

Géochimie/*Geochemistry*
(Géologie/*Geology*)

Diagenèse des monticules micritiques de la partie supérieure du Frasnien du Synclinorium de Dinant (Belgique, France)

Frédéric BOULVAIN, Alain HERBOSCH et Eddy KEPPENS

Résumé – Ces édifices classiques ainsi que d'autres corps sédimentaires contemporains font l'objet d'une étude diagenétique détaillée, combinant cathodoluminescence et géochimie isotopique. La séquence diagenétique mise en évidence est placée dans un cadre paléogéographique général.

Diagenesis of Upper Frasnian mud mounds from Dinant Synclinorium (Belgium, France)

Abstract – This paper presents a detailed diagenetic study of these classical build-ups and of associated contemporaneous sediments. Cathodoluminescence and isotope geochemistry have been used to document a diagenetic sequence, which is placed in a general paleogeographic model.

Abridged English Version – Upper Frasnian mud mounds from Belgium are lenticular carbonate build-ups 40 to 80 m thick and 100 to 200 m in diameter. They are embedded in shales or argillaceous limestones and developed on a ramp during eustatic rises ([1], [2]). These mounds crop out in the Southern part of the Dinant Synclinorium and in the Philippeville Massif (*Fig. 1*). In a previous paper [3], we indicated the stratigraphical relations between the build-ups and the other contemporaneous sedimentary bodies of the ramp.

The present study is based upon a petrographical (using both ordinary light and cathodoluminescence) analysis of hundreds of thin sections from twelve mud mounds. O and C isotopic analyses were performed on the different cement types. Table I and Figure 3 indicates the Mn, Fe (respectively activator and inhibitor of calcite luminescence [7], [8]), and Ca, Mg concentrations of the cements. Isotopic results are presented in Table II and in Figure 4.

DIAGENETIC SEQUENCES (*Fig. 2*). – The pluricentimetric *fenestrae* of the mounds (Pl. II, *Fig. 4*) are characterized by the following sequence (Pl. II, *Figs. 1, 2, 5*):

(1) a **syndimentary radiaxal** [5] calcite: this cement contains submicronic dolomite rhombs (Pl. II, *Fig. 3*) and has an oxygen isotopic composition which is significantly different from that of Devonian marine cements (*see* [9], for example). It has been isotopically and chemically restabilized by non-magnesian waters, precipitating the next cement type;

(2) an **automorphic non-luminescent granular calcite** with (3): an **orange luminescent border**. The chemical composition of cement (2) together with its morphology and the zonation of cement (3) suggests a meteoric origin. The sequence (2)-(3) can be interpreted as the result of the increasingly reduced character of the meteoric waters ([10], [11]). The low $\delta^{18}\text{O}$ of cement (2), together with its scattered $\delta^{13}\text{C}$ values can be considered as an additional argument for meteoric water action [4];

(4) a **xenomorphic granular dull orange luminescent calcite**: this iron-containing cement is precipitated in more reducing conditions than (3). It is introduced in the cavities

Note présentée par Jean AUBOUIN.

through a fracture network, contemporaneous with the beginning of pressure-solution phenomena. This cement is very homogeneous and rarely zoned. Since its very low $\delta^{18}\text{O}$ values may be interpreted as a result of increased fluid temperatures, this calcite is a burial cement. The carbonate matrix has the same cathodoluminescence and isotopic composition as the cement (4). This means that the late stage of matrix neomorphism is related to the (4) cementation phase;

(5) a ferroan "baroque" [6] dolomite: this cement is contemporaneous or posterior to (4). It results from a burial diagenesis.

Infracentimetric mud-mound cavities are characterized by sequence (2) à (5). In extra-biohermal argillaceous limestones, the sequence consists only of (4)-(5), and in the internal ramp, the contemporaneous oncolitic limestones are characterized by the sequence (2)-(4)-(5), with (4) and (5) occurring in fractures only.

DIAGENETIC EVOLUTION OF THE RAMP. — The diagenetic history begins with a radialial magnesian symsedimentary cement (1), precipitated in the "large" cavities of the mounds. Then, a meteoric cement (2) occludes all the porosity in the internal ramp, but only 5 to 10% in the mounds. An increasingly reducing environment is then responsible for the formation of (3). Differentiation between the (reducing) mounds and the (oxidizing) internal ramp results from a better water circulation in the area close to the continent. The lack of cements (2)-(3) in peri-biohermal limestones may be attributed to their low permeability. The invasion of the sediments by a meteoric aquifer is the consequence of the Famennian marine regression. This meteoric diagenesis comes to an end during the Carboniferous transgression. Burial cements (4) and (5) are contemporaneous with the opening of a fracture system.

CONCLUSION. — This diagenetic sequence is common to a number of carbonate bodies, although they are stratigraphically different (*see* [12], for example). This similarity points to a common post-sedimentary history: a marine phreatic cementation, followed by drowning, then a meteoric diagenesis because of a marine regression, with a reduced facies in the aquifer's distal area, and finally a burial diagenesis, after a marine transgression. This "pattern" is common in geological history.

INTRODUCTION. — Les monticules micritiques du Frasnien « F2j » de la Belgique sont des édifices lenticulaires calcaires de 40 à 80 m de puissance et de 100 à 200 m d'extension horizontale. Ils sont entourés de schistes et de calcaires argileux et se sont développés sur une rampe à la faveur de hausses eustatiques [1]. Leur principale aire d'affleurement se situe au bord sud du Synclinorium de Dinant et dans le Massif de Philippeville (*fig.* 1). Leur répartition correspond à une zone bathymétrique relativement profonde, microaérophile, favorable à l'installation de communautés pionnières à éponges (*stromatolites*), bactéries carbonatogènes et ferro-oxydantes [2]. L'évolution vers des milieux moins profonds permet ensuite une diversification progressive.

Nous avons indiqué dans une Note précédente [3], les relations stratigraphiques entre les monticules et les autres corps sédimentaires contemporains, notamment les calcaires stratifiés à oncolithes des zones internes de la rampe.

L'objet de ce travail est d'étudier l'évolution diagénétique de la rampe carbonatée et en particulier des monticules micritiques. L'accent sera placé sur la mise en évidence de séquences de cimentation.

MÉTHODES D'ANALYSE. — L'étude s'appuie sur l'observation pétrographique (lumière polarisée et cathodoluminescence) de plusieurs centaines de plaques minces provenant de douze monticules micritiques (*fig. 1*). Des colorations de surface (méthode de Dickson) ainsi que des analyses à la microsonde ont été réalisées. Plusieurs dizaines d'analyses isotopiques du carbone et de l'oxygène ont été effectuées sur les divers types de ciment mis en évidence, après extraction sous la loupe binoculaire.

LES SÉQUENCES DIAGÉNÉTIQUES (*fig. 2*). — Les *fenestras* pluricentimétriques des monticules (pl. II, *fig. 4*) possèdent une séquence diagénétique commune (pl. II, *fig. 1, 2, 5*):

- (1) calcite fibreuse « radiaxiale » ([5], p. 512) à luminescence irrégulière;
- (2) calcite granulaire automorphe non luminescente en cristaux submillimétriques à terminaison scalénoédrique;
- (3) en croissance syntaxiale sur (2), une bordure à vive luminescence orangée, souvent zonaire;
- (4) calcite granulaire xénomorphe à luminescence orangée terne, parfois grossièrement zonaire;
- (5) dolomite baroque ferrifère à luminescence variable [6].

D'un point de vue quantitatif, (1) représente de 20 à 60 % du volume des ciments, (2) et (3) n'en représentent que 5 à 10 % et (4) peut représenter 30 à 70 % des ciments. Les phases (4) et (5) sont contemporaines de l'ouverture d'un réseau de fracture et du début des phénomènes de pression-dissolution.

Ces « grandes » cavités possèdent la séquence la plus complète. Dans les cavités plus petites, on observe la séquence (2) à (5). Dans les calcaires argileux péri- et extra-biohermaux, elle se réduit à (4)-(5). Enfin, dans les calcaires à oncolithes des zones internes de la rampe, une calcite xénomorphe non luminescente, attribuable à la phase (2), colmate la totalité de la porosité. Les phases (4) et (5) y sont présentes uniquement dans les fractures. Toutes les matrices carbonatées montrent la même luminescence terne que (4).

GÉOCHIMIE ET GÉOCHIMIE ISOTOPIQUE. — Le tableau I indique la teneur des différents ciments en Mn, Fe (respectivement activateur et inhibiteur de la cathodoluminescence de la calcite [7]) et Mg, Ca. La figure 3 illustre la liaison entre la composition chimique et la luminescence des calcites. On peut constater que les résultats sont en accord avec la plupart des observations publiées à ce sujet (*voir* [8]).

Les analyses des isotopes du carbone et de l'oxygène portent sur les phases (1), (2), (4), (5) et sur la matrice. Les résultats sont résumés au tableau II et à la figure 4.

TABLEAU I

Analyses microsonde des ciments des monticules micritiques.
Limites de détection (degré de confiance 2σ) : FeO = 0,07%; MnO = 0,05%.

Microprobe analysis of cements of mud mounds.
Detection limit (confidence level 2σ): FeO = 0.07%; MnO = 0.05%.

Phase	Nombre d'analyses	FeO (%)		MnO (%)		MgO (%)		CaO (%)	
		moy.	var.	moy.	var.	moy.	var.	moy.	var.
1	6	n. d.		n. d.		1,2	0,3	98,4	0,8
2	10	n. d.		n. d.		0,8	0,1	99,2	0,3
3	16	n. d.		1,2	0,3	0,8	0,03	98	0,6
4	13	1,0	0,01	0,2	0,02	0,8	0,1	98	1,1
m.	6	0,8	0,2	n. d.		1,5	0,3	94,7	0,8
5	10	16	2	0,2	0,01	31	2,4	52,5	0,2

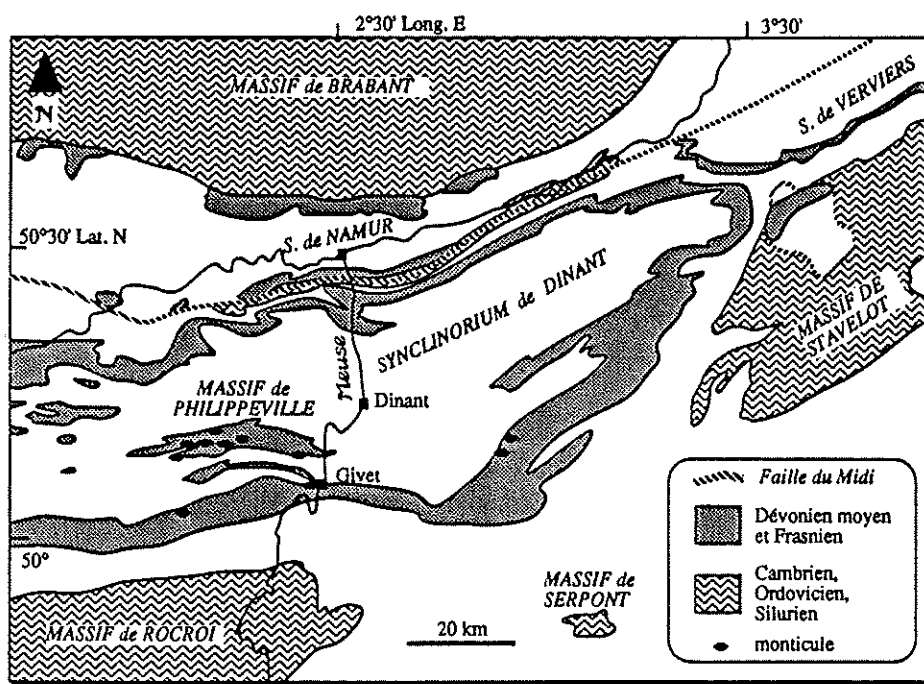


Fig. 1. — Localisation des monticules micritiques.

Fig. 1. — Location of mud mounds.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS. — L'interprétation de l'origine des ciments doit intégrer les données pétrographiques, géochimiques et les résultats de l'étude sédimentologique qui fournit des contraintes sur l'évolution du milieu de sédimentation. Reprenons les différentes phases de la cimentation.

(1) Ce ciment, quoique fibreux, ne possède ni la signature isotopique d'un ciment marin dévonien ($\delta^{18}\text{O}$: $-5,0\text{‰}$ PDB, $\delta^{13}\text{C}$: $+2,0\text{‰}$ PDB, [9]) ni la teneur élevée en Mg de la calcite magnésienne actuelle. Sa morphologie en est cependant très proche et de fréquentes interstratifications ciment-sédiment marin témoignent de son caractère précoce. Au MEB, une attaque acide révèle des cristaux submicroniques de dolomite (pl. II, fig. 3). On peut dès lors admettre que la calcite radiaxiale est un ciment marin magnésien, rééquilibré isotopiquement et chimiquement par des eaux non magnésiennes responsables de la précipitation des phases suivantes. Ce phénomène serait responsable

EXPLICATIONS DES PLANCHES

Planche I

Fig. 2. — Représentation schématique des séquences diagenétiques suivant la nature du corps sédimentaire. La taille des figurés des ciments est proportionnelle à leur importance volumétrique.

Fig. 2. — Schematic representation of diagenetic sequences in various contemporaneous sedimentary bodies. The size of each schema is equivalent to the abundance of cement.

Fig. 3. — Représentation graphique des teneurs en FeO et MnO des calcites granulaires des monticules (analyses microsonde CAMST, UCL).

Fig. 3. — Cross-plot of FeO and MnO content of granular calcites of mud mounds (microprobe analyses, CAMST, UCL).

Fig. 4. — Représentation graphique des rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène des ciments des monticules micritiques.

Fig. 4. — Cross-plot of carbon and oxygen isotope ratios of cements of mud mounds.

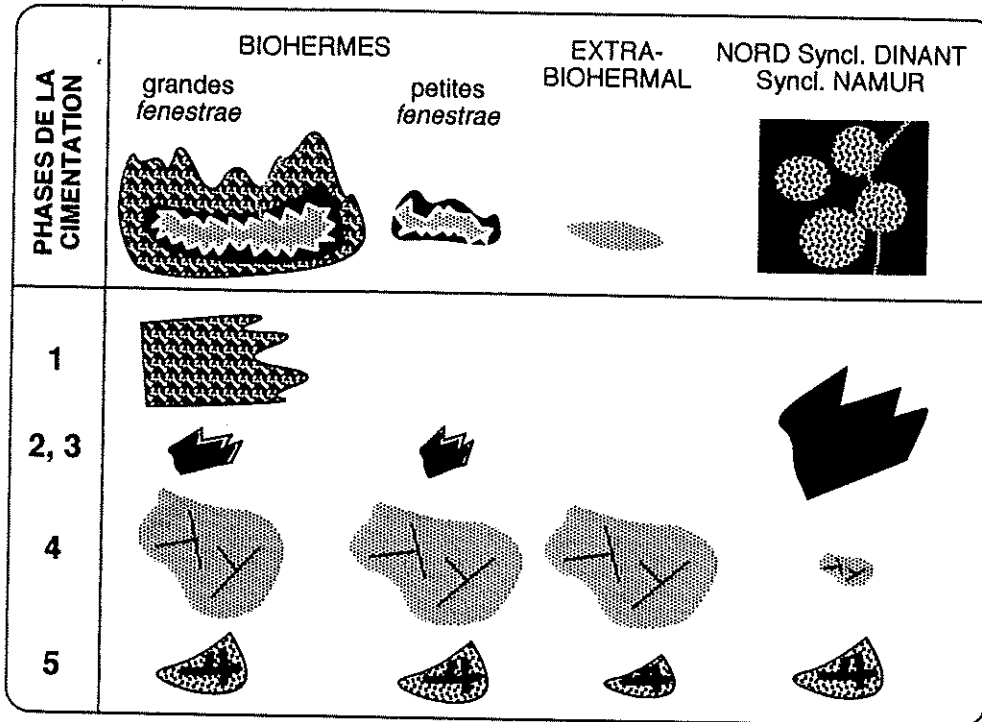


Fig. 2

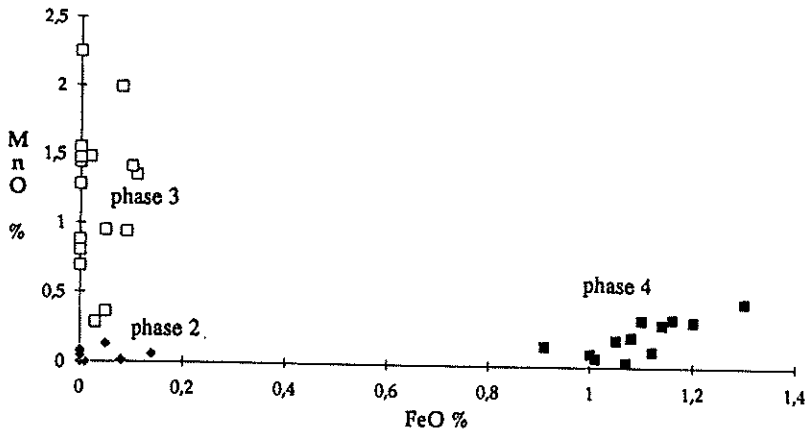


Fig. 3

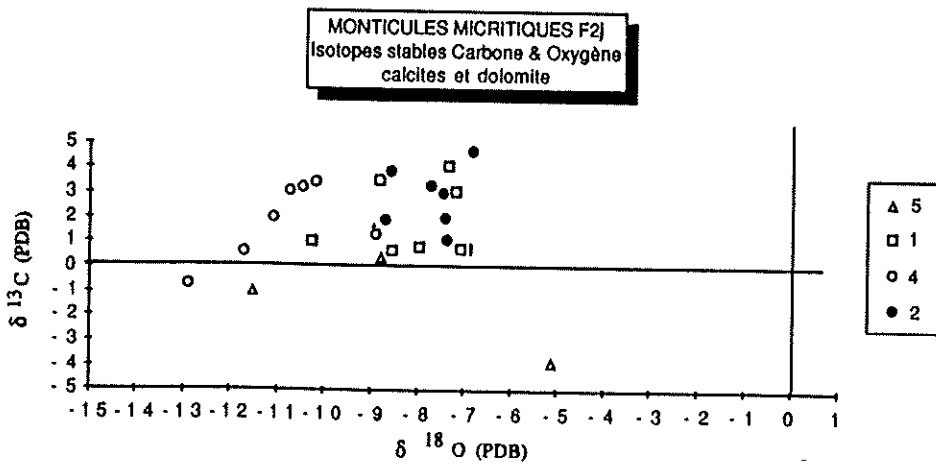


Fig. 4

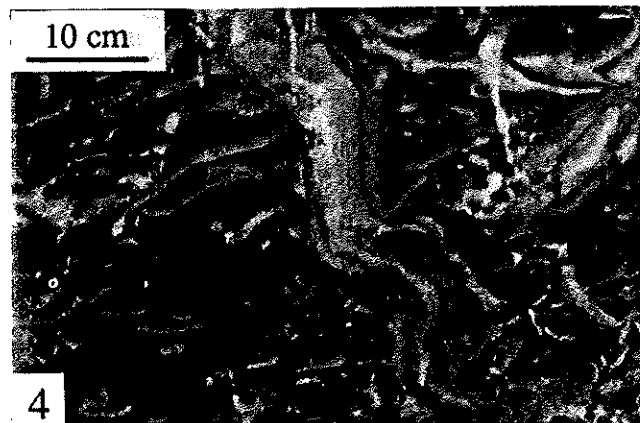
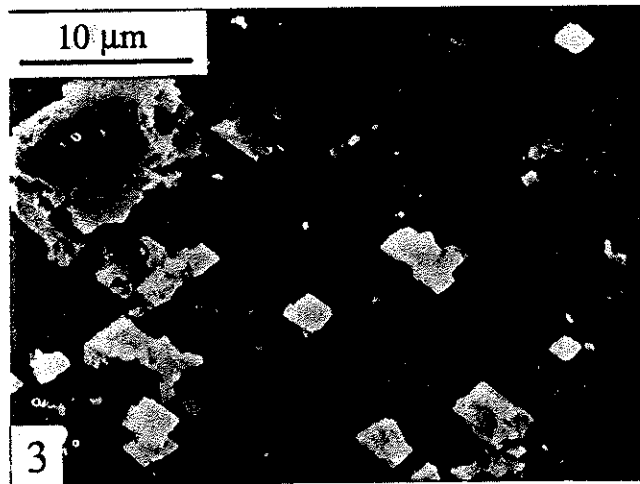
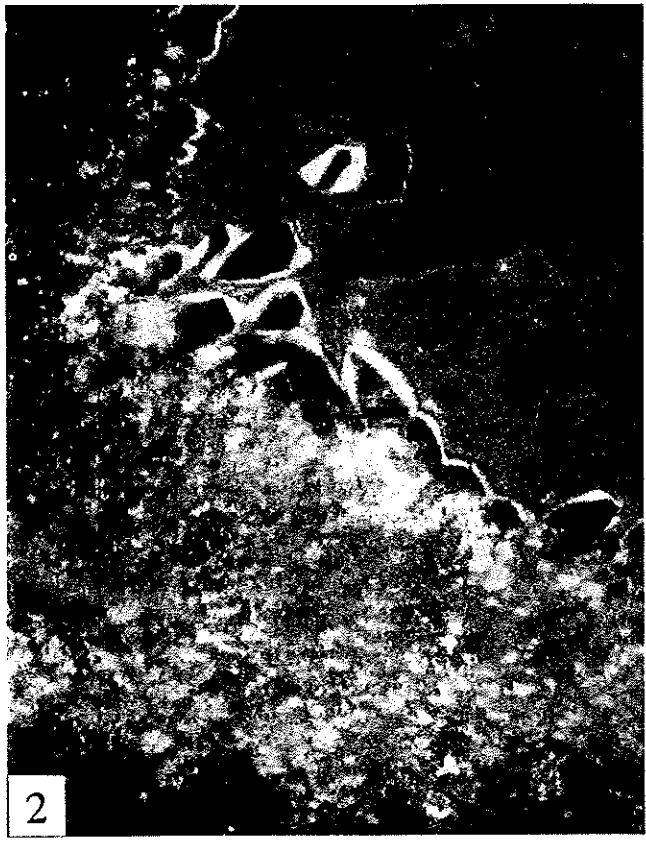


Planche II

Fig. 1. — Fenestra du monticule des Bulants ([1], [3]), Neuville, lumière polarisée.

Fig. 1. — Fenestra from *Les Bulants mud mound*, Neuville, ordinary light.

Fig. 2. — Comme figure 1, cathodoluminescence (appareil Technosyn MkII). Séquence diagénétique (1) à (4).

Fig. 2. — Same as Figure 1, cathodoluminescence. The diagenetic sequence consists of cements (1) to (4).

Fig. 3. — Cliché MEB de ciment radiaxial après attaque à l'HCL (monticule de Rochefontaine, ([1], [3]), Franchimont).

Fig. 3. — SEM photograph of radiaxial cement after HCL attack (Rochefontaine mud mound, Franchimont).

Fig. 4. — Calcaire à stromatactis (grandes fenestreae), monticule du Hautmont ([1], [3]), Vodelée.

Fig. 4. — Stromatactis (large fenestreae), Hautmont mud mound, Vodelée.

Fig. 5. — Séquence diagénétique dans un stromatactis du monticule de Tienne à l'Gatte ([1], [3]), Philippeville, cathodoluminescence.

Fig. 5. — Diagenetic sequence in a stromatactis from Tienne à l'Gatte mud mound, Philippeville, cathodoluminescence.

de la similarité des compositions isotopiques des calcites (1) et (2) et de la luminescence irrégulière, nulle ou orangée de (1).

(2) et (3) Ce type de ciment, étant donné sa morphologie et sa composition, est rarement considéré comme un ciment marin. Il peut s'agir soit d'un ciment météorique, soit d'un ciment lié à l'évolution d'eaux connées au cours de l'enfouissement. La zonation de la luminescence plaide plutôt en faveur d'un ciment météorique [9]. La séquence (2)-(3) s'interprète alors comme résultant de l'augmentation du caractère réducteur des fluides météoriques, permettant l'incorporation du Mn dans le réseau de la calcite [10]. Le $\delta^{18}\text{O}$ de (2), nettement plus négatif que la valeur acceptée pour les ciments marins traduit l'influence météorique. Enfin, la dispersion des valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ est considéré comme un critère d'identification des ciments météoriques [4].

(4) Cette calcite témoigne, par sa teneur en Fe, de conditions plus réductrices que (3). Introduit dans les cavités par un réseau de fractures, ce ciment présente une grande homogénéité de composition. Ses valeurs de $\delta^{18}\text{O}$, nettement négatives, témoignent d'une augmentation de température des fluides diagénétiques. On note d'ailleurs que plus les monticules sont éloignés du paléorivage, plus le $\delta^{18}\text{O}$ de (4) est négatif [1], traduisant un enfouissement plus important. La diminution corrélative du $\delta^{13}\text{C}$ peut être liée à une disparition des carbonates métastables (diminution de l'interaction sédiment-fluides) ou encore à la production de ^{12}C par maturation des hydrocarbures [11]. Sans rejeter totalement une influence météorique, on doit conclure ici à une diagenèse d'enfouissement. La composition isotopique de la matrice et sa luminescence montrent que la dernière phase du néomorphisme est contemporaine de la précipitation de la phase (4).

(5) Le caractère tardif de ce ciment apparaît par sa position dans la séquence diagénétique : il est contemporain ou postérieur à (4). Il résulte d'une diagenèse d'enfouissement.

SÉQUENCES DIAGÉNÉTIQUES ET ÉVOLUTION POST-SÉDIMENTAIRE DE LA RAMPE. — L'histoire diagénétique débute dès l'édification des monticules, avec la croissance dans les « grandes » cavités d'un ciment marin magnésien. Ensuite, intervient un aquifère météorique oxydant, à circulation intense et forte cimentation dans les zones internes de la rampe, proches des aires d'alimentation. Dans les monticules micritiques ne précipite par contre qu'une frange de calcite (2), rapidement suivie d'un ciment plus réducteur (3). Cette différence traduit l'éloignement des monticules par rapport aux zones de recharge

TABLEAU II

Analyses isotopiques (spectromètre de masse Finnigan Mat Delta E) du C et de l'O d'échantillons de neuf monticules micritiques. (1), (2), (4) et (5) : ciments; (m) : matrice. Deux séries de 10 analyses ont été réalisées pour chacun des échantillons.

Results of isotopic analyses of C and O of samples from nine mud mounds. (1), (2), (4) and (5): cements; (m): matrix. Two series of 10 analyses have been performed on each sample.

Phase	Nombre d'échant.	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)		$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	
		moy.	var.	moy.	var.
1	8	1,69	1,4	-8,02	1,1
2	8	2,87	1,1	-7,70	0,6
4	13	2,24	1,5	-10,86	1,0
m	15	1,94	1,5	-10,85	1,8
5	4	-0,71	2,0	-8,59	2,3

de l'aquifère. L'absence des phases (2) et (3) dans les calcaires argileux périphériques aux monticules est attribuée à leur faible perméabilité.

L'envahissement des sédiments par une lentille météorique est la conséquence d'une importante régression marine. Cette régression est pré-carbonifère, puisqu'elle est préalable aux phénomènes de pression-dissolution qui débutent avec quelques centaines de mètres d'enfouissement. Il s'agit donc de la régression famennienne. La transgression carbonifère est ensuite responsable de l'arrêt de la cimentation météorique. Les ciments (4) et (5) témoignent d'une élévation de température et de l'existence d'une pression lithostatique à l'origine des phénomènes de pression-dissolution. Les fluides chauds et réducteurs responsables de la précipitation de ces ciments ont transité par un réseau de fracture ouvert à l'échelle de la rampe. Le rééquilibrage chimique et isotopique de la matrice est la conséquence de cette dernière phase.

CONCLUSIONS. — La séquence diagénétique décrite ici semble être commune à plusieurs types de corps carbonatés stratigraphiquement différents [12]. Il faut voir dans cette similitude l'effet d'une histoire post-sédimentaire analogue : une cimentation en zone phréatique marine préalable à l'enfouissement, puis l'installation d'une lentille météorique au cours d'une régression marine, avec faciès réduits dans les zones distales de l'aquifère et enfin, une cimentation d'enfouissement, après une nouvelle transgression. Ce « motif » géologique s'est répété maintes fois.

Note remise le 6 janvier 1992, acceptée après révision le 17 juin 1992.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. BOULVAIN, *Thèse Doct. Sciences*, Université Libre de Bruxelles, 1990, 535 p. (non publié).
- [2] F. BOULVAIN, *Ann. Soc. Géol. Belgique*, 112, 1989, p. 79-86.
- [3] F. BOULVAIN et M. COEN-AUBERT, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 309, série II, 1989, p. 81-87.
- [4] A. H. SALLER et C. H. MOORE Jr, *Sedimentology*, 38, 1991, p. 601-621.
- [5] R. G. C. BATHURST, *J. of Geology*, 67, 1959, p. 506-521.
- [6] R. L. FOLK et R. ASSERETO, A.A.P.G. abstr. with progr., 1974, p. 34-35.
- [7] P. AMIEUX, *Bull. C. Rech. Explor.*, Prod. Elf-Aquitaine, 6, 1982, p. 437-483.
- [8] N. G. HEMMING, W. G. MEYERS et J. C. GRAMS, *J. Sedim. Petrol.*, 59, 1989, p. 404-411.
- [9] S. J. CARPENTER et K. C. LOHMANN, *J. Sedim. Petrol.*, 59, 1989, p. 792-814.
- [10] D. R. CHAMP, J. GULENS et R. E. JACKSON, *Can. J. Earth Sc.*, 16, 1979, p. 12-23.
- [11] C. H. MOORE, *Developments in Sedimentology*, 46, 338 p.
- [12] J. MILLER, in J. H. SCHROEDER et B. H. PURSER éd., *Reef diagenesis*, Springer-Verlag, 1986, p. 311-335.

F. B. et A. H. : *Laboratoire Ass. Géologie, Université libre de Bruxelles, 50, av. Roosevelt, B-1050 Bruxelles;*
 F.B. : adresse actuelle : *Service géologique de Belgique, rue Jenner, B-1040 Bruxelles;*
 E. K. : *Geochronology (CHRO-WE), Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan, 2, B-1050 Brussel.*