

Glauconie  
Paléoenvironnement  
Sédimentologie

Glaucony  
Paleoenvironment  
Sedimentology

# Évolution géométrique des supports de glauconitisation; application à la reconstitution du paléoenvironnement

P. Giresse <sup>a</sup>, M. Lamboy <sup>b</sup>, G. S. Odin <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Département de Géologie, Université M. Ngouabi, Brazzaville, R. P. Congo.

<sup>b</sup> Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Sfax, Tunisie.

<sup>c</sup> Département de Géologie dynamique, Université Pierre-et-Marie-Curie, 75230 Paris.

Reçu le 2/7/79, révisé le 30/11/79, accepté le 18/12/79.

## RÉSUMÉ

Les glauconies apparaissent aujourd'hui comme le résultat d'une authigenèse marine de phyllites vertes spécifiques dans un micro-environnement poreux préalablement déposé, le plus souvent de nature granulaire. Les supports de glauconitisation peuvent être répartis en quatre types : les coprolithes, les débris carbonatés d'origine organique, les tests et les squelettes de mollusques, les débris de foraminifères et les débris de microfoules. Ces supports sont reconstitués. Mineralogical and morphological evolution both occur. Remains of these are reconstituted. Mineralogical and morphological evolution both occur. Remains of these are reconstituted. Minéralogical and morphological evolution both occur. Remains of these are reconstituted. La reconnaissance de ces divers supports originels permet de reconstituer certains traits du paléo-environnement dans l'espace et le temps compris entre la formation des supports et leur enfouissement sous des sédiments postérieurs. Selon qu'il s'agit de grains verts provenant de tel ou tel support, on pourra proposer l'absence ou l'existence d'une phase transgressive au cours de la période considérée. Le principe de cette reconstitution est établi et les principales précautions à prendre sont indiquées.

*Oceanol. Acta*, 1980, 3, 2, 251-260.

## ABSTRACT

The geometrical evolution of glauconitization frameworks as the basis for a reconstruction of the paleoenvironment

Glauconomies\* are today considered to be the product of the marine authigenesis of specific green clay-minerals in a previously deposited and generally particulate, porous microenvironment. Glauconitization frameworks may be divided into four types : coprolites, shell fragments, microfaunal tests and mineral debris; the evolution of each of these is reconstituted. Mineralogical and morphological evolution both occur. Remains of the initial framework gradually disappear; each grain tends to become dark-green coloured, rounded, smooth and glossy, often bigger; recognition of the initial framework is then almost impossible. Recognition of one or several types of framework in a stock of green pellets permits reconstitution of the environment, first at the time of framework formation and then at the time of glauconitization. According to the framework marine transgression may or may not be postulated. The principles of carrying out this reconstitution, and the main precautions to be taken are established.

*Oceanol. Acta*, 1980, 3, 2, 251-260.

\* The terms *glaucony* (pl. *glauconies*), *glauconitic* and *glauconitization* refer to the green facies of the material examined, and should not be confused with the mineral glauconite.

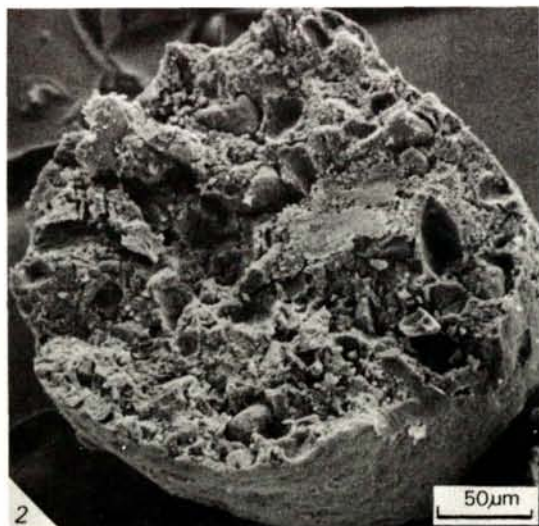
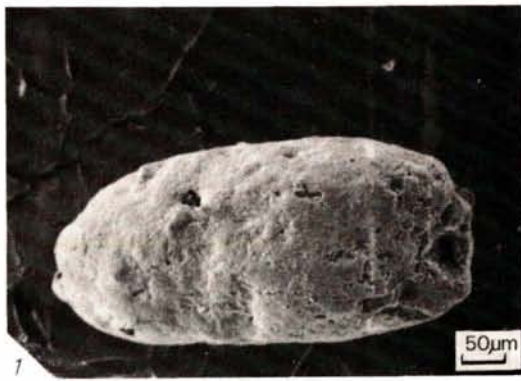
INTRODUCTION

Des études récentes ont été consacrées aux variations de volume de composants sédimentaires au cours de la formation des phosphates (Nathan et Lucas, 1971, Lucas *et al.*, 1978), des carbonates (Purser, 1973) et des granules glauconitisés (Ehlmann *et al.*, 1963, Giresse, 1969, Odin, 1972, Giresse et Odin, 1973, Hein *et al.*, 1974, Lamboy, 1976). Pour ces derniers, la glauconitisation s'accompagne également, selon les supports, de modifications d'aspect et de structure interne. Nous essayerons de montrer comment l'étude des grains verts permet d'appréhender quelques facteurs du milieu où ils ont pris naissance.

On admet aujourd'hui qu'un grain vert est le résultat de la glauconitisation d'un support préalable, lui-même particulière. L'étude de l'évolution morphologique des supports permet de déterminer dans la glauconie qui en résulte des critères susceptibles de les caractériser. A l'inverse, la reconnaissance des supports originels des grains évolués fournit des renseignements utiles à la reconstitution du milieu de formation.

Figure 1

Supports en cours de glauconitisation. (1) Coprolithe du golfe de Guinée au stade de la glauconie naissante; noter la forme ellipsoïdale. (2) Coprolithe vert, semblable au précédent, cassé pour montrer la structure interne; remarquer la porosité, en partie créée par la dissolution de tests initialement ingérés par l'animal. (3) Divers remplissages verdis avec test encore parfois adhérent (glauconie peu évoluée du plateau Nord-Ouest espagnol). The less advanced infillings are coated by test fragments, while the more advanced ones (Gastropods) are not. (4) Result of mica glauconitization; the mica sheets are pushed apart by the interlamellar crystal growth of glauconitic minerals (NW Spanish shelf).



DESCRIPTION DE QUELQUES EXEMPLES DE GLAUCONITISATION

Les différents types de supports de glauconitisation

Les supports de glauconitisation sont extrêmement variés. Ils ont été observés par Cayeux (1916) et Millot (1964), puis par Giresse et Odin (1973), Lamboy (1968, 1974, 1976), Odin (1972, 1975), Mc Rae (1972). Leur nature chimique peut être quelconque. *Le milieu semi-confiné poreux* existant au sein de ces supports (Odin et Giresse, 1972) est le caractère primordial permettant la mise en route du processus de glauconitisation : chaque support est une micro-Éponge, captant les ions utiles aux authigenèses. La glauconitisation correspond à la formation *de novo*, dans les pores de ce support, de minéraux originaux verts : ce sont les smectites glauconitiques définies par Odin (1975), Velde et Odin (1975).

