulés.

Dans la partie haute de la carrière, on peut observer deux bancs de 30 à 40 cm d'épaisseur de gypse albâtre de couleur jaunâtre plus ou moins translucide, séparés eux aussi par une passée de marnes vertes. La stratification est soulignée au sein de ces bancs par des lamines millimétriques alternativement claires et fon-

cées. Dans le banc inférieur, ces lamines sont rigoureusement horizontales, bien parallèles à la stratification et sans aucune déformation. Par contre, dans le banc supérieur, elles sont extraordinairement plissotées de façon qui semble anarchique mais sans que ce phénomène n'affecte le banc lui-même parfaitement horizontal. Ce niveau, qui renferme un peu de pyrite est, lui aussi, surmonté d'une passée de marnes vertes à lits de gypse fibreux. L'aspect plissoté des lamines (Pl. II, fig. F) évoque des phénomènes de slumping [ou peut-être les déformations qui accompagneraient la transformation de l'anhydrite en gypse (6)].

Dans la partie supérieure de la carrière, des niveaux de dolomies verdâtres largement cristallisées s'intercalent entre les bancs de gypse. A la surface des niveaux dolomitiques, des passées de marnes vertes montrent des mud-cracks très caractéristiques.

Les bancs sommitaux de gypse blanc saccharoïde présentent de très nombreux entonnoirs de dissolution plus ou moins remplis de brèches gypso-argileuses, se ramifiant en un réseau de style karstique. La surface supérieure, lorsqu'elle est dégagée, montre un aspect mamelonné très caractéristique de la dissolution. Une analyse aux rayons X des argiles de remplissage des poches de dissolution a montré la présence de traces d'un phosphate d'aluminium, probablement de la variscite.

Les autres exploitations situées au NE et au Sud de la précédente, où l'on rencontre des niveaux gypseux (d'épaisseur pouvant atteindre 2 m) séparés par des niveaux de marnes vertes plus ou moins dolomitiques à lits de gypse fibreux, ne montrent pas de différences notables par rapport à la carrière décrite ci-dessus. Cependant, dans la carrière Benhima-Kakon située au Sud de la route Safi-Marrakech, quelques bancs de gypse massif présentent des aspects de boudinage, de plissement qui évoquent incontestablement des slumps intercalés dans les niveaux horizontaux.

CONCLUSION

Des observations faites aussi bien dans la falaise de la plage de Lalla-Fatma que dans les carrières de Sidi-Tijji, il ressort qu'au moment du dépôt de la série gypseuse, on était en présence d'un milieu marin plus ou moins confiné. La présence de laminites à bird-eyes, de niveaux à terriers de vers et à coprolithes de crustacés, semble montrer que la tranche d'eau était relativement faible; elle a même pu se réduire totalement à certains moments comme le montrent les niveaux à mud-cracks.

Mais le niveau d'énergie du milieu, faible en général (laminites), s'est parfois brusquement accru, permettant, outre la formation des calcaires oolithiques, le remaniement et le dépôt de gypse détritique (conglomérat, gypsarénite) avec formation de ripple-marks et de stratifications entrecroisées.

On peut donc penser qu'à la limite Jurassique-Crétacé, la zone de sédimentation gypseuse se trouvait sur une plate-forme confinée, parfois émergente, située en bordure d'un continent où des ruissellements importants et épisodiques provoquaient de brusques décharges détritiques venant perturber la tranquillité de la sédimentation gypseuse des bordures.

Du reste, on ne peut pas écarter l'hypothèse qu'une partie au moins de ce gypse puisse être d'origine plus lointaine, érodé et/ou dissous sur un continent où le Trias gypsifère était bien représenté, et venant se

déposer sur la plate-forme soit sous forme de gypse détritique (et peut-être parfois d'anhydrite), soit sous forme de saumures saturées en sulfate.

Ces conditions créent ainsi un milieu favorable à la précipitation des niveaux gypseux saccharoïdes et au transport des particules détritiques gypseuses devenues insolubles par suite de sursaturation.

Ces données semblent du reste en accord avec la synthèse géologique récente (5) concernant l'évolution paléogéographique de la zone centre-atlasique au Jurassique supérieur.

BIBLIOGRAPHIE

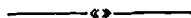
- 1) DESTOMBES J., JEANNETTE A. (1950). — Compte rendu de visite à la carrière de Sidi-Ahmed-Tijji. *Rapport S.E.G.M., Serv. géol. Maroc* (inédit).
- 2) GAUDEFROY Ch. (1956). — Question de cristallogénie : phénocristaux de gypse inclus dans le gypse saccharoïde de Safi. *Notes et Mém., Serv. géol. Maroc*, n° 135, p. 139-145.
- 3) GIGOUT M. (1954). — Carte géologique de la Méséta entre Mechra-Ben-Abbou et Safi (Maroc) (1/200.000). *Serv. carte géol. Maroc*, n° 84.
- 4) LARHZAL M. (1981). — Le gypse jurassico-crétacé de la région de Safi (Maroc). *D.E.S. Univ. de Picardie*, Amiens, 91 p.
- 5) MICHARD J. (1976). — Eléments de géologie marocaine. *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, n° 252, 420 p.
- 6) MAZEAS J.L. et NATAF M. (1967). — Le gypse de la région de Safi ; gisements, utilisations, marché. *Revue de Géographie du Maroc*, n° 12, p. 91-112.
- 7) ROCH E. (1930). — Etudes géologiques dans la région méridionale du Maroc occidental. *Notes et Mém. Serv. géol. Maroc*, n° 9, 542 p.

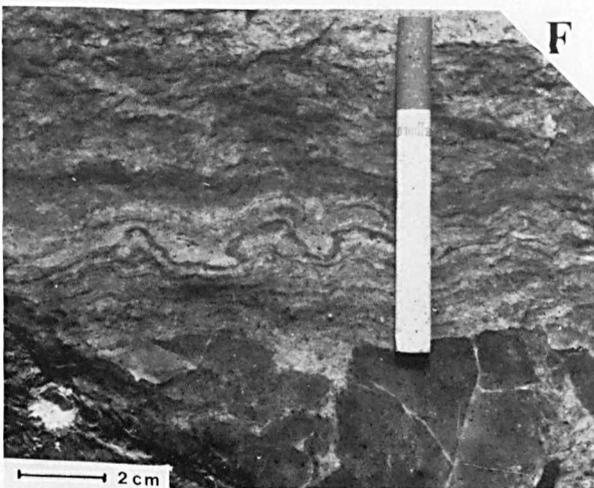
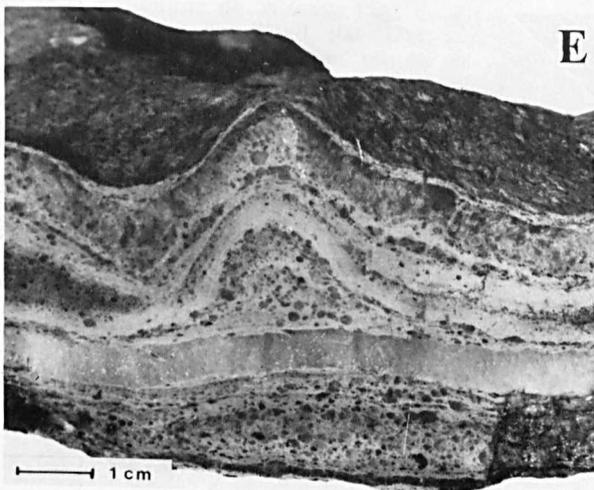
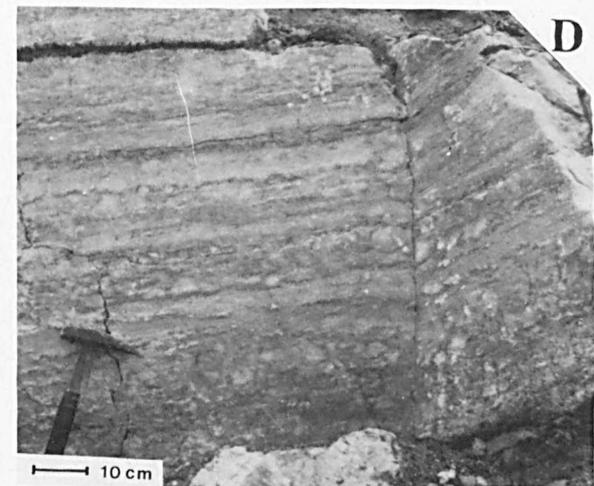
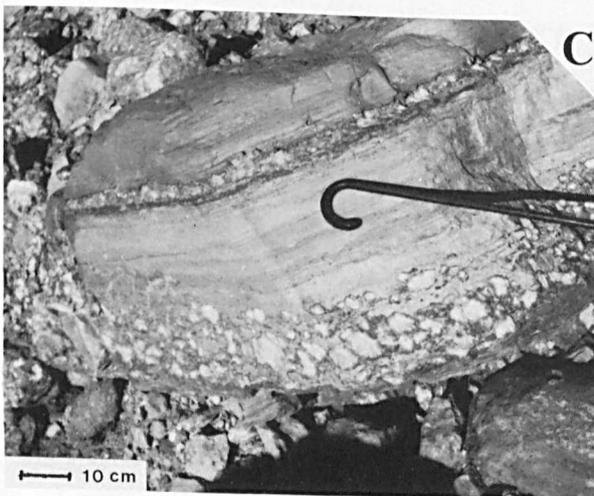
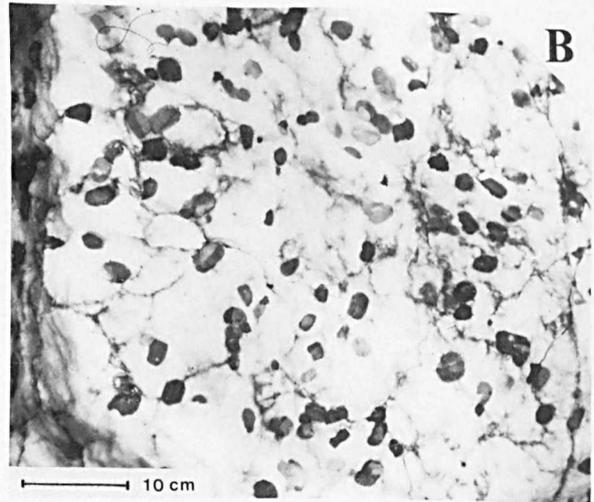
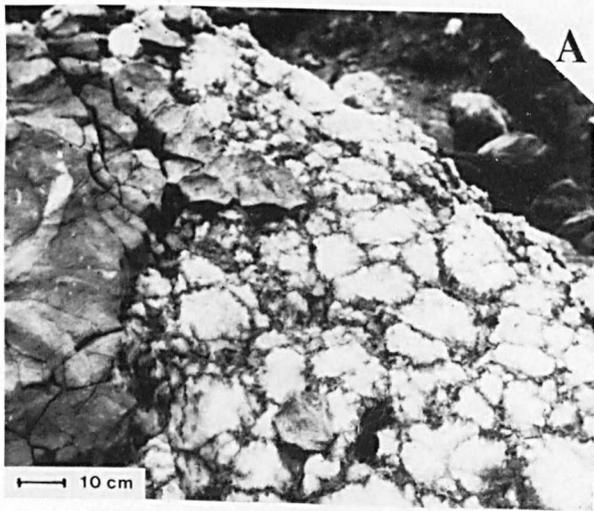
* * *

EXPLICATION DE LA PLANCHE II

EXPLANATION OF THE PLATE II

- Fig. A. — (Falaise de Lalla-Fatma). Niveaux marneux à mud-cracks (l'un d'eux, près des lunettes qui donnent l'échelle, a été isolé; on remarque les facettes rebroussées vers le haut), reposant sur un niveau de gypse lui aussi affecté par les fentes de dessiccation.
- Fig. A. — (*Cliff of Lalla-Fatma*). Marly bed with mud-cracks (one of them, near the sun-glasses, show the turned-up facets) laying upper gypsum alike concerned by the desiccation cracks.
- Fig. B. — (Falaise de Lalla-Fatma). Gypse saccharoïde renfermant de nombreux nodules plus ou moins ovoïdes de gypse recristallisé de différentes teintes, répartis dans la masse sans orientation cristallographique préférentielle.
- Fig. B. — (*Cliff of Lalla-Fatma*). Saccharoid gypsum with much ovoid nodules differently coloured of recrystallised gypsum, distributed without preferential crystallographic orientation.
- Fig. C. — (Falaise de Lalla-Fatma). Banc (éboulé) présentant deux séquences avec, à leur base, des éléments gypseux évoquant soit un conglomérat, soit plutôt des structures de type "chicken-wire" (cage à poules) des auteurs anglo-saxons et, au-dessus, des laminites marno-calcaires.
- Fig. C. — (*Cliff of Lalla-Fatma*). Fallen bed with two sequences: down, gypsiferous elements showing either a conglomerate or, rather, chicken-wire structures; up, marly-calcareous laminations.
- Fig. D. — (Carrière de Sidi-Tijji). Gros banc de gypse gris bien stratifié avec très net aspect "griotteux" visible sur toute son épaisseur.
- Fig. D. — (*Quarry of Sidi-Tijji*). Bed of grey gypsum well stratified; a typical "griotte" aspect is visible all along its thickness.
- Fig. E. — (Carrière de Sidi-Tijji). Aspect en surface et en section d'une plaque prélevée dans les niveaux à "ripple-marks" constitués de "gypsarénite" et de concrétionnements algaires, avec passée de gypse fibreux intercalée.
- Fig. E. — (*Quarry of Sidi-Tijji*). Surface and section aspects of a slab with ripple-marks formed by "gypso-arenites" and algal mats, with fibrous gypsum intercalation.
- Fig. F. — (Carrière de Sidi-Tijji). Plissements affectant les "laminés" d'un banc de gypse parfaitement horizontal dans son ensemble. Il s'agit soit de phénomènes de slumping, soit peut-être d'une illustration des déformations qui, d'après Mazéas et Nataf (6. fig. 1), accompagneraient la transformation de l'anhydrite en gypse.
- Fig. F. — (*Quarry of Sidi-Tijji*). Little folded laminations in a gypsiferous bed, meaning either slumping effects or, perhaps, deformations which [Mazéas and Nataf (6, fig. 1)] go with the transformation of the anhydrite in gypsum.





Smectites authigènes et glauconitisation dans les argiles du Gault (Albien du Boulonnais)

Authigenic smectites and glauconitization in the Gault formation (Albian from the Boulonnais)

par T. HOLTZAPFFEL (*)

Résumé. — L'étude détaillée des argiles du Gault (Albien de Wissant, Boulonnais), révèle la présence de smectites authigènes. Celles-ci se distinguent des smectites détritiques, d'aspect floconneux, par leur forme lattée. Elles sont issues de la recristallisation, lors de la diagenèse précoce, de matériel détritique préexistant (smectites floconneuses).

