

# L'Atlantique Sud au Crétacé d'après l'étude des minéraux argileux et de la matière organique (legs 39 et 40 DSDP)

Atlantique Sud  
Crétacé  
Argiles  
Matière Organique  
Environnement  
Paléogéographie  
South Atlantic  
Cretaceous  
Clay minerals  
Organic matter  
Environment  
Paleogeography

C. Robert<sup>a</sup>, J.-P. Herbin<sup>b</sup>, G. Deroo<sup>b</sup>, G. Giroud d'Argoud<sup>a</sup>, H. Chamley<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de Géologie marine, Centre d'Océanographie, Luminy, 13288 Marseille Cedex 2, France

<sup>b</sup> Institut français du Pétrole, B.P. 311, 92506 Rueil-Malmaison Cedex, France

<sup>c</sup> Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie, Université de Lille-I, 59650 Villeneuve d'Ascq, France.

Reçu le 26/7/78, révisé le 28/9/78, accepté le 11/10/78.

## RÉSUMÉ

L'étude des argiles et de la matière organique des séries crétacées des sites 361, 356, 357, 363 et 364 contribue à reconstituer l'évolution paléogéographique des bassins de l'Atlantique Sud et de ses bordures continentales. Deux groupes de mécanismes sont discutés : l'évolution morphologique des bassins-versants d'une part, celle des milieux de sédimentation d'autre part :

- l'évolution morphologique continentale se déroule en deux phases qui passent de l'une à l'autre de manière progressive :

- a) instabilité marginale, caractérisée par des apports de minéraux primaires, d'interstratifiés et de kaolinite,

- b) stabilisation, caractérisée par des apports de smectite et de minéraux fibreux, au cours de laquelle se développent les plaines côtières et les sols mal drainés;

- l'évolution des milieux de sédimentation varie d'un bassin à l'autre. Elle se fait d'un pôle anoxique à un pôle oxydant, ces conditions extrêmes étant liées à des phénomènes morpho-tectoniques, à la configuration physiographique, aux apports et aux courants :

- 1) Aptien : présence de milieux euxiniques développés à la fois dans les bassins du Cap et d'Angola, la barrière Rio Grande-Walvis culminant au niveau des couches supérieures oxygénées ou étant même émergée,

- 2) Albien : oxygénation des bassins liée au coulissage du plateau des Falkland, les courants atteignant le bassin d'Angola de manière transitoire et ménagée, par des ouvertures peut-être préexistantes dans la barrière Rio Grande-Walvis. Le bassin du Cap est définitivement ouvert vers le Sud,

- 3) Albien supérieur à Coniacien-Santonien : fermeture épisodique de la barrière Rio Grande-Walvis, avec formation temporaire et partielle d'un milieu euxinique dans le bassin d'Angola,

- 4) Santonien supérieur à Maestrichtien : réouverture du bassin d'Angola aux circulations, vers le Sud par des passages à travers la barrière Rio Grande-Walvis, vers le Nord par la formation du rift du Bénin et par l'ouverture de la zone de fracture de la Vema.

*Oceanol. Acta*, 1979, 2, 2, 209-218.

## ABSTRACT

Cretaceous South Atlantic Ocean  
through the study of clay minerals and organic matter  
(DSDP legs 39 and 40)

The study of clayey and organic sedimentary fractions of Cretaceous sediments from sites 361, 356, 357, 363 and 364 contributes to the reconstruction of the paleogeographical evolution of the South Atlantic basins and margins. Two types of phenomena

are considered: the morphological changes of continental river basins and the nature of sedimentary environments:

- morphological evolution occurs in two stages with a progressive transition from one to the other:

- a) marginal instability, characterized by detrital supply of primary minerals, irregular mixed-layers and kaolinite,

- b) stabilization, characterized by the supply of detrital smectite and fibrous minerals and the simultaneous formation of coastal basins and badly-drained soils;

- the evolution of sedimentary environments varies according to the geographical location of the basins, and depends on tectonic events causing the opening or closing of the East-West ridges:

- 1) Aptian: euxinic environments developed in both the Cape and Angola basins. The Rio Grande-Walvis barrier reached the level of oxygenated upper water masses or emerged,

- 2) Albian: oxygenation of the basins, following the rupture of the Falkland plateau. The currents reached the Angola basin only temporarily and with low intensity, through openings in the Rio Grande-Walvis barrier,

- 3) Upper Albian to Coniacian-Santonian: episodic closing of the Rio Grande-Walvis barrier, leading to the formation of a partial and temporary euxinic environment in the Angola basin,

- 4) Upper Santonian to Maastrichtian: definitive opening of the Angola basin to marine circulations: southwards through the Rio Grande-Walvis barrier; northwards after the initiation of the Benue rift and the opening of the Vema fracture zone.

