Caractérisation et extension de niveaux repères de bentonites dans le Turonien supérieur du Bassin de Paris (Boulonnais, Aube)

Patricia VANDERAVEROET
Sédimentologie et Géodynamique, UMR 8577 CNRS,
Université des Sciences et Technologies de Lille,
F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)

Francis AMÉDRO
26 rue de Nottingham, F-62100 Calais (France)

Claude COLLETÉ
11 rue du 11 Novembre, F-10300 Sainte-Savine (France)

Jean-François DECONINCK
Sédimentologie et Géodynamique, UMR 8577 CNRS,
Université des Sciences et Technologies de Lille,
F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)
Jean-Francois.Deconinck@univ-lille1.fr

Philippe RÉCOURT
Sédimentologie et Géodynamique, UMR 8577 CNRS,
Université des Sciences et Technologies de Lille,
F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)

Francis ROBASZYNSKI
Faculté polytechnique, 9 rue de Houdain, 7000 Mons (Belgique)

Vanderaveroet P., Amédro F., Colleté C., Deconinck J.-F., Récourt P. & Robaszynski F. 2000. — Caractérisation et extension de niveaux repères de bentonites dans le Turonien supérieur du Bassin de Paris (Boulonnais, Aube). *Geodiversitas* 22 (3) : 457-469.

RÉSUMÉ
Treize échantillons de marnes intercalées dans les craies d'âge Turonien supérieur du Boulonnais et de l'Aube ont fait l'objet d'analyses pétrographiques, minéralogiques et géochimiques. Les analyses révèlent que deux des niveaux marneux, dépourvus de marqueurs de volcanisme et caractérisés par la présence de fortes proportions d'illite et de kaolinite, correspondent à des passées terrigènes banales. En revanche, les onze autres échantillons, riches en verres volcaniques et en smectites, correspondent à des bentonites. La présence de

particules de verres volcaniques, de cristaux de zircon ou d'apatite constitue le critère d'identification le plus fiable de ces niveaux de bentonite. La constitution de la fraction argileuse ainsi que les caractéristiques géochimiques, variables en fonction de l'intensité de la bioturbation subie par l'horizon volcanique, ne permettent pas d'établir des critères distinctifs de chaque horizon. Des corrélations sont proposées entre les coupes de l'Aube et du Boulonnais grâce à la similitude des successions lithologiques et aux données macropaléontologiques. Les niveaux de bentonites permettent d'affiner ces corrélations et suggèrent une dilatation environ trois fois plus importante de la série stratigraphique du Turonien de l'Aube par rapport à celle du Boulonnais, secteur qui devait être moins subsident. Les niveaux de bentonites, connus également en Angleterre et en Allemagne, reflètent des événements instantanés et constituent donc des repères très précis pour les corrélations à grande distance dans les craies par rapport aux zones paléontologiques beaucoup plus larges.

MOTS CLÉS
Bentonite,
corrélation,
craie,
Turonien,
Bassin de Paris.

ABSTRACT

Characterization and geographic distribution of bentonites in the upper Turonian of the Paris Basin (Boulonnais, Aube).

Petrographic, mineralogical and geochemical analyses have been performed on thirteen samples coming from marly layers intercalated in upper Turonian chalks from the Boulonnais and Aube (Paris Basin, France). Two samples characterized by abundant illite and kaolinite correspond to terrigenous horizons, while the other samples, characterized by the occurrence of volcanic glass shards, zircon and apatite, are of volcanogenic origin. The clay fraction is dominantly composed of smectite formed by submarine weathering of volcanic glass; therefore, the marly layers correspond to bentonites. The initial mineralogical and geochemical composition of the marly layers is disturbed by common burrowing. Consequently, it is unfortunately impossible to characterize and distinguish one bentonite layer from another using mineralogical and geochemical data only. However, correlations based on lithological and paleontological data are proposed between the sections exposed in the Boulonnais and Aube. The bentonites allow to refine these correlations and show that the upper Turonian in the Aube region is about three times thicker than in the Boulonnais which was probably less subsident. The bentonites layers also occur in England and Germany. They reflect instantaneous events and are therefore very useful for long distance correlations and much more precise than palaeontological zones.

KEY WORDS
Bentonite,
correlation,
chalk,
Turonian,
Paris Basin.

INTRODUCTION

La présence de niveaux argileux ou marneux d'origine volcanique (bentonite) dans les sédiments mésozoïques d'Europe occidentale a été signalée à plusieurs reprises en particulier dans les formations d'âge Jurassique supérieur à Crétacé supérieur (Bernoulli & Peters 1970 ; Knox 1977 ; Jeans *et al*. 1977, 1982 ; Zimmerle 1979, 1989 ; Dauphin *et al*. 1998). Dans le Bassin de Paris, un niveau d'origine volcanique très riche en smectite, en cristaux de zircon et d'apatite a été identifié au voisinage de la limite entre l'Oxfordien inférieur et l'Oxfordien moyen (Pellenard *et al*. 1999). Des

bentonites ont également été identifiées dans le Turonien supérieur du Boulonnais et de Haute-Normandie (Deconinck *et al*. 1991). Il est probable que les niveaux de bentonite soient relativement fréquents dans les séries sédimentaires, mais ces niveaux d'épaisseur millimétrique à centimétrique sont parfois difficiles à identifier sur le terrain ou en forage. Dans les formations argileuses, les horizons de bentonite qui constituent des obstacles aux circulations de fluides présentent souvent une teinte rouille à ocre résultant de leur oxydation privilégiée. Retenant davantage l'eau, la végétation s'installe préférentiellement le long de ces horizons. Dans les craies, ils apparaissent comme des niveaux plus marneux, légèrement en retrait à l'affleurement, impossible à distinguer des horizons marneux purement terrigènes.

Au laboratoire, plusieurs techniques permettent de caractériser les bentonites des craies du Crétacé supérieur. Grâce à la technique des frottis de sédiment, observables au microscope optique, la présence de particules vitreuses d'origine volcanique constitue un excellent critère. Toutefois, les particules de verres disparaissent parfois puisqu'elles s'altèrent facilement en smectite. Dans ce cas, une fraction argileuse constituée par 100 % de smectite constitue un bon critère de détermination d'un niveau bentonitique. Cependant, certains niveaux marneux essentiellement smectitiques peuvent avoir une origine détritique et non volcanique. Ce problème est particulièrement aigu dans le Turonien moyen et supérieur du Boulonnais où le cortège argileux des craies est constitué essentiellement de smectite détritique (Deconinck *et al*. 1989). Par conséquent, les niveaux de bentonites constitués de smectites provenant de l'altération de verres volcaniques s'intercalent dans une sédimentation argileuse elle-même dominée par des smectites terrigènes. Dans ces conditions, sur la base de la minéralogie des argiles, les niveaux de bentonites peuvent être facilement confondus avec des niveaux terrigènes. À ces difficultés, s'ajoute une bioturbation parfois intense qui provoque un mélange des sédiments terrigène et volcanogène.