La répartition, dans la série, des smectites lattées authigènes est parallèle à celle des glauconies, et deux hypothèses sont évoquées pour interpréter ce fait. Dans la première, on envisage que les smectites lattées correspondent à un stade initial de la glauconitisation. Dans la seconde, la genèse des smectites lattées est indépendante de la glauconitisation et a lieu dans le sédiment isolé de l'influence de l'eau de mer.

Abstract. — A detailed study of the Gault formation (Albian from Wissant, Boulonnais), shows the presence of authigenic smectites. They are different of fleecy detrital ones because of their lathed shape, and are issued from the early diagenetic recrystallization of preexisting fleecy detrital particles.

The vertical distribution of authigenic smectites is parallel to the vertical distribution of glauconites, and two hypothesis can be proposed to explain it. In the first one, lathed smectites correspond to an initial stage of glauconitization. In the second one, there is no relation between glauconitization and the genesis of lathed smectites, which appear during early diagenesis, when the sediment is isolated from sea water influence.

I. — PRESENTATION

Sur la côte du Boulonnais, les argiles du Gault affleurent entre le Cap Blanc-Nez et le Cap Gris-Nez, au Nord de la commune de Wissant (fig. 1). La série stratigraphique, décrite en détail par Destombes et Destombes (1937), recouvre l'Albien moyen et supérieur. Elle est composée d'argiles monotones noires à gris-bleu. Sa richesse en macrofaune (ammonites, lamelibranches et dents de poissons), et en microfaune (foraminifères, nannofossiles et ostracodes), a permis une bonne connaissance de sa stratigraphie (Destombes et Destombes, 1965; Fauconnier, 1979; Robaszynski *et al.*, 1980; Amédéo *et al.*, 1981; Amédéo et Magniez-Jannin, 1982). Le faciès Gault *s. str.* débute au-dessus des sables verts de l'Albien inférieur, dont il est séparé

par deux niveaux phosphatés repères (P_2 et P_3), et s'arrête sous les marnes glauconieuses du Tourtia céno-manien inférieur. Sa puissance est d'environ 12 m et trois niveaux phosphatés repères y sont connus: P_4 (Albien moyen), P_5 (limite Albien moyen - Albien supérieur) et P_6 (Albien supérieur) (fig. 2). Les sédiments, riches en organismes variés, ont été déposés en conditions peu oxydantes.

L'analyse minéralogique détaillée de la série a été effectuée par observation des frottis et des minéraux en grains et par diffraction des rayons X (roche totale et fraction inférieure à $2 \mu\text{m}$). La stratigraphie minéralogique ainsi déterminée (fig. 2) confirme et complète les résultats antérieurs de Odin et Pomerol (1969) et Fauconnier (1979). La série se divise en trois parties :

(*) Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie, Université des Sciences et Techniques de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq.
Note présentée le 4 Janvier 1984 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 7 Novembre 1984.

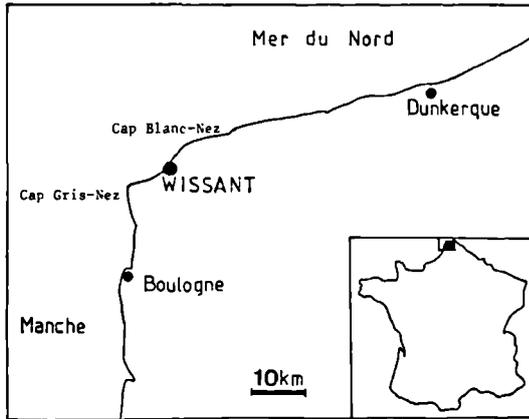


Fig. 1. — Localisation géographique de la coupe étudiée.
 Fig. 1. — Geographical localisation of the section studied.

- Albien moyen (du P₃ au P₅). Les niveaux de base sont riches en quartz et glauconies, et leur fraction argileuse est smectitique (65 %). L'abondance de ces minéraux diminue rapidement, au profit des carbonates, de l'illite et de la kaolinite.
- Partie inférieure de l'Albien supérieur (du P₅ au P₇). La fraction argileuse est constituée à parts égales d'illite,

kaolinite et smectites. On note la présence de chlorite et d'interstratifiés irréguliers, illite-smectite et chlorite-smectite, et l'absence de glauconie.

- Partie supérieure de l'Albien supérieur (du P₆ au Tourtia cénomannien inférieur). Elle est marquée par l'augmentation progressive des smectites, qui dominent à nouveau la fraction argileuse et la discrète réapparition de la glauconie.

Les analyses morphologiques au M.E.T. (*), géochimiques, cristallographiques et isotopiques (système Rb-Sr), des smectites de la fraction inférieure à 2 μm révèlent les faits suivants :

- 1) On distingue trois variétés morphologiques de smectites, semblables à celles décrites par Holtzapffel et Chamley (1983) : floconneuses, lattées et de type mixte.
- 2) Les smectites lattées, à l'image de celles des bassins océaniques profonds, sont authigènes, c'est-à-dire formées *in situ* (Holtzapffel, 1983 ; Holtzapffel *et al.*, 1984).
- 3) Les smectites de type mixte présentent tous les intermédiaires morphologiques entre smectites floconneuses et smectites lattées, ce qui suggère la possibilité du passage continu d'une forme à l'autre (Holtzapffel, 1983).

(*) M.E.T. : Microscope Electronique à Transmission.

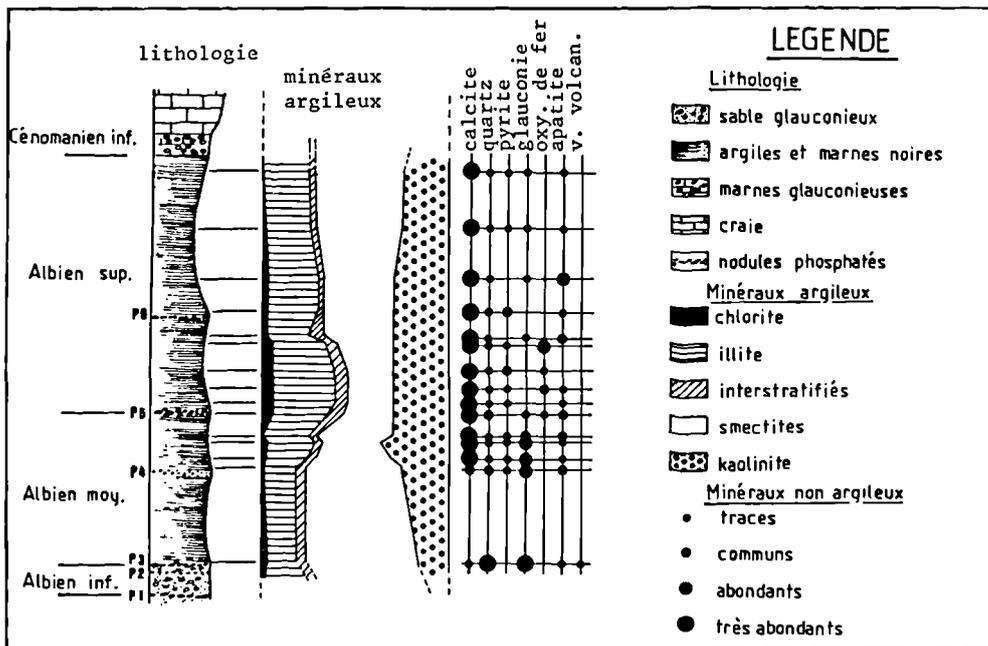


Fig. 2. — Lithologie et composition minéralogique détaillée de la série.
 Fig. 2. — Detailed lithology and mineralogical composition of the series studied.

4) La nature des différentes smectites est invariable : il s'agit toujours de smectites alumino-ferrifères, ou beidellites (paramètre $b = 9$, Nagelschmidt, 1938).

La genèse des smectites lattées de la série de Wisant, caractérisée par la présence parfois abondante de glauconie, n'est peut-être pas semblable à celle des smectites lattées connues dans les sédiments albioptiens et paléogène inférieur de l'Océan Atlantique Nord (Holtzapffel, 1983 ; Holtzapffel *et al.*, 1984). Le but de ce travail est donc de présenter la répartition stratigraphique des diverses variétés minérales dans la série, et d'aborder ainsi le problème de la genèse des smectites et de leur relation avec les processus de glauconitisation.

II. — DISTRIBUTION DES SMECTITES DANS LA SERIE. - DISCUSSION

1) Les faits.

Dans cinq niveaux, les résultats de comptages de particules (*) effectués pour la fraction inférieure à $1 \mu\text{m}$, sont comparés à l'abondance de l'ensemble des smectites dans cette même fraction et à l'abondance des glauconies dans la fraction inférieure à $100 \mu\text{m}$ (fig. 3). Un parallélisme net apparaît entre ces trois paramètres : les smectites lattées sont d'autant plus abondantes que la quantité totale des smectites et de glauconies est plus grande.

Une étude plus générale, faisant intervenir deux paramètres supplémentaires, la cristallinité des smectites (**) et le rapport r (***), montre que cette relation est vérifiée pour l'ensemble de la série (fig. 4). Trois périodes, superposables à celles identifiées précédemment, sont ainsi individualisées :

- Albien moyen. Cette période est caractérisée par la diminution, du bas vers le haut, de l'abondance des smectites lattées, parallèlement à celle de l'ensemble des smectites, des glauconies, du rapport r , et à la diminution de la cristallinité des smectites (valeurs plus élevées de l'indice).
- Partie inférieure de l'Albien supérieur. Durant cette période, les smectites, peu abondantes, sont moyennement cristallisées et essentiellement floconneuses. Le rapport r est inférieur à 0,5 (moins de particules fines) et la glauconie est absente.

(*) La méthode des comptages de particules sur micrographies agrandies (M.E.T.), mise au point et décrite par Holtzapffel (1983), permet l'analyse semi-quantitative des diverses variétés morphologiques des smectites dans un échantillon.

(**) Angle d'ouverture du pic à 17 \AA , sur le diagramme X de l'essai glycolé.

(***) $r = \%$ de particules inférieures à $0,5 \mu\text{m} / \%$ de particules inférieures à $2 \mu\text{m}$ (d'après l'analyse granulométrique au Sédigraph).

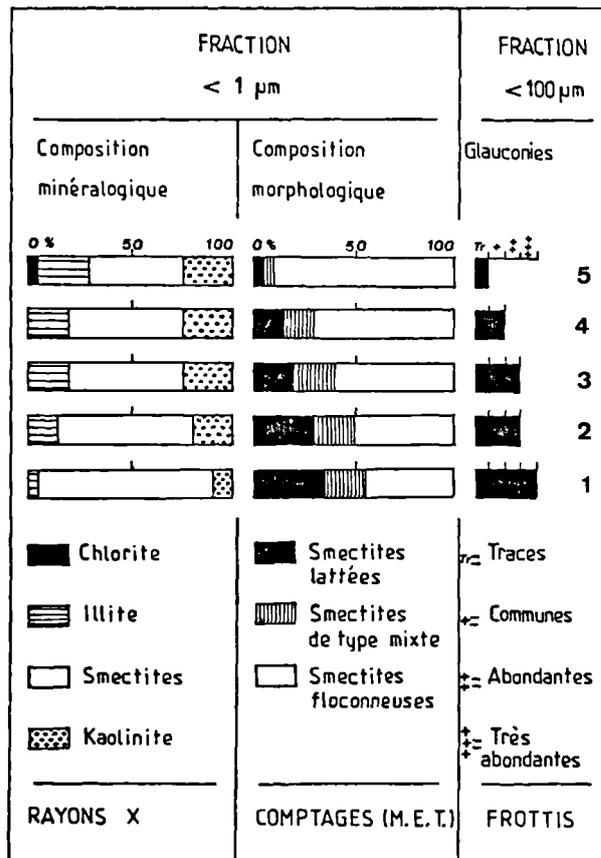


Fig. 3. — Analyses minéralogique et morphologique des argiles (fraction $< 1 \mu\text{m}$) et abondance des glauconies (fraction $> 100 \mu\text{m}$), dans cinq niveaux albiens moyens à supérieur.

Fig. 3. — Mineralogical analysis and morphology of clay particles (less than $1 \mu\text{m}$ fraction) and abundance of glauconites (more than $100 \mu\text{m}$ fraction), in five samples from the Middle to Upper Albian.

- Partie supérieure de l'Albien supérieur. Cette période est marquée par la réapparition et l'augmentation relative des smectites lattées, parallèlement à la discrète réapparition de la glauconie, l'augmentation de la quantité totale de smectites mieux cristallisées et l'augmentation du rapport r .

2) Relations entre smectites lattées et ensemble des smectites ; discussion.

L'augmentation parallèle des smectites lattées et de la cristallinité de l'ensemble des smectites montre que les particules lattées possèdent un ordre cristallin supérieur à celui des smectites floconneuses (Holtzapffel, 1983). Quant à la correspondance entre l'aug-

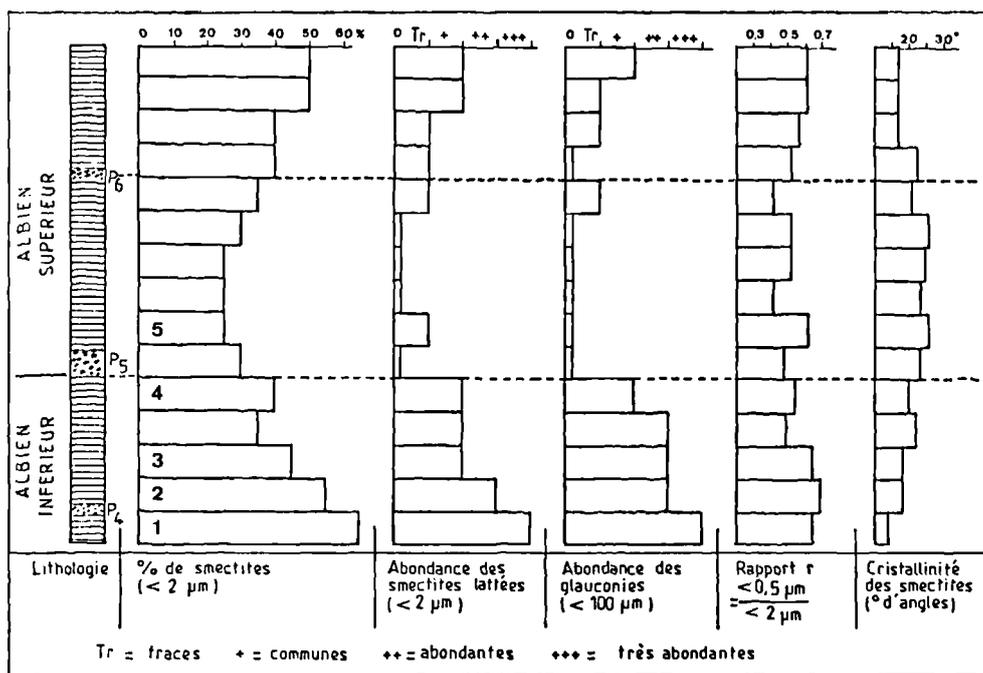


Fig. 4. — Stratigraphie minéralogique détaillée de la série. Les cinq niveaux étudiés sur la fig. 3 sont numérotés 1 à 5.