*Oceanol. Acta*, 1979, 2, 2, 209-218.

## INTRODUCTION

Au Jurassique, l'écartement des continents américain et africain a permis la formation de nouveaux bassins sédimentaires (Nairn, Stehli, 1973; Van Andel *et al.*, 1977). A l'Aptien, l'Atlantique Sud comprenait deux bassins séparés par les rides de Walvis et de Rio Grande formant barrière (fig. 1) :

- le bassin d'Angola-Brésil, fermé aux influences de l'Atlantique Nord;

- le bassin du Cap-Argentine, limité au Sud par les plateaux des Falkland et des Aiguilles qui formaient un seuil.

Les forages réalisés lors des legs 39 et 40 du « Glomar Challenger » (fig. 1) ont recoupé de fortes épaisseurs de sédiments crétacés : Aptien post-salifère à Maeëtrichtien (Supko, Perch-Nielsen *et al.*, 1977; Bolli, Ryan *et al.*, 1978). Les principaux sites concernés sont le 361 dans le bassin du Cap, les 356, 357, 363 sur la barrière Rio Grande-Walvis, le 364 dans le bassin d'Angola. Leurs caractéristiques de prélèvement sont les suivantes :

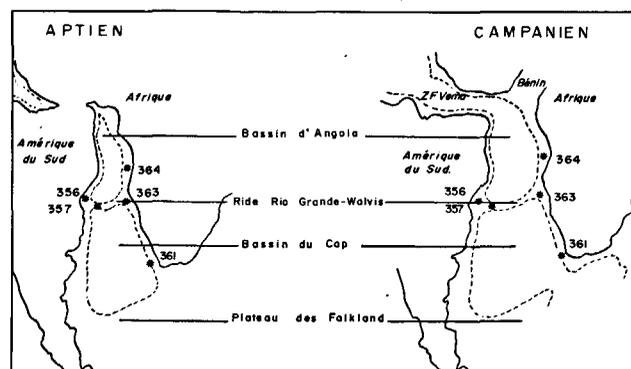
Site	Latitude	Longitude	Profondeur	Longueur
361	35°03.97'S	15°26.91'E	4 549 m	1 314 m dont 1 000 m de Crétacé
356	28°17.22'S	41°05.28'W	3 203 m	741 m dont 340 m de Crétacé
357	30°00.25'S	35°33.59'W	2 109 m	796 m dont 300 m de Crétacé
363	19°38.75'S	09°02.80'W	2 248 m	715 m dont 340 m de Crétacé
364	11°34.32'S	11°58.30'W	2 448 m	1 086 m dont 740 m de Crétacé

La présence de niveaux argileux riches en matière organique est à l'origine de cette étude comparative, dont le but est de contribuer à définir l'évolution paléogéographique des bassins de l'océan Atlantique Sud, ainsi que la nature des milieux de sédimentation.

## MÉTHODES D'ÉTUDE ET RÉSULTATS D'ENSEMBLE

### Minéralogie des argiles

L'étude concerne 144 échantillons. Après tamisage à 63 µm, la fraction fine est décalcifiée à l'acide chlo-



▲  
Figure 1  
Localisation des forages.  
Location map.

rydrique N/5 puis défloculée par centrifugation et mixage. Les particules inférieures à 2 µm sont isolées par sédimentation puis soumises aux rayons X<sup>2</sup> sous forme d'agrégats orientés, à trois reprises : lames normale, glycolée sous vide primaire, puis chauffée à 490°C pendant 2 heures. Un diffractomètre CGR Thêta 60 équipé d'un tube au cuivre et d'un monochromateur à cristal de quartz courbe a été utilisé dans des conditions constantes de réglage, avec une vitesse du goniomètre de 1°θ/2 mn et une fente d'analyse de 1,25 mm pour permettre une meilleure détermination des minéraux interstratifiés. Les premiers travaux concernant la minéralogie des argiles dans ces forages ont été réalisés par Zimmerman (1977) ainsi que Siesser et Bremner (1978). Les minéraux présents sont la chlorite, l'illite, les interstratifiés irréguliers chlorite-vermiculite, chlorite-smectite, illite-vermiculite et illite-smectite, la kaolinite, la smectite, l'attapulгите et la sépiolite. Y sont parfois associés en abondance variable le quartz, les feldspaths, la cristobalite et la clinoptilolite.