La caractérisation des bentonites des séries crayeuses n'étant pas aisée, l'application de nombreuses techniques, allant de l'observation sur le terrain aux analyses géochimiques, devient nécessaire. La présence de cristaux de zircon et d'apatite constitue un excellent critère d'identification de niveau volcanique mais elle n'est pas systématique dans les bentonites. Du point de vue géochimique, les profils de terres rares peuvent constituer un bon outil, les bentonites du Turonien présentant selon Wray *et al.* (1996) et Wray (1999), une anomalie négative en europium, mais la bioturbation peut là encore modifier notablement la constitution minéralogique et géochimique des niveaux volcaniques par introduction de constituants de l'encaissant dans le niveau de bentonite.

Dans cet article, nous présentons l'étude minéralogique et géochimique de niveaux marneux du Turonien supérieur du Boulonnais et de l'Aube. En effet, dans les craies d'âge Turonien de nombreuses régions du NW de l'Europe (France, Allemagne, Angleterre), s'intercalent de minces niveaux marneux centimétriques à décimétriques d'origine volcanique (bentonite). Ces niveaux ont d'abord été signalés dans les craies d'Allemagne (Siebertz & Vortisch 1979 ; Ernst *et al*. 1983) et d'Angleterre (Pacey 1984). Leur étude géochimique systématique a été menée plus récemment, principalement en Allemagne et en Angleterre (Wray 1995, 1999 ; Wray & Wood 1995 ; Wray *et al*. 1996). Grâce à de nouveaux affleurements mis à jour dans le Boulonnais et dans l'Aube, dans la région de Troyes, nous avons entrepris la caractérisation des niveaux de bentonites du Turonien supérieur, puis nous avons tenté d'utiliser ces niveaux considérés comme isochrones afin de proposer des corrélations entre les différentes coupes en les confrontant aux données paléontologiques et lithostratigraphiques.

CADRE STRATIGRAPHIQUE

Les parties moyenne et supérieure du Turonien sont représentées dans le Boulonnais par une craie blanche à filets marneux (Formation des Mottelettes), passant vers le haut à une craie blanche à silex rares (Formation du Guet), surmontée elle-même par une craie blanche à nombreux rognons

de silex (Formation de Caffiers) dont seule la base riche en hardgrounds est turonienne (Robaszynski *et al.* 1980). Dans cette succession crayeuse, un certain nombre de niveaux marneux comparables à ceux décrits dans le Sud-Est de l'Angleterre par Mortimore (1983) constituent d'excellents repères lithologiques. Il s'agit :
– des Southerham Marls : groupe de quatre niveaux marneux équidistants dont seuls les niveaux extrêmes sont souvent bien visibles ;
– du Caburn Marl : mince niveau marneux sombre, très sensible à l'altération, qui surmonte un lit de silex assez constant ;
– des Bridgewick Marls : faisceau de trois niveaux marneux surmontant un ensemble complexe de hardgrounds et associés à de gros rognons de silex cornus, en particulier le niveau supérieur qui est presque toujours encadré par deux lits ;
– du Lewes Marl : mince niveau marneux le plus souvent en creux à la suite de l'action des agents atmosphériques.
La succession stratigraphique décrite ci-dessus est bien visible le long des falaises littorales du cap Blanc-Nez où ont d'ailleurs été définies les formations (Robaszynski *et al.* 1980). Malheureusement, la situation des craies turoniennes en sommet de falaises verticales les rend difficilement accessibles. Le creusement d'une tranchée de chemin de fer à l'intérieur du Boulonnais, près de la gare de Caffiers, a mis au jour en 1975 une succession continue de près de 150 m de craies allant du Cénomanien supérieur au Coniacien (Amédro & Robaszynski 1978 ; Amédro *et al.* 1979) (Figs 1 ; 2). C'est là qu'ont été identifiés pour la première fois des niveaux de bentonites dans les craies du Turonien supérieur du Boulonnais (Deconinck *et al.* 1991). L'affleurement est aujourd'hui très dégradé, mais à 4 km à l'Ouest, une coupe très similaire est visible actuellement à l'entrée de la forteresse de Mimoyecques (Figs 1 ; 2). Cinq niveaux marneux de teinte gris-verdâtre, à localement rouille en raison de l'oxydation, situés respectivement à la cote 8 ; 20,20 ; 27,50 ; 28,50 et 29,50 m ont été échantillonnés. D'après la succession lithologique, le niveau marneux le plus épais (5 cm), situé à 8 m serait l'équivalent du Southerham Marl 1 (Fig. 2). Celui situé à la cote 20,20 serait l'équivalent du Caburn Marl, et le triplet à 27,5 ; 28,5 et 29,5 m correspondrait aux Bridgewick Marls.
Dans le département de l'Aube, les craies du Turonien supérieur n'affleurent pas de façon permanente. Quatre coupes proches de la ville de Troyes ont cependant entaillé durant ces dernières années une grande partie de la succession : une tranchée de l'autoroute A5 à Torvilliers et trois carrières aux Champs-Dey, à Payns et à Saint-Lyé, les deux dernières recoupant le même intervalle stratigraphique (Fig. 2). La succession composite obtenue montre que les craies du Turonien supérieur de l'Aube et du Boulonnais présentent un grand nombre de caractères communs, excepté l'épaisseur de craie qui semble plus importante dans l'Aube que dans le Boulonnais. On observe en particulier la continuité entre les deux régions de tous les niveaux marneux servant de marqueurs lithologiques ainsi que de la plupart des hardgrounds et niveaux durcis, les corrélations étant contrôlées par le contenu macropaléontologique (répartition des ammonites et niveaux d'abondance des échinides en particulier, Amédro *et al.* 1997).
Les niveaux de marne gris-verdâtre étudiés dans la région auboise sont situés dans la carrière de Champs-Dey à 0,60 et 2,55 m, dans la tranchée de Torvilliers à 1,70 ; 4,30 et 8,20 m, et dans la carrière de Saint-Lyé à 2,35 et 5,90 m.
Les fortes ressemblances entre successions sédimentaires du Boulonnais et de l'Aube déjà remarquées dans le Cénomanien et le Turonien (Amédro *et al.* 1997) révèlent une unité dans l'histoire sédimentaire d'une large bande centrale NW-SE du Bassin de Paris. Dans ce contexte, il a semblé intéressant de caractériser minéralogiquement et géochimiquement les niveaux marneux aubois et boulonnais afin, d'une part, de distinguer les niveaux marneux qui pourraient être liés à des apports terrigènes banals, de ceux d'origine volcanique, et d'autre part, de préciser la distribution verticale et spatiale des lits de bentonite. Partant, les niveaux de bentonites qui sont considérés comme des isochrones peuvent être utilisés en confrontation avec les données paléontologiques afin d'affiner les corrélations.