Fig. 4. — Detailed mineralogical stratigraphy of the serie.

mentation des smectites lattées et celle des smectites totales et du rapport r, elle peut être interprétée de deux manières.

a) Première hypothèse.

Le parallélisme observé peut signifier que l'authigénèse des smectites lattées, toujours plus abondantes dans les fractions très fines inférieures à 0,5 μm (Holtzapffel, 1983), conduit à fournir du matériel nouveau, principalement fin, au sédiment. Dans ce cas, afin d'expliquer l'apport de smectites au cours de la diagenèse, il est nécessaire d'envisager que les smectites lattées sont soit d'origine strictement néoformées (à partir de solutions interstitielles), soit issues de la transformation de particules non smectitiques. Les résultats de la géochimie isotopique du strontium montrent la participation de matériel détritique initial, à l'élaboration des smectites lattées (Clauer *et al.*, en préparation). Ainsi, si la néoformation stricte ne peut être totalement exclue, elle ne constitue certainement pas un processus unique de genèse des smectites lattées. La transformation de particules non smectitiques ne semble pas non plus pouvoir être évoquée car, ni les intermédiaires morphologiques, ni les intermédiaires minéralogiques et chimiques n'existent entre les smectites lattées et les minéraux non smectitiques. En effet, d'une part, les particules partiellement lattées sont en presque totalité

de forme intermédiaire entre smectites floconneuses et smectites lattées, c'est-à-dire qu'il s'agit toujours de smectites; d'autre part, les interstratifiés irréguliers illite-smectite sont très rares dans les niveaux riches en smectites lattées.

L'hypothèse d'un matériel volcanique à l'origine des smectites lattées a été envisagée par Jeans *et al.* (1982), dans la série albiénne de Folkestone, sur la côte anglaise opposée à Wissant. L'argumentation de ces auteurs est reconsidérée ici, afin de voir dans quelle mesure l'hypothèse proposée peut être appliquée à la série du Boulonnais. Les données relatives à la série de Wissant sont les suivantes :

- 1) L'observation de lames minces n'a pas montré de glauconies à cœur de verre volcanique, mais en a montré à cœur de feldspaths. Rien ne prouve cependant que ces plagioclases et *a fortiori* les glauconies, sont d'origine volcanique.
- 2) Les très rares esquilles de verre volcanique, parfois observées dans les frottis d'un seul niveau, sont toujours fraîches.
- 3) Les minéraux lourds sont abondants, mais leur assemblage est de type détritique, sans contribution de matériel volcanique (Odin et Pomerol, 1969 ; Holtzapffel, 1983).

4) Les analyses chimiques des éléments majeurs et en traces, dans la roche totale, la fraction argileuse et la fraction très fine, ne témoignent pas d'influences volcaniques, et la géochimie des terres rares permet de conclure dans le même sens (Holtzapffel, 1983). Il est donc peu vraisemblable que les smectites lattées de la série de Wissant soient issues de la dévitrification ou de l'altération de matériel volcanique initial.

En résumé, l'hypothèse d'une genèse *in situ* de smectites supplémentaires (lattées), venant s'ajouter au lot détritique initial, est peu soutenue par l'ensemble des résultats disponibles.

b) *Deuxième hypothèse.*

L'élaboration des smectites lattées a pu se faire par recristallisation de smectites floconneuses détritiques préexistantes, comme c'est le cas dans les sédiments océaniques (Holtzapffel *et al.*, 1984). Dans cette hypothèse, qui s'accorde avec les résultats de l'analyse isotopique (Clauer *et al.*, en préparation), la genèse des smectites lattées s'effectue à bilan minéralogique constant et donc sans apport de matériel nouveau à la fraction argileuse. Les variations observées dans la quantité totale de smectites et de matériel fin, ne peuvent alors être attribuées aux variations de l'intensité de l'authigenèse des smectites, comme c'était le cas dans l'hypothèse précédente. Il faut envisager la relation inverse : l'importance de l'authigenèse des smectites lattées est fonction des variations des apports terrigènes au bassin. L'augmentation des minéraux primaires et de la kaolinite, liée à des venues détritiques plus grossières et plus abondantes, et à une augmentation de la vitesse de dépôt, contrarierait l'authigenèse des smectites lattées.

Cette hypothèse d'une recristallisation de smectites préexistantes est en accord avec l'ensemble des résultats, et tout particulièrement avec l'existence d'abondantes formes intermédiaires entre smectites floconneuses et smectites lattées. Elle semble donc la plus vraisemblable.

3) **Relations entre smectites lattées et glauconies ; discussion.**

L'abondance des smectites lattées dans la fraction argileuse varie parallèlement à celle des glauconies dans la fraction sableuse (fig. 3 et 4). Une relation génétique peut donc exister entre la formation des smectites lattées, dont les conditions de genèse sont discutées ci-dessus, et la formation de glauconies, dont les conditions de genèse sont décrites par Giresse et Odin (1973) et Odin et Matter (1981). Deux hypothèses sont envisageables, selon que cette relation existe ou n'existe pas.

a) *Les smectites lattées : une étape vers la glauconitisation ?*

Dans le cas où une relation génétique existe entre les smectites lattées et les glauconies, la formation des premières est liée à celle des secondes, c'est-à-dire à

la glauconitisation. Le processus envisageable est alors semblable à celui proposé par Louail (1981) : ces deux phases minérales prennent naissance dans un même milieu. De plus, comme la glauconitisation vraie conduit à l'élaboration de glauconite et non de smectite, les smectites lattées correspondent sans doute à un stade initial de ce processus diagénétique. Leur élaboration est, dans cette hypothèse, assimilable à un phénomène diagénétique d'interface.

Cette hypothèse est en accord avec plusieurs résultats. D'une part, le parallélisme entre les smectites lattées et les glauconies est spectaculaire (fig. 3 et 4). D'autre part, par l'utilisation conjointe des données de la géochimie isotopique du strontium et de celles relatives aux comptages de particules (M.E.T.), on montre que la genèse des smectites lattées se fait à une période proche de celle de la sédimentation (Holtzapffel *et al.*, 1984 ; Clauer *et al.*, en préparation). Enfin, l'élaboration des smectites lattées par recristallisation, à bilan chimique constant, de smectites floconneuses détritiques (cf. ci-dessus), peut correspondre à une phase initiale des processus de glauconitisation, les néoformations accompagnées de modifications chimiques étant des phénomènes qui n'interviennent que lors de la glauconitisation vraie.

b) *Genèse des smectites lattées et glauconitisation : deux processus diagénétiques distincts.*

S'il n'existe pas de relation génétique entre smectites lattées et glauconies, les deux phases minérales sont indépendantes. Leur présence commune dans les mêmes niveaux s'explique alors par l'existence, dans les argiles du Gault, de conditions favorables, à la fois à la genèse des glauconies et à celle des smectites lattées. De même, leur disparition progressive dans la série s'explique par la disparition progressive de ces conditions favorables. Dans cette hypothèse, il faut envisager qu'il existe un diachronisme entre l'élaboration des glauconies et celle des smectites lattées dans un même niveau. Les glauconies sont connues pour être élaborées à l'interface eau-sédiment, lors de périodes à vitesse de sédimentation quasiment nulle, par contact de supports granulaires avec l'eau de mer (Giresse et Odin, 1973 ; Odin et Matter, 1981). Les smectites lattées, quant à elles, seraient élaborées principalement par contact entre les particules détritiques (surtout les smectites floconneuses) et le milieu interstitiel isolé de l'eau de mer, selon un processus semblable à celui déjà envisagé dans les sédiments océaniques (Holtzapffel *et al.*, 1984). Ainsi, un même niveau peut être, dans un premier temps, le siège de phénomènes d'interface (glauconitisation), dans un deuxième temps, le siège de phénomènes diagénétiques précoces différents (formation de smectites lattées).

Dans cette seconde hypothèse, la formation des smectites lattées des argiles du Gault pourrait être tout à fait comparable à celle des smectites de même forme, connues dans les sédiments océaniques atlantiques (Holtzapffel *et al.*, 1984).

c) *Discussion.*

Si la plus grande partie des données analytiques acquises dans une étude générale des smectites lattées (Holtzapffel, 1983) est en accord avec les deux hypothèses proposées, certains faits peuvent cependant être discutés.

1° Les courbes de normalisation des terres rares par rapport aux shales ne présentent pas l'anomalie négative en cérium connue dans l'eau de mer (Goldberg *et al.*, 1963 ; Hogdhal *et al.*, 1968), et dans les minéraux typiquement formés à l'interface (Piper, 1974 ; Courtois et Hoffert, 1977 ; Bonnot-Courtois, 1981), fait qui va à l'encontre de la première hypothèse. Il n'a cependant pas de valeur décisive car la durée des phénomènes diagénétiques a toutefois pu être trop courte pour que les terres rares enregistrent l'influence de l'eau de mer à l'interface.

2° Il est étonnant, si l'on admet la première hypothèse, de rencontrer dans un même niveau, à la fois d'abondantes particules correspondant au stade initial de la glauconitisation (smectites lattées), et d'autres correspondant au stade ultime de ce même phénomène. Les glauconies des argiles du Gault sont en effet très évoluées (Odin et Matter, 1981) : les grains sont bien arrondis, peu mamelonnés, vert foncé et constitués exclusivement de glauconite vraie. De plus, aucun terme intermédiaire n'est connu entre le stade initial supposé et le stade ultime dans les niveaux où les deux sont présents : les interstratifiés irréguliers illite-smectite ne sont abondants que dans les niveaux dépourvus de smectites lattées et de glauconies, et l'observation au M.E.T. montre qu'il n'existe aucune variété intermédiaire entre les deux phases authigènes.

3° Le parallélisme constaté entre smectites lattées et glauconies est un argument tout à fait en accord avec la première hypothèse, mais ne peut exclure la seconde.

En résumé, l'étude de la seule série de Wissant ne permet pas de préférer une hypothèse plutôt que l'autre et les deux sont également retenues.

III. — CONCLUSIONS

Dans les argiles du Gault de la série de Wissant, les smectites ont une origine double : détritique et diagénétique. Il existe d'une part des smectites de forme floconneuse (beidellites) et d'origine détritique vraisemblablement pédologique, d'autre part des smectites de forme lattée (également des beidellites), d'origine authigène.

L'analyse détaillée de la stratigraphie minéralogique révèle que l'abondance des smectites authigènes évolue parallèlement à plusieurs paramètres : la quantité totale de smectites, leur indice de cristallinité, la quantité de particules très fines ($< 0,5 \mu\text{m}$) et l'abondance des glauconies. On montre que l'origine des smectites lattées n'est ni la néoformation stricte, ni la transformation de particules non smectitiques, mais correspond plutôt à la recristallisation, à bilan chimique et minéralogique constant, de smectites floconneuses préexistantes.

Deux hypothèses sont ensuite proposées, quant à la localisation des processus diagénétiques concernés par la genèse des smectites lattées, en relation avec la glauconitisation :

1° Les smectites lattées correspondent à un stade initial de la glauconitisation. Le modèle envisageable est alors comparable à celui proposé par Louail (1981) et les smectites lattées de la série de Wissant, différentes de celles des sédiments océaniques de même âge, sont le résultat d'une convergence morphologique.

2° Les smectites lattées se forment indépendamment des processus de glauconitisation, lors de la diagénèse précoce, mais après un certain enfouissement, quand le milieu interstitiel est isolé de l'influence de l'eau de mer. Dans ce cas, leur genèse ne diffère pas de celle des smectites lattées connues dans les sédiments profonds du Domaine Nord-Atlantique (Holtzapffel *et al.*, 1984).

Il n'est pas possible, dans l'état actuel des connaissances, et à partir de l'étude d'une seule série glauconieuse, de choisir l'une ou l'autre hypothèse, et la discussion reste ouverte.

* * *

BIBLIOGRAPHIE

- 1) AMEDRO F., DAMOTTE R., MAGNIEZ-JANNIN F. et MANIVIT H. (1981). — Echelles biostratigraphiques dans l'Albien du Boulonnais (macro, micro, nannofossiles). *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, vol. 18, n° 2, p. 3-19.
- 2) AMEDRO F. et MAGNIEZ-JANNIN F. (1982). — Corrélations lithologiques et biostratigraphiques (ammonites, foraminifères) dans le Boulonnais. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. CI, p. 133-143.
- 3) BONNOT-COURTOIS C. (1981). — Géologie des terres rares dans les principaux milieux de formation et de sédimentation des argiles. *Thèse Dr. ès Sci.*, Orsay, 217 p.
- 4) COURTOIS C. et HOFFERT M. (1977). — Distribution des terres rares dans les sédiments superficiels du Pacifique Sud-Est. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. XIX, p. 1245-1251.
- 5) DESTOMBES J.P. et DESTOMBES P. (1937). — Note sur le Gault de Wissant. *Bull. Soc. Géol. Nord*, t. LXII, p. 98-113.
- 6) DESTOMBES J.P. et DESTOMBES P. (1965). — Distribution zonale des ammonites dans l'Albien du Bassin de Paris. *Mém. B.R.G.M.*, n° 34, Coll. sur le Crétacé inférieur, p. 255-270.
- 7) FAUCONNIER D. (1979). — Les dinoflagellés de l'Albien et du Cénomaniens inférieur du bassin de Paris. Répartition stratigraphique et relation avec la nature du dépôt. *Doc. B.R.G.M.*, n° 5, 150 p.
- 8) GIRESSE P. et ODIN G.S. (1973). — Nature minéralogique et origine des glauconies du plateau continental du Gabon et du Congo. *Sedimentology*, vol. 20, p. 457-488.
- 9) GOLDBERG E.D., KOLDE M., SCHMITT R.A. et SMITH R.H. (1963). — Rare earths distribution in the marine environment. *Journ. Géoph. Res.*, vol. 68, p. 4209-4217.
- 10) HOGDHAL O.T., MELSON S. et BOWEN V. (1968). — Neutron activation analysis of lathanides elements in sea water. *Adv. Chem.*, vol. 73, p. 308-325.
- 11) HOLTZAPFFEL T. (1983). — Origine et évolution des smectites albo-aptiennes et paléogènes du Domaine Nord-Atlantique. *Thèse 3^{ème} Cycle*, Lille, 164 p.
- 12) HOLTZAPFFEL T., BONNOT-COURTOIS C., CHAMLEY H. et CLAUER N. (1984). — Héritage et diagenèse dans la constitution des smectites nord-atlantiques (Crétacé, Paléogène). *Bull. Soc. Géol. Fr.* (sous presse).
- 13) HOLTZAPFFEL T. et CHAMLEY H. (1983). — Morphologie et genèse de smectites albo-aptiennes et paléogènes de l'Atlantique Nord : héritage et recristallisation. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, sér. II, t. 296, p. 1599-1602.
- 14) JEANS C.V., MERRIMAN R.J., MITCHELL J.G. et BLAND D.J. (1982). — Volcanic clays in the Cretaceous of the Southern England and Northern Ireland. *Clay Minerals*, vol. 17, p. 105-156.
- 15) LOUAIL J. (1981). — La transgression crétacée du Sud du Massif Armoricaïn. Cénomaniens de l'Anjou et du Poitou. Crétacé supérieur de Vendée. Etude stratigraphique, sédimentologique et minéralogique. *Thèse Dr. ès Sci.*, Rennes, 456 p.
- 16) NAGELSCHMIDT G. (1938). — On the atomic arrangement and variability of the members of the montmorillonite group. *Min. Mag.*, vol. 25, 140 p.
- 17) ODIN G.S. et MATTER A. (1981). — De glauconarium originiae. *Sedimentology*, vol. 28, p. 611-641.
- 18) ODIN G.S. et POMEROL C. (1969). — Données sédimentologiques sur les formations du Crétacé moyen entre Wissant et Sangatte (Pas-de-Calais). *C.R. somm. S.G.F.*, fasc. 3, p. 67.
- 19) PIPER D.Z. (1974). — Rare earth elements in the sedimentary cycle : a summary. *Chem. Geol.*, vol. 14, p. 285-304.
- 20) ROBASZYNSKI F., AMEDRO F., FOUCHER J.C., GASPARD D., MAGNIEZ-JANNIN F., MANIVIT H. et SORNAY J. (1980). — Synthèse biostratigraphique de l'Aptien au Santonien du Boulonnais, à partir de sept groupes paléontologiques : Foraminifères, Nannoplancton, Dinoflagellés et Macrofaune. *Rev. Micropal.*, vol. 22, n° 4, p. 195-321.