Les estimations d'abondance des minéraux argileux, exprimées en pourcentages, ont été effectuées en tenant compte de la hauteur des pics au-dessus du fond continu, ainsi que de leur surface. Les pics 001 de l'illite et de la chlorite (diagramme de l'échantillon glycolé) sont utilisés comme références. Par comparaison, la smectite, l'attapulгите, la sépiolite et les interstratifiés irréguliers subissent une correction positive alors que la kaolinite, bien cristallisée, subit une correction négative. Les résultats sont donnés avec une erreur relative d'environ 5%.

Aux différents points de forage, les argiles n'ont subi aucun effet de diagenèse (fig. 2, 3 et 4) :

- absence de diagenèse liée à l'enfouissement. Il n'y a pas de passage progressif de la smectite à l'illite par l'intermédiaire de minéraux interstratifiés, ni d'amélioration de la cristallinité de l'illite avec la profondeur (Dunoyer, 1969);
- absence de diagenèse liée au volcanisme. La distribution de la smectite est indépendante de la présence ou de l'absence de verre volcanique (site 357 notamment). Son abondance n'augmente pas vers la base des forages qui lors du dépôt des sédiments étaient plus proches de la zone de rift qu'actuellement. Enfin, les spectres de terres rares dans les minéraux argileux des sites 361 et 364 traduisent l'absence d'influence du volcanisme marin et de l'eau de mer (pas d'anomalie négative en cérium, Courtois, Chamley 1978);
- absence de diagenèse liée à la matière organique. Il n'y a pas de dégradation sélective des minéraux argileux (attapulгите et smectite notamment) dans les niveaux riches en matière organique (Chamley, 1975; Cita *et al.*, 1977; Sigl *et al.*, 1978). Les fluctuations dans l'abondance des minéraux argileux présents dans ces forages sont indépendantes de la présence ou de l'absence de matière organique.

Du fait de l'absence de liaisons entre la lithologie et la nature des argiles, ainsi que de l'abondance des faciès terrigènes (Supko, Perch-Nielsen *et al.*, 1977; Bolli, Ryan *et al.*, 1978), les minéraux argileux des forages étudiés ici sont d'origine détritique, comme dans l'Atlantique Nord (Chamley, 1978). Les spectres

des terres rares, dont la distribution est très proche de celle des argiles détritiques des milieux continentaux (Courtois, Chamley, 1978) confirment cette interprétation.

La présence, en proportions importantes, de kaolinite et de smectite tout au long des séries traversées permet de proposer un climat moyen chaud et humide pour la zone étudiée, depuis l'Aptien jusqu'au Maestrichtien, ce qui est en accord avec les données de Furon (1972). Toutefois, la smectite pour se former en grandes quantités nécessite des phases successives humides et sèches (Paquet, 1969). La présence de saisons contrastées à cette époque est donc probable, comme c'était également le cas dans l'Atlantique Nord (Chamley, 1978). La relative constance du climat au cours du Crétacé autorise le regroupement des minéraux argileux selon leur origine moyenne (Millot, 1964) :

- minéraux primaires et dérivés (chlorite, illite, interstratifiés irréguliers) provenant de l'érosion directe des roches et de celle de sols contrariés dans leur évolution;
- kaolinite, provenant des sols évolués des zones amont déclives, bien drainées;
- smectite, provenant des sols ou des sédiments situés dans les zones aval, peu déclives et mal drainées, des bassins-versants continentaux;
- minéraux fibreux (attapulгите, sépiolite) provenant des croûtes carbonatées et des sédiments des bassins confinés (Trauth, 1974; Nahon, 1976).