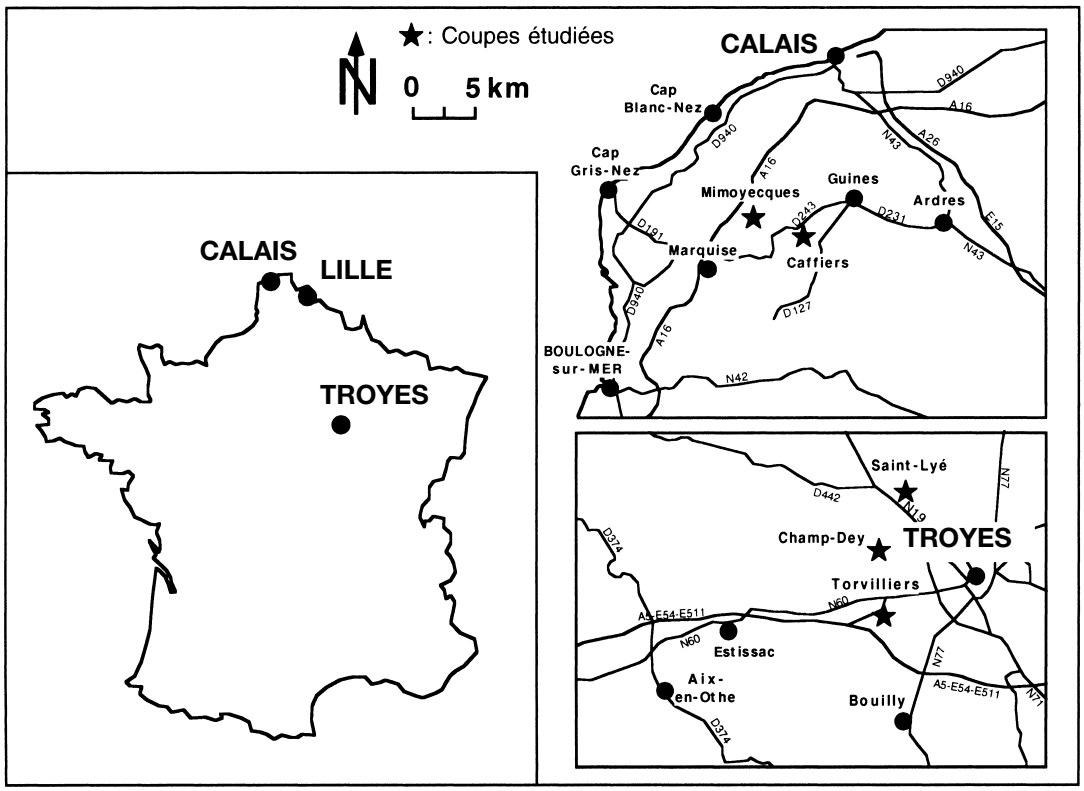

FIG. 1. — Localisation géographique des coupes étudiées.

MÉTHODES D'ÉTUDES

La fraction argileuse (particules de tailles inférieures à 2 µm) de tous les niveaux marneux identifiés a été étudiée par diffraction des rayons X et analyse thermique différentielle. Par ailleurs, des analyses géochimiques ont été effectuées sur la fraction argileuse (éléments majeurs) et sur le sédiment total (éléments-traces et terres rares). De plus, des frottis de sédiments ont été confectionnés et observés au microscope optique afin de vérifier la présence de verres et de minéraux d'origine volcanique. Afin d'étudier la fraction argileuse par diffraction des rayons X, les échantillons bruts sont mis à déliter dans de l'eau distillée. Ils sont ensuite décarbonatés par un traitement à l'acide chlorhydrique dilué à N/5. Puis, l'excès d'acide est éliminé par rinçages successifs jusqu'à défloculation du matériel argileux. La partie supérieure est ensuite prélevée à l'aide d'une seringue après homogénéisation et décantation selon un temps donné obéissant à la loi de Stokes (1 cm après 50 mn). Après centrifugation, le culot d'argile est récupéré et étalé sur une lame de verre rainurée afin de permettre l'orientation des minéraux argileux. Trois diffractogrammes sont réalisés : 1) après séchage à l'air libre à température ambiante ; 2) après saturation par l'éthylèneglycol sous vide pendant 12 heures ; 3) après chauffage à 490 °C pendant 2 heures (Holtzapffel 1985). La détermination des minéraux argileux et l'estimation de leurs proportions relatives (à ± 5 %) sont alors possibles grâce à l'étude combinée des trois diffractogrammes obtenus grâce à un diffractomètre de type Philips PW 1730 à anticathode de cuivre. Les modalités expérimentales sont les suivantes : tension de 40 kV, intensité de 25 mA et sensibilité de 1 000 coups/sec.

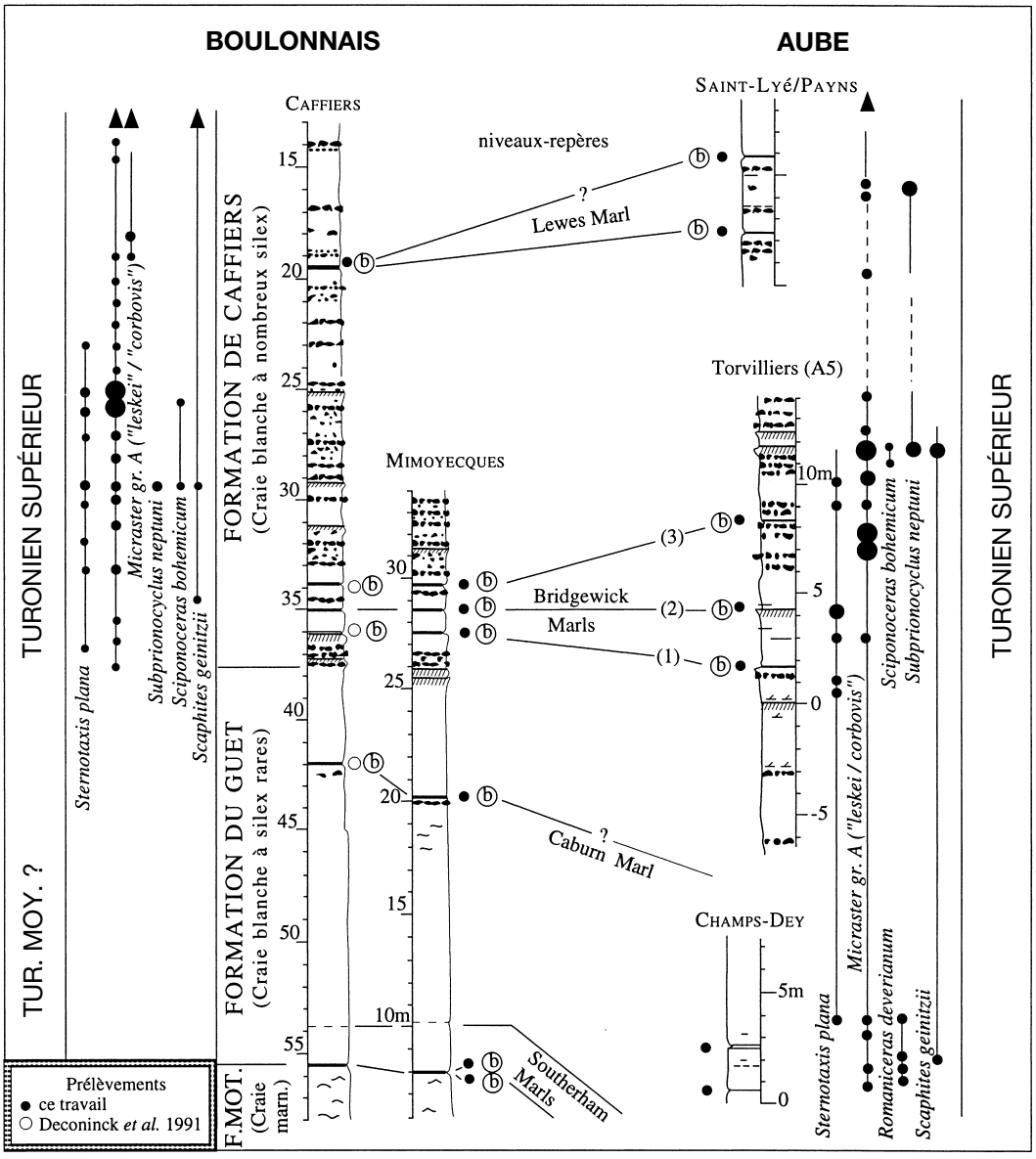

FIG. 2. — Lithostratigraphie, biostratigraphie, localisation des échantillons étudiés et corrélations proposées entre les coupes du Boulonnais et de l'Aube.

Le balayage angulaire (1°2 θ/mn) s'étend de 2,50 à 28,50 °2 θ pour des distances d comprises entre 35,45 Å et 3,12 Å.

Les analyses thermiques différentielles (ATD) sont réalisées à l'aide d'un appareil de type SETARAM TAG 24. Cette méthode consiste à enregistrer les différences de température et de masse qui apparaissent entre un échantillon d'argile et un témoin inerte (alumine calcinée) au cours de leur montée commune en température (10 °C/mn). Au cours du chauffage progressif d'une smectite, trois réactions se produisent : déshydratation vers

100-120 °C, déshydroxylation vers 500-700 °C et déstabilisation/recristallisation vers 1 000-1 100 °C. Selon la température à laquelle apparaissent ces réactions, il est possible de connaître le type de smectite présent dans l'échantillon.
Les analyses géochimiques ont été réalisées au Service d'Analyse des Roches et des Minéraux du Centre de Recherches pétrographiques et géochimiques de Nancy. Les échantillons étudiés sont d'abord fondus avec $LiBO_2$, puis dissous par HNO_3. Les analyses sont réalisées par ICP-émission pour les éléments majeurs et mineurs. Tous les autres éléments-traces sont, quant à eux, dosés par ICP-MS. Les contrôles de qualité sont effectués avec des géostandards internationaux. Les éléments majeurs ont été dosés sur le sédiment brut et sur la fraction argileuse, les éléments-traces et les terres rares ont été dosés sur le sédiment brut.

TABLEAU 1. — Composition minéralogique de la fraction argileuse des échantillons étudiés en pourcentage.

Échantillon n°	smectite	illite	kaolinite	chlorite
Coupe de Mymoyecques				
My 8	97	3	-	-
My 20,20	98	2	-	-
My 27,50	98	2	-	-
My 28,50	89	11	-	-
My 29,50	98	2	-	-
Coupe de Caffiers				
Caf 19,50	100	-	-	-
Coupe de Saint-Lyé				
Lyé 2,35	96	2	-	-
Lyé 5,90	82	18	-	-
Coupe de Torvilliers				
Tor 1,70	95	2	3	-
Tor 4,30	84	16	-	-
Tor 8,30	82	14	4	-
Coupe de Champs-Dey				
Dey 0,6	55	19	26	0
Dey 2,55	42	33	23	2

RÉSULTATS

Les résultats minéralogiques des niveaux marneux étudiés dans les coupes de Mimoyecques, de Caffiers, de Saint-Lyé, de Torvilliers et des Champs-Dey sont présentés dans le Tableau 1. Trois types d'assemblages argileux sont distingués :
– le premier type d'assemblage argileux, composé essentiellement de smectite (95 à 98 %) à laquelle sont associées des traces d'illite et de kaolinite (Fig. 3A ; Tableau 1), caractérise tous les niveaux de Mimoyecques sauf My 28,50, le niveau 19,50 de Caffiers ainsi que les échantillons Tor 1,70 et Lyé 2,35. La raie 060 des smectites se situe vers 1,498 Å ce qui indique leur caractère dioctaédrique (Desprairies 1983). Les courbes d'ATD, variables d'un échantillon à l'autre, révèlent la présence systématique d'un pic de déshydroxylation vers 640 °C (Fig. 3A-C), occasionnellement doublé d'un pic plus ou moins marqué situé vers 520 °C (Fig. 3A, C). La réaction de déstabilisation/recristallisation bien marquée est souvent caractérisée par l'existence d'un crochet endo-exothermique de type Cheto typique des montmorillonites magnésiennes (Fig. 3A, B). Ces smectites magnésiennes de type Cheto sont présentes dans les niveaux My 20,20 ; 27,50 et 29,50, Caf 19,5 et Lyé 2,35 ;
– le second est représenté par un cortège dominé par la smectite (80 à 90 %), l'illite (10 % à 20 %) et parfois de traces de kaolinite et de chlorite (Tableau 1). Ce second type caractérise les niveaux marneux My 28,50, Tor 4,30 et 8,30 et Lyé 5,90 qui présentent par ailleurs des courbes d'ATD ne montrant qu'un seul pic de déshydroxylation, situé vers 520 °C (Fig. 3D) ;
– le troisième type d'assemblage argileux constitué d'un mélange de smectite (jusqu'à 55 %), d'illite (jusqu'à 33 %) et de kaolinite (jusqu'à 26 %, Tableau 1) caractérise les deux niveaux marneux de la coupe des Champs-Dey (Dey 0,6 et 2,55).
Les analyses chimiques (Tableau 2) réalisées sur la fraction argileuse confirment le caractère dioctaédrique des smectites. Les teneurs en K_2O sont directement dépendantes de la proportion d'illite et de l'importance de l'interstratification des smectites par ces mêmes feuillets illitiques. Par

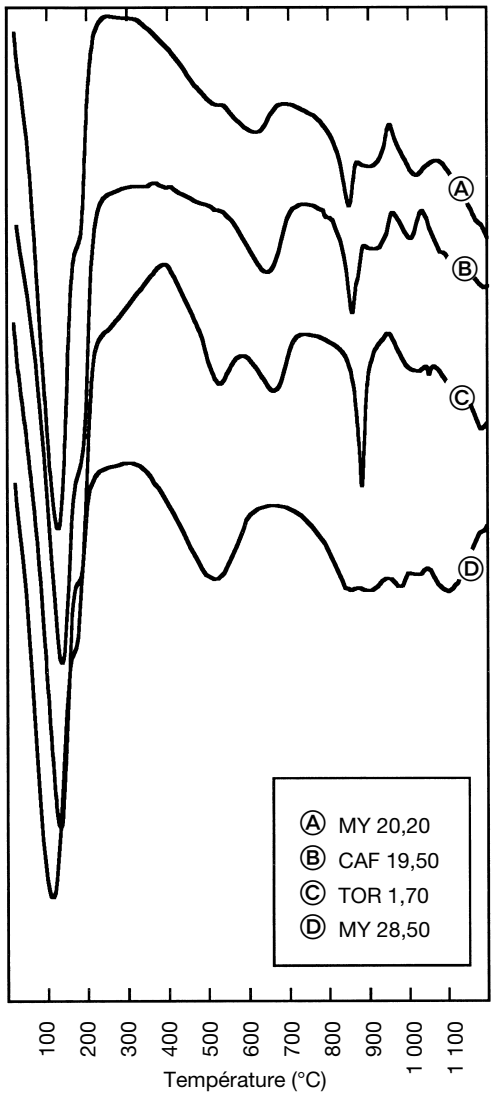

FIG. 3. — Courbes d'analyses thermiques différentielles caractéristiques des échantillons étudiés.

exemple, les pourcentages en K_2O sont généralement inférieurs à 1,62 sauf pour l'échantillon My 28,50 plus riche en illite que les autres et dont les teneurs en K_2O atteignent 3,41 %. Les teneurs en MgO sont supérieures à 4,4 %, ce qui correspond à des teneurs intermédiaires entre celles des smectites de la craie (dont les teneurs en MgO sont inférieures à 4,4 %) et celles des smectites de niveaux purement volcaniques dont les teneurs en MgO peuvent atteindre 7,4 % (Deconinck & Chamley 1995). L'échantillon My 28,50 fait encore figure d'exception puisque les teneurs en MgO sont nettement plus faibles que dans les autres échantillons étudiés.

Les profils d'éléments-traces et de terres rares normalisés par rapport aux shales sont très proches d'un échantillon à l'autre. Les échantillons étudiés (My 8 ; 20,20 ; 27,50 ; 28,50 ; 29,50 ; Tor 1,70 et Lyé 2,35) présentent un profil d'éléments-traces et de terres rares voisin, excepté l'échantillon My 28,50 qui se différencie des autres par l'absence d'une anomalie positive en Ta et en Zr et par une anomalie positive en Sm alors que les autres échantillons montrent une anomalie négative en Sm (Fig. 4).

L'évolution des profils de terres rares présente dans l'ensemble une tendance voisine pour tous les échantillons étudiés, sauf pour les échantillons My 28,50 et 29,50 (Fig. 4) qui ne présentent pas d'anomalie négative en Eu, ni d'anomalie positive en Sm.

DISCUSSION

IDENTIFICATION DES NIVEAUX DE BENTONITE

Les niveaux de bentonite antérieurement identifiés dans les craies du Turonien supérieur présentent les caractéristiques suivantes : fraction argileuse quasiment monominérale à smectite (montmorillonite magnésienne) pure ne présentant pratiquement pas d'interstratification par des feuillets illitiques ; présence d'un crochet endothermique de déshydroxylation situé à 640 °C et crochet endo-exothermique de type Cheto ; présence de verres et/ou de minéraux d'origine volcanique (Deconinck & Chamley 1995) ; anomalie en europium sur le profil de terres rares (Wray 1995, 1999).

Parmi les niveaux marneux étudiés, les niveaux My 8 ; 20,20 ; 27,50 ; Caf 19,50 ; Lyé 2,35 et Tor 1,70 présentent la plupart de ces caractéristiques et correspondent clairement à des bentonites. Les autres niveaux marneux (My 28,50 ; 29,50, Lyé 5,90 ; Tor 4,30 ; 8,30) contiennent systéma-

TABLEAU 2. — Composition chimique de la fraction argileuse des échantillons étudiés.

	My 8	My 20,20	My 27,50	My 28,50	My 29,50	Tor 1,70	Lyé 2,35
SiO_2	64,63	65,17	64,95	62,03	64,54	64,73	64,88
Al_2O_3	21,67	20,23	20,36	22,4	20,51	22,87	22,09
Fe_20_3	4,44	4,68	4,61	5,45	4,4	3,12	3,15
MgO	4,92	5,31	5,35	3,9	5,33	4,67	5,07
CaO	1,99	2,88	2,92	1,99	2,94	2,81	2,98
Na_2O	0,06	0,02	0,04	0,11	0,04	0,04	0,05
K_2O	1,62	1,19	1,18	3,41	1,26	1,2	1,24
TiO_2	0,64	0,48	0,49	0,65	0,9	0,54	0,5

tiquement des particules de verres volcaniques et occasionnellement des cristaux de zircons. Il s'agit assurément de niveaux volcaniques, mais les courbes d'analyses thermiques différentielles et les caractéristiques minéralogiques et chimiques sont différentes du groupe précédent. Les smectites sont davantage interstratifiées et les minéraux détritiques mieux représentés. Ceci peut s'expliquer par l'influence de la bioturbation dont les traces sont bien visibles à l'affleurement. En effet, après le dépôt de matériel volcanique dans la mer de la craie, l'activité biologique benthique a contribué au mélange du matériel volcanique et des smectites provenant de l'altération des verres avec le matériel détritique des craies sous-jacentes en partie smectitiques également. Les particularités minéralogiques et géochimiques relevées dans le niveau My 28,50 résultent probablement d'un mélange intense du niveau volcanique et de la boue carbonatée sous-jacente par les organismes benthiques. Ce niveau présente également un profil d'éléments-traces très différents des niveaux strictement bentonitiques et par ailleurs, il ne présente pas d'anomalie négative en europium. La courbe d'analyse thermique différentielle présente un pic de déshydroxylation centré sur 520 °C comparable aux courbes obtenues sur les smectites de la craie (Deconinck & Chamley 1995).

Le niveau My 29,50 présente toutes les caractéristiques des niveaux de bentonite (en particulier, la courbe d'ATD de cet échantillon révèle la présence de deux types de smectites, l'une terrigène, l'autre volcanogène et des verres volcaniques sont présents) mais ne présente pas d'anomalie négative en europium, or selon Wray (1999), les bentonites se caractérisent par cette anomalie, son absence étant caractéristique de niveaux terrigènes. L'anomalie en europium ne paraît donc pas systématique et ne semble pas pouvoir être utilisée comme seul critère d'identification des bentonites dans les craies par rapport aux niveaux marneux banals.

Enfin, les deux niveaux marneux prélevés sur la coupe des Champs-Dey (Dey 0,6 et 2,55) présentent une fraction argileuse riche en illite et kaolinite dont l'origine détritique est probable. Ce type d'assemblage s'apparente à ceux identifiés dans le Turonien inférieur et à la base du Turonien moyen dans le Boulonnais (Deconinck *et al.* 1989). Par ailleurs, aucun élément d'origine volcanique n'y a été détecté. L'ensemble de ces caractéristiques suggère que ces niveaux plus marneux correspondent simplement à des passées terrigènes et non volcanogènes.

En résumé, tous les niveaux marneux étudiés correspondent à des bentonites, sauf ceux prélevés sur la coupe des Champs-Dey qui correspondent à des niveaux terrigènes banals. Au moins six niveaux de bentonite s'intercalent dans la succession lithologique du Turonien supérieur du Bassin de Paris. Cette étude montre que l'identification des niveaux volcanogènes ne peut s'appuyer sur un seul critère. La craie s'étant déposée dans un milieu oxygéné, l'intensité de la bioturbation introduit une forte distorsion des signaux minéralogiques et géochimiques initiaux.

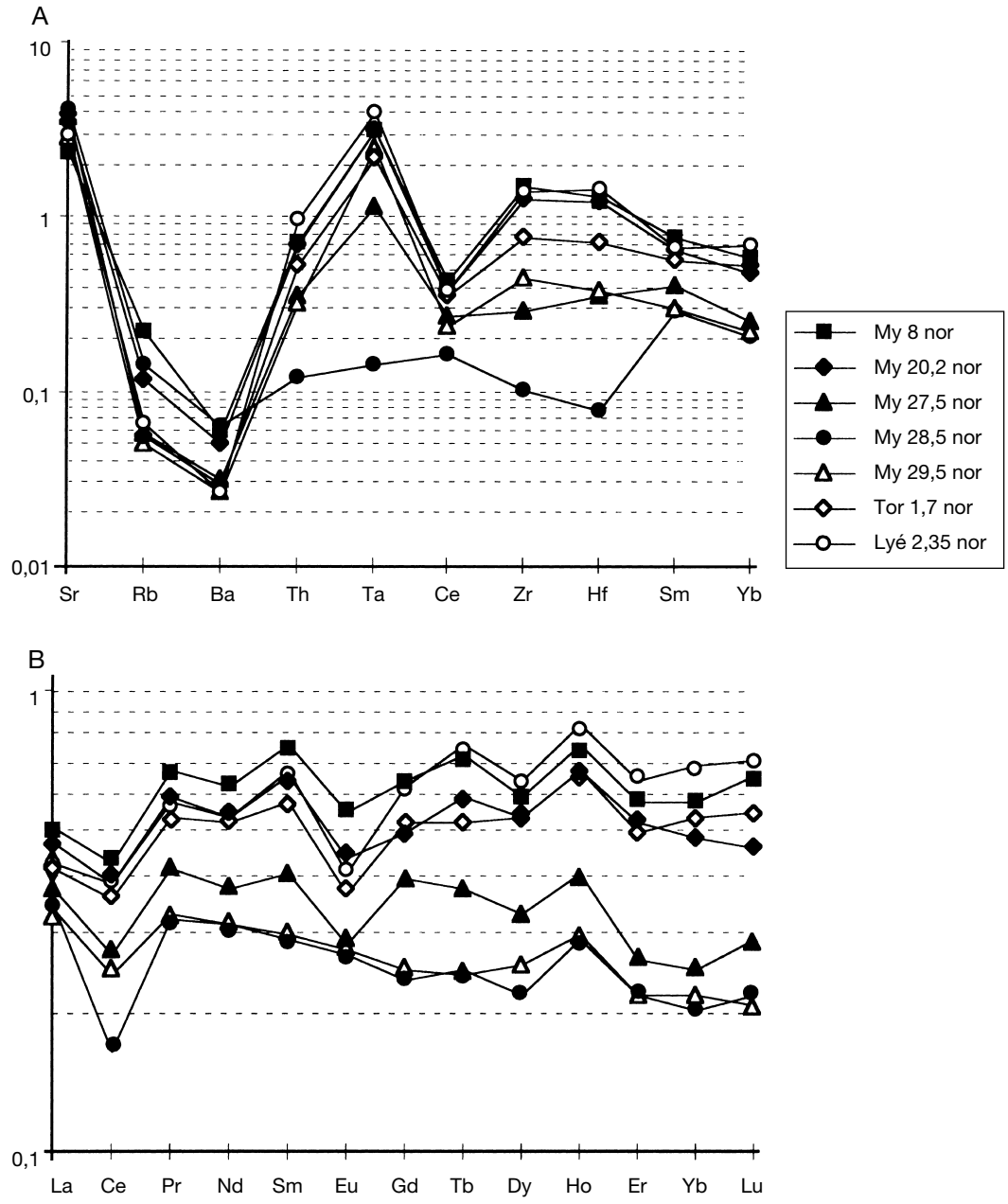

FIG. 4. — Profils des échantillons étudiés ; **A**, éléments-traces ; **B**, terres rares.

CORRÉLATION DES NIVEAUX DE BENTONITE DU BOULONNAIS À L'AUBE

Après l'identification des niveaux de bentonite, leur utilisation en tant qu'éléments de corrélation stratigraphique repose sur le caractère quasi instantané de ces dépôts mais suppose la possibilité de les distinguer les uns des autres. Au sein d'un même bassin de sédimentation, cette distinction peut s'effectuer grâce à la succession lithologique encadrante et reconnue dans plusieurs secteurs,

mais dans ce cas fréquent en domaines hémipélagiques à pélagiques, l'intérêt du niveau de bentonite est limité en tant qu'élément de corrélation, puisque celle-ci est déjà assurée par les autres repères lithologiques. Dans le cas des craies, les « *hardgrounds* » et les niveaux de silex peuvent constituer des repères fiables, mais ils ne présentent pas une aussi bonne continuité spatiale que les bentonites qui constituent un élément supplémentaire de corrélation.

La minéralogie et la géochimie ne permettent pas de distinguer les niveaux puisque deux niveaux différents d'une même coupe (par exemple My 8 et 27,5) peuvent présenter exactement les mêmes caractéristiques. Par ailleurs, deux niveaux bentonitiques corrélés du Boulonnais à l'Aube (par exemple My 27,5 et Tor 1,7) ne présentent pas exactement le même profil d'éléments-traces. Il semble donc très difficile d'établir des critères de distinction propres à chaque niveau de bentonites dans le Turonien supérieur du Bassin de Paris.

Quel est donc l'intérêt stratigraphique des niveaux de bentonite ? Dans le cas du Turonien supérieur du Boulonnais et de l'Aube, nous avions d'abord envisagé une corrélation entre le Caburn Marl (niveau My 20,20) (Fig. 2) avec le niveau marneux 2,35 des Champs-Dey (Amédro *et al.* 1997). Or cette corrélation est impossible puisque le niveau marneux 2,55 des Champs-Dey ne correspond pas à un niveau volcanogène mais terrigène. Cet exemple précis montre de quelle manière les bentonites peuvent permettre d'affiner les corrélations.

Les bentonites étant parfaitement isochrones, il est possible d'estimer les différences d'épaisseur de craie entre le Boulonnais et l'Aube et par conséquent d'estimer de manière relative les taux de sédimentation, en admettant que le taux de compaction des craies est voisin dans les deux régions. Puisque l'histoire géologique post-turonienne des deux secteurs est très comparable, cette hypothèse est vraisemblable. Au niveau du triplet de bentonite constituant les Bridgewick Marls (Fig. 2), l'épaisseur entre les deux niveaux extrêmes dans le Boulonnais est de 2 m, alors qu'elle est de 6,6 m dans l'Aube, suggérant un taux de sédimentation environ 3,3 fois plus élevé dans l'Aube que dans le Boulonnais. Ce taux de sédimentation plus fort dans l'Aube est confirmé vers la base du Turonien supérieur puisque le Caburn Marl doit se situer au niveau de la lacune d'observation entre la coupe de Torvilliers et des Champs-Dey, dans la mesure où, dans l'ensemble, du bassin anglo-parisien, les exemplaires de *Romaniceras deverianum* ont été récoltés au niveau ou quelques mètres sous le Caburn Marl (Gale 1996). Vers le haut, on constate que deux niveaux de bentonite sont identifiés dans l'Aube sur la coupe de Saint-Lyé, contre un seul dans le Boulonnais. Cette différence peut être liée soit à un meilleur enregistrement des événements volcaniques dans l'Aube grâce à un taux de sédimentation élevé, soit à une condensation de deux événements volcaniques au niveau du Lewes Marl de Caffiers.

Au total, de la base au sommet du Turonien supérieur, les corrélations entre les deux secteurs, affinées grâce aux niveaux de bentonites, montrent que les taux de sédimentation devaient être nettement (environ trois fois) plus élevés dans la région auboise que dans le Boulonnais au cours du Turonien supérieur.

CONCLUSION

L'étude pétrographique, minéralogique et géochimique d'horizons marneux intercalés dans les craies du Turonien supérieur du Boulonnais et de l'Aube montre qu'il existe deux types de niveaux, des niveaux terrigènes banals et des niveaux volcanogènes (bentonites) marqués par la présence de verres volcaniques plus ou moins altérés en smectite. Aux verres volcaniques sont parfois associés des cristaux de zircons et/ou d'apatite. Les caractéristiques minéralogiques et géochimiques sont variables d'un niveau de bentonite à l'autre en particulier en raison de la bioturbation qui provoque l'introduction de matériel terrigène issu de la craie sous-jacente au sein du matériel volcanogène. Par ailleurs, le même niveau corrélé stratigraphiquement entre le Boulonnais et l'Aube peut présenter des caractéristiques différentes. Il n'est donc pas possible pour l'instant

d'établir un diagnostic fiable d'identification des niveaux bentonitiques. Ils ne peuvent à eux seuls constituer des éléments de corrélations indiscutables. Ces niveaux doivent être obligatoirement utilisés en confrontation avec les données biostratigraphiques et avec d'autres niveaux repères de nature et d'origine différentes. Dans ces conditions, ils permettent d'affiner les corrélations.

En plus du Southerham Marl (Turonien moyen) identifié dans le Boulonnais, au moins six horizons de bentonites, pour la plupart connus en Angleterre et en Allemagne, sont identifiés dans le Turonien supérieur du Bassin de Paris. Il s'agit du Caburn Marl, des Bridgewick Marls (triplet identifié dans le Boulonnais et dans l'Aube), du Lewes Marl identifié dans le Boulonnais et probablement dans l'Aube. Dans cette dernière région, un niveau supplémentaire de bentonite est identifié.

La corrélation des horizons volcaniques confirme la forte dilatation de la série stratigraphique du Turonien supérieur de l'Aube par rapport à celle du Boulonnais.

Ultérieurement, il conviendra de préciser le type de volcanisme à l'origine des niveaux de bentonites du Turonien, de situer les sources et de replacer ce volcanisme dans le cadre géodynamique global de l'époque.

Remerciements

Nous remercions les rapporteurs, M. Caron, C. Robert et un anonyme, pour leurs commentaires sur le manuscrit.

RÉFÉRENCES

Amédro F., Manivit H. & Robaszynski F. 1979. — Échelles biostratigraphiques du Turonien au Santonien dans les craies du Boulonnais (macro-, micro-, nannofossiles). *Annales de la Société géologique du Nord* 99 : 287-305.

Amédro F. & Robaszynski F. 1978. — *Peroniceras*, faunes et microfaunes associées dans le Nord de la France ; comparaison de quelques sections dans le Turonien-Coniacien. *Annales de la Société géologique du Nord* 98 : 35-50.

Amédro F., Robaszynski F., Colleté C. & Fricot C. 1997. — Les craies du Cénomanien-Turonien de l'Aube et du Boulonnais : des événements litho- et biosédimentaires communs. *Annales de la Société géologique du Nord* 5 (2) : 189-197.

Bernoulli D. & Peters T. 1970. — Traces of rhyolitic-trachytic volcanism in the Upper Jurassic of the Southern Alps. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 63 (2): 609-621.

Dauphin L., Beaudoin B., Friès G. & Zimmerle W. 1998. — Corrélations de cendres volcaniques (bentonites) aptiennes, dans le Bassin du Sud-Est de la France et en Europe du Nord. Réunion spécialisée ASF-SGF « Argiles : sédimentologie, diagenèse, environnement ». Lille, 20-21/11/98. *Publication ASF* 30 : 25-26.

Deconinck J.-F., Amédro F., Desprairies A., Juignet P. & Robaszynski F. 1991. — Niveaux repères de bentonite d'origine volcanique dans les craies du Turonien du Boulonnais et de Haute-Normandie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, *Paris,* 312 (II) : 897-903.

Deconinck J.-F. & Chamley H. 1995. — Diversity of smectite origins in Late Cretaceous sediments: example of chalks from Northern France. *Clay Minerals* 30: 365-379.

Deconinck J.-F., Holtzapffel T., Robaszynski F. & Amédro F. 1989. — Données minéralogiques, géochimiques et biologiques comparées dans les craies cénomaniennes à santoniennes du Boulonnais. *Geobios* 11 : 179-188.

Desprairies A. 1983. — Relation entre le paramètre b des smectites et leur contenu en fer et magnésium. Application à l'étude des sédiments. *Clay Minerals* 18: 165-175.

Ernst G., Schmid F. & Seibertz E. 1983. — Event-Stratigraphie im Cenoman und Turon von NW-Deutschland. *Zitteliana* 10: 531-554.

Gale A. S. 1996. — Turonian correlation and sequence stratigraphy of the chalk in southern England, *in* Hesselbo S. P. & Parkinson D. N. (eds), Sequence Stratigraphy in British Geology. *Geological Society of London, Special Publication* 103: 177-195.

Holtzapffel T. 1985. — Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Société géologique du Nord* 12, 135 p.

Jeans C. V., Merriman R. J. & Mitchell J. G. 1977. — Origin of Middle Jurassic and Lower Cretaceous fuller's earths in England. *Clay Minerals* 12: 11-44.

Jeans C. V., Merriman R. J., Mitchell J. G. & Bland D. J. 1982. — Volcanic clays in the Cretaceous of southern England and Northern Ireland. *Clay Minerals* 17: 105-156.

Knox 1977. — Upper Jurassic pyroclastic rocks in Skye, West Scotland. *Nature* 265: 323-324.

Mortimore R. N. 1983. — The stratigraphy and sedimentation of the Turonian-Campanian in the Southern Province of England. *Zitteliana* 10: 27-41.

Pacey N. R. 1984. — Bentonites in the chalks of central eastern England and their relation to the open-

ing of the Northeast Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters* 67: 48-60.

Pellenard P., Deconinck J.-F., Marchand D., Thierry J., Fortwengler D. & Vigneron G. 1999. — Influence eustatique et événement volcanique pendant la sédimentation argileuse du Callovien-Oxfordien moyen dans l'Est du Bassin de Paris. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris 328 : 807-813.

Robaszynski F. & Amédro F. & Foucher J. C., Gaspard D., Magniez-Jannin F., Manivit H. & Sornay J. 1980. — Synthèse biostratigraphique de l'Aptien au Santonien du Boulonnais à partir de sept groupes paléontologiques : Foraminifères, nannoplancton, dinoflagellés et macrofaunes. *Revue de Micropaléontologie* 22 (4) : 195-321.

Siebertz E. & Vortisch W. 1979. — Zur Stratigraphie, Petrologie und Genese einer Bentonit-Lage aus dem oberen Mittle-Turon (Oberkreide) des südöstlichen Münsterlandes. *Geologische Rundschau* 68 (2): 649-679.

Wray D. S. 1995. — Origin of clay-rich beds in Turonian chalks from Lower Saxony, Germany: a rare-earth element study. *Chemical Geology* 119: 161-173.

Wray D. S. 1999. — Identification and long-range correlation of bentonites in Turonian-Coniacian (Upper Cretaceous) chalks of northwest Europe. *Geological Magazine* 136 (4): 361-371.

Wray D. S. & Wood C. J. 1995. — Geochemical identification and correlation of tuff layers in Lower Saxony, Germany. *Berliner geowissenschaftliche Abhendlungen* 16 (E): 215-225.

Wray D. S., Wood C. J., Ernst G. & Kaplan U. 1996. — Geochemical subdivision and correlation of clay-rich beds in Turonian sediments in northern Germany. *Terra Nova* 8: 603-610.

Zimmerle W. 1979. — Lower Cretaceous tuffs in northwest Germany and their geotectonic significance: 385-402, *in* Aspekte der Kreide Europas. *International Union of Geological Science* 6 (A).

Zimmerle W. 1989. — Vestiges of volcanic activity in Cretaceous sediments of Europe: 951-987, *in* Wiedmann J. (ed.), *Cretaceous of the Western Tethys: Proceedings of the 3rd International Cretaceous Symposium, Tübingen, 1987*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchandlung, Stuttgart.

Soumis le 27 mai 1999 ;
accepté le 7 décembre 1999.