Mécanisme du transfert des pollutions de la nappe de la craie de l'Artois et du Cambrésis (Nord de la France)

Mass transfert modality of the pollutions in chalk water-table in Artois and Cambresis countries (North of France)

par P. ARNOULT (*) et J. MANIA (**)

Résumé. — La compréhension globale de la pollution des eaux souterraines du réservoir crayeux du Nord de la France en zone rurale (secteurs de Cambrai et d'Arras) est abordée par les moyens de l'analyse hydrochimique classique et de la géochimie isotopique (azote, soufre et tritium). Cette dernière est limitée à huit sites hydrogéologiques bien contrastés. Nous montrons, au niveau de ce premier stade de travail, qu'il semble délicat de trancher de manière certaine sur la question de la paternité des polluants. Cette difficulté est inhérente à la conjonction des écoulements transversaux et verticaux très variables dans une nappe à régime libre.

Abstract. — *The global knowledge of groundwater pollution in the chalky aquifer of North of France in rural region (district area of Cambrai and Arras) is dealt with the means of hydrochemical analysis and isotopic geochemistry (Nitrogen, Sulphur and Tritium). The latest method is limited to eight hydrogeological contrasted sites. We show, in the first step of the study, that it is delicate to set up undoubtedly on the question of pollutants paternity. These difficulties are inherent at the conjunction of transversal and vertical flows which are very variable in an unconfined water.*

I. — INTRODUCTION

Dans le cadre de la restructuration des ressources en eaux souterraines en Artois et en Cambrésis, deux séries d'analyses isotopiques concernant le tritium, l'azote ^{15}N et le soufre ^{34}S ont été demandées à la Direction Départementale de l'Action Sanitaire et Sociale par l'intermédiaire de la Direction Départementale de l'Agriculture du Nord. Une de ces séries a été effectuée en avril 1979, l'autre en septembre 1979.

Cette triple analyse a porté sur huit puits du Cambrésis, puits choisis théoriquement en raison du contexte hydrogéologique (nappe profonde ou proche, teneur en nitrate faible ou forte, distance à la limite du bassin hydrologique).

Nous proposons ici une analyse portant sur une période de mesures très courte, les éventuelles variations saisonnières ne pouvant être mises en évidence.

Des cartes d'isoteneurs en nitrate (fig. 1) et en sulfate (fig. 2) ont été réalisées en 1979 (Arnoult, 1979) et permettent d'appréhender de manière globale le chimisme de la nappe et les causes probables des pollutions constatées.

Le but des analyses isotopiques est de permettre une meilleure appréhension de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines et, de ce fait, de définir une stratégie apte à éviter une extension des pollutions futures.

Il s'avère nécessaire de déterminer l'âge des eaux captées qui circulent dans l'ensemble de la région (datation par le tritium) et l'origine des composants chimiques (nitrates et sulfates) présents dans l'eau (mesure des variations du rapport isotopique $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ et $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$).

La figure 3 représente la carte piézométrique levée en octobre 1978, celle-ci est intéressante pour la con-

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

(**) Université de Franche-Comté, Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, 1, Place Leclerc, 25000 Besançon. Note présentée le 1^{er} Février 1984 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 7 Novembre 1984.

naissance du sens d'écoulement de la nappe qui permet la prévision de l'extension géographique des pollutions et aboutit à une meilleure implantation des captages. Une modélisation mathématique des flux de pollution, en cours de calage, apporte par ailleurs, des informations quantitatives complémentaires (Arnoult, 1981).

II. — RAPPEL DES RESULTATS ANTERIEURS

La carte des teneurs en nitrates (fig. 1) de la nappe de la craie nous permet de tirer les conclusions suivantes.

Les taux de nitrates dans les eaux souterraines du réservoir crayeux sont supérieurs à la valeur de 20 mg par litre dans 91 % des cas considérés et à la valeur de 40 mg/l dans 20 % des cas. On observe deux zones géographiques distinctes :

— la première correspond au Sud du Valenciennois, là où les faibles valeurs observées sont dues à la protection de la nappe par des terrains imperméables tertiaires et par la forêt de Mormal ;

— la deuxième correspond à la totalité des arrondissements de Cambrai ou d'Arras, là où est observé un fond de pollution de l'ordre de 20 à 25 mg/l et sur lequel se développent des secteurs à teneurs beaucoup plus fortes. Ce sont principalement le secteur NW de Bapaume (Sapignies, Mory, Ablainzeville) et NW d'Arras, dans la zone interfluve entre la Sensée et le ruisseau de l'Hirondelle, le secteur de Séranvillers au sud de Cambrai et la zone NE de Cambrai (Avesnes-le-Sec, Avesnes-les-Aubert).

La carte des isoteneurs en sulfates (fig. 2) nous montre la correspondance des anomalies nitrates-sulfates. Sachant que les sulfates existent en concentrations élevées dans les eaux usées urbaines et industrielles, nous pouvons relier leur présence à une pollution induite par l'activité humaine (eaux usées, déchets organiques animaux).

Dans le reste de la région, les nitrates présents dans la nappe semblent ne provenir que de l'activité agricole intensive.

Cette vision des choses n'est pas tout à fait satisfaisante dans la mesure où une étude hydrochimique doit apporter des réponses sûres conduisant ultérieurement à la suppression éventuelle de la source de pollution, au niveau en particulier de la protection des captages. Aussi avons-nous souhaité bénéficier du support de l'analyse isotopique en espérant confirmer nos premières hypothèses.

III. — LES ANALYSES ISOTOPIQUES : PRINCIPES ET GENERALITES

Les isotopes du milieu naturel obéissent à des lois de répartition identiques à celles qui régissent les réactions chimiques, mais une de leurs caractéristiques est qu'ils peuvent s'échanger facilement entre deux composés, sans l'intervention de réactions chimiques.

L'application de l'outil de la géochimie isotopique à la connaissance de l'hydrogéologie a bénéficié de progrès remarquables ces dernières années (Fritz et Fontes, 1980) et nous ne rappelons ici que les éléments utiles à la compréhension des résultats.

1) Le tritium.

Le tritium est un isotope radioactif instable de l'hydrogène. Cet élément se désintègre avec une période de vie de 12,26 ans et a été injecté en grande quantité dans la stratosphère lors des essais thermonucléaires et nucléaires. Ces essais ont débuté en 1953. Les valeurs d'unité tritium [1 unité tritium (U.T.) représente 1 atome de ^3H pour 10^{18} atomes d'hydrogène] dans les précipitations vont alors passer de 10 U.T. avant 1953 à 300 U.T. en 1954 avec, pour les années 1963-1964, un maximum de 6.000 U.T. Depuis la fin des essais, on observe une décroissance nette des valeurs (Fontes, 1976 ; Blavoux, 1978).

Le tritium est un indicateur du temps de transfert de l'eau vers la nappe. Une concentration inférieure à 5 U.T. signifie que l'âge de l'eau souterraine est supérieur à 40 ans. Entre 5 et 40 U.T., l'eau souterraine est le résultat d'un mélange d'eaux récentes et anciennes. L'eau souterraine est d'âge récent pour des concentrations supérieures à 40 U.T. (Fontes, 1976).

2) L'azote.

L'azote possède deux isotopes stables : ^{14}N qui représente 99,64 % de l'azote total et ^{15}N qui représente 0,36 % de l'azote total.

Les mesures de l'azote ^{15}N se font par rapport à l'air pris comme référence (composition isotopique moyenne de l'azote atmosphérique de la troposphère). Les résultats sont donnés sous la forme d'un "delta" (δ) qui correspond à :

$$\left(\frac{R \text{ étalon}}{R \text{ échantillon}} - 1 \right) \times 1.000$$

avec R : rapport de la concentration de l'espèce isotopique lourde sur la concentration de l'espèce isotopique légère.

L'isotope ^{15}N de l'azote peut provenir du milieu naturel par assimilation bactérienne de l'azote atmosphérique, par la fermentation des végétaux, ou encore par l'apport d'engrais artificiels ou ammoniacaux naturels (Mariotti *et al.*, 1975 ; Mariotti, 1982).

Il faut tenir compte néanmoins de la mobilité de ce traceur qui, par fractionnement isotopique, évolue constamment au sein du cycle naturel de l'azote.

3) Le soufre.

Les isotopes du soufre les plus courants sont le ^{32}S (95 %) et le ^{34}S (4,2 %). La valeur "delta"

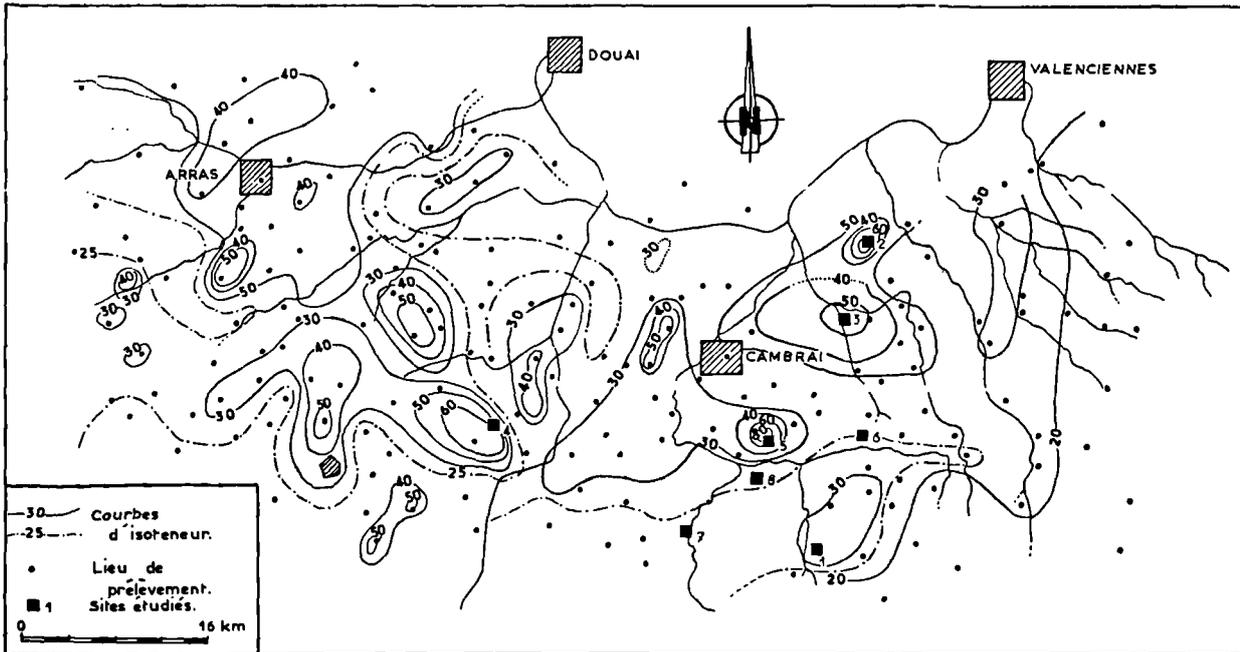


Fig. 1. — Carte des teneurs en nitrates (unités en mg/l) des eaux souterraines de la nappe de la craie (octobre 1978).
Fig. 1. — Map of nitrates concentrations (unit : mg/l) in the ground waters of the chalk water-table (october 1978).

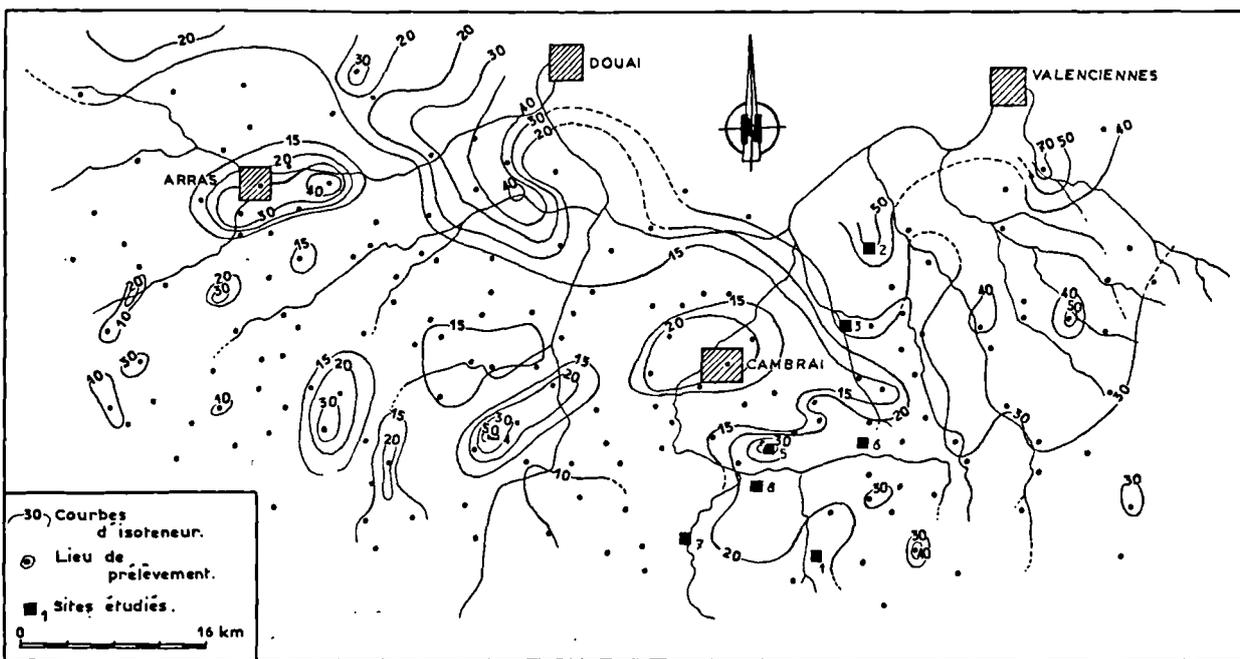


Fig. 2. — Teneurs en sulfates (unités en mg/l) des eaux souterraines de la nappe de la craie (octobre 1978).
Fig. 2. — Map of sulphates concentrations (unit : mg/l) in the ground waters of the chalk water-table (october 1978).