#### Étude de la matière organique

Une méthode permettant d'estimer le potentiel pétrolier des roches sédimentaires ainsi que les différents types de matière organique a été développée à l'Institut Français du Pétrole (Espitalié *et al.*, 1977<sup>9</sup>). L'appareil utilisé est le Rock-Eval. Basée sur la pyrolyse, la méthode peut être appliquée sur des échantillons de carottes ou de cuttings, dans un laboratoire ou directement sur le forage. Elle a été utilisée avec succès sur le « Glomar Challenger » au cours des legs 48 et 50 (Deroo *et al.*, sous presse). Des études par analyse élémentaire et spectroscopie infrarouge appliquées à des fractions kérogènes (Tissot *et al.*, 1974) ont permis de définir trois types de matière organique (I, II, III). Si l'on reporte les rapports atomiques H/C et O/C sur un diagramme de Van Krevelen, les échantillons d'un même type de matière organique se localisent sur une courbe appelée « chemin d'évolution ». Sur ce diagramme, les kérogènes proches des lignées I et II proviennent d'un matériel planctonique aquatique très souvent présent dans les milieux marins. La conservation de ce matériel impose des conditions réductrices au moment du dépôt. Par ailleurs, les kérogènes localisés près de la lignée III résultent d'un matériel organique terrestre qui a été faiblement altéré avant ou pendant la sédimentation. Ce matériel provient principalement des végétaux supérieurs et constitue un témoin du climat et de la physiographie du continent. La méthode de pyrolyse est basée sur la détection sélective des composés hydrocarbonés et oxygénés (CO<sub>2</sub>) provenant du chauffage en atmosphère inerte d'une roche sédimentaire selon une programmation de température. Cette technique fournit plusieurs paramètres.

Deux d'entre eux, appelés « index d'hydrogène » et « index d'oxygène » peuvent être corrélés avec les rapports atomiques H/C et O/C obtenus lors de l'analyse élémentaire de la fraction kérogène (Espitalié *et al.*, 1977b). Un troisième paramètre, la température atteinte au maximum du pic de pyrolyse, est lié à l'évolution thermique. Généralement, la zone de faible évolution thermique dite de diagenèse (réflectance de la vitrinite inférieure à 0,5) correspond à des températures de l'ordre de 400 à 435°C. Au-delà commence la zone principale de formation de l'huile.

Dans la présente étude, des analyses élémentaires sur la fraction kérogène ont été réalisées sur quelques échantillons en même temps que la pyrolyse, de façon à caler les résultats avec les types de référence. Il apparaît ainsi qu'un matériel ayant une fraction kérogène proche des types I et II montre à la pyrolyse des index d'hydrogène rapportés au carbone organique (IH) supérieurs à 400 mg de composés hydrocarbonés par gramme de carbone organique; les index d'oxygène correspondants rapportés au carbone organique (IO) sont inférieurs à 100 mg de composés oxygénés par gramme de carbone organique. Pour un kérogène de type III, la pyrolyse montre des valeurs de IH inférieures à 100 et de IO inférieures à 200. Une catégorie supplémentaire doit être utilisée pour caractériser les échantillons à faible IH (inférieur à 100) et fort IO (supérieur à 200) : ils correspondent à une « matière organique résiduelle », c'est-à-dire à un matériel organique très largement dégradé avant ou après le transport. En fait il existe une grande dispersion entre ces trois types de référence. Ces variations peuvent s'expliquer par le mélange de plusieurs de ces types. Les plus fréquents sont : type II+matière organique résiduelle, types II+III, type III+matière organique résiduelle.

Pour comparer les résultats acquis sur les minéraux argileux et sur la matière organique, une représentation verticale en fonction de la profondeur est choisie (fig. 2, 3, 4). Pour chaque site sont figurées la colonne stratigraphique et lithologique, l'estimation de l'abondance des minéraux argileux, les valeurs de carbone organique (sur une échelle logarithmique, entre 0,1 et 10% du poids de roche) et l'index d'hydrogène (sur une échelle arithmétique, entre 0 et 400 mg de composés hydrocarbonés par gramme de carbone organique).

### ÉTUDE RÉGIONALE

#### Bassin du Cap. Site 361

La zone étudiée se situe entre les carottes 48 et 12; elle recouvre une période allant de l'Aptien inférieur au Crétacé supérieur indifférencié (fig. 2). Trois unités peuvent être distinguées :

#### De la carotte 48 à la carotte 35. Aptien inférieur

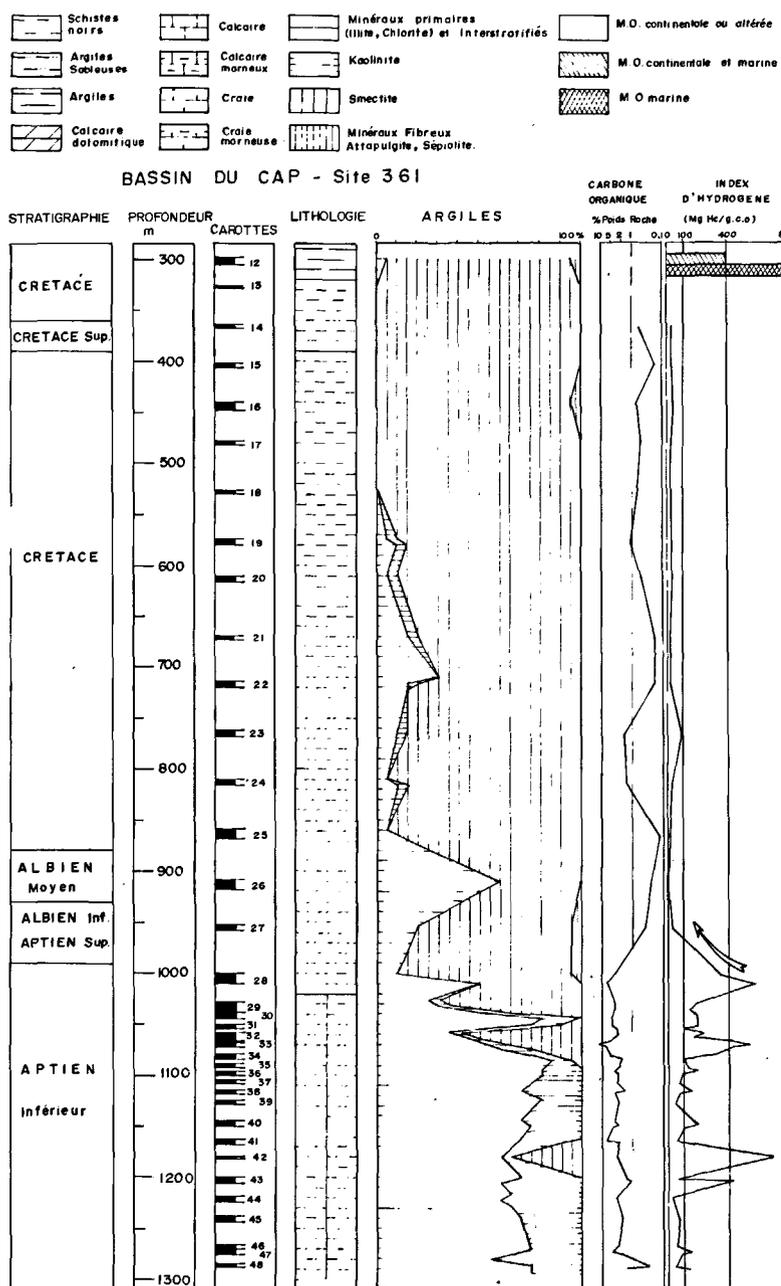
Cette unité est composée d'une série de niveaux argileux noirs intercalés dans des bancs silteux et sableux de couleur gris-vert. Les différents niveaux ont des épaisseurs variant de l'échelle centimétrique à l'échelle métrique.

Les descriptions (Bolli, Ryan *et al.*, 1978) font état d'une grande richesse en quartz et en argile, les feldspaths et les micas sont en quantité relativement abondante, les débris de plantes et de poissons sont parfois très bien représentés (jusqu'à 20% de la matière organique figurée). D'une façon générale, les teneurs en carbonates sont faibles (3 à 20%).

#### • Minéraux argileux

Les minéraux primaires et dérivés dominant, représentant en moyenne 70% de la fraction argileuse, accompagnés d'environ 30% de kaolinite. Sous climat chaud et humide, l'hydrolyse importante provoque une altération intense de la roche-mère et la formation de sols qui, dans les zones possédant un bon drainage, aboutissent à la formation de kaolinite. Par contre, les minéraux primaires et interstratifiés proviennent de l'érosion de la roche-mère et de sols peu évolués. Les

Figure 2  
Résultats des analyses d'argiles et de matière organique.  
*Clay minerals and organic matter data.*



conditions climatiques étant favorables à l'évolution complète des sols, comme le prouve la présence de la kaolinite, l'existence de minéraux primaires et interstratifiés en abondance dans le sédiment marin doit avoir une explication autre. Celle-ci peut résider dans un rajeunissement des reliefs permettant le décapage des roches et contrariant localement le développement des sols en équilibre avec le climat. Cette tectonique active est certainement liée à une phase d'élargissement océanique (Van Andel *et al.*, 1977).