En fonction de leur évolution, les supports peuvent être répartis en quatre types :

*Different glauconitization frameworks. (1) Coprolite from the Gulf of Guinea at the nascent stage of the glauconitization; note the ellipsoidal aspect common to most of the fecal pellets. (2) Broken green coprolite showing its internal structure (same stage of evolution as in the preceding picture); note the numerous pores created by the dissolution of the microtests within the coprolite itself. (3) Various green infillings selected to show a relatively small degree of glauconitization (NW Spanish shelf). The less advanced infillings are coated by test fragments, while the more advanced ones (Gastropods) are not. (4) Result of mica glauconitization; the mica sheets are pushed apart by the interlamellar crystal growth of glauconitic minerals (NW Spanish shelf).*

- Pelotes fécales : ce sont des micro-Éponges de 50 à 1000  $\mu\text{m}$ , le plus souvent de forme ellipsoïdale, constituées de vase agglomérée par des animaux généralement limivores (fig. 1). Cette vase est riche en matière organique et la nature minéralogique de ses constituants varie selon les gisements.
- Débris carbonatés : ce sont des micro-Éponges, la plupart du temps calcitiques, mais parfois aragonitiques ou plus ou moins magnésiennes. Il s'agit souvent de débris de tests de macrofaune néritique qui peuvent être entièrement verdis, même lorsque leur taille atteint plusieurs millimètres.
- Tests de microfaunes : l'intérieur des tests de Foraminifères, de formes larvaires de Mollusques, les loges de Bryozoaires constituent un milieu isolé du milieu marin sus-jacent; pour être favorable au développement des minéraux glauconitiques, ce type de support doit mesurer de 10 à 150  $\mu\text{m}$  s'il est relativement clos, davantage s'il est plus ouvert (fig. 1).
- Débris minéraux : ce sont des débris de roches ou de minéraux divers comme les micas, le quartz, les feldspaths par exemple, instables dans le milieu marin et en voie d'altération. Quelle que soit leur composition chimique, qu'ils aient été originellement cristallisés ou non, ils constituent, s'ils sont poreux, des supports que la glauconitisation va verdifier et dont l'aspect va se modifier (fig. 1).

### Données morphologiques

#### Évolution des débris carbonatés

Les manières d'aboutir à un grain vert à partir d'un débris carbonaté sont illustrées par trois exemples où l'évolution de l'aspect est toujours nette.

#### ● Les débris de test d'Échinodermes

Sur le plateau Nord-Ouest espagnol (Odin et Lamboy, 1975), les débris de test d'Échinodermes constituent des Éponges millimétriques tout à fait favorables aux croissances des minéraux glauconitiques. Les cavités en forme de canaux constituent un micromilieu semi-confiné par rapport au milieu marin ambiant. Dans ces canaux dont le diamètre va de 10 à 20  $\mu\text{m}$ , on observe au microscope électronique le développement de phyllites glauconitiques qui remplissent les espaces libres. Puis le stérécôme lui-même est dissout et une seconde génération de phyllites le remplace, donnant un grain vert d'où l'essentiel du support originel a disparu. Mais la structure réticulée est conservée et ces grains ont souvent un aspect moucheté. Lamboy (1976) distingue deux évolutions divergentes à partir de ce stade. Soit les minéraux recristallisent sans modification de la taille et de la forme du grain et il devient dès lors difficile de reconnaître les deux générations de phyllites vertes. Soit les croissances cristallines se poursuivent en déformant le grain initial qui *grossit* : toute structure primitive disparaît. L'augmentation de taille provoque des fissures et il en résulte une glauconie composée de grains craquelés, intérieurement assez homogènes.

#### ● Les fragments coquilliers perforés

Il s'agit d'un exemple fréquent sur le plateau Nord-Ouest espagnol (Lamboy 1968, 1974) : un débris carbonaté massif donne naissance à un support spongieux par altération. Des Algues et des Champignons perforants déterminent une porosité initiale dans des débris de quelques millimètres (Dangeard, 1940). A la mort de l'organisme perforant, les canaux se remplissent de minéraux verts ainsi que l'avait vu Bailey (1856). La masse du carbonate est ensuite envahie par remplacement. L'ensemble du grain est déformé, *augmente de taille*, se craquèle, puis est colmaté extérieurement (fig. 2). Il devient alors impossible d'imaginer la nature du support initial si l'on ne dispose pas des divers stades d'évolution. On obtient en effet un grain globuleux, assez lisse en surface et d'apparence homogène.

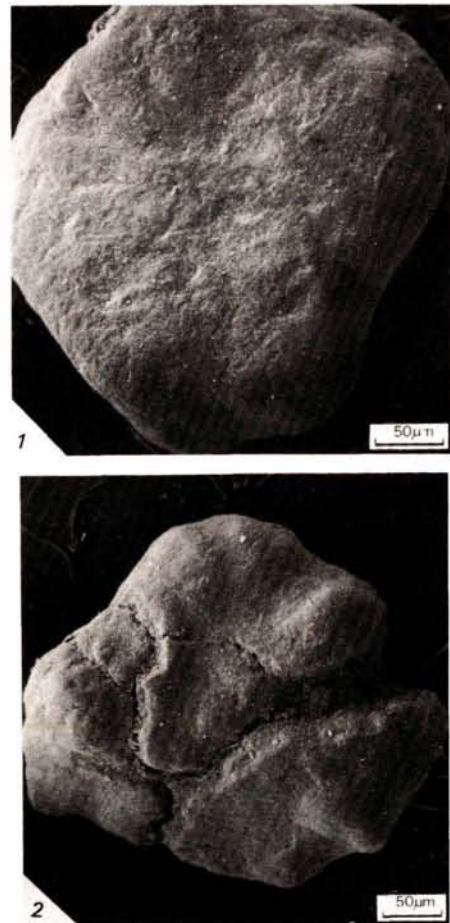


Figure 2

Grains évolués du plateau continental Nord-Ouest espagnol. (1) Grain vert foncé, arrondi; l'évolution a masqué toutes les traces du débris carbonaté original. (2) A un stade moins avancé, les craquelures sont en voie de comblement par des minéraux glauconitiques de génération tardive.

*Grains at advanced and very advanced stages of evolution from the NW Spanish shelf. (1) Dark-green rounded grain; evolution has masked all the remains of the initial shell fragment. (2) At a less advanced stage, cracks are filling up with glauconitic minerals of later generation.*

#### ● Les débris carbonatés remplacés

Dans diverses formations anciennes (Odin, 1969) et récentes (Lamboy, 1976), on rencontre des débris coquilliers ou de petits tests, de quelques centaines ou milliers de microns, entièrement verts. La diffractométrie X montre qu'il s'agit uniquement de minéraux glauconitiques. Cependant, le détail des structures

lamellaire ou prismatique, de l'ancienne coquille est parfaitement reconnaissable. Le carbonate peut donc être « directement » remplacé par les phyllites, les échanges ioniques nécessaires se faisant sans doute par les joints des prismes carbonatés du test comme le suggère l'examen au MEB. L'évolution peut être arrêtée à ce stade ou se poursuivre par des croissances cristallines, conduisant à des plaquettes mamelonnées *plus épaisses* que le support initial et de forme générale aplatie.

*Évolution des tests de micro-organismes*

Ces supports sont les plus ubiquistes. Depuis Cayeux (1916), la glauconie située dans des tests de micro-organismes a été rencontrée dans la plupart des bassins sédimentaires et des gisements récents. Cependant ce type de support ne constitue que très localement l'essentiel des supports verdis (plate-forme à l'Ouest de l'Afrique sahélienne). Initialement, des minéraux verts se développent dans le test : on obtient un moule vert. Dès lors, l'évolution est différente selon qu'il s'agit d'un micro-organisme à test épais ou à test mince; la nature chimique du test ne paraît pas intervenir. Les tests benthiques les plus épais (Nummulites, Amphistégines) ont seulement leurs loges remplies de minéraux verts; parfois un début de verdissement du test lui-même est observé; on rencontre même dans certains grès (Lutétien) des tests d'Alvéolines entièrement verdis. Les tests benthiques plus minces (Elphidium) ou planctoniques (Globigérines) éclatent sous les pressions développées par les croissances cristallines (Lamboy, 1976). C'est l'effet d'une *augmentation de volume*. Le moule interne

peut demeurer reconnaissable quelque temps, puis des boursoufflures se développent, comme sur les débris d'Échinodermes; des craquelures apparaissent, les remplissages des diverses loges fusionnent et l'on finit par obtenir un grain d'aspect quelconque, *plus gros* que le test initial, craquelé et bien vert.

Pour les tests minces et de petite taille, ce qui est le cas de beaucoup de tests de Foraminifères planctoniques, la solubilisation facile du test et un confinement insuffisant peuvent donner naissance à de petits grains verts, de quelques dizaines de microns seulement, qui correspondent aux moulages de loges. Ces minuscules grains, plus petits que le support originel, constituent un micro-environnement trop ouvert au milieu marin et ne peuvent poursuivre leur évolution.

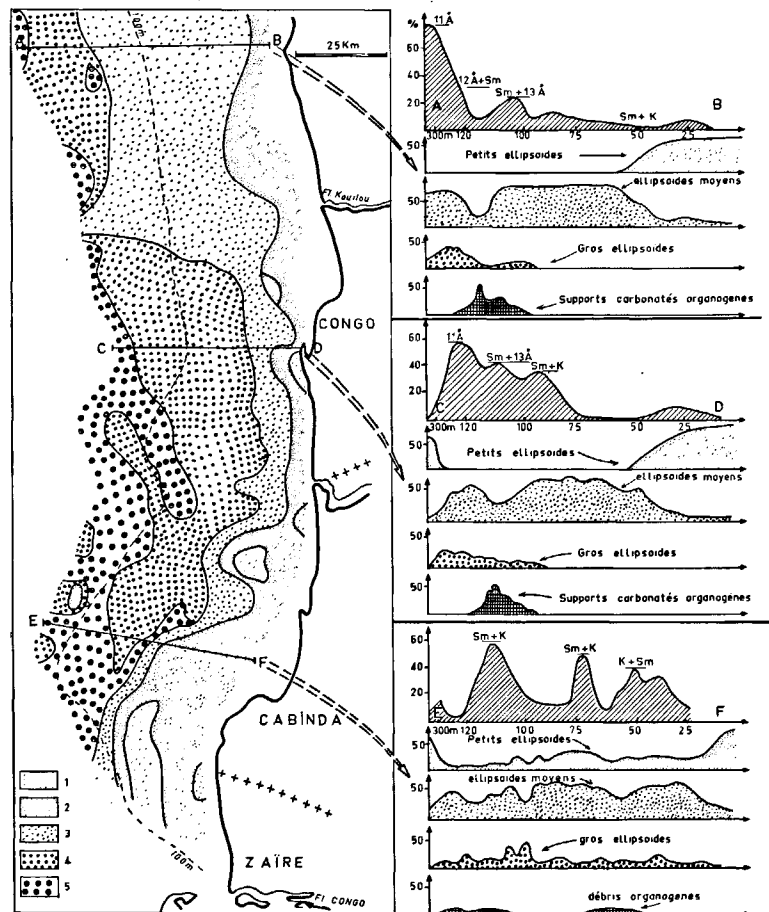
*Évolution des pelotes fécales*

L'exemple des coprolithes ellipsoïdaux du Golfe de Guinée est spectaculaire en raison de la masse considérable de matériau mise en jeu principalement sur la bordure externe de cette plate-forme. Les divers états de minéralisation de ces coprolithes de Polychètes ont été étudiés au large du delta de l'Ogooué (Giresse, 1965 a et b), du delta du Niger (Porrenga, 1967), de la Côte-d'Ivoire (Martin, 1973) et sur la plate-forme congolaise atteinte par les alluvions du Congo (Giresse et Odin, 1973). Ils existent, fort semblables, au large de la Guinée et abondent au large du Sénégal. Les minéralisations sont en fait très diverses : — goéthite sur les hauts fonds littoraux battus par la houle et passagèrement émergés — berthiérine dans les vases

Figure 3

Situation et caractéristiques des sédiments et grains verts glauconitiques de la zone sud du golfe de Guinée. Carte de distribution des médianes (M) de la fraction magnétique du sédiment : 1,  $M < 0,1$  mm; 2,  $0,1 < M < 0,2$  mm; 3,  $0,2 < M < 0,3$  mm; 4,  $0,3 < M < 0,4$  mm; 5,  $M > 0,4$  mm. Un gradient existe de la côte vers le large. Pour chacune des trois radiales AB, CD et EF localisées sur la carte, sont indiqués, de haut en bas : — le pourcentage en grains magnétiques du sédiment entier et leur composition minéralogique, les profondeurs étant notées en abscisse; — les teneurs, relativement à la seule fraction magnétique, de chacun des quatre types de grains identifiés : petits, moyens et gros coprolithes ellipsoïdaux, débris organogènes carbonatés.

*Situation and features of sediments and glauconitic pellets from the southern zone of the Gulf of Guinea. Distribution map of the median line (M) of the magnetic fraction of sediments: 1,  $M < 0.1$  mm; 2,  $0.1 < M < 0.2$  mm; 3,  $0.2 < M < 0.3$  mm; 4,  $0.3 < M < 0.4$  mm; 5,  $M > 0.4$  mm. A gradient exists from the coast to the open sea. For each of the three cross-sections AB, CD and EF shown on the map are indicated, from top to bottom: — the percentage of sediment magnetic grains and their mineralogical composition; depths are noted on the absciss; — the contents (concerning the magnetic fraction only), of each of the four types of grains: small, medium and large-sized ellipsoidal coprolithes, shell fragments.*



alluviales organiques à faible pH et à haute teneur en fer amorphe, — minéraux glauconitiques dans les zones de mer ouverte. C'est ce dernier cas qui retient notre attention.

La connaissance de l'âge des dépôts de la plate-forme congolaise grâce aux datations par le  $^{14}\text{C}$  (Delibrias *et al.*, 1973), l'estimation de la progression eustatique de la dernière transgression en fonction des microfaunes incluses, permettent de déduire la position stratigraphique détaillée des grains verdés (Giresse, 1975; Odin et Giresse, 1976; Giresse *et al.*, 1979). De plus, les sédiments renferment des teneurs élevées en grains verts, ce qui rend possible leur étude granulométrique (Giresse, 1977). La courbe de fréquence de la fraction magnétique et celle du sédiment entier sont très dissemblables dans la plupart des cas : les courbes de fréquences des fractions magnétiques sont polymodales; le classement des populations est souvent médiocre.

La forme, l'aspect et la taille permettent de distinguer quatre types de grains verdés (fig. 3) : l'un correspond à des supports carbonatés organogènes et les trois autres ont la forme ellipsoïdale des déjections de Polychètes limivores (coprolithes) mais sont de tailles différentes. De plus, la distribution géographique et la composition minéralogique moyenne des grains varie selon la profondeur (fig. 3).

Dans les fonds de 0 à 30 m, les dépôts ont moins de 5 000 ans BP. Leur fraction magnétique, peu abondante, est surtout constituée de petits grains ellipsoïdaux (modes les plus fréquents 120 à 180  $\mu\text{m}$ ), mal classés, de teinte grise, verte ou beige ocre. Minéralogiquement, les grains sont à kaolinite et smectite; les smectites sont plus abondantes que dans la vase matricielle à kaolinite très dominante. Dans les fonds de 30 à 90 m, les grains verts ont commencé leur évolution il y a 5 000 à 10 000 ans BP. Ils sont de forme ellipsoïdale, ont des modes centrés sur 300 à 350  $\mu\text{m}$  et un classement médiocre; des pelotes fécales plus petites leur sont encore associées, souvent entre 30 et 50 m de profondeur. La couleur des grains est gris-vert et leur aspect est terne. Sur le plan minéralogique, les smectites (authigènes) dominent la kaolinite (héritée) comme il l'a été précédemment précisé (Giresse, Odin, 1973).

Entre 95 et 115 m, le sédiment est coquillier et date d'environ 12 000 ans BP. La fraction magnétique est peu importante. Le verdissement atteint le plus fréquemment des débris de Mollusques, des formes embryonnaires de gastéropodes, des fragments de stéréomes et piquants d'Oursins, des Bryozoaires et des Amphistéginés. Les courbes de fréquence des grains verts sont le plus souvent polymodales : modes vers 350, 450 et 700  $\mu\text{m}$ ; le classement est médiocre. Les rayons X montrent une proportion de phyllites TOT très élevée (smectites authigènes) par rapport aux TO (kaolinite héritée).

Au-delà de 115 m, le sédiment est un dépôt relique préholocène; il est très riche en grains verts : jusqu'à 80 %. Le mode granulométrique de la fraction magnétique est le plus souvent d'environ 700  $\mu\text{m}$  et le classement est assez bon. Les rayons X révèlent des édifices dont l'espacement réticulaire principal est entre 10 et 11 Å (Giresse et Odin, *loc. cit.*), et la teneur en potassium

( $\text{K}_2\text{O}$ ) atteint 5 à 6 %. Les grains sont tous de couleur vert foncé mais leur forme varie : ellipsoïdes lisses ou craquelés en proportion voisine, grains craquelés informes.

Sur la plate-forme congolaise, de la côte vers le large, les grains verts sont donc de plus en plus âgés et contiennent de plus en plus de minéraux glauconitiques; cependant, l'évolution minéralogique n'est pas terminée car aucun grain ne présente les caractéristiques des glauconies évoluées ou très évoluées. Or, les grains ellipsoïdaux d'origine coprolithique montrent une *augmentation de volume* de la côte vers le large : il s'agit là d'une évolution morphologique, non terminée puisque l'évolution minéralogique est elle-même inachevée, vers un grain sans forme reconnaissable. Dans tous les cas analysés, les évolutions morphologique et minéralogique sont apparues remarquablement parallèles.

#### *Évolution des débris minéraux*

Le devenir de ce type de support initial est *très variable selon ses propriétés physiques originelles* : substance amorphe ou cristallisée, présence de clivage aisé ou non, solubilité dans l'eau de mer, etc. Ce sont en effet ces propriétés qui dictent le type d'évolution morphologique et la possibilité de reconnaissance ultérieure du matériel initial. Ainsi, les particules cinéritiques sont assez rapidement verdies et l'absence de structure nette entraîne la formation de grains verts dont l'origine est très vite indéchiffrable. A l'opposé, le verdissement des paillettes micacées reste reconnaissable même lors d'une évolution longue (fig. 1), Galliher (1935), Wermund (1961), Tapper et Fanning (1968), Odin (1972) montrent que la permanence des feuillettes du mica entraîne des croissances cristallines perpendiculairement aux plans de clivage. C'est la glauconie clivée de Cayeux (1916). Le mica s'ouvre en accordéon parfois très allongé et présente une *croissance spectaculaire*. Le milieu semi-confiné poreux est constitué par l'ensemble des plans de clivages plus ou moins ouverts; les pores sont représentés par les espaces interlamellaires.

L'exemple des quartz verdés (Odin, 1969) montre un minéral encore moins instable sur le fond marin. Ce type de support, peu favorable du fait de sa structure compacte, ne donne jamais naissance à lui seul à des gisements glauconieux, au contraire des minéraux déjà cités. On peut penser que la porosité superficielle constitue un caractère acquis préalablement à l'occasion d'une altération continentale. Les micas et les feldspaths à un degré moindre peuvent être considérés comme des minéraux relativement stables en milieu marin et avoir subi eux aussi une étape préliminaire d'altération à terre qui favorisera par la suite la glauconitisation.

## DISCUSSION ET ENSEIGNEMENTS

### **Caractères communs à l'évolution de l'aspect des divers supports**

L'évolution des supports tend à l'effacement des caractères distinctifs de chaque micromilieu. Leur

couleur tend systématiquement vers un vert plus ou moins sombre. De rugueux et terreux, l'aspect de surface tend à devenir plus lisse et parfois brillant.

Les déformations qui surviennent sont expliquées par la *croissance irrégulière* des minéraux authigènes. Des boursouffures et craquelures apparaissent et se développent; elles finissent par constituer un nouveau micro-environnement dans lequel une nouvelle génération de phyllites glauconitiques se développe. Les grains nés du verdissement sont en général *plus volumineux* que les supports initiaux. Parfois ils sont *plus petits*, lorsque le support se dissocie : égrènement des loges verdies des tests de microfaune pélagique, cassure de certains coprolithes par une craquelure qui s'est trop approfondie. Dans pratiquement tous les cas, *le terme de l'évolution est une population de grains dont l'origine n'est plus reconnaissable et dont l'aspect est similaire quelle que soit l'origine*. Le stade ultime n'est réalisé qu'assez rarement et l'on peut reconnaître dans de nombreux gisements des indices de la nature des supports originels.

### Reconnaissance des divers types de supports

#### Caractéristiques individuelles

Les débris carbonatés paraissent spécialement favorables et sont à l'origine d'une fraction importante (sans doute plus du tiers) des gisements de glauconie. La plupart des supports carbonatés semble perdre assez vite la structure initiale du débris; mais on peut la reconnaître dans quelques grains : granules verts zébrés, débris de tests d'Échinodermes à surface mouchetée. Lamboy (1976) a pu repérer dans des grains très évolués de discrètes traces des canalicules provoqués par des organismes perforants dans le fragment coquillier originel. Un caractère commun à ces grains d'origine carbonatée est qu'ils atteignent *les plus fortes tailles* de tous les supports dont on a reconnu l'ensemble de l'évolution : des grains de plus de 1 mm ne sont pas rares. De plus, certains grains provenant de débris coquilliers gardent une forme générale en plaquette, parfois en tuile, jusqu'à un stade très avancé de l'évolution.

Les moules de microfaune évoluent de façon variée selon la taille du test initial. Les remplissages de Gastéropodes sont assez souvent reconnaissables, leur évolution s'étant arrêtée à la dissolution du test. En fin d'évolution, les remplissages de tests benthiques finissent généralement par perdre leur forme originelle. Enfin, les loges de microfaune pélagique donnent sans doute naissance à la plupart des *grains verts les plus petits* et globulaires car l'évolution s'arrête lors de la dissolution du test qui n'isole plus le milieu semi-confiné nécessaire aux croissances cristallines.

Les coprolithes observés sur les côtes africaines gardent leur forme ellipsoïdale presque jusqu'à la fin de leur évolution actuellement reconnue. On constate cependant, localement, les premiers stades d'une déformation sous forme de boursouffures et de craquelures; de même, les morceaux d'ellipsoïdes sont fréquents. Mais certains gros coprolithes évolués, vert-foncé et luisants, ont gardé leur forme générale : les craquelures engendrées par les

croissances cristallines ont en effet été colmatées par une seconde génération de minéraux glauconitiques.

Les grains provenant de débris minéraux conservent d'autant mieux la trace de leur structure initiale que celle-ci correspond à un composé chimique moins altérable dans le milieu marin. Les débris mal cristallisés, comme les cendres ou verres volcaniques, sont très rapidement verdies; ils donnent naissance à des grains déjà très irréguliers à un stade peu avancé de l'évolution contrairement aux coprolithes et aux remplissages déjà cités. Les micas prennent un aspect caractéristique en vermicules « clivés ». Comme les types précédents, ils peuvent constituer une grande partie des supports ayant donné naissance à un niveau glauconieux. Généralement, les paillettes assez grosses, de plus de 200  $\mu\text{m}$  de diamètre environ, ne s'allongent pas beaucoup et gardent une forme générale aplatie; au contraire, on observe que les plus petites paillettes *s'allongent* et dépassent en longueur plusieurs fois le diamètre initial (Odin, 1972). Comme dans les loges de microfaunes, le confinement adéquat est réalisé dans des supports initialement petits comparés aux débris carbonatés et aux coprolithes; pour ces derniers, communément plus poreux et plus ouverts, les observations (Lamboy, 1976; Giresse et Odin, 1973) montrent que des supports plus gros que 150 à 200  $\mu\text{m}$  favorisent une glauconitisation plus rapide et complète.

#### Caractéristiques d'ensemble des grains verts

##### • Exemple des coprolithes du golfe de Guinée.

Nous avons décrit l'évolution des pelotes fécales et émis l'hypothèse d'une dilatation des supports en fonction du temps, de l'évolution minéralogique et des recristallisations. Cependant, cette évolution apparente depuis les petits grains proches de la côte vers les gros grains de la bordure externe doit être considérée avec prudence; elle n'est pas systématique : en effet, sur le plateau cabindais (fig. 3, radiale EF), on trouve de gros ellipsoïdes dès les fonds de 25 à 50 m. En résumé, trois hypothèses peuvent être envisagées qui ne s'excluent pas l'une l'autre :

— Élimination de petits grains par altération préférentielle d'un stock composite.

Les petits grains sont observés exclusivement dans les vases où la sédimentation actuelle est active : faibles fonds à l'abri des fortes houles, zones de dépôts alluviaux rapides ou zones bathyales en face du Congo. Ces sédiments sont jeunes, la glauconitisation est peu avancée. On ne trouve presque plus ces petits coprolithes dans les fonds de 50 à 100 m et encore moins sur la bordure externe : le micro-milieu étant restreint le confinement n'est pas suffisant, la minéralisation s'arrête vite et une dissociation ou une dissolution du support peuvent intervenir. Ainsi, les courbes granulométriques des stocks de glauconie plus « évoluée » vers 50 m de fond se trouvent décalées vers les plus grosses tailles de grains sans qu'il y ait nécessairement de dilatation au niveau des grains moyens.

— Hétérogénéité des coprolithes avant le verdissement  
Le dépôt rapide et riche en matière organique du delta sous-marin du Congo est un biotope favorable aux

Polychètes limivores; dans des sédiments de surface très jeunes du plateau cabindais, on peut rencontrer dès 50 m de fond, plus de 50 % de fraction magnétique (coprolithes minéralisés). Cette abondance est d'ailleurs très irrégulière d'un point à l'autre. La kaolinite, héritée du support, domine sur les smectites nouvellement formées. Les tailles de ces coprolithes sont variées; des diamètres de 600 à 700  $\mu\text{m}$  sont fréquents. Tous ces caractères présentent des changements locaux importants. On ne peut donc exclure l'hypothèse de l'existence de plusieurs espèces de Polychètes qui prolifèrent dans un milieu qui leur est, ici ou là, plus ou moins favorable.

– Évolution des petits coprolithes vers les gros par dilatation liée au verdissement.

L'observation de cette évolution est plus favorable dans les radiales AB et CD (fig. 3). Jusqu'à 100 m de fond, les recristallisations trouvent dans les pores fréquemment observés au MEB l'espace suffisant pour se développer. Une croissance multidirectionnelle peut s'opérer dans les coprolithes, comme dans les supports carbonatés, au fur et à mesure que progresse la dissolution du support. Il semble que ce soit au moment où les feuillets à 13, 12, voire 11 Å dominent les smectites glauconitiques préliminaires que les figures de craquellement apparaissent à la surface des grains; en même temps, l'observation électromicrographique montre la *disparition de la porosité*. Ces craquellements ainsi que les boursouflures qui les accompagnent produisent indéniablement une *dilatation* du grain. D'après les courbes de fréquence, ces dilatations exprimeraient le passage de grains de 300 à 500  $\mu\text{m}$  vers d'autres de 600 à 700  $\mu\text{m}$ , passage assez rapide puisque les cas intermédiaires sont statistiquement assez rares. Tant que la forme ellipsoïdale est visible, la filiation peut être retrouvée. A des stades plus avancés de la minéralogenèse, les croissances cristallines se multiplient tellement que le grain est déformé et que l'origine première du support devient énigmatique.

Cette troisième hypothèse nous paraît aujourd'hui probable bien que les coprolithes puissent correspondre à plusieurs espèces de Polychètes.

• Variation de taille des supports au cours de la glauconitisation.

La figure 4 représente schématiquement l'évolution de taille des différents types de supports. Les grains initiaux sont les supports considérés plus haut, les grains finaux sont ceux qui sont obtenus lorsque l'évolution a pu se poursuivre complètement. L'échelle des temps n'est contrôlée que par quelques points; celle des tailles a été observée dans les cas cités ci-dessus.

En ce qui concerne les pelotes fécales, les très petites, (de moins de 50  $\mu\text{m}$ ) s'altèrent et disparaissent sans doute avant la formation de smectites glauconitiques. Les petites (100-150  $\mu\text{m}$ ) permettent le développement des smectites authigènes; mais, étant donné le milieu insuffisamment confiné, l'évolution s'arrête aux premières cristallisations. Les plus gros coprolithes (400  $\mu\text{m}$  par exemple) montrent une évolution complète avec croissance de volume assez rapide après environ 10 000 ans d'évolution, craquellement et éventuellement cassure d'une partie des pelotes.

Une évolution très semblable a lieu pour les débris carbonatés avec une taille favorable optimale atteignant le millimètre et une déformation et croissance plus importantes.

Les tests de micro-organismes doivent être divisés en deux types. Les tests d'animaux planctoniques, plutôt petits, donnent souvent naissance à des grains verts plus petits que le test initial. Les tests benthiques gros d'environ 0,5 mm ont une évolution équivalente à celle des coprolithes avec augmentation de volume et parfois cassure. Enfin, les tests millimétriques ne donnent souvent naissance qu'à des remplissages, les parois épaisses n'étant entièrement dissoutes qu'après une très longue évolution.

Les débris minéraux ont une évolution de taille très variée selon la nature du support initial. Rapides et équivalentes à celles des coprolithes et débris coquilliers pour les débris de roches très altérables, les modifications de taille sont beaucoup plus importantes pour les petits micas tandis que les gros micas et les quartz n'évoluent que très lentement voire pas du tout.

#### Liens entre l'évolution morphologique et la nature minéralogique du grain

La figure 4 reprend les étapes morphologiques décrites dans divers travaux concernant le verdissement des débris coquilliers (Lamboy 1968-1976, Odin 1975). Sur le plateau Nord-Ouest espagnol en particulier, les analyses chimiques et minéralogiques montrent une évolution synchrone remarquable. Les constituants chimiques et l'architecture cristalline du support initial, reconnaissables au début, disparaissent progressivement alors qu'apparaissent les constituants et la structure fine des minéraux authigènes. Ces derniers deviennent dominants puis se modifient vers des aspects cristallographiques et nanostructuraux mieux organisés.

L'une ou l'autre de ces étapes a été retrouvée dans l'évolution des autres types de supports. Quoique les documents disponibles aujourd'hui soient encore incomplets, l'évolution paraît très voisine pour les pelotes fécales (Takahashi et Yagi, 1929; Giresse et Odin, 1973; Broyer *et al.*, 1977) et pour les remplissages de tests de microfaune (Ehlmann *et al.*, 1963).

Un schéma peut être établi pour reconstituer l'évolution à la fois de l'aspect, de la structure et de la composition du grain. Elle est la *résultante de deux phénomènes parallèles* : 1. l'altération d'un support granulaire hérité déposé sur le plancher marin et en déséquilibre géochimique avec ce milieu; 2. la genèse synchrone de minéraux en équilibre avec le micro-environnement créé par cette « éponge » en voie d'altération. Les deux processus se recouvrent en partie et peuvent être schématisés au long de quatre étapes :

1. Les supports déposés s'altèrent; une certaine *porosité* en résulte; dans les pores, le milieu relativement confiné permet aux premiers germes de type smectitique de se développer.
2. Les smectites se développent et envahissent tout le support : c'est la **glauconie naissante**. La structure initiale est généralement très reconnaissable; la teneur en

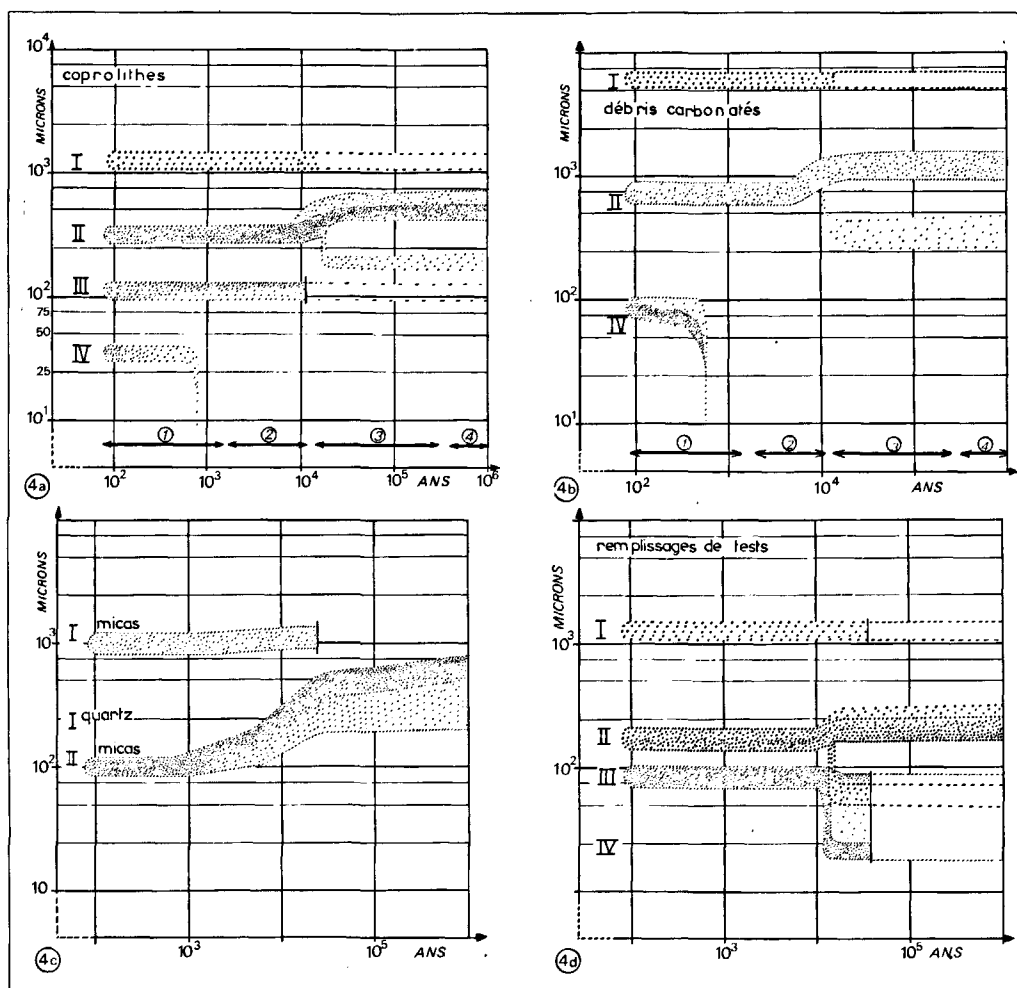


Figure 4

Schéma de l'évolution de taille des divers supports au cours de leur glauconitisation. (I) Taille des supports trop grosse pour qu'ils soient entièrement verdis; on observe cependant un verdissement superficiel. (II) Taille des supports la plus favorable à un verdissement rapide et complet suivi d'une possibilité d'évolution jusqu'au stade le plus évolué des glauconies. (III) Taille permettant un verdissement complet mais non suivi d'une évolution vers les stades finaux. (IV) Taille trop petite pour permettre un début de verdissement; le support s'altère et disparaît avant son début de glauconitisation. La densité des pointillés traduit la fréquence des exemples rencontrés dans nos sédiments. Pour les coprolithes (4 a) et les débris carbonatés (4 b), 4 stades d'évolution minéralogique sont indiqués en fonction du temps : stade 1, glauconie naissante; stade 2, glauconie peu évoluée; stade 3, glauconie évoluée; stade 4, glauconie très évoluée. La taille optimale varie selon les supports. L'évolution morphologique et minéralogique varie selon la taille des supports et, de façon moindre, selon leur nature. Les grains verts peuvent être plus gros ou plus petits que les supports initiaux.

potassium s'accroît (4 % de  $K_2O$ ); le support est en grande partie altéré mais *le grain garde son aspect*; seule la couleur verte se substitue à la couleur initiale.

3. Le nouveau milieu créé par ces smectites est favorable à des recristallisations de minéraux en meilleur équilibre avec le milieu marin, c'est-à-dire plus fermés et plus potassiques. Les croissances cristallines entraînent souvent une *déformation* importante du support; les craquelures apparaissent. La structure du support disparaît petit à petit : c'est la **glauconie peu évoluée** lorsqu'on reconnaît le support initial (teneur en  $K_2O$  de 4 à 6 %) et la **glauconie évoluée** lorsque celui-ci ne peut plus être deviné (teneur en potassium atteignant 7,5-8 %).

4. Dans un dernier stade, reconnu par Lamboy (1976), une nouvelle génération de minéraux glauconitiques rebouche les craquelures tandis qu'une pellicule

Diagram showing the size evolution of various frameworks during the process of glauconitization. (I) Size of frameworks too big to be completely glauconitized; superficial glauconitization is, however possible. (II) Most favourable size for rapid, complete glauconitization, followed by the possibility of evolution to the most advanced stage. (III) Size permitting complete glauconitization without evolution towards the final stages. (IV) Size too small to permit glauconitization; the framework deteriorates and disappears before the onset of glauconitization. The thickness of the dotted area shows the frequency of the example found in the selected sediments. For coprolite (4 a) and shell fragments (4 b), four stages of mineralogical evolution are indicated in relation to time: 1st stage: nascent glaucony; 2nd stage: little evolved glaucony; 3rd stage: evolved glaucony; 4th stage: highly evolved glaucony. Optimal size varies according to the frameworks. Mineralogical and morphological evolution vary with the size and to a lesser degree with the nature of frameworks. Glauconitic grains may be bigger or smaller than their initial frameworks.

superficielle peut *empâter* les formes (Zumpe, 1971; Lamboy, 1976); la teneur en  $K_2O$  dépasse alors 8 %; c'est la **glauconie très évoluée**.

L'ensemble de ces phénomènes se déroule sous l'influence prépondérante de l'eau de mer puisque les grains ne sont pas enfouis.

## RECONSTITUTION DES MILIEUX D'ÉVOLUTION DES GRAINS

### Signification de la glauconie

La reconnaissance des différents types de supports conduit à caractériser les conditions régnant *au moment de la formation des supports* et non pas au moment de la



glauconitisation. Un temps non négligeable s'écoule entre la formation des supports et leur évolution. Ainsi, un gisement dont l'essentiel des grains résulte du verdissement de débris coquilliers roulés indique un « prisme littoral » submergé bien avant la glauconitisation elle-même (fig. 5).

Les glauconies évoluent à l'abri des apports continentaux figurés. Celles qui sont très évoluées impliquent donc une absence de dépôt prolongée durant laquelle d'importants changements hydrodynamiques et eustatiques peuvent survenir. Ainsi, Cotillon (1968) observe des glauconies grano-classées résultant de l'accumulation de grains ayant évolué *ailleurs et avant*.

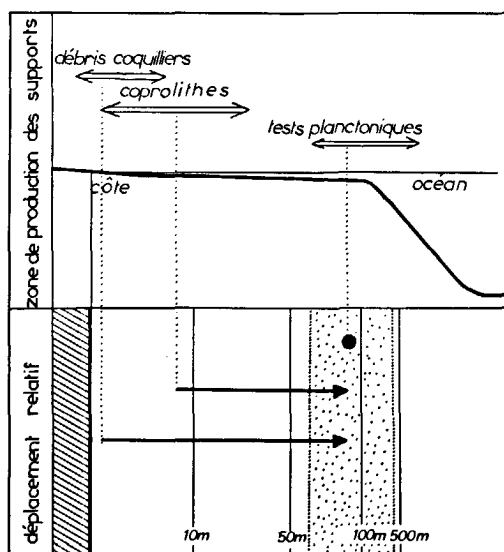
Certaines glauconies sont altérées lors d'une régression. Le milieu devenant plus oxygéné, les grains verts ont tendance à prendre une teinte rouille et à devenir vernissés : c'est la marque de conditions dégradantes, postérieures à la genèse des grains verts. Elles permettent de reconstituer les différents stades de la formation du gisement glauconieux.

Enfin, les glauconies héritées d'un niveau marin dans un autre sont difficiles à déceler. D'origine marine, les grains ne sont modifiés sensiblement que si l'altération de la roche glauconieuse entraîne une oxydation des grains. L'aspect arrondi et brillant des grains n'est pas l'indication d'un milieu agité favorable au verdissement ni forcément l'indice d'une usure secondaire des grains; c'est souvent le reflet de la forme du support originel (débris coquilliers usés, loges de Foraminifères, coprolithes) ou encore d'un empatement évolutif tardif.

Figure 5

Répartition et signification des supports originels de glauconitisation. Moitié supérieure : répartition, vue en coupe, des zones de production des supports. Moitié inférieure : localisation en plan, de la zone de glauconitisation (en pointillé). Pour certains supports nés près de la côte, le verdissement nécessite un déplacement relatif, matérialisé par une flèche, provoqué le plus souvent par un phénomène eustatique. Au contraire, la glauconitisation des remplissages des tests de Foraminifères planctoniques n'implique pas de déplacement relatif.

*Distribution and signification of glauconitization frameworks. Upper half: cross-section view of framework production areas. Lower half: localization of the glauconitization area (dotted). For certain frameworks originating near the coast line, glauconitization requires a relative shifting (see arrow), generally caused by a transgression. On the other hand, planctonic foraminiferal infillings do not imply a relative shifting.*



L'analyse granulométrique comparée des fractions paramagnétique et non magnétique aide à déterminer l'authigénie ou le remaniement; rappelons que, malgré une densité souvent supérieure à celle du quartz, le comportement hydrodynamique des grains verts est généralement celui de grains plus légers (Odin *et al.*, 1972).

#### Utilisation des données lors de la reconstitution des milieux d'évolution

Les différents types de supports identifiés ci-dessus ne se déposent pas initialement dans des environnements identiques. S'ils sont dominants, ils caractérisent différents milieux de sédimentation (fig. 5).

Les coprolithes sont engendrés dans des dépôts fins, riches en éléments nutritifs, le plus souvent à proximité des côtes. Pryor (1975) décrit en particulier un milieu deltaïque peu profond et très favorable au nord du golfe du Mexique. Il est possible que des coprolithes voisins prennent naissance dans des vasières plus profondes dans lesquelles la matière organique serait d'origine essentiellement planctonique. De plus, à cause de leur forme même, ces coprolithes peuvent aisément être accumulés un peu au-delà de leur lieu de production.

Les débris coquilliers sont surtout formés dans les zones intertidales et infralittorales. Un sable coquillier, à l'occasion d'une transgression de plusieurs dizaines de mètres, deviendra un sédiment favorable à la glauconitisation. C'est le cas du Lutétien de base du Bassin de Paris; un autre exemple d'âge quaternaire supérieur est fourni par la bande coquillière située vers - 100 m au large du Gabon et du Congo.

Les moules et verdissements de microfaune benthique indiquent un milieu de dépôt des supports au large des côtes et à l'abri d'apports vaseux. Les moules de faune pélagique supposent lorsqu'ils sont très abondants un dépôt biogène nettement au-delà des apports terrigènes sableux. Déposés sur la bordure externe des plateformes, ces supports n'ont pas besoin d'une tranche d'eau supérieure pour être le siège d'une glauconitisation. La glauconie qui en résulte n'est donc *pas nécessairement liée à une transgression* (Odin, 1975), idée qui avait été hâtivement généralisée à partir d'exemples particuliers.

L'interprétation des débris minéraux dépend de la nature de ceux-ci. Certaines glauconies dont le support principal est de type micacé peuvent, si elles sont très concentrées, signaler la proximité d'un pluton en voie d'altération; les verres volcaniques glauconitisés peuvent indiquer, s'ils gisent en masse suffisante, l'existence d'une période d'activité volcanique, etc.

Tous ces supports, qui auraient disparu durant les arrêts de sédimentation successifs, sont fossilisés par le phénomène de glauconitisation lié aux périodes de non dépôt. L'exemple des sédiments des plateaux continentaux actuels, ayant subi de fréquentes et amples variations eustatiques, montre les limites de ce type de reconstitution. En un même lieu, diverses conditions se succèdent. C'est même souvent la succession de ces conditions de milieu différentes qui permet la réalisation des supports puis leur glauconitisation : il est donc

nécessaire de tenir compte des milieux successifs correspondant à chaque phase de l'évolution.

Le support reconnu et sa signification trouvée, le stade d'évolution atteint par l'ensemble des grains ou par différents lots de grains peut fournir un ordre d'idée du temps nécessaire à la réalisation du verdissement, des croissances cristallines et des phases terminales (fig. 5). La vitesse de ces évolutions dépend en partie de l'altérabilité du support. Plus il est stable, plus les évolutions sont ralenties. Il semble que les changements sont d'abord rapides (stades 1 et 2), puis se ralentissent car les minéraux se rapprochent de l'équilibre géochimique et thermodynamique avec le milieu marin.

Cette évolution s'effectue principalement à la surface du fond marin ou sous une faible couverture perméable où l'influence du milieu marin demeure prépondérante. Par là-même, cette minéralisation, comme le dépôt mécanique ou la précipitation chimique, se rattache à la phase initiale de la genèse d'un sédiment. Toutefois, il s'agit déjà d'un sédiment où les paléoenvironnements successifs (différentes profondeurs parfois) ont laissé des traces. Les grains initialement déposés portent donc les traces de ce que certains auteurs nomment « diagenèse précoce », d'autres « modifications synsédimentaires », et que le sédimentologue se doit de considérer.

## RÉFÉRENCES

- Bailey J. W., 1856. On the origin of greensand and its formation in the Ocean on the present epoch, *Proc. Boston Soc. Nat. Hist.*, **5**, 364-368.
- Boyer P. S., Guinness E. A., Lynch-Blosse M. A., Stolsman R. A., 1977. Greensand fecal pellets from New Jersey, *J. Sediment. Petrol.*, **47**, 267-280.
- Cayeux, L., 1916. *Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires : Glauconie*, Imprimerie Nationale, Paris, 241, 252.
- Cotillon P., 1968. Le Crétacé inférieur de l'arc sub-alpin de Castellane entre l'Asse et le Var. Stratigraphie et Sédimentologie, *Mém. BRGM*, **68**, 1-313.
- Dangeard L., 1940. Sur diverses manières d'être de la glauconie dans la couche verte du Bajocien normand, *C. R. Acad. Sc.*, **211**, 264-265.
- Delibrias G., Giresse P., Kouyoumouzakakis G., 1973. Géochronologie des divers stades de la transgression holocène au large du Congo, *C. R. Acad. Sc., sér. D*, **276**, 1389-1391.
- Ehlmann, A. S., Hulings N. C., Glover E.D., 1963. Stages of glauconite formation in modern foraminiferal sediments, *J. Sediment. Petrol.*, **33**, 1, 87-96.
- Gallihier E. W., 1935. Geology of glauconite, *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, **19**, 11, 1569-1601.
- Giresse P., 1965 a. Observation sur la présence de « glauconie » actuelle dans les sédiments ferrugineux peu profonds du bassin gabonais, *C. R. Acad. Sc.*, **260**, 5597-5600.
- Giresse P., 1965 b. Oolithes ferrugineuses en voie de formation au large du Cap Lopez (Gabon), *C. R. Acad. Sc.*, **260**, 2550-2552.
- Giresse P., 1969. Étude des différents grains ferrugineux authigènes des sédiments sous-marins au large du delta de l'Ogooué (Gabon), *Sci. Terre*, **14**, 1, 27-62.
- Giresse P., 1975. Essai de chronométrie de la glauconitisation dans le Golfe de Guinée, *C. R. Somm. Séances Soc. Géol. Fr.*, **5**, 163-164.
- Giresse P., 1977. Matériaux pour la connaissance de la glauconitisation sur la plate-forme du Congo, *Ann. Univ. Brazzaville*, **13**.
- Giresse P., Kouyoumouzakakis G., Moguedet G., 1979. Le Quaternaire supérieur du plateau continental congolais, in : *Palaeoecology in Africa*, Van Zinderen Bakker, édit., **11**, 193-217.
- Giresse P., Odin G. S., 1973. Nature minéralogique et origine des glauconies du plateau continental du Gabon et du Congo, *Sedimentology*, **20**, 4, 457-488.
- Hein J. R., Allwardt A. O., Griggs G.B., 1974. The occurrence of glauconite in Monterey bay, California. Diversity, origins and sedimentary environmental significance, *J. Sediment. Petrol.*, **44**, 2, 562-571.
- Lamboy M., 1968. Sur un processus de formation de la glauconie en grains à partir des débris coquilliers. Rôle des organismes perforants, *C. R. Acad. Sc., sér. D*, **266**, 1937-1940.
- Lamboy M., 1974. La glauconie du plateau continental au Nord-Ouest de l'Espagne dérive d'anciens débris coquilliers, *C. R. Acad. Sc., sér. D*, **280**, 157-160.
- Lamboy M., 1976. Géologie marine du plateau continental au N.-O. de l'Espagne, *thèse Doct. État*, Rouen, 283 p.
- Lucas J., Prévôt L., Lamboy M., 1978. Les phosphorites de la marge nord de l'Espagne, Chimie, minéralogie, genèse, *Oceanol. Acta*, **1**, 1, 55-71.
- Martin L., 1973. Morphologie, sédimentologie et paléogéographie au Quaternaire récent du plateau continental ivoirien, *thèse Doct. État*, Paris, 339 p.
- McRae S. G., 1972. Glauconite, *Earth-Sci. Rev.*, **8**, 397-440.
- Millot G., 1964. *Géologie des argiles*, Masson, Paris, 499 p.
- Nathan Y., Lucas J., 1971. Synthèse de l'apatite à partir du gypse, *Chem. Geol.*, **9**, 99-112.
- Odin G. S., 1969. Méthode de séparation des grains de glauconie, intérêt de leur étude morphologique et structurale, *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, **11**, fasc. 3, 171-174, 3 pl. h.t.
- Odin G. S., 1972. Observations nouvelles sur la structure de la glauconie en accordéon; description du processus de genèse par néoformation, *Sédimentology*, **19**, 285-294.
- Odin G. S., 1975. De glauconiarum, constitutione, origine, aetateque, *thèse Doct. État*, Paris, 280 p.
- Odin G. S. et al., 1972. Étude du sondage de Cassel, *Bull. Inf. Bassin Paris*, **31**, 22-36.
- Odin G. S., Giresse P., 1972. Formation de minéraux phylliteux (berthiérine, smectites ferrifères, glauconite ouverte) dans les sédiments du Golfe de Guinée, *C. R. Acad. Sc., sér. D*, **275**, 177-180.
- Odin G. S., Giresse P., 1976. Essai de chronométrie de la glauconitisation dans le Golfe de Guinée, Compléments et remarques, *C. R. Somm. Séances Soc. Géol. Fr.*, **3**, 108-111.
- Odin G. S., Lamboy M., 1975. Sur la glauconitisation d'un support carbonaté d'origine organique : les débris d'Échinodermes du plateau continental nord-espagnol, *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **17**, 1, 108-115.
- Porrenga D. H., 1967 a. *Clay mineralogy and geochemistry of recent marine sediments in tropical areas*. Dort. Stolk., Amsterdam, 145 p.
- Pryor W. A., 1975. Biogenic Sedimentation and Alteration of Argillaceous Sediments in Shallow Marine Environments, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **86**, 1244-1254.
- Purser B. M., 1973. Aspects de la diagenèse carbonatée précoce et ses rapports avec les milieux sédimentaires actuels et anciens, *Sci. Terre*, **18**, 3, 301-313.
- Takahashi J. I., Yagi T., 1929. The peculiar mud grains in the recent littoral and estuarine deposits, with special reference of the origin of glauconite, *Écon. Geol.*, **24**, 838-852.
- Tapper M., Fanning D. S., 1968. Glauconite pellets; similar X-ray patterns from individual pellets of lobate and vermiform morphology, *Clays Clay Miner. Proc. Nat. Conf.*, **16**, 4, 275-284.
- Velde B., Odin G. S., 1975. Further information related to the origin of glauconite, *Clays Clay Min.*, **23**, 376-381.
- Wermund E. G., 1961. Glauconite in early tertiary sediments of gulf coastal province, *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, **45**, 1667-1696.
- Zumpe H. H., 1971. Microstructures in Cenomanian glauconite from the Isle of Wight (England), *Mineral. Mag.*, **38**, 284, 215-224.