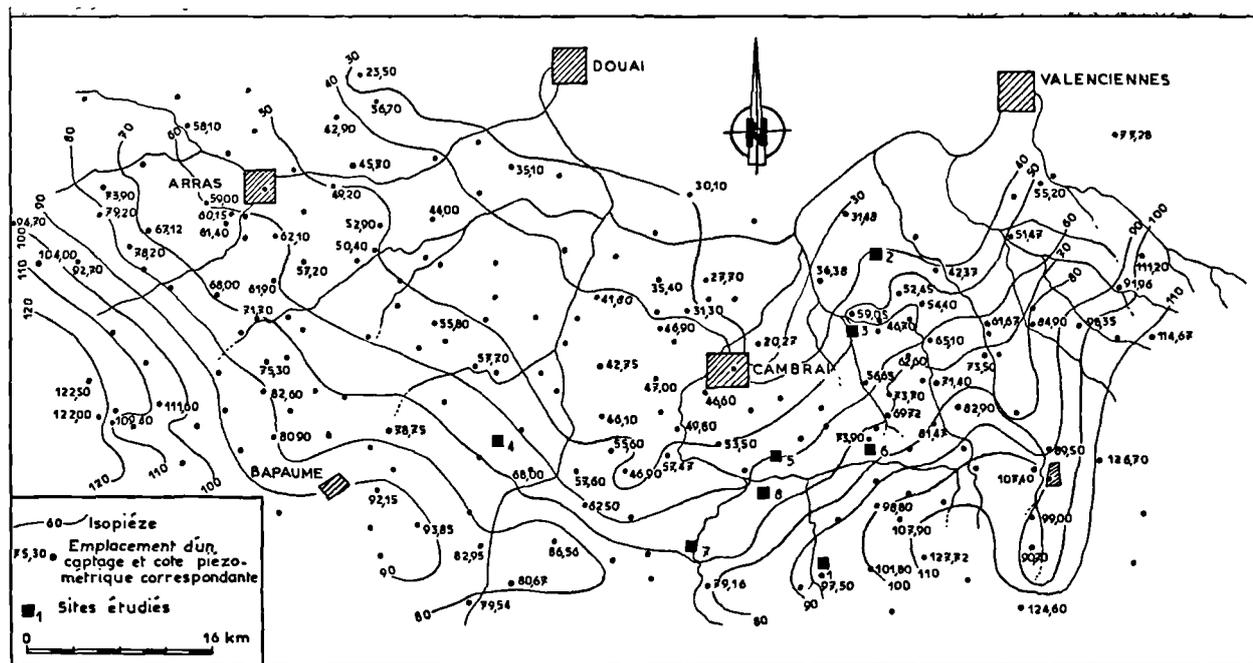


Fig. 3. — Courbes isopiézométriques de la nappe de la craie (unités en mètres) (octobre 1978).

Fig. 3. — Piezometrics contours of the chalk water-table (unit: metres) (october 1978).

obtenue se calcule de la même façon que dans le cas des nitrates et ses variations sont dues au fractionnement isotopique provenant des réactions physico-chimiques et biologiques au moment de la sédimentation et de l'activité bactériologique (la biosynthèse fait appel aux isotopes légers).

La présence de soufre dissous dans les eaux superficielles et souterraines peut être soit naturelle avec des domaines de valeurs définies (Rightmire *et al.*, 1974), soit due à une pollution de l'eau par des sulfates en solution. Il s'agit alors dans ce cas d'étudier les causes de pollution et de comparer les résultats aux analyses de l'eau supposée polluée (Bernard, 1979).

Des analyses isotopiques de référence ont été effectuées par divers auteurs et sont rapportées dans l'Annexe 1. Le "zéro" de l'échelle relative correspond à la teneur en ^{34}S d'un sulfure (Troilite du Cañon Diablo du Nouveau-Mexique, U.S.A.).

IV. — ETUDE DES CONCENTRATIONS EN TRITIUM

Les résultats des analyses isotopiques (Tableau I) dont l'échantillonnage a été réalisé en avril et en septembre 1979, montrent que sur les huit puits étudiés, quatre d'entre eux possèdent des teneurs comprises

entre 0 et 10 U.T. et les quatre autres, des teneurs comprises entre 10 et 20 U.T.

Dans le cas des trois autres captages (Banteux, Séravillers, Rieux), il est raisonnable de conclure à une eau relativement vieille, tout au moins à la période d'activité nucléaire 1963-1964.

Pour les cinq autres captages (Walincourt, Avesnes-le-Sec, Fontaine-au-Pire, Lesdain, Doignies), les teneurs élevées ne peuvent indiquer qu'un mélange d'eaux anciennes et d'eaux provenant de pluies antérieures à 1965. Il est cependant difficile d'établir une corrélation entre les teneurs en tritium et la profondeur de la nappe. Nous observons une relation totalement inverse pour le site de Banteux (nappe proche et eaux anciennes) et celui de Fontaine-au-Pire (nappe profonde et eaux récentes). L'interprétation de telles anomalies fait appel soit au concept d'un décalage de distribution des eaux tritiées dans des milieux non saturés d'épaisseur très variable (Smith et Richard, 1974; Baliff *et al.*, 1978; Duermael *et al.*, 1978), soit au concept d'un échange isotopique entre l'eau d'infiltration et l'eau de la matrice crayeuse (Foster, 1975). Une autre hypothèse est proposée ici : celle du mixage aléatoire dans l'espace et le temps des apports verticaux d'eaux jeunes (dont le volume ne représente qu'une infime partie de la réserve totale de l'aquifère) et des

Communes	Situation géographique	profondeur de la nappe (m)	Teneur en nitrates (mg/l)	Teneur en tritium (en U.T.)		¹⁵ N‰	³⁴ S‰	
				Avril 79	Sept. 79		Avril 79	Sept. 79
WALINCOURT-SELVIGNY n°1	Plateau (cote 140)	40	23,6 (Juillet 79)	11 ± 2	5 ± 2	+4,9 ± 0,1	+3,3 ± 0,2	+1,3 ± 0,2
AVESNES-LE-SEC n°2	Plateau (cote 70)	35	94,9 (Juin 79)	19 ± 3	17 ± 3	+7,2 ± 0,1	+3,9 ± 0,2	+0,9 ± 0,2
RIEUX-EN-CAMBRESIS n°3 (château d'eau)	Flanc de Vallée (cote 60)	15	53,9 (Juin 79)	3 ± 1	8 ± 2	+7,3 ± 0,1	+1,3 ± 0,1	0,0
DOIGNIES n° 4	Plateau (cote 100)	50	59,5 (Juin 79)	10 ± 2	4 ± 1	+ 6,5 ± 0,1	+3,8 ± 0,2	+2,1 ± 0,2
SERANVILLERS n° 5	Plateau (cote 105)	40	34,1 (Juillet 79)	3 ± 1	4 ± 1	+ 5,1 ± 0,1	-2,7 ± 0,2	-2,7 ± 0,2
FONTAINE AU PIRE n°6	Flanc de Vallée (cote 120)	46	30,4 (Sept. 79)	16 ± 3	8 ± 2	+ 4,9 ± 0,1	-3,3 ± 0,2	-3,7 ± 0,2
BANTEUX n° 7	Vallée sèche	5,58	32,2 (Juin 79)	4 ± 1	2 ± 1	+ 3,7 ± 0,1	-15,1 ± 0,2	-13,1 ± 0,2
LESDAIN n° 8	Vallée	23,2	31 (Sept. 79)	20 ± 3	12 ± 2	+ 6,2 ± 0,1	- 9,9 ± 0,2	-11,4 ± 0,2

Tableau I. — Résultats d'analyse et contexte des sites étudiés.

N.B. - Les numéros d'ordre correspondent à l'implantation des sites étudiés sur les trois figures n° 1, n° 2 et n° 3. Dates de l'échantillonnage : Avril 1979, Septembre 1979.

Table I. — Analysis results and context of studied sites.

N.B. - The array numbers are in relation with the position of field sites. Sampling dates : april 1979, september 1979.

apports latéraux d'eaux anciennes sollicitées par le pompage. Une imbrication de ce schéma avec le premier concept aboutit à des cas de figure fort complexes à interpréter à l'échelle d'un bassin hydrogéologique.

Une certaine relation semble se dégager entre les valeurs de transmissivité et la teneur en tritium dans certains secteurs du pays crayeux, notamment dans la région du bassin minier (Bernard, 1979). Cette observation confirme un des aspects de l'hypothèse précédente (sans toutefois être une règle). En effet, le site de Banteux, pour une transmissivité faible (Tableau II), présente une eau faiblement tritiée. Par contre, la transmissivité plus élevée du site de Fontaine-au-Pire, malgré une profondeur de nappe de 49 m, explique une valeur en tritium plus importante (16 U.T.) liée à un renouvellement plus rapide des eaux de nappe. Les autres sites montrent des valeurs non significatives :

— en période de hautes eaux (avril), cinq d'entre eux possèdent des teneurs en Tritium supérieures ou égales à 10 unités ;

— en période de basses eaux (septembre) les valeurs décroissent nettement et correspondent à la

venue d'eaux plus anciennes stockées dans la matrice crayeuse qui remplacent progressivement les eaux de circulation fissurale en absence d'infiltration d'eau de précipitation.

V. — ANALYSE DES TENEURS EN AZOTE 15 ET EN SOUFRE 34

Sur le tableau I sont reportés les deltas de ¹⁵N et ³⁴S. On constate que les valeurs de delta de l'azote sont comprises entre 3,7 et 7,3, ce qui montre une identité possible des caractéristiques chimiques des eaux captées avec le milieu naturel.

Nous pouvons dégager plusieurs points essentiels. En se référant aux analyses isotopiques étalons (annexes 1-2), nous constatons qu'il est difficile, voire impossible dans certains cas, de rechercher l'origine de l'azote des nitrates. Ainsi la valeur de ¹⁵N‰ relevée pour le captage d'Avesnes-le-Sec, nous fait conclure soit à des eaux de drainage — ce qui n'est pas le cas dans la réalité — soit à des apports en

Communes	Concentration en Nitrates (mg/l) Avril 79	Transmissivité en $10^{-2} m^2$	Teneur en ^{15}N des nitrates (en %)	^{15}N ‰ $\pm 0,1$ (avril 79)	Activité bactériologique
WALINCOURT	39	0,10	0,337	4,9	intense
AVESNES-LE-SEC	80	0,30	0,336	7,2	faible
RIEUX	47	0,15	0,339	7,3	nulle
DOIGNIES	51	5,00	0,338	6,5	importante
SERANVILLERS	27	0,10	0,335	5,1	moyenne à nulle
FONTAINE AU PIRE	24	1,00	0,336	4,9	nulle
BANTEUX	25	0,35	0,334	3,7	faible
LESDAIN	21	5,2	0,336	6,2	faible

Tableau II. — Relations entre les caractéristiques hydrauliques de la nappe de la craie, l'activité biologique et la teneur en ^{15}N .

Table II. — Hydraulic features relations between chalk water-table, biological activity and the ^{15}N concentration.

nitrates naturels des sols, nitrates qui existent dans tous les cas. La valeur de $^{34}S\%$ peut indiquer que nous nous trouvons en présence de rejets de sucrerie, d'eaux de drainage ou d'engrais ($-3,2 < ^{34}S < +14$), ce qui contredit le raisonnement antérieur.

L'hypothèse de travail peut être basée à la fois sur l'examen des analyses isotopiques de l'azote et sur l'étude des concentrations en éléments chimiques classiques. Nous pensons que les nitrates contenus dans les différents prélèvements proviennent en majeure partie des engrais artificiels auxquels s'ajoutent parfois des composés azotés issus de l'activité humaine (eaux usées, déchets organiques, animaux), dans des proportions malheureusement impossibles à déterminer.

Cette hypothèse est basée sur l'utilisation du diagramme d'identification de l'origine des nitrates établi par Letolle et Mariotti (1977) qui permet, en reportant la teneur relative de ^{15}N par rapport aux nitrates, d'indiquer que :

— les sites de Rieux et de Doignies sont contaminés par des nitrates issus de rejets organiques (épanchages de lisiers, eaux usées...);

— le site d'Avesnes-le-Sec est affecté par des nitrates artificiels (engrais);

— les sites de Banteux, Lesdain, Fontaine-au-Pire et Séravillers voient le mélange des nitrates naturels et des nitrates artificiels.

Les teneurs en ^{34}S des sulfates des sites de Banteux et de Lesdain ne correspondent pas, dans la zone d'étude, à une véritable pollution mais plutôt à une

évolution au sein du cycle géochimique du soufre (oxydation de pyrites, lessivage d'évaporites) (Marce, 1978) avec des deltas très fortement négatifs.

Il apparaît que pour des prélèvements très dispersés dans le temps, l'analyse isotopique de l'azote et du soufre ne puisse pas se suffire à elle-même. Cette dernière doit être considérée comme un élément supplémentaire à une étude hydrochimique complète. Nous avons mis en évidence les difficultés d'interprétation des résultats, difficultés qui ne peuvent être surmontées que par une connaissance parfaite du milieu naturel. En effet, le prélèvement analysé ne constitue qu'un maillon de toute une chaîne de réactions chimiques, biologiques et bactériologiques.

Les difficultés d'interprétation proviennent à la fois du mixage d'eaux matricielle ou fissurale ainsi que du fractionnement isotopique, surtout dans le cas de l'azote qui réagit continuellement dans le cycle naturel (Mariotti, 1982). Dans quelles proportions ce cycle intervient-il dans l'assimilation des nitrates provenant d'engrais artificiels? Enfin, il serait souhaitable d'effectuer des prélèvements à différents niveaux de l'aquifère (une stratification des éléments chimiques étant possible) mais aussi sur des échantillons d'eau extraits de la matrice crayeuse (par centrifugation par exemple).