#### ● Matière organique

Des teneurs en carbone organique de l'ordre de 2 à 5 % se rencontrent aussi bien dans les niveaux argileux que dans les niveaux silto-sableux. Toutefois des valeurs plus élevées se trouvent dans certains niveaux argileux : 7 à 12 % de carbone organique. A l'examen de l'index d'hydrogène, les niveaux argileux se distinguent des niveaux silto-sableux. Dans les niveaux argileux, les valeurs de l'IH sont généralement très élevées (jusqu'à 700). Ceci correspond à une matière organique d'origine marine, sédimentée dans un milieu euxinique qui a favorisé son accumulation et surtout sa conservation, comme dans l'Atlantique Nord (Tissot *et al.*, 1978). Dans les niveaux silto-sableux, à carbone organique équivalent les IH sont plus faibles (inférieurs à 150). De plus la matière organique est caractérisée par de très faibles valeurs de IO (souvent inférieures à 40). Cet appauvrissement relatif serait le fait d'une fraction organique continentale intervenant peu à la pyrolyse : il y aurait coexistence d'un matériel marin identique à celui des niveaux argileux, et d'un matériel continental humique.

*De la carotte 34 à la carotte 28. Aptien supérieur, Albien inférieur*

A l'échelle macroscopique, cette unité ne diffère pas de la précédente.

#### ● Minéraux argileux

Les minéraux primaires et dérivés, ainsi que la kaolinite diminuent au profit de la smectite, celle-ci passant de 5 à 90 % de la fraction argileuse. La smectite trouve son origine principale dans les sols évolués des régions déprimées mal drainées et dans les milieux confinés, sous climat chaud et humide à saisons contrastées (Paquet, 1969). La transition, au site de forage, d'une association argileuse à minéraux primaires dominants vers une association à smectite dominante semble indiquer une décroissance de l'activité tectonique. Celle-ci entraîne une diminution de l'intensité d'érosion sur les versants, en même temps que se développent sur les bordures du continent des zones basses, marécageuses ou lacustres, où la smectite peut se former (plaines côtières).

#### ● Matière organique

La nature de la matière organique des niveaux argileux est équivalente à celle de l'ensemble sus-jacent, c'est-à-dire issue d'un matériel marin autochtone typique des milieux euxiniques. Toutefois, à carbone organique équivalent, les niveaux silteux montrent un meilleur IH, ce qui prouverait qu'ils renferment une plus grande

quantité de matière organique autochtone. Ceci irait dans le sens d'une diminution des apports dans le bassin de sédimentation et d'une meilleure conservation au lieu du dépôt.

*De la carotte 27 à la carotte 12. Albien inférieur à Crétacé supérieur indifférencié*

Cet ensemble, épais de plus de 600 m, correspond à une série argileuse monotone, riche en quartz. Les descriptions (Bolli, Ryan *et al.*, 1978) font état de feldspaths et de micas localisés entre les carottes 27 et 20; au sommet de la série, ces minéraux ne sont plus signalés. Des débris de poissons sont présents, mais contrairement à la série sous-jacente, aucun débris de plante n'est mentionné. A partir de la carotte 14, le faciès est différent : il s'agit d'un sable riche en chlorite, dont la taille des éléments détritiques est plus grande.

#### ● Minéraux argileux

Très abondante, la smectite représente en moyenne 80 % de la fraction argileuse. Ceci indique que les minéraux proviennent en grande majorité des bassins côtiers, et que l'érosion sur les versants est réduite. De plus, la kaolinite produite à l'amont se trouve piégée en grande partie sur le continent au cours du transport, alors que la smectite produite à l'aval est emportée de façon privilégiée vers l'océan. Enfin, les propriétés de la smectite, bonne flottabilité et floculation difficile, lui permettent de se trouver relativement accumulée vers le large.

Remarque : dans certains niveaux, la smectite régresse parfois au profit des minéraux primaires et dérivés, ainsi que de la kaolinite. Il pourrait s'agir d'une conséquence de reprises temporaires de l'activité tectonique qui, en modifiant l'équilibre des pentes, provoque soit une recrudescence de l'érosion sur le continent, soit un remaniement des sédiments marins peu profonds. Ces épisodes paraissent liés au coulissage du plateau des Falkland (Barker, Dalziel, 1977; Le Pichon *et al.*, 1978).

#### ● Matière organique

Les valeurs de carbone organique montrent une brusque chute par rapport aux niveaux précédents. Tous les échantillons ont des teneurs inférieures à 0,8 %, quelques intercalations révélant des teneurs de 1 à 2 %. Par ailleurs, les valeurs d'IH sont très faibles. De leur côté les IO présentent des valeurs très élevées (jusqu'à 300). Cette association de valeurs provient d'une matière organique ayant subi une altération très avancée. L'absence de matière organique d'origine marine ne correspond certainement pas à un arrêt de la production de matériel autochtone, mais sans doute à une modification des conditions de préservation (oxygénation du milieu).

La rupture dans la sédimentation, marquée dans la lithologie par le passage d'une série à alternances argilo-silteuses vers une série argileuse homogène, ainsi que par la disparition des débris végétaux, correspond à une coupure majeure entre deux modes de sédimentation. A l'Aptien, la matière organique est bien conservée et présente une dominante marine autochtone tandis qu'à l'Albien et au Crétacé supérieur seuls les vestiges d'une matière organique altérée sont présents. Cette coupure

majeure correspond également à la disparition des minéraux primaires et de la kaolinite au profit de la smectite.

**Barrière Rio Grande-Walvis. Sites 356, 357, 363**

Les deux sites forés sur la côte Est de l'Amérique du Sud, sur le flanc Nord de la ride de Rio Grande, ont atteint respectivement l'Albien (356) et le Coniacien (357). Le forage effectué sur la ride de Walvis (363) a été arrêté dans l'Aptien supérieur (fig. 3). Tous ces forages se caractérisent par une série fortement carbonatée : plus de 50 % (Supko, Perch-Nielsen *et al.*, 1977; Bolli, Ryan *et al.*, 1978).

• Minéraux argileux

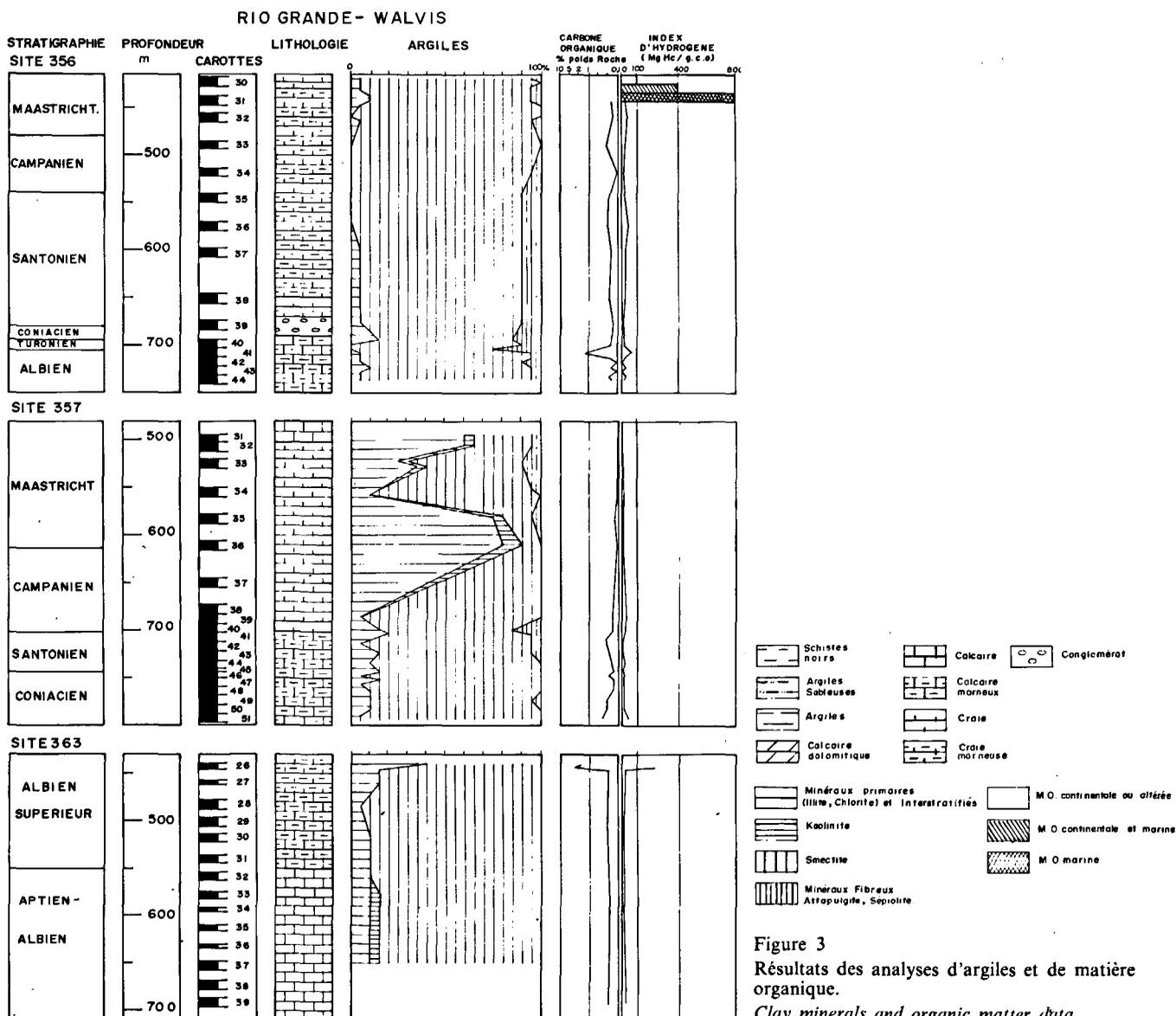
L'association argileuse est à smectite dominante (90 % de la fraction inférieure à 2 µm) depuis l'Aptien jusqu'au Maestrichtien. Les minéraux associés comprennent les espèces primaires et interstratifiées ainsi que de la kaolinite en faible quantité. Les minéraux fibreux (attapulgite) sont présents en direction du continent américain (site 356). Cet assemblage minéralogique suggère l'absence de tectonique active ou de reliefs importants, et le développement de zones côtières mal drainées,

aussi bien sur les continents que sur la barrière Rio Grande-Walvis elle-même, située en eau peu profonde (Pastouret, Goslin, 1974) et parfois émergée (Thiede, 1977) au cours du Crétacé.

Dans les sédiments maestrichtiens du site 357 apparaît à deux reprises une progression importante des minéraux primaires et dérivés ainsi que de la kaolinite, qui représentent de 60 à 90 % de la fraction argileuse. Il s'agit probablement d'un épisode tectonique local, lié à la barrière Rio Grande-Walvis qui a pu émerger par moments sous forme d'archipel (Thiede, 1977), permettant ainsi l'altération des roches et la formation de sols. Ceci est à mettre en parallèle avec les observations réalisées dans l'Atlantique Nord (Chamley, 1978) : cet épisode peut-être dû à une phase importante d'élargissement océanique qui est à l'origine de la mise en place des circulations océaniques profondes.

• Matière organique

Les carbones organiques dans ces séries fortement carbonatées sont très faibles (inférieurs à 0,3 %), les IH sont presque nuls (inférieurs à 40) et les IO très élevés (600 à 700). En raison des faibles teneurs en carbone organique, les données de la pyrolyse perdent de leur signification. On peut toutefois supposer qu'il s'agit d'une



matière organique résiduelle fortement dégradée, sans préjuger de son origine. Sur la partie Nord de la ride de Walvis, quelques niveaux de « black shales » existent dans une série condensée d'âge Albien supérieur à Turonien inférieur (carotte 26, site 363). Dans ces niveaux de quelques centimètres d'épaisseur, les teneurs de carbone organique atteignent 2 à 3 %. L'analyse par pyrolyse révèle un matériel marin associé à de la matière organique terrestre. Ces quelques niveaux montrent que périodiquement, entre l'Albien supérieur et le Turonien, des conditions euxiniques se sont développées au Nord de la barrière Rio Grande-Walvis et ont permis à la matière organique autochtone d'être conservée.

### Bassin d'Angola. Site 364

La zone étudiée se situe entre les carottes 45 et 11; elle correspond à la période Aptien supérieur-Maestrichien (fig. 4). Deux grandes unités peuvent être distinguées.

*De la carotte 45 à la carotte 38. Aptien supérieur, Albien inférieur*

Cet ensemble est composé de niveaux argileux noirs intercalés dans des carbonates parfