

# OBSERVATIONS SUR LA CIMENTATION DES BIOHERMES DE «MARBRE ROUGE» DU FRASNIEN FRANCO-BELGE<sup>1</sup>

par

**Frédéric BOULVAIN<sup>2</sup>**

(8 figures, 1 tableau et 1 planche)

**RESUME.**- L'étude pétrographique (lumière naturelle et cathodoluminescence) couplée à des analyses à la microsonde des ciments de cavité des monticules de boue frasniens «F2j» conduit à la mise en évidence d'une séquence diagénétique commune à tous les édifices. Cette séquence comprend cinq phases de cimentation et témoigne de l'augmentation du caractère réducteur des fluides intersticiels.

Les calcaires infra- et péri-biohermaux par contre sont caractérisés par une seule phase de cimentation. Cette phase correspond à la quatrième phase de cimentation des biohermes et est liée à l'ouverture d'un réseau de fracture permettant le transit de fluides riches en carbonates. L'essentiel du CaCO<sub>3</sub> semble provenir du développement de phénomènes de pression-dissolution.

**ABSTRACT.**- Cathodoluminescence and microprobe analysis of Frasnian «F2j» mud-mounds cavity cements lead to identification of a characteristic diagenetic sequency, identical for all studied bioherms. This sequency, including five cementation stages, reflects decreasing redox potential of pore fluids with time.

Infra- and peri-biohermal limestones, however, are characterized by a single cementation stage. This stage is equivalent to the forth biohermal cementation stage and depends on circulation of carbonates-rich fluids owing to opening of a fracture system. Most of CaCO<sub>3</sub> supply seems to originate from development of pression-solution phenomena.

## INTRODUCTION

Si les descriptions géologiques et les études paléontologiques ou écologiques des biohermes de «marbre rouge» de la partie supérieure du Frasnien de la Belgique sont relativement nombreuses (Tourneur, 1981), il n'en va pas de même en ce qui concerne la diagénèse.

Ces dernières années pourtant, de nombreuses études de bioconstructions paléozoïques d'Europe et du Canada ont été consacrées essentiellement à ce sujet; citons entre autre les travaux de Schmidt (1971), Davies (1977), Walls et coll. (1979), Wong & Oldershow (1981), Mountjoy & Krebs (1983), Walls & Burrows (1985), Frykman (1986), Miller (1986) qui s'attachent principalement à préciser la nature et l'origine des divers types de ciments qui se succèdent dans les cavités.

Il nous a semblé dès lors intéressant d'étudier l'évolution diagénétique de quelques biohermes

frasniens belges dans le but d'une part, de mettre en évidence les caractéristiques de la cimentation de chaque édifice et d'autre part de pouvoir comparer la diagénèse des différents biohermes.

## CHOIX DES BIOHERMES ETUDIÉS ET METHODES

Cinq biohermes (fig. 1 et 2) ont fait l'objet d'un échantillonnage banc par banc suivi d'une étude pétrographique systématique. Il s'agit, d'Ouest en Est, des biohermes des Bulants, de Tiène al Gatte, du Hautmont, du Petit-Mont et de Fort-Condé.

1. Communication présentée à la séance du 6 décembre 1988.

2. Laboratoire de Pétrologie Sédimentaire, bât. 504, Université de Paris XI, 91405 Orsay, France et Laboratoires Associés de Géologie-Pétrologie-Géochronologie, Université Libre de Bruxelles, 50 av. Roosevelt, B-1050 Bruxelles, Belgique.

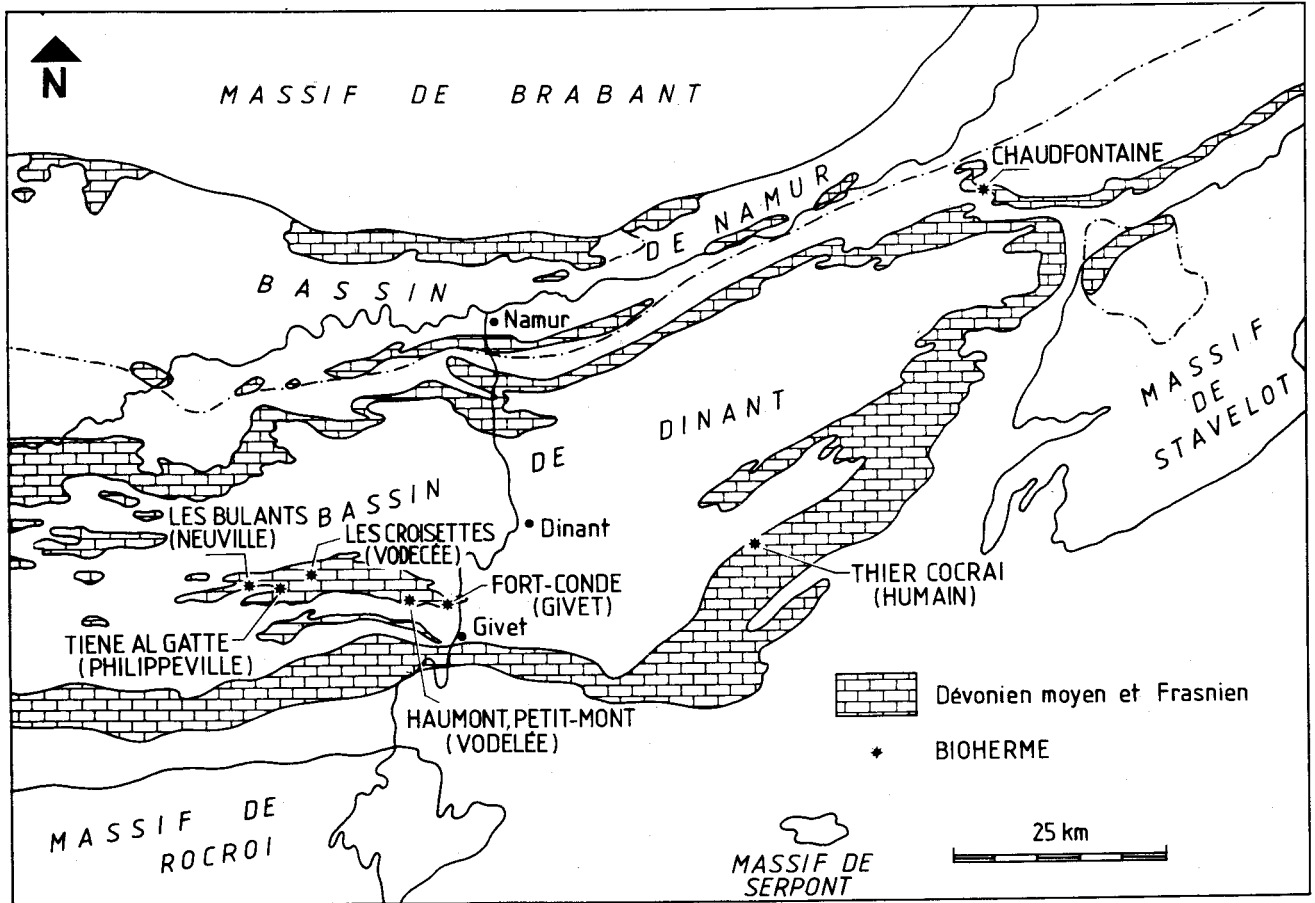


Fig. 1.- Carte géologique sommaire du Sud de la Belgique. Les coordonnées Lambert des biohermes étudiés sont : Les Bulants: X 159,850 Y 95,600; Tiène al Gatte: X 163,625 Y 96,625; Les Croisettes: X 164,500 Y 98,175; Hautmont: X 175,175 Y 95,025; Petit-Mont: X 175,650 Y 95,000; Fort-Condé: X 92,150 Y 181,150; Tiers Cocrai : X 212,525 Y 98,950.

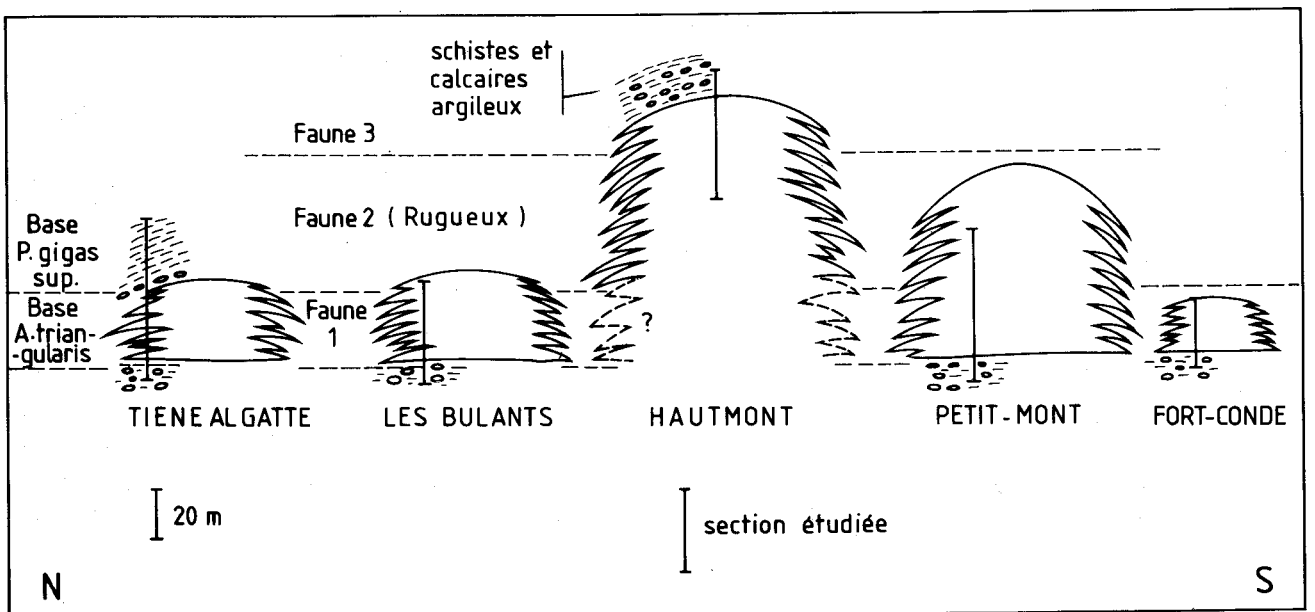


Fig. 2.- Position stratigraphique des biohermes étudiés. La situation des coupes est représentée pour chaque édifice.

Chacun de ces édifices possède des caractéristiques sédimentologiques ou d'affleurement contrastées. Les conditions d'affleurement permettent pour les biohermes de Tiène al Gatte et des Bulants d'échantillonner des coupes en périphérie; Hautmont et Petit-Mont, édifices de grande taille, sont intéressants à comparer à Fort-Condé, de petite taille; et enfin, Hautmont possède un coeur important de «marbre gris» (Dumon, 1957), accessible dans les conditions actuelles d'affleurement.

De nombreux échantillons pétrographiques provenant de ces édifices ont été observés en cathodoluminescence\*, de même qu'une vingtaine d'autres échantillons prélevés de manière non-systématique dans les biohermes de Tiers-Cocrai, des Croisettes et du sondage 134 E303 de Chaudfontaine (Dejonghe, 1985). Les observations en cathodoluminescence ont été accompagnées de tests de coloration destinés à distinguer la calcite, la calcite ferrifère, la dolomite et la dolomite ferrifère (Dickson, 1965), ainsi que d'analyses à la microsonde des différentes phases mises en évidence (tableau 1).

## POSITION STRATIGRAPHIQUE

La figure 2 donne la position stratigraphique des cinq biohermes étudiés. Tous ces biohermes contiennent une ou deux des associations de Rugueux massifs distinguées par Coen, Coen-Aubert & Cornet (1977) et Coen-Aubert (1982) dans la partie supérieure du Frasnien de la Belgique. Rappelons (Coen et coll., *op. cit.*) que la première association de Rugueux correspond à la zone à *Ancyrognathus triangularis* supérieure *sensu* Coen (1973) et que les deuxième et troisième associations sont caractéristiques de la zone à *Palmatolepis gigas* supérieure.

Nous nous sommes basés sur des déterminations inédites de Rugueux massifs effectuées par Madame Coen-Aubert pour les coupes de Tiène al Gatte et Hautmont, sur des datations par Conodontes pour le bioherme de Fort-Condé (Tourneur, 1982) et sur des datations par Conodontes et par Rugueux massifs pour les biohermes des Bulants et du Petit-Mont (Coen et coll., *op. cit.*).

## LES FENESTRAE DES BIOHERMES DE MARBRE ROUGE

Par convention, nous appellerons «*Fenestra*» toute zone actuellement occupée par du ciment, que la cimentation ait eu lieu dans une cavité réelle ou qu'elle ait eu lieu au sein d'un gel organique.

Une littérature très abondante est consacrée à l'origine des *fenestras* des «monticules de boue» (voir les revues bibliographiques de Heckel, 1972; Wilson, 1975 et Pratt, 1982). Des modèles génétiques variés ont été proposés, impliquant des processus organiques ou physiques.

Notre propos n'est pas, dans le cadre de cet article, de faire une description ou une classification exhaustive des *fenestras* des biohermes de marbre rouge. Nous voudrions insister simplement sur le fait que ces *fenestras* sont de taille, de morphologie et d'origine diverses.

Une façon simple et intéressante de les classer est d'observer leur relation avec les microfaciès. Nous avons pu montrer que certaines *fenestras* (zebra) qui possèdent une répartition indépendante du type de microfaciès, sont dues à des poussées latérales provoquant l'ouverture du sédiment. D'autres types de *fenestras*, celles-là caractéristiques de certains microfaciès, sont dues soit à des Eponges, soit à des tapis microorganiques (Boulvain, 1987). La seule caractéristique commune à toutes ces structures (la seule d'ailleurs qui nous intéresse dans ce travail) est leur cimentation, ce qui n'indique, tout au plus, qu'une histoire diagénétique commune.

## DESCRIPTION DES CIMENTS

### 1. GENERALITES

Il est possible de classer les ciments de cavité des biohermes de marbre rouge en trois catégories. Il s'agit, successivement et dans l'ordre chronologique du remplissage : des ciments «fibreux», représentés généralement par de la calcite radiaxiale (Bathurst, 1959), ou plus rarement par de la calcite à axes optiques en fascicules («fascicular optic», Kendall, 1977) ou de la calcite palissadique, suivis par de la calcite sparitique, pour terminer dans certains cas par de la dolomite ferrifère.

Ces trois types de ciments ne sont pas toujours simultanément présents. On peut constater une fois de plus que la calcite radiaxiale est caractéristique des biohermes (Miller, 1986) et qu'elle ne s'observe pas dans les calcaires argileux sous-jacents et périphériques. La dolomite ferrifère est relativement plus abondante vers le sommet des bioconstructions.

Examinons maintenant de manière plus détaillée les phases successives de la cimentation. Sur les coupes illustrées, les ciments sont

\* Appareil Technosyn Model 8200 Mk II du Laboratoire de Pétrologie Sédimentaire de l'Université de Paris XI.

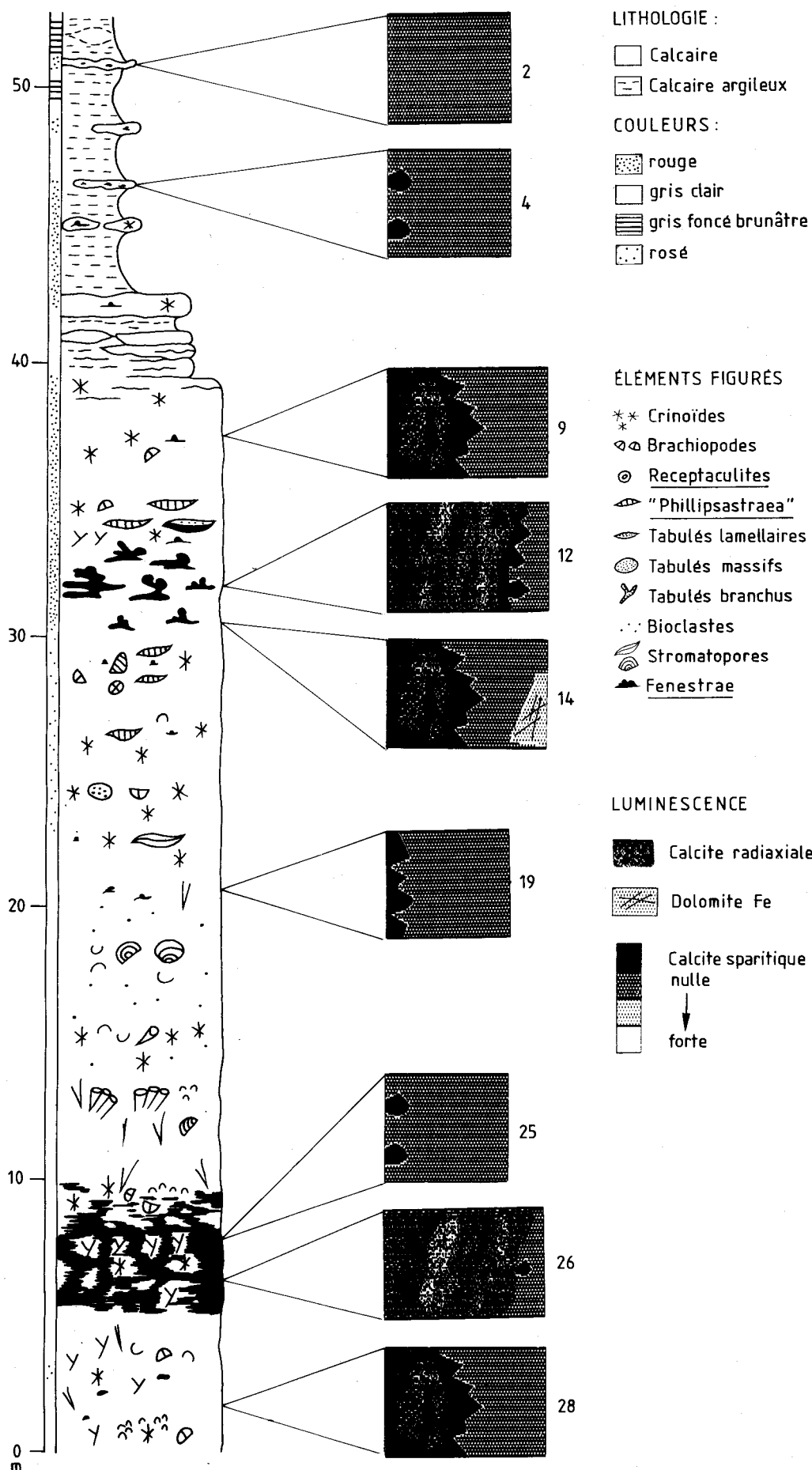


Fig. 3.- Log schématique du bioherme de Hautmont suivant la coupe représentée fig. 2. Les résultats des observations en cathodoluminescence sont représentés schématiquement. Par convention, le centre des cavités est situé vers la droite de chaque case.

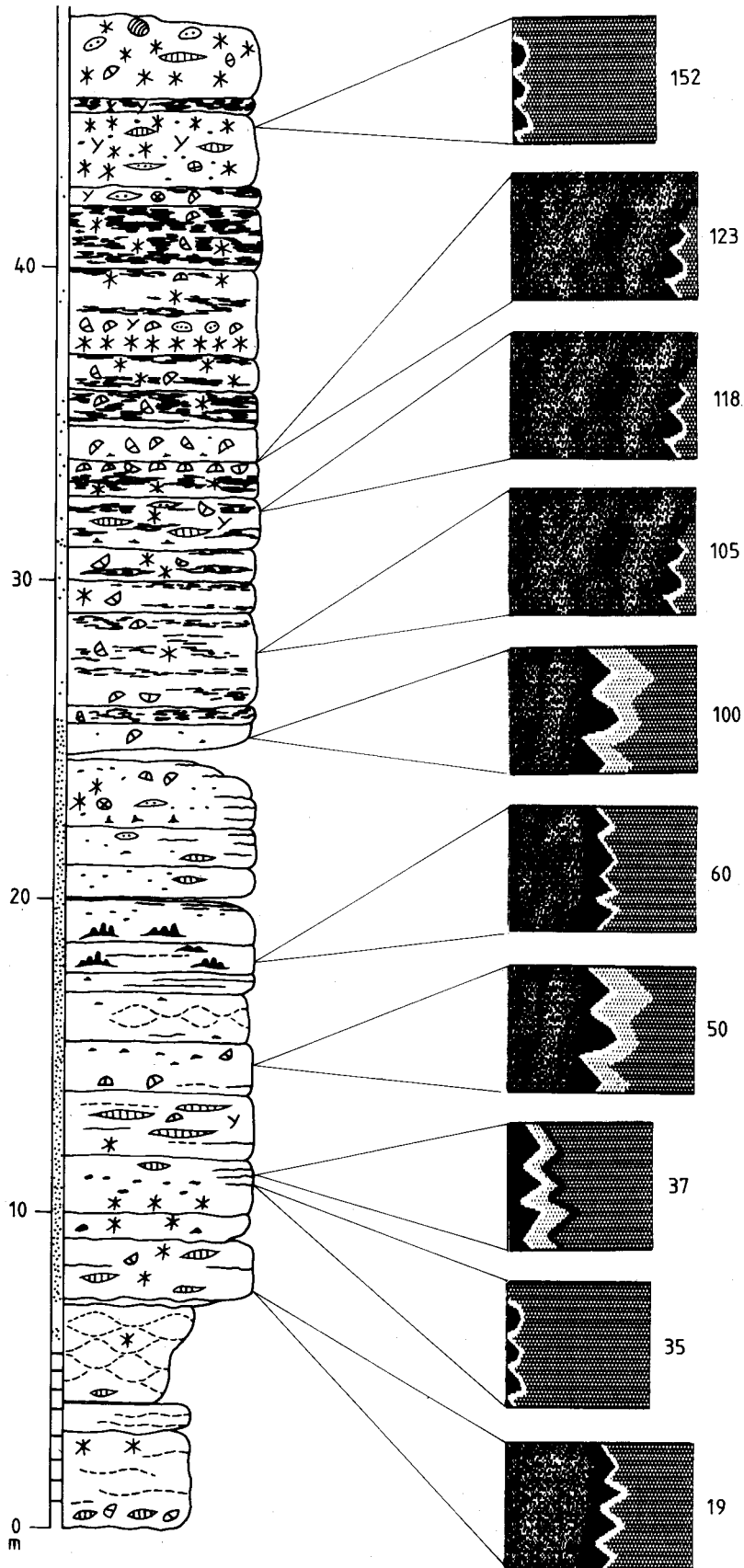


Fig. 4.- Log schématique du bioherme de Petit-Mont suivant la coupe représentée fig. 2.

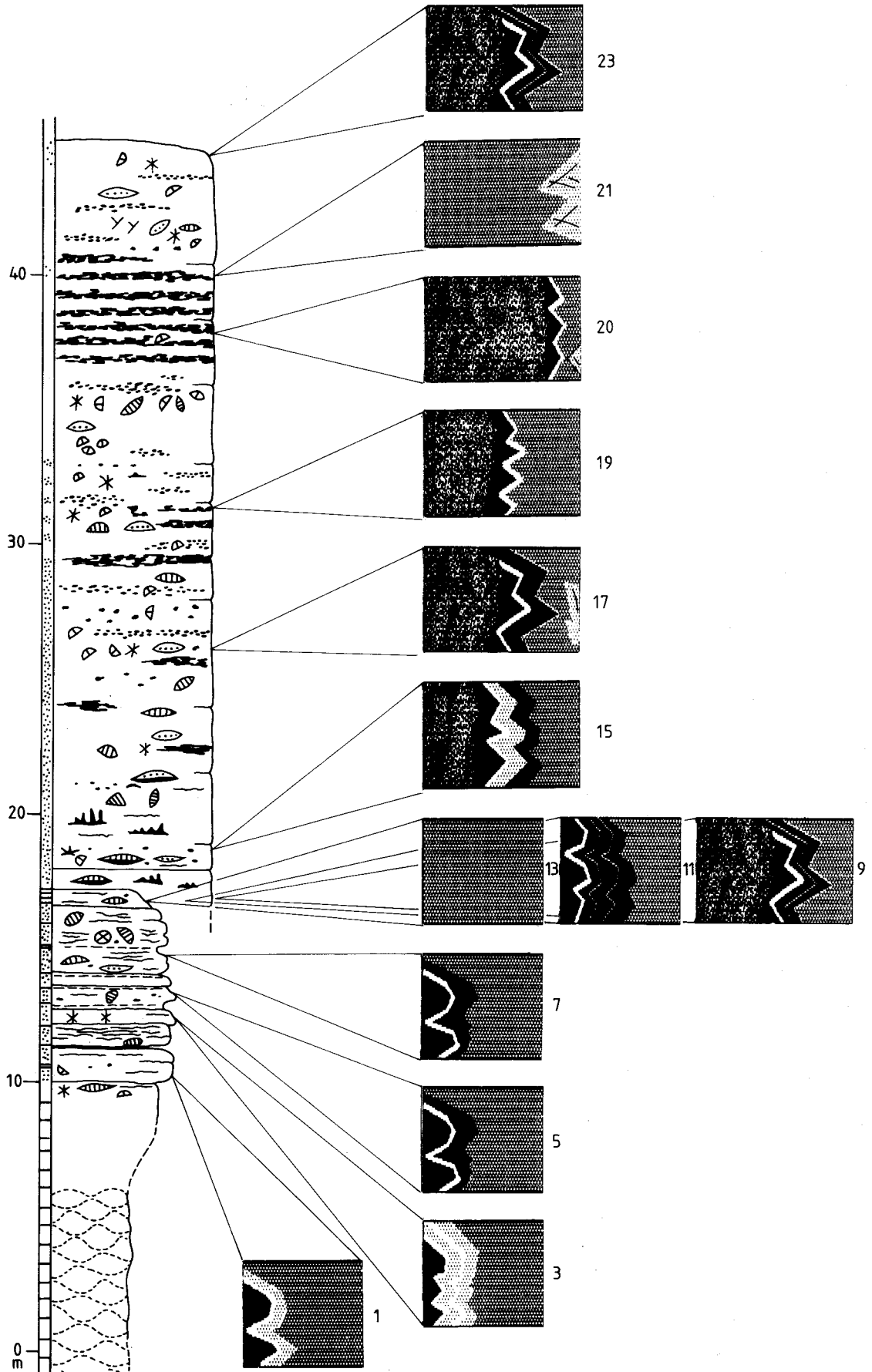


Fig. 5.- Log schématique du bioherme des Bulants suivant la coupe représentée fig. 2.

représentés de manière schématique suivant leur nature (calcite radiale, sparitique, dolomite ferrifère), l'intensité de leur luminescence et la proportion relative des différentes phases.

## 2. LA CALCITE RADIAIALE (1<sup>è</sup> phase de la cimentation)

L'origine de ce ciment a fait l'objet de nombreuses controverses opposant les partisans d'une origine inorganique, par remplacement d'un ciment fibreux primaire (Kendall & Tucker, 1973; Kendall, 1977) ou par précipitation directe à partir de l'eau de mer (Kendall, 1985; Saller, 1986) et les partisans d'une origine organique (Monty et coll., 1982; Monty, 1982; Vanlaer & Monty, 1984). Mamet & Boulvain (1988) ont montré que, sans préjuger de son origine, la croissance de ce ciment peut s'effectuer à partir de voiles endostromatolithiques.

En tout état de cause, le ciment radiaial semble être une phase précoce, puisque l'on retrouve parfois (c'est le cas de certains *Stromatactis* de Fort-Condé) des couches de ciment surmontées de micrite.

Le ciment radiaial (Pl. 1 : A, B, C, D) est caractérisé par d'abondantes inclusions, de taille souvent inférieure au micron et réparties en zones de densité différente perpendiculairement à la direction de croissance des cristaux. Ces inclusions sont composées principalement soit de microrhomboides de dolomite (mis en évidence le long des plans de clivage, au microscope électronique à balayage, après attaque acide ménagée), soit de matière organique, sous forme de bâtonnets et de petites sphères. Il pourrait s'agir de micro-organismes piégés lors de la croissance du ciment (Monty, 1982); les bandes de densité différentes correspondraient dans ce cas à des vitesses de cimentation variables, les plus riches en inclusions étant les couches de ciment ayant poussé le plus lentement. Cette zonation rythmique peut se retrouver identique dans des *fenestrae* éloignées de plusieurs mètres et faisant partie de niveaux différents. Cette observation tendrait à prouver que, bien que précoce, ce type de cimentation s'est fait dans certains cas à une échelle supérieure à l'échelle de la cavité individuelle. Cela impose bien évidemment des contraintes sur toute tentative de modélisation de la cimentation radiaiale.

Rappelons aussi que l'abondance des inclusions de la calcite radiaiale est nettement plus élevée lorsqu'il s'agit de ciments remplaçant des tapis microorganiques (Boulvain et coll., 1987).

La répartition du ciment radiaial dans les biohermes semble dépendre de la taille des

cavités. Les cavités les plus petites (infracentimétriques, parfois centimétriques) ne possèdent pas de ciment radiaial, par opposition aux cavités plus grandes dont la première phase de cimentation est radiaiale. Les spicules d'Eponge, même de grande taille, ne possèdent jamais de ciment radiaial, ce qui semble indiquer que la phase de croissance de ce ciment a été toujours antérieure à la phase de dissolution des spicules siliceuses.

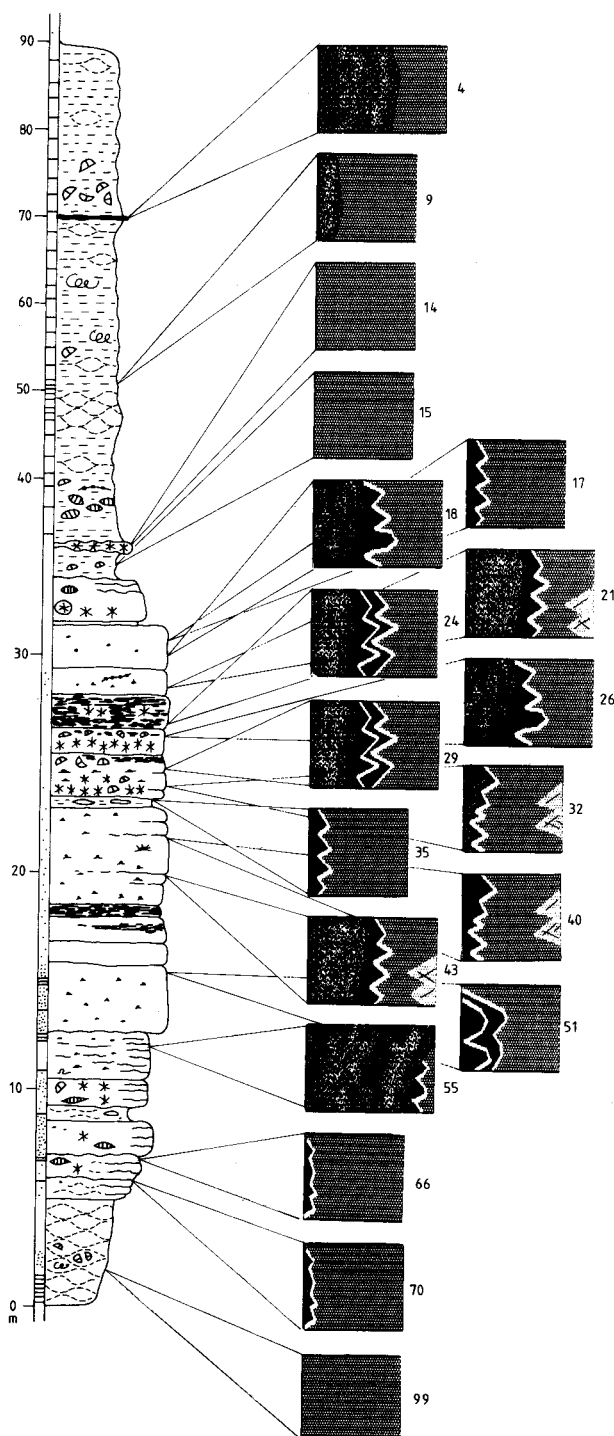


Fig. 6. - Log schématique du bioherme de Tiène al Gatte suivant la coupe représentée fig. 2.

Tableau 1. Analyse chimique des différents ciments  
(Analyses effectuées à la microsonde Camebax du C.A.M.S.T. de l'Université Catholique de Louvain).

	FeO %		MnO %		MgO %		CaO %		Nombre d'échantillons
	moy	var	moy	var	moy	var	moy	var	
calcite sparitique automorphe non luminescente (phase 2)	<0,05*	-	<0,1	-	0,8	0,1	99,2	0,3	10
calcite sparitique automorphe luminescente (phase 3)	<0,03	-	1,2	0,3	0,8	0,03	98,0	0,6	16
calcite sparitique xénomorphe peu luminescente (phase 4)	1,0	0,01	0,2	0,01	0,8	0,07	98	1,1	13
dolomite ferrifère (phase 5)	16	2	0,2	0,01	31	2	52	0,2	10

\* limite de détection calculée avec un intervalle de confiance de  $3\sigma$

La luminescence du ciment radiaxial est nulle, sauf dans certaines zones riches en inclusions qui apparaissent sous forme de points brillants (Pl. 1 : B,D).

Signalons enfin que tous les organismes à test aragonitique ont subi une dissolution suivie de précipitation de calcite sparitique, contrairement au ciment radiaxial qui ne montre aucune trace de corrosion. Cela permet évidemment d'exclure pour ce ciment une origine aragonitique, et plaide, avec la présence d'inclusions dolomitiques, pour un précurseur magnésien (High Magnesian Calcite).

### 3. LA CALCITE SPARITIQUE

est présente dans tous les types de *fenestrae*. Elle est limpide et possède peu d'inclusions.

L'observation en cathodoluminescence permet de différencier deux générations de ciments sparitiques : une première phase automorphe caractéristique des biohermes et des calcaires argileux immédiatement sous-jacents et une seconde génération plus tardive, xénomorphe, ubiquiste et nourrie par un système de fissures. La sparite automorphe se présente, soit immédiatement après le ciment radiaxial, soit comme premier ciment, principalement dans les petites *fenestrae*. La sparite xénomorphe termine la cimentation de la plupart des *fenestrae*. C'est le seul ciment des calcaires non-biohermaux.

#### La calcite sparitique automorphe (2e et 3e phase de la cimentation) Pl. 1 : B, D)

Ce ciment se présente soit sous forme d'une frange de cristaux limpides euhédraux, souvent scalénoédriques, de quelques centaines de microns, croissant sur le ciment radiaxial, soit sous forme d'auréole syntaxique autour d'articles de Crinoïde.

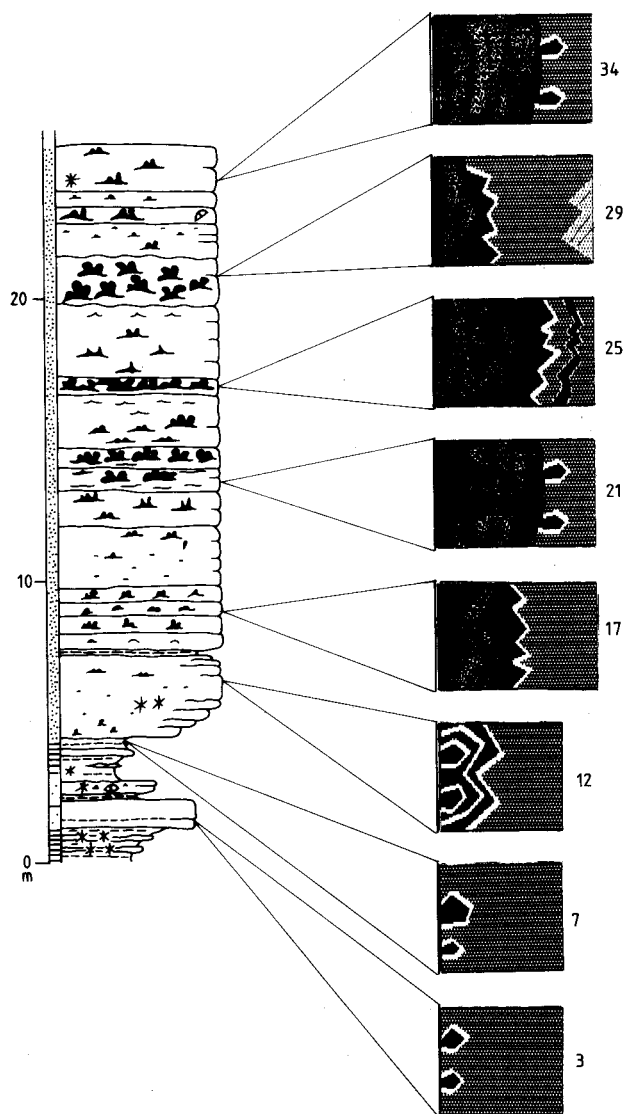


Fig. 7.- Log schématique du bioherme de Fort-Condé suivant la coupe représentée fig. 2.



Des différences importantes de luminescence permettent d'opposer un premier stade non luminescent (2<sup>e</sup> phase de la cimentation; composition chimique, voir tableau) à un deuxième stade en croissance syntaxique, formant une bordure externe à chaque cristal, de luminescence orangée forte, souvent d'importance variable (3<sup>e</sup> phase). Dans certains cas, le passage entre les deux phases est oscillant (fig. 7, éch. 12). L'importance relative du stade luminescent semble caractéristique de l'édifice considéré : comparons par exemple Hautmont (fig. 5), où la 3<sup>e</sup> phase est représentée uniquement par une fine bordure luminescente, aux autres biohermes où ce ciment est plus développé. Le zonage de la luminescence par contre est variable au sein d'un édifice (voire au sein d'une cavité) et semble refléter des caractéristiques plus locales.

Dans de rares cas, de la micrite infiltrée peut recouvrir la sparite automorphe avant la précipitation de la phase suivante.

#### La calcite sparitique xénomorphe

(4<sup>e</sup> phase de la cimentation) (Pl. 1 : B, D)

Ce ciment est le seul présent dans les calcaires argileux non-biohermaux et représente la dernière phase calcitique du remplissage des cavités des biohermes. Cette différence de cimentation est clairement visible pour les échantillons BL 9, 11 et 13 (coupe des Bulants, fig. 4), prélevés latéralement à intervalles de 7 mètres au sein d'un même banc.

Cette sparite se présente sous forme de grands cristaux limpides sans formes propres. Elle possède une luminescence orangée terne moyenne à faible, avec parfois un zonage peu visible en grandes plages.

La plupart des fissures, souvent en communication avec les cavités, possèdent ce type de ciment.

Dans certains échantillons, ce ciment s'infiltré entre cristaux ou groupes de cristaux de calcite radiaxiale.

Les fissures à ciment sparitique sont contemporaines du développement des phénomènes de pression-dissolution (Wanless, 1979), puisqu'on observe tantôt des fissures recoupant des sutures argileuses («terrasses» des marbriers), tantôt l'inverse. Outre la formation de ces sutures argileuses, la pression-dissolution est responsable du développement localisé de dolomite en rhomboèdres non luminescents de 50 à 200  $\mu\text{m}$ .

#### 4. LA DOLOMITE FERRIFERE (5<sup>e</sup> phase de la cimentation)

Elle représente en relation avec un système de fractures recoupant le précédent, le remplissage ultime de certaines cavités biohermales. Elle est spécialement abondante dans les microfaciès où abondent les tapis microorganiques («wackestones à grandes *fenestrae* irrégulières» in Boulvain et coll., *op. cit.*) c'est-à-dire des zones à forte cimentation radiaxiale. C'est de ce fait le seul type de ciment qui, à l'intérieur du bioherme, tende à posséder une distribution liée à un microfaciès.

Cette dolomite se présente sous forme de cristaux parfois rhomboédriques à faces et clivages souvent courbes (dolomite baroque), de 1 à quelques millimètres de longueur. Leur luminescence est faiblement orangée. Par endroits, une dernière phase calcitique (6<sup>e</sup> phase) apparaît sous forme de dédolomite à luminescence orangée forte.

#### 5. SILICIFICATIONS ET FRACTURES TARDIVES

Dans certains biohermes, on observe la présence sporadique, principalement dans les cavités cimentées, de cristaux de quartz bipyramidés non luminescents de quelques centaines de microns. Ces cristaux recoupent tous les ciments carbonatés (dont ils contiennent de nombreuses inclusions) et paraissent liés à des cassures.

Cette phase accessoire de silicification peut être rapprochée du «quartz II» de Mountjoy & Krebs (1983) signalé dans de nombreuses constructions récifales du Dévonien de l'Allemagne et interprété comme associé à des circulations hydrothermales tardives. Ce quartz est donc postérieur aux quartz authigènes décrits par Molenaar & de Jong (1987) dans des calcaires dévoniens belges de plate-forme peu profonde.

Des fractures tardives (probablement liées à l'émersion post-varisque) à sparite non luminescente recoupent tous les ciments précédents.

#### INTERPRETATION

Nous nous sommes basé essentiellement sur les travaux de Frank et coll. (1982) et Grover & Read (1983) pour qui la succession des types de ciments reflète les variations du chimisme des fluides et particulièrement de leur degré d'oxydo-réduction au cours de la diagenèse. Nous nous

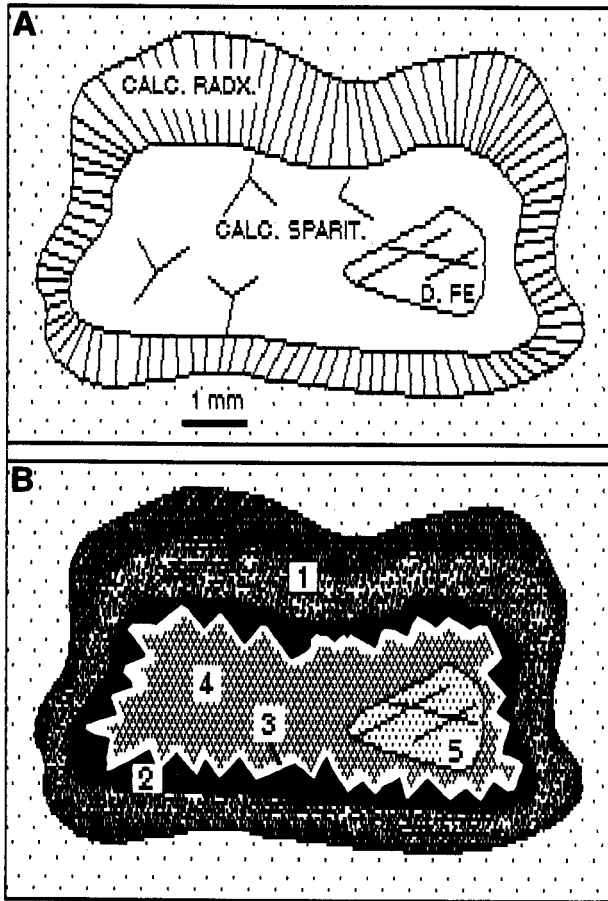


Fig. 8.- Représentation schématique des phases (1-5) de la cimentation, en lumière naturelle et en cathodoluminescence.

Nous limiterons provisoirement notre interprétation à quelques indications sur le chimisme des fluides précipitant les ciments, sans préjuger de leur origine.

Nous avons donc observé la séquence diagénétique suivante : pour les calcaires biohermaux il s'agit, suivant la taille de la cavité, de la succession plus ou moins complète (fig. 8) calcite radiaxiale (1e phase) - calcite sparitique automorphe non luminescente (2e phase) - calcite sparitique syntaxique automorphe luminescent (3e phase) - calcite sparitique xénomorphe faiblement luminescente (4e phase) - dolomite ferrifère (5e phase); pour les calcaires argileux non biohermaux, il s'agit uniquement de calcite sparitique xénomorphe faiblement luminescente (4e phase). Toutes les calcites sparitiques sont actuellement non magnésiennes (Low Magnesian Calcite).

La calcite radiaxiale représente un ciment néoformé à partir d'un précurseur précipité en zone phréatique marine. La séquence diagénétique complète (1-2-3-4-5) peut être interprétée, à la lumière des analyses chimiques des différentes phases (tableau), comme le reflet de la décrois-

sance progressive du potentiel redox des fluides interstitiels (Frank et coll., Grover & Read, Mountjoy & Krebs, *op. cit.*).

La calcite sparitique automorphe non luminescente (2) a été précipitée en zone oxydante, où l'étage d'oxydation du manganèse ( $Mn^{3+}$  et  $Mn^{4+}$ ) l'empêche d'être incorporé dans le réseau de la calcite. Le passage progressif ensuite à des conditions plus réductrices aurait permis l'incorporation, à des teneurs de l'ordre de 1 % ( $MnO$ ), de Mn sous forme  $Mn^{2+}$  (3e phase).  $Mn^{2+}$  est responsable de la forte luminescence de ce ciment.

Ce changement dans les conditions d'oxydo-réduction a dû être oscillant dans certains cas, donnant naissance à une luminescence zonée (FC 12, fig. 7 et BL 23, fig. 5 par exemple). La poursuite de cette évolution a permis, à partir d'un certain potentiel redox, l'incorporation de fer sous forme  $Fe^{2+}$  (teneurs de l'ordre de 1 %  $FeO$ ). Cet ion a eu pour effet d'atténuer la luminescence de la calcite et est responsable de la faible luminescence de la calcite xénomorphe (4e phase). Ce ciment a probablement été précipité par des fluides peut-être issus de la compaction des shales encaissants (Grover & Read, 1983) et transitant par le système de cassures. Il a colmaté la presque totalité de la porosité résiduelle, sauf dans certains microfaciès biohermaux.

La précipitation de la 4e phase est donc postérieure à la lithification complète des biohermes (attestée par la présence des cassures) et est probablement contemporaine des phénomènes de pression-dissolution.

La précipitation de la dolomite ferrifère a colmaté les cavités ultimes des calcaires biohermaux et/ou remplacé une phase calcitique précédente. Cette dolomite est souvent interprétée comme résultant d'une précipitation à partir de saumures chaudes et réductrices (Choquette, 1971; Radke & Mathis, 1981, cités par Miller, *op. cit.*; Grover & Read, 1983) dans des conditions d'enfouissement profond.

## CONCLUSIONS

La grande ressemblance des séquences diagénétiques de tous les édifices étudiés permet d'étendre le modèle de cimentation à l'ensemble des biohermes de marbre rouge du Frasnien belge.

La séquence diagénétique type d'un bioherme est donc la succession plus ou moins complète calcite radiaxiale (1) - calcite sparitique automorphe d'abord non luminescente (2), ensuite manganifère à forte luminescence zonaire (3) - calcite sparitique ferrifère xénomorphe faiblement

luminescente (4) - dolomite ferrifère (5). Elle témoigne de l'augmentation du caractère réducteur des eaux interstitielles au cours de la diagenèse qui a débuté en zone marine phréatique.

Cette séquence, souvent complète dans les cavités les plus grandes des biohermes, s'oppose à la cimentation «extra-biohermale» des calcaires argileux infra- et péri-biohermaux, réduite à la calcite sparitique xénomorphe faiblement luminescente et éventuellement un peu de dolomite ferrifère. La séquence diagénétique complète, ou même seulement les 2e et 3e phases (calcite sparitique automorphe) suffit ainsi à identifier une cimentation en milieu biohermal. Le contraste entre les trois premières générations de ciment, typiques des biohermes et la quatrième, ubiquiste, marque le passage d'une diagenèse en système fermé (à l'échelle de la cavité ou du système de cavités interconnectées) à une diagenèse en système ouvert (à l'échelle du bassin sédimentaire). Cette différence est due essentiellement à l'ouverture d'un système de cassures, qui permet la circulation de fluides à large échelle, fluides riches en carbonates à la suite du développement des phénomènes de pression-dissolution.

La persistance de porosité dans les calcaires argileux extra-biohermaux jusqu'à leur cimentation par la calcite sparitique xénomorphe faiblement luminescente peut être expliquée par l'existence d'une forte pression hydrostatique qui maintient les pores ouverts (Fazel & Schatzinger, 1985). Ces pressions hydrostatiques élevées sont courantes dans les formations argileuses où la perméabilité est faible.

Remarquons que ce modèle de cimentation peut souffrir certaines exceptions dues à une situation paléogéographique particulière. C'est le cas du bioherme de marbre rouge de Baelen (Famennien, synclinorium de Verviers) qui possède une histoire diagénétique plus complexe, avec des phases d'émergence et de dissolution (Dreesen et coll., 1985).

D'un point de vue quantitatif enfin, la part de la calcite radiaxiale dans la cimentation des cavités biohermales est de loin la plus importante, suivie par la calcite sparitique xénomorphe. Les calcites sparitiques automorphes, bien que très caractéristiques, ne représentent que quelques % du volume total de ciment d'un bioherme de marbre rouge.

## REMERCIEMENTS

Ces recherches ont été rendues possibles grâce à une bourse sectorielle de la CEE.

Nous tenons à remercier très vivement Madame M. Coen-Aubert, qui a effectué pour nous

de nombreuses déterminations de Rugueux et a bien voulu relire le manuscrit, Monsieur L. Dejonghe, qui nous a accueilli au Service Géologique de Belgique et a mis à notre disposition les carottes des sondages de Chaudfontaine, Messieurs A. Herbosch et B. Mamet qui ont relu le manuscrit, Monsieur B. Purser, qui nous a accueilli dans son Laboratoire à Orsay, le C.A.M.S.T. de l'Université Catholique de Louvain et enfin Madame Thiry et Monsieur Verstraeten qui nous ont permis d'accéder à Petit-Mont et aux Bulants.

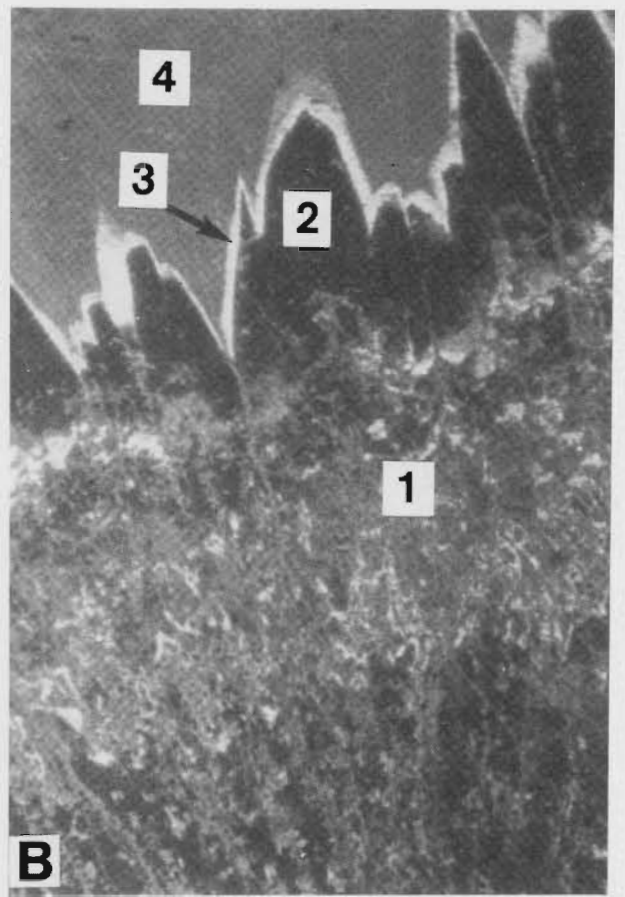
## BIBLIOGRAPHIE

- BATHURST, R.G.C., 1959. The cavernous structure of some Mississippian *Stromatactis* reefs in Lancashire, England. *J. of Geology*, 67 : 506-521.
- BOULVAIN, F., 1987. Origines des *fenestras* des biohermes frasniens (Belgique, France) (Résumé). *1er Congrès français de Sédimentologie*, Paris : 76-77.
- BOULVAIN, F., COEN-AUBERT, M. & TOURNEUR, F., 1987. Sédimentologie et Coraux du bioherme de marbre rouge frasnien («F2») de Tapoumont (Massif de Philippeville, Belgique). *Ann. Soc. géol. Belg.*, 110 : 225-240.
- COEN, M., 1973. Faciès, Conodontes et stratigraphie du Frasnien de l'Est de la Belgique pour servir à une révision de l'étage. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 95 : 239-253.
- COEN, M., COEN-AUBERT, M. & CORNET, P., 1977. Distribution et extension stratigraphique des récifs à «*Phillipsastrea*» dans le Frasnien de l'Ardenne. *Ann. Soc. géol. Nord*, XCVI (4) : 325-331.
- COEN-AUBERT, M., 1982. Rugueux solitaires du Frasnien de la Belgique. *Bull. Inst. roy. Sc. Nat. Belg.*, 54 (6) Sc. de la Terre, 65 p.
- DAVIES, G.R., 1977. Former magnesian calcite and aragonite submarine cements in Upper Paleozoic reefs of the Canadian Arctic : a summary. *Geology*, 5 : 11-15.
- DEJONGHE, L., 1985. Contribution à l'étude métallogénique du synclinorium de Verviers (Belgique). Thèse présentée à l'Université de Paris VI, 389 p.
- DICKSON, J.A.D., 1965. A modified staining technique for carbonates in thin section. *Nature*, 4971 : 587.
- DREESEN, R., BLESS, M.J.M., CONIN, R., FLAJS, G. & LASCHET, C., 1985. Depositional environment, paleoecology and diagenetic history of the «Marbre rouge à Crinoïdes de Baelen» (Late Upper Devonian, Verviers Synclinorium, Eastern Belgium). *Ann. Soc. géol. Belg.*, 108 : 311-359.
- DUMON, P., 1957. Note sur les marbres rouges en Belgique. *Publ. Ass. Ing. Fac. polyt. Mons*, 3 : 1-41.
- FEAZEL, C.T. & SCHATZINGER, R.A., 1985. Prevention of carbonate cementation in petroleum reservoirs. In : Schneidermann, N. & Harris, P.M. (eds.) : Carbonate Cements, *SEPM sp. Publ.*, 36 : 97-196.
- FRANK, J.R., CARPENTER, A.B. & OGLESBY, W., 1982. Cathodoluminescence and composition of calcite cement in the Taum Sauk Limestone (Upper Cambrian), southeast Missouri. *J. Sedim. Petrol.*, 52 : 631-638.
- FRYKMAN, P., 1986. Diagenesis of Silurian bioherms in the Klinteberg Formation, Gotland, Sweden. In : Schroeder, J.H. & Purser, B.H. (eds.) : Reef diagenesis, Springer-Verlag : 399-423.
- GROVER, G., Jr. & READ, J.E., 1983. Paleoaquifer and deep burial related cements defined by regional cathodoluminescent patterns, Middle Ordovician carbonates, Virginia. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 67 : 1275-1303.
- HECKEL, P.H., 1972. Possible inorganic origin for *Stromatactis* in calcilutite mounds in the Tully Limestone, Devonian of New York. *J. Sedim. Petrol.*, 42 (1) : 7-18.
- KENDALL, A.C., 1977. Fascicular-optic calcite : a replacement of bundled acicular carbonate cements. *J. Sedim. Petrol.*, 47 (3) : 1056-1062.

- KENDALL, A.C., 1985. Radial fibrous calcite : a reappraisal. *In* : Schneidermann, N & Harris, P.M. (eds.) : Carbonate cements. *SEPM Sp. Publ.* : 59-77.
- KENDALL, A.C. & TUCKER, M.E., 1973. Radial fibrous calcite : a replacement after acicular carbonate. *Sedimentology*, 20 : 365-389.
- MAMET, B. & BOULVAIN, F. (sous presse) : Remplissages bactériens de cavités biohermales frasnienne. *Bull. Soc. belge Géol.*
- MILLER, J., 1986. Facies relationships and diagenesis in Waulsortian mudmounds from the Lower Carboniferous of Ireland and N. England. *In* : Bricker, O.P. (ed.) : Carbonate cements. John Hopkins Univ. Geol. Studies, 19 : 311-335.
- MOLENAAR, N. & de JONG, A.F.M., 1987. Authigenic quartz and albite in Devonian limestones : origin and significance. *Sedimentology*, 34 : 623-640.
- MONTY, C.L.V., 1982. Microbial spars. (Abstract). *11th Int. Congress on Sedimentology, IAS*, Hamilton (Canada) : 26.
- MONTY, C.L.V., BERNET-ROLLANDE, M.C. & MAURIN, A.F., 1982. Re-interpretation of the Frasnian classical «reefs» of the southern Ardennes, Belgium. (Extended abstract). *Ann. Soc. géol. Belg.*, 105 : 339-341.
- MOUNTJOY, E.W. & KREBS, W., 1983. Diagenesis of Devonian reefs and buildups, Western Canada and Europe - A comparison. *Z. deutsch. geol. Ges.*, 134 : 5-60.
- PRATT, B.R., 1982. Stromatolitic framework of carbonate mudmounds. *J. Sedim. Petrol.*, 52 (4) : 1203-1227.
- SALLER, A.H., 1986. Radial calcite in Lower Miocene strata, subsurface Enewetak Atoll. *J. Sedim. Petrol.*, 56 (6) : 743-762.
- SCHMIDT, V., 1971. Early carbonate cementation in Middle Devonian bioherms Rainbow Lake, Alberta. *In* : Bricker, O.P. (ed.) : Carbonate cements. John Hopkins Univ. Geol. Studies, 19 : 209-215.
- TOURNEUR, F., 1981. L'étude des «récifs rouges F2» en Belgique (jusqu'en 1970). *Bull. Soc. belge Géol.*, 90 (3) : 157-173.
- TOURNEUR, F., 1982. Conodontes de trois «récifs de marbre rouge F2» Stratigraphie et écologie. *Bull. Soc. belge Géol.*, 91 (2) : 91-102.
- VAN LAER, P. & MONTY, C.L.V., 1984. The cementation of mud mound cavities by microbial spars. (Abstract). *5th IAS Eur. Reg. Meeting of Sedimentology*, Marseille : 446-447.
- WALLS, R.A., MOUNTJOY, E.W. & FRITZ, P., 1979. Isotopic composition and diagenetic history of carbonate cements in Devonian Golden Spike reef, Alberta, Canada. *Geol. Soc. America Bull.*, 90 : 963-982.
- WALLS, R.A. & BURROWES, G., 1985. The role of cementation in the diagenetic history of Devonian reefs, Western Canada. *In* : Schneidermann, N & Harris, P.M. (eds.) : Carbonate cements. *SEPM Sp. Publ.* : 185-220.
- WANLESS, H.R., 1979. Limestone response to stress : pressure solution and dolomitization. *J. Sedim. Petrol.*, 49 : 437-462.
- WILSON, J.L., 1975. Carbonate facies in geologic history. Springer-Verlag, 471 p.
- WONG, P.K. & OLDERSHOW, A., 1981. Burial cementation in the Devonian Kaybob reef complex, Alberta, Canada. *J. Sedim. Petrol.*, 51 : 507-520.

## PLANCHE 1

- A. lame TG 18, lumière naturelle. Remarquer l'accumulation d'impuretés dans le ciment radial (partie inférieure de la photo).
- B. lame TG 18, cathodoluminescence. Les phases de cimentation sont : 1. calcite radiale; 2. calcite sparitique automorphe non luminescente; 3. calcite sparitique syntaxique luminescente; 4. calcite sparitique xénomorphe faiblement luminescente. Remarquer la luminescence irrégulière de la calcite radiale, due aux inclusions signalées fig. A.
- C. lame BL 15, lumière naturelle.
- D. lame BL 15, cathodoluminescence. Même succession que fig. B. Remarquer la zonation de la phase 3.



0.5mm