CONCLUSION

L'analyse du mécanisme de la pollution des eaux souterraines en zone rurale apparaît complexe et ne permet pas actuellement de trancher définitivement sur

l'origine des modes de pollution, que ce soit avec des analyses chimiques ou des analyses isotopiques.

Il apparaît difficile d'avancer des conclusions précises sans connaître tous les facteurs chimiques, bactériologiques, pédologiques et hydrologiques.

Le réservoir crayeux montre la particularité de posséder à la fois une circulation hydrologique de fissures et de matrice. Les échanges des polluants s'effectuent ainsi selon le différentiel des concentrations entre la

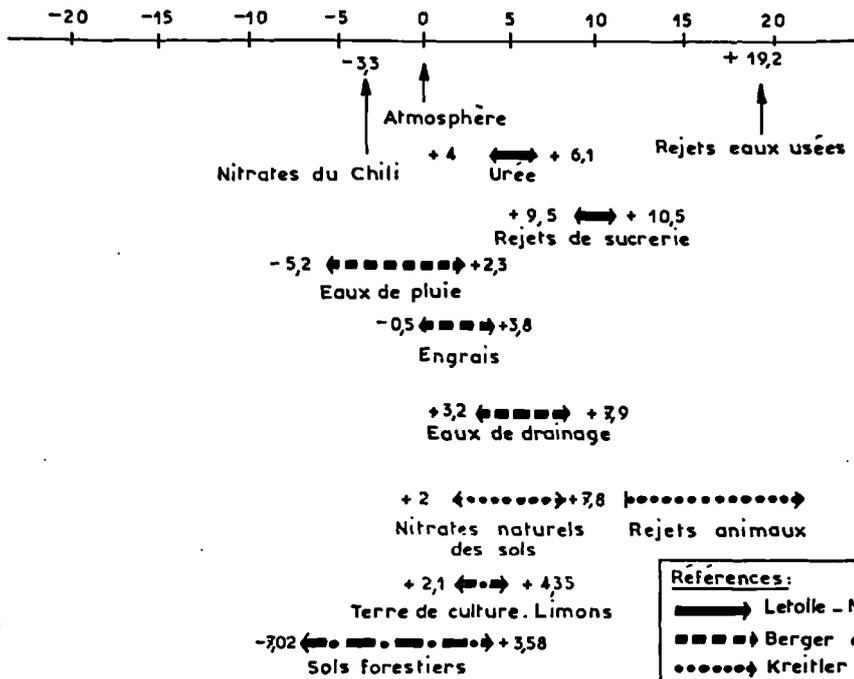
matrice à forte porosité et la fissure à porosité plus faible. Il faut associer en outre à ces échanges l'hétérogénéité des caractéristiques hydrauliques du réservoir crayeux selon qu'il est situé sur plateau ou en vallée.

Remerciements. - Cette étude a été réalisée en collaboration et avec le financement des D.D.A.S.S., des D.D.A. et du S.R.A.E. des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Nous remercions vivement ces organismes ainsi que Monsieur Mariotti, de l'Université Pierre et Marie Curie, pour ses conseils.

BIBLIOGRAPHIE

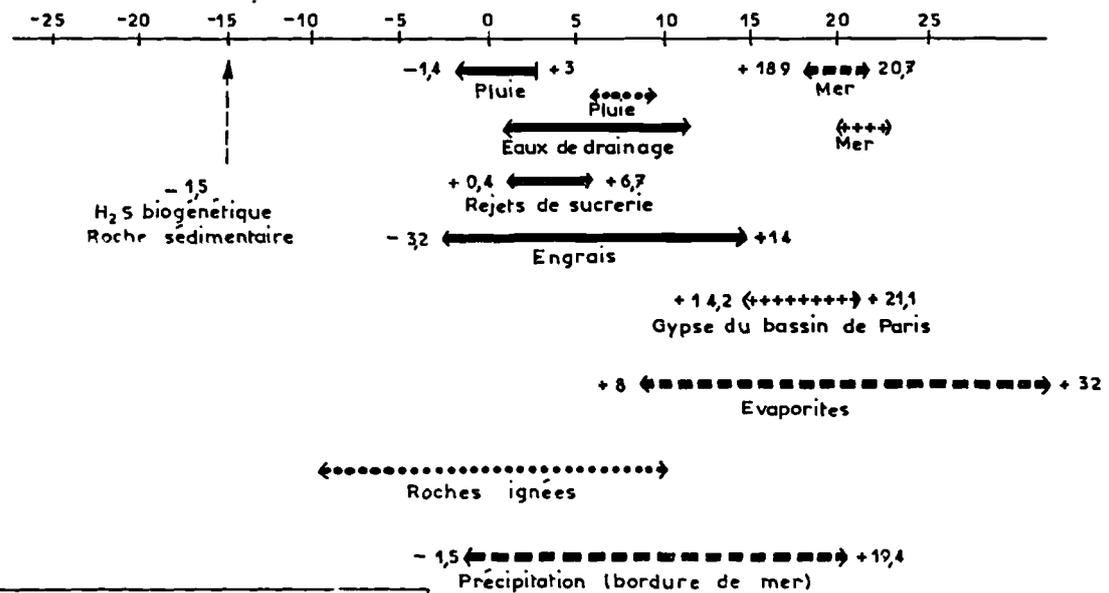
- 1) ARNOULT P. (1979). — Contribution à l'étude de la nappe de la craie en Artois-Cambrésis. *D.E.A.*, Univ. de Lille I, 50 p.
- 2) ARNOULT P. (1981). — Gestion qualitative et quantitative des eaux souterraines en zone agricole. Application à la nappe de la craie du Cambrésis et de l'Artois. *Thèse de 3^e Cycle*, Univ. de Lille I, 206 p.
- 3) BALLIF J.L. et DUTIL P. (1978). — Décalage chronologique entre le début de la remontée de la craie et la reprise du drainage des sols en Champagne. *Colloque de Rouen sur l'Hydro. du Bassin de Paris*, t. 1, p. 37.
- 4) BERNARD D. (1979). — Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France. *Thèse de 3^e Cycle*, Univ. de Lille I, p. 79.
- 5) BLAVOUX B. (1978). — Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Univ. de Paris VI. 333 p.
- 6) DUERMAEL G., MOREAUX P. (1978). — Infiltration en aquifère crayeux; mouvements d'eau dans la zone non saturée et leur incidence sur l'évapotranspiration et l'alimentation de la nappe. *Coll. de Rouen sur l'Hydro du Bassin de Paris*, t. 1, p. 235.
- 7) FONTES J.C. (1976). — Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Univ. de Paris VI. 208 p.
- 8) FOSTER S.S.D. (1975). — The chalk groundwater tritium anomaly. A possible explanation. *Journ. of Hydro.*, n° 25. p. 159.
- 9) FRITZ P. et FONTES J.C. (1980). — Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. *Ed. Elsevier*, vol. 1, 545 p.
- 10) LETOLLE R. et MARIOTTI A. (1977). — Détermination de l'origine des pollutions azotées par le marquage isotopique naturel. *Colloque d'Orléans sur la Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine*. t. 2, p. 239-241.
- 11) MARCE A. (1978). — Contribution des méthodes isotopiques à l'étude des modalités d'alimentation et de renouvellement des réserves de quelques nappes souterraines du Maroc. *I.A.E.A.*, Vienne, SM 228/25.
- 12) MARIOTTI A. (1982). — Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'Azote. *Thèse de Doct. d'Etat ès Sc. Nat.*, Univ. Paris VI, 476 p.
- 13) MARIOTTI A., LETOLLE R., BLAVOUX B., CHASSAING F. (1975). — Détermination, par les teneurs naturelles en N15, de l'origine des nitrates. Résultats préliminaires sur le bassin de Melarchez. *C.R. Ac. Sc.*, Paris. t. 280, D, p. 423.
- 14) RIGHTMIRE C.T., PEARSON F.J., BACK W. (1974). — Distribution of sulphur isotopes of sulfates in groundwater from the principal artesian aquifer of Florida and the Edwards aquifer of Texas (U.S.A.). *I.A.E.A.*, Vienne, SM 182/39.
- 15) SMITH D.B., RICHARDS H.J. (1974). — Les techniques à base de tritium naturel. *Bull. B.R.G.M.*, III, 2.

* * *



Références:
 —————> Letolle - Mariotti (1975)
 ■■■■■> Berger et al. (1977)
 ●●●●●> Kreitler (1975)
 ■●●●●> Riga et al. (1976)
 +++++> Bosch et al. (1978)

Annexe 1. Deltas $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ de référence



Annexe 2. Deltas $^{34}\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ de référence

Annexes 1 et 2. — Analyses isotopiques de substances naturelles et artificielles du cycle de l'Azote et du Soufre.
 Appendix 1 and 2. — Isotopic analysis of natural and artificial substances in the nitrogen and sulphur cycle.

Caractérisation des craies du Nord de la France par porosimétrie au mercure

Characterization of chalks from the North of France by Hg porosimetry

par C. DOREMUS (*) et J.P. HENRY (**)

Résumé. — Le volume poreux de craies pures et marneuses, de différents teneurs en argiles, est caractérisé par porosimétrie au mercure à partir des deux cycles d'injection-désorption. Il est montré que la teneur en argiles de 10 % joue un rôle prépondérant dans cette caractérisation. En particulier, pour des teneurs supérieures à 10 %, les rayons des vides sont inférieurs à 0,1 μm . Ce seuil de 10 % est également retrouvé pour les caractéristiques rhéologiques. Il est alors proposé de considérer les craies comme "blanches" pour des teneurs en argiles en-deçà de 10 % et comme "argileuses" pour des teneurs au-delà de 10 %. Pour les craies dites "blanches", les propriétés mécaniques dépendent essentiellement de la porosité $\bar{\eta}$ déterminée à partir du volume des vides et du volume occupé par les feuillets argileux.

Abstract. — *The pore volume of pure and marlaceous chalks containing various amounts of clay minerals is described by Hg porosimetry. The method is based on the two cycles of Hg injection-desorption. The experiments show that the 10 % content in clay minerals is a critical value for the characterization. For example when the rate is over 10 %, all the pore radius are less than 0,1 μm . This critical value also appears for the rheological properties of the chalk. Chalk can then be considered as "pure" or "white" when the content in clay minerals is less than 10 % and marlaceous otherwise. For pure chalk, the mechanical properties essentially depend on the porosity $\bar{\eta}$ which is calculated from the void volume and from the volume of the clay minerals.*

I. — INTRODUCTION

Les craies constituent le substrat de la plupart des ouvrages importants de Génie Civil à venir dans la région Nord (Flandres, Artois, Picardie). Elles apparaissent comme un matériau au comportement mécanique intermédiaire entre celui d'un sol et celui d'une roche. Elles sont caractérisées par une granulométrie très fine et une porosité variable.

Les propriétés des craies, comme des roches en général (résistances mécaniques, paramètres rhéologiques, gonflement...), dépendent essentiellement de la microstructure, c'est-à-dire de la porosité et de la teneur en impuretés (argiles, quartz, glauconie...). Dans les études géotechniques, il est intéressant de connaître grossièrement les propriétés mécaniques en fonction de la teneur en impuretés et de la porosité.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux craies blanches et marneuses du Nord de la France dans l'optique de définir par un essai très simple, la porosimétrie au mercure, une classification entre craie blanche dont les propriétés seront dues à la présence d'une plus ou moins grande porosité et craies marneuses dont les propriétés mécaniques et surtout rhéologiques seront liées à une teneur plus ou moins importante en argiles. Pour définir cette classification simplifiée, nous supposons que les particules argileuses se localisent dans le volume poreux.

Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à définir de façon précise le volume poreux par porosimétrie au mercure. Dans un deuxième temps, nous relierons les résultats obtenus par porosimétrie et les propriétés rhéologiques de ces craies.

(*) Actuellement : Bureau d'Etude Botte-Bagneux, à Tourcoing.

(**) Laboratoire de Mécanique des Matériaux Fragiles, E.U.D.I.L., Université des Sciences et Techniques de Lille.
Note présentée le 1^{er} Février 1984 et acceptée pour publication par le Conseil de la S.G.N. le 7 Novembre 1984.

II. — DESCRIPTION DES CRAIES ETUDIEES

Les craies retenues dans la présente étude présentent un large échantillonnage allant de la craie blanche à la craie marneuse.

Ces craies ont été étudiées par Dorémus (1). La correspondance entre le faciès et le numéro d'ordre est rappelée dans le tableau I. Par la suite, textes et figures se référeront le plus souvent à cette numérotation. Dans ce tableau figurent également les teneurs en CaCO₃ obtenues par calcimétrie et les teneurs en argiles déterminées à partir d'analyses chimiques et calculs en fonction des minéraux dosés. Le tableau II donne les principaux constituants en impuretés des craies décelés par l'analyse diffractométrique aux rayons X du résidu insoluble à HCL.

III. — POROSITE DES CRAIES

La description du volume poreux (porosité, histogramme de rayon de pores) des craies retenues a été faite par porosimétrie au mercure en utilisant deux cycles de montée en pression. Cette procédure (1, 2, 3, 4) a l'avantage de préciser :

- la surface spécifique (SSp),
- le volume piégé (Vp).

Rappelons que le volume piégé (Vp) est défini par le rapport du volume du mercure piégé dans l'échantillon après rétablissement de la pression atmosphérique sur le volume total de mercure injecté à la pression maximale du porosimètre.

1) Résultats.

Dans cette étude, les rayons d'entrée de pores choisis pour le dépouillement des courbes pression-injection de mercure sont (en Angströms): 75.000, 25.000, 12.500, 6.818, 4.687, 3.571, 2.884, 2.419, 1.829, 1.470, 1.229, 1.056, 925, 742, 496, 373, 298, 249, 187, 149, 124, 106 et 93. Notons que le rayon d'entrée de pore (r), est relié à la pression d'injection de mercure (p), par :

$$r (\text{Å}) = \frac{75.000}{p \text{ (bars)}}$$

Sur chaque craie, il a été procédé à un cycle complet (chargement-déchargement) et à une deuxième montée en pression. Les résultats présentés sont des moyennes de trois essais par échantillon repéré. La porosité obtenue est reportée dans le tableau I. La fig. 1 donne les histogrammes lissés pour les classes de pores définies précédemment. A partir de ces histogrammes, l'on peut en déduire que le volume piégé (Vp) pour chaque craie et le facteur de forme S à partir des pics des histogrammes de descente et

Provenance	N°	Lithologie	Position stratigraphique	CaCO ₃ %	Argiles %	porosité n
HAUBOURDIN (Nord)	1	Craie blanche	SENONIEN (Coniacien)	96,6	0	38,9
	2	Craie grise	TURONIEN sup.	83,4	8,4	25,0
	3	Tun niveau durci	" "	95,4	0	8,2
DANNES-CAMIERES (Pas-de-Calais)	4	Craie marneuse, verdâtre microlitée	TURONIEN inf.	92	2,4	22,4
	5	Niveaux durcis dans la craie blanche	CENOMANIEN sup.	90,2	7,4	5,8
	6			92,7	4,5	24,3
	7	Craie blanche à jaunâtre	" "	89,3	3,9	36,2
	8			83,2	4,7	30,9
	9	niveau durci dans la craie grise	CENOMANIEN moyen	88,7	4,8	24,4
	10	craie grise, marneuse, à marcssite	" "	82,6	5,3	28,0
	11	craie dure, très marneuse noirâtre	CENOMANIEN Inf.	72,5	13,5	21,8
	12			64,1	25,2	22,0
	13	craie "bleue" très marneuse	" "	72,9	19,6	23,7

Tableau I. — Définition des craies étudiées.

Table I. — Characterization of the studied chalks.

	Smectites	Kaolinite	(Illite) Muscovite	Chlorite	Qz	Glauconite	Divers
1			**		**		
2	*	*	**		**		
3					**	**	
4		**	**		**		
5	*	**	**	*	**		
6	*	**	**	*	**		
7	*	**	**	*	**		
8	*	**	**	*	**		+ cristobelite
9	-	**	**		**		+ clinoptilo- lite
10	**	*	**		**		+ cristobelite
11	***	*	**		**		+ clinoptiloli- te
12	***	*	**		**	*	
13	**	*	**		**	*	

Tableau II. — Principaux constituants des craies décelés par l'analyse diffractométrique aux rayons X, du résidu insoluble à HCL.

Table II. — Main components of the chalks (X-ray determination).

de deuxième montée. Rappelons que le facteur S traduit la forme du pore ($S = 2$ à 3 pour les pores cylindriques). Les valeurs ainsi obtenues sont reportées dans le tableau III, de même que les surfaces spécifiques calculées sur le premier cycle à partir de vides cylindriques dont le rayon est le rayon moyen d'entrée du mercure. Les valeurs ainsi obtenues sont du même ordre que celles déterminées sur d'autres craies [Grande-Bretagne, Normandie..., voir par ex. Tallon (10)].

2) Rayon moyen d'entrée.

La première remarque que l'on puisse faire à la lecture de la fig. 1 est que le rayon moyen d'entrée des pores (r) des craies étudiées se situe entre $0,5$ et $0,05 \mu\text{m}$. La valeur maximale correspond aux interstices de l'assemblage des grains de calcite de l'ordre de $1 \mu\text{m}$, assemblage par ponts.

Qualitativement, le pic principal se déplace vers les diamètres d'entrée les plus faibles au fur et à mesure que la teneur en argile augmente, c'est-à-dire au fur et à mesure que les particules argileuses obturent le volume poreux. Afin de décrire l'importance prise par les argiles, nous proposons d'utiliser le paramètre K qui sera égal au rapport du volume des vides dont la taille est inférieure de $0,1 \mu$ sur le volume total des vides.

Dans la fig. 2, le rapport K est étudié en fonction de la teneur massique en argile de la craie ; au-delà d'une teneur de 10% , l'on remarque que le facteur K est très voisin de 1, c'est-à-dire qu'au-delà de cette teneur les particules argileuses joueraient vis-à-vis de cette classification un rôle prépondérant dans le volume poreux des craies.

Remarquons que la valeur critique de 10% de teneur en argile correspond à une occupation de 20 à 30% du volume poreux fictif.

Cette valeur critique de 10% de teneur en argile est retrouvée également lorsque l'on considère les volumes piégés (fig. 3). Pour des faibles teneurs en argile, les volumes piégés sont importants, ce qui traduit les fortes variations de diamètre des pores de la structure crayeuse ; lorsque la teneur en argile est faible $\leq (12 \%)$ et au fur et à mesure que celle-ci augmente, les feuillets remplissent les gros vides, diminuant ainsi les irrégularités et par conséquent les volumes piégés. Au-delà d'une teneur de 10 à 12% en argile, il semblerait que l'on retrouve les particules argileuses distribuées dans tout le volume et notamment dans les rétrécissements de pores de la matrice crayeuse ; ce qui induit leur obstruction, faisant ainsi diminuer les rayons de pores et à nouveau croître les irrégularités des vides, et en conséquence, le volume piégé.

En ce qui concerne les surfaces spécifiques, les résultats obtenus à partir du dépouillement du premier cycle sont reportés dans le tableau III. De nombreux auteurs ont montré qu'un tel calcul surestimait fortement les surfaces spécifiques ; Hill (2) propose une valeur égale à $SSp (1 - Vp)$. Mais cette valeur subit les doubles fluctuations enregistrées dans la mesure de SSp et de Vp . Nous proposons de calculer les surfaces spécifiques à partir du deuxième cycle en faisant remarquer qu'au cours de ce cycle, on n'enregistre que les vides correspondant aux étranglements, c'est-à-dire les petits vides, et ceci avec une bonne précision ; on laisse de côté les poches accessibles par ces petits vides qui ont alors peu d'importance du point de vue surface spécifique. La mesure obtenue devrait être une mesure par défaut. La fig. 4 fait ressortir que les deux techniques de dépouillement conduisent à des résultats voisins.

Les surfaces spécifiques obtenues selon la technique proposée sont comprises entre 1 et $3 \text{ m}^2/\text{g}$ (fig. 5) et sont proportionnelles à la teneur en argile. La corrélation n'est pas très nette car une partie de la surface spécifique est liée au volume poreux de la craie.

Afin de montrer l'importance du seuil de 10% de teneur en argile, des essais mécaniques ont été réalisés en traction (essais Brésilien) et en compression à vitesse lente ($5 \mu\text{m}/\text{mn}$) sur échantillons secs et saturés en eau. Ces types d'essais permettent de mettre en lumière l'influence de l'argile sur les propriétés rhéologiques des craies. Les rapports ρ des résistances sur échantillons secs et saturés et des modules d'Young mesurés en compression dans les mêmes conditions sont synthétisés dans la fig. 6. On constate une fois encore que pour des teneurs inférieures à 10% en argile, les rapports ρ varient entre $2,5$ et 5 mais que, dès que ces teneurs sont supérieures à 10% , les rapports sont supérieurs à 20 et même 50 . Puisque

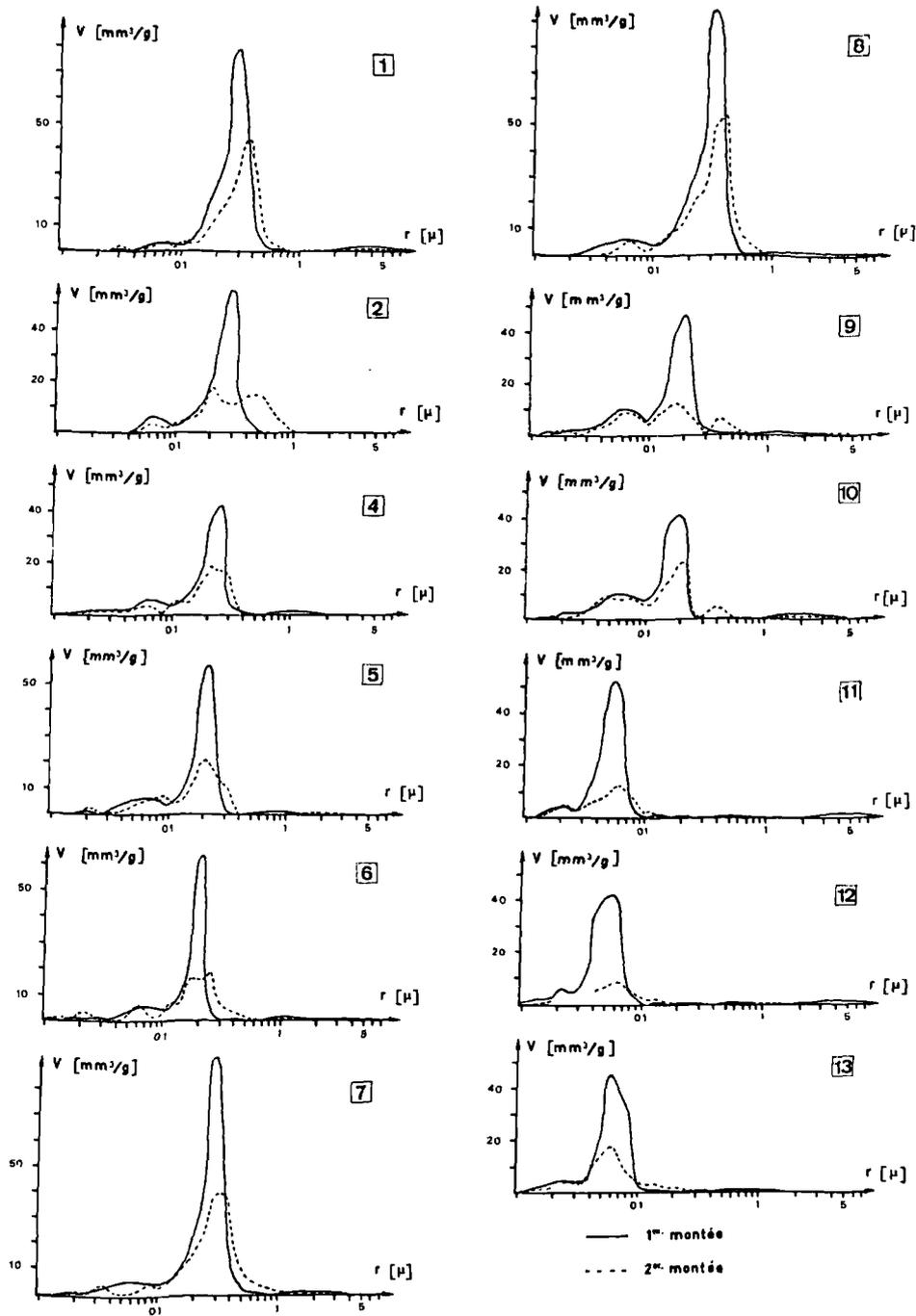


Fig. 1. — Histogrammes lissés de porosité des différentes craies étudiées.

Fig. 1. — Pore volume distribution of the studied chalks.

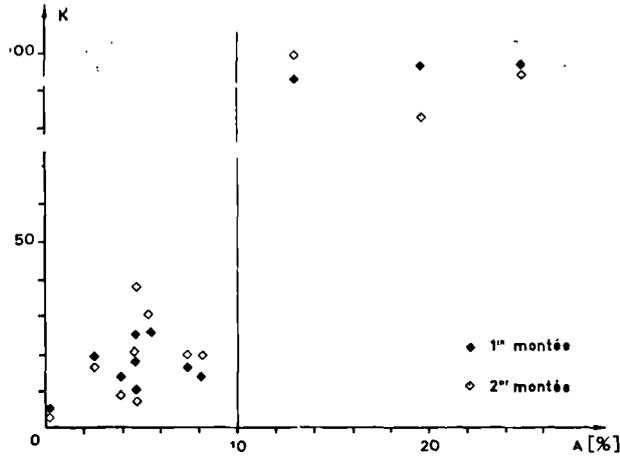


Fig. 2. — Evolution du rapport K en fonction de la teneur massique en argiles A.

Fig. 2. — Variation of the parameter K with the clay mineral content A.

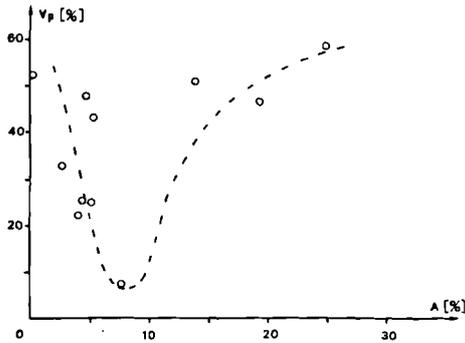


Fig. 3. — Evolution du volume piégé (V_p) en fonction de la teneur massique en argiles A.

Fig. 3. — Evolution of V_p with the clay mineral content A.

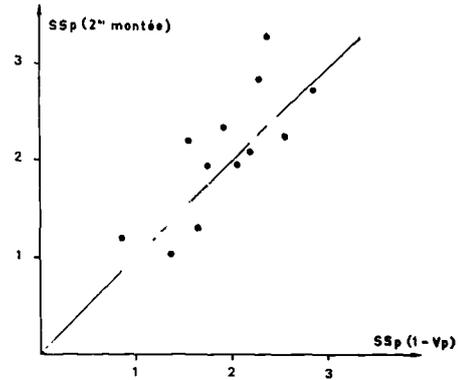


Fig. 4. — Corrélation entre la surface spécifique obtenue par le dépouillement du second cycle et la surface spécifique calculée selon Hill (2).

Fig. 4. — Correlation between the Specific Surface calculated from the second cycle and the Specific Surface given by Hill (2).

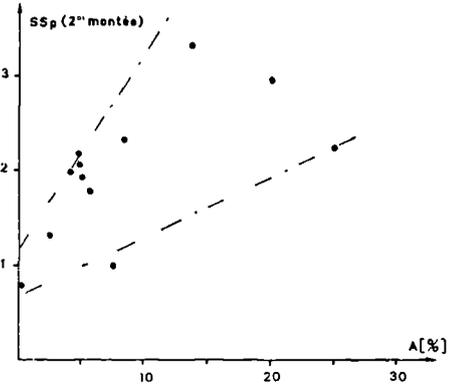


Fig. 5. — Surface spécifique des craies en fonction de la teneur massique en argiles A.

Fig. 5. — Variation of the Specific Surface with the clay mineral content A.

Craie n°	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Volume piégé	0,51	0,39	0,64	0,33	0,43	0,25	0,22	0,25	0,47	0,43	0,57	0,51	0,58
S SP (m ² /g)	1,77	3,18	1,25	2,52	2,42	2,29	2,61	2,92	2,88	3,25	5,37	4,52	6,02
S	2,4	3,4		3,8	2,9	2,3	2,1	2,6	3,1	2,6	5,4	6,6	~6

Tableau III. — Volume piégé (V_p), Surface spécifique (SSp) et facteur de forme (S) des différentes craies.

Table III. — Parameters of the pore volume (V_p , SSp and S) for the different chalks.

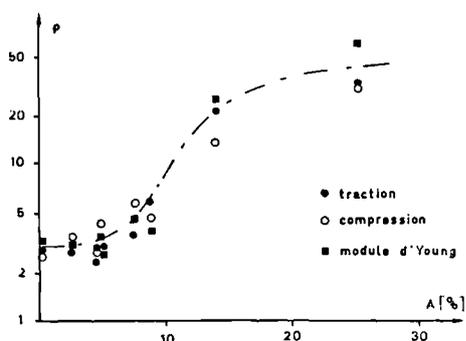


Fig. 6. — Evolution du rapport ρ des caractéristiques mécaniques sur échantillons secs et saturés en eau en fonction de la teneur massique en argiles A. (Essais effectués à vitesse lente : $5 \mu\text{m}/\text{mn}$).

Fig. 6. — Evolution of the rate between the mechanical properties on dry and saturated specimens with the clay mineral content A (Rate of the tests : $5 \mu\text{m}/\text{mn}$).

les essais sont effectués à vitesse lente, ceci signifie que lorsque la teneur en argile dépasse 10 % les argiles jouent un rôle prépondérant dans les propriétés mécaniques des craies (propriétés dépendant fortement du temps), alors que lorsque cette teneur est inférieure à 10 % l'on peut considérer que seule la matrice crayeuse dicte les propriétés mécaniques.

IV. — APPLICATIONS

Lorsque la teneur en argiles est inférieure à 10 %, nous proposons, au vu des résultats précédents, de comptabiliser le volume des feuillets argileux comme vide en ce qui concerne les propriétés mécaniques car ceux-ci ne semblent pas intervenir de façon notable dans les mécanismes de déformation.

Ainsi, nous définissons une porosité fictive $\bar{\eta}$ par

$$\bar{\eta} = \frac{V_v + V_A}{V_T} \quad \text{si } A < 10 \%$$

$$\bar{\eta} = \frac{V_v}{V_T} \quad \text{si } A \geq 10 \%$$

avec V_v : volume des vides mesuré au porosimètre à mercure

V_A : volume des argiles

V_T : volume total de l'échantillon testé.

Les résultats des essais de compression et de K_{10} obtenus par Henry (9) et Dorémus (1) sont alors redépouillés en fonction de $\bar{\eta}$.

1) Résistance à la compression.

Les essais de compression étant effectués à vitesse lente ($5 \mu\text{m}/\text{mn}$), il n'est possible de s'intéresser qu'aux essais sur échantillons secs, afin que les modifications de comportement en fonction du temps apportées par la présence d'argiles interviennent le moins possible. Dans ce cas, les résistances en compression en fonction de la porosité fictive $\bar{\eta}$ sont reportées dans la fig. 7 sous la formulation proposée par Ryshevitch (6) et Duckworth (7) :

$$\sigma_c = \sigma_0 \exp(-b\bar{\eta})$$

Les valeurs des paramètres σ_0 et b obtenues dans le cas des roches calcaires sont égales à :

$$\sigma_0 = 440 \text{ MPa}$$

$$b = 9,12$$

La fig. 7 montre que les résultats expérimentaux sont en bon accord avec la relation empirique précédente. La formulation proposée en fonction de $\bar{\eta}$ supprime les difficultés rencontrées autour de la porosité η de 26 % (1).

Au cours des essais de compression, les courbes contraintes déformations longitudinales présentent toutes une partie linéaire permettant le calcul du module d'Young élastique tangent. Bien que chaque module d'Young soit établi à partir de 10 essais, la dispersion des résultats est forte. L'interprétation des résultats en fonction de la porosité fictive $\bar{\eta}$ selon la loi de Spriggs (8) :

$$E = E_0 \exp(-b\bar{\eta})$$

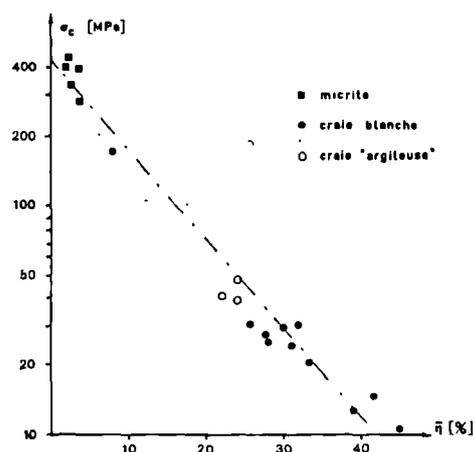


Fig. 7. — Variation de la résistance à la compression des roches calcaires en fonction de la porosité fictive $\bar{\eta}$ (essais sur échantillons secs).

Fig. 7. — Variation of the compression strength with the fictitious porosity (dry specimens).

est traduite par la fig. 8, avec les paramètres :

$$E_0 = 80 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$b = 8,04$$

Une fois encore, l'utilisation de la porosité fictive $\bar{\eta}$ supprime les difficultés rencontrées par Dorémus (1) pour des porosités η de l'ordre de 26 %.

2) Essais de K_{IC} .

K_{IC} traduit la résistance à la propagation des fissures. Pour des commodités d'essais, le montage de flexion trois points sur éprouvettes pré-entaillées a été utilisé. La vitesse d'essai, choisie de façon à propager la fissure de façon instable, est rapide, d'autant plus rapide que la compliance de l'éprouvette est importante. Dans ce cas, l'importance du temps que pourrait imposer la présence des argiles est fortement atténuée, et les mesures que l'on obtient dépendent essentiellement de la microstructure de la partie carbonatée. Les résultats obtenus par ailleurs (9) sont redéveloppés en fonction de la porosité fictive $\bar{\eta}$ (fig. 9). Avec une dispersion très faible, les résultats sont représentés par des loi du type

$$K_{IC} = 4 \exp(-5,44\bar{\eta}) \text{ pour des échantillons secs,}$$

$$K_{IC} = 4 \exp(-7,88\bar{\eta}) \text{ pour des échantillons saturés en eau avec } K_{IC} \text{ en daN.mm}^{-3/2}.$$

CONCLUSION

L'étude des différentes propriétés mécaniques des craies permet de montrer que celles-ci dépendent de la porosité et de la présence d'argiles. Lorsque les argiles sont en teneur inférieure à 10 %, celles-ci influent très peu sur les propriétés mécaniques et, notamment, ne conduisent pas à d'importants phénomènes différés. Dans ce cas, l'on obtient d'excellentes corrélations entre une porosité fictive $\bar{\eta}$ et les résistances mécaniques, module d'Young et facteur d'intensité de contrainte critique. La porosité fictive est alors calculée en additionnant la porosité obtenue par porosimétrie au mercure et le volume unitaire des argiles.

Le seuil de 10 % peut donc être considéré comme séparant les craies dites "blanches" et les craies dites "argileuses". Une détermination rapide de l'appartenance de la craie à l'une de ces deux classes sera effectuée également par un essai de porosité au mercure. Dans ce cas, nous proposons d'utiliser le rapport K égal au rapport du volume des vides dont la taille est inférieure à $0,1 \mu\text{m}$ sur le volume total des vides; les craies seront considérées comme "argileuses" lorsque ce rapport est voisin de 1.

Remerciements. — Ce contrat a été en partie réalisé grâce à une aide de la D.G.R.S.T. (contrats n° 78.07.0229 à 78.07.0232).

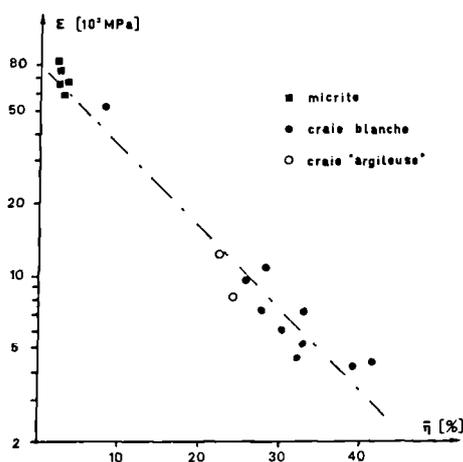


Fig. 8. — Variation du module d'Young des roches calcaires en fonction de la porosité fictive $\bar{\eta}$. (Essais de compression sur échantillons secs).

Fig. 8. — Variation of the Young modulus with the fictitious porosity (dry specimens).

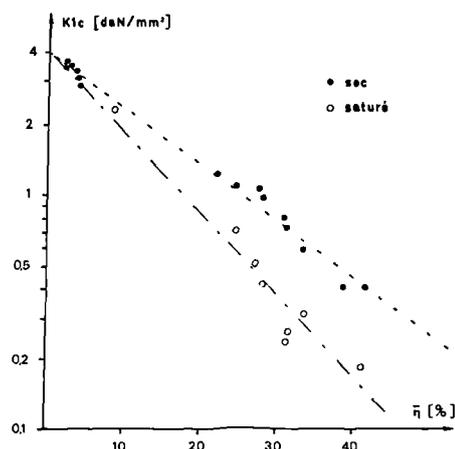
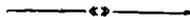


Fig. 9. — Variation de K_{IC} pour les roches calcaires en fonction de la porosité fictive $\bar{\eta}$.

Fig. 9. — K_{IC} variation with fictitious porosity.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) DOREMUS C. (1978). — Les craies du Nord de la France. Corrélations entre la lithostratigraphie, la microstructure et les propriétés mécaniques. *Thèse de spécialité*, Université de Lille I, 132 p.
- 2) HILL R.D. (1960). — A study of pore size distribution of fired clay bodies. *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, 59 (6), p. 189-212.
- 3) FREVEL L.K. et KRESSLEY L.J. (1963). — Modifications in mercure porosity. *Analytical Chemistry*, 35 (10), p. 1492-1502.
- 4) PELLERIN F.M. (1980). La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, 106, p. 105-116.
- 5) HENRY J.P. (1978). — Mécanique linéaire de la rupture appliquée à l'étude de la fissuration et de la fracture de roches calcaires. *Thèse d'Etat*, Université de Lille I, 182 p.
- 6) RYSHKEWITCH E. (1953). — Compression strength of porous sintered alumina and zirconia. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 36, (2), p. 65-68.
- 7) DUCKWORTH W. (1953). — Discussion of Ryshkewitch paper. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 36 (2), p. 68.
- 8) SPRIGGS R.M. (1961). — Expression for effect of porosity on elastic modulus of polycrystalline refractory materials, particularly aluminium oxyde, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 44 (12), p. 628-629.
- 9) HENRY J.P. et PAQUET J. (1977). — La ténacité des roches calcaires : influence des paramètres microstructuraux et de l'environnement. *Mech. Res. Comm.*, 4 (3), p. 193-198.
- 10) TALLON J.P. (1976). — Influence de la texture sur certaines propriétés géotechniques de craies franches. *Thèse Docteur-Ingénieur*, Paris VI.



Sont en vente au Siège de la Société :

MEMOIRES (*)

Tome I, n° 1. — Ch. BARROIS, <i>Recherches sur le terrain crétacé de l'Angleterre et de l'Irlande</i> , 1876, 232 p.	336,00 F.
n° 2. — P. FRAZER, <i>Géologie de la partie Sud-Est de la Pensylvanie</i> , 1882, 178 p.	252,00 F.
n° 3. — R. ZEILLER, <i>Mémoire sur la flore houillère des Asturies</i> , 1882, 24 p.	36,00 F.
Tome IV, n° 1. — J. GOSSELET, <i>Etudes sur les variations du Spirifer 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. LAVERDIERE, <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 Gigantostracés du Siluro-Dévonien de Liévin</i> , 1966, 23 p., 5 pl.	84,00 F.
Tome XV. — J. MANIA, <i>Gestion des Systèmes aquifères. Applications au Nord de la France</i> , 1978, 228 p.	180,00 F.
Tome XVI. — A. BOUROZ et al., <i>Essai de synthèse des données acquises dans la genèse et l'évolution des marqueurs pétrographiques dans les bassins houillers</i>	250,00 F.

FASCICULES SPECIAUX (*)

« Géologie du Nord de la France » (T. LXXXIX, fasc. 1)	85,00 F.
« Centenaire de la S.G.N. » (T. XC, fasc. 4)	100,00 F.
« Rupture des roches et massifs rocheux » (T. XCV, fasc. 3)	70,00 F.
« Données nouvelles sur le Paléozoïque de l'Europe occidentale » (T. XCVI, fasc. 4 et T. XCVII, fasc. 1)	200,00 F.
« Apports récents à la Géologie du Gondwana » (T. XCVII, fasc. 4)	150,00 F.
« Géologie de l'Europe, du Précambrien aux bassins sédimentaires post-hercyniens » (T. XCIX, fasc. 1)	150,00 F.
« Géologie appliquée aux problèmes d'énergie et de matières premières »	150,00 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 Sarajevo (Yougoslavie)</i>	150,00 F.
Publication N° 3. — J. ANGELIER, <i>Néotectonique de l'arc égéen</i>	140,00 F.
Publication N° 4. — J.I. 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 Hellénides externes en Péloponnèse méridional</i>	185,00 F.
Publication N° 7. — P. DEWEVER, <i>Radiolaires du Trias et du Lias de la Téthys</i>	180,00 F.
Publication N° 8. — J. FERRIERE, <i>Paléogéographie et tectoniques superposées dans les Hellénides internes : les massifs de l'Othrys et du Pélion (Grèce continentale)</i>	185,00 F.
Publication N° 9. — H. MAILLOT, <i>Les Paléoenvironnements de l'Atlantique sud : Apport de la géochimie sédimentaire</i>	130,00 F.
Publication N° 10. — Cl. BROUSMICHE, <i>Les Fougères sphénoptéridiennes du Bassin Houiller Sarro-Lorrain</i>	200,00 F.
<hr/>	
<i>Esquisse géologique du Nord de la France</i> , par J. GOSSELET, Fascicule IV (Terrains quaternaires)	29,00 F.
<i>Ecorché géologique infra-mésozoïque</i> (extrait de « Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France », présentée par C.F.P. (M), COPESEP et S.N.P.A.)	50,00 F.

SERIE DOCUMENTATION (Pochettes de 6 Diapositives avec notice) (**)

Les membres abonnés bénéficient d'une réduction de 20% sur un exemplaire de chacune de ces publications.

Les prix sont augmentés des frais de port et d'emballage quand les volumes ne sont pas pris directement au dépôt.

(*) Tous les prix sont indiqués hors taxe.

(**) La liste des séries de diapositives peut être demandée au Secrétariat de la S.G.N.

SOMMAIRE

Tome CIV

1984

1^{er} trimestre

	pages
P. COSSEMENT, H. CHAMLEY et L. PASTOURET (†). — Considérations sur la sédimentation du Quaternaire terminal en Mer d'Alboran (Méditerranée occidentale)	17
D. BOULANGER (†), M. LARHZAL et N. BEUN. — Le gypse de la région de Safi (Maroc) : géologie et sédimentologie. Note préliminaire	27
T. HOLTZAPFFEL. — Smectites authigènes et glauconitisation dans les argiles du Gault (Albien du Boulonnais)	33
P. ARNOULT et J. MANIA. — Mécanisme du transfert des pollutions de la nappe de la craie de l'Artois et du Cambrésis (Nord de la France)	41
C. DOREMUS et J.P. HENRY. — Caractérisation des craies du Nord de la France par porosimétrie au mercure	49

© 1985 Société Géologique du Nord Editeur, Lille

Toute reproduction, même partielle, de cet ouvrage est interdite. Une copie ou reproduction par quelque procédé que ce soit, photographie, microfilm, bande magnétique, disque ou autre, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 sur la protection des droits d'auteur.

Imprimé en France (Printed in France)

Le Directeur de la publication : Paule CORSIN.
Commission Paritaire N° 55.940.

Imprimerie Centrale du Nord, 12, rue Lepelletier, 59800 Lille - 2-1985
Dépôt légal N° 707 — 1^{er} trimestre 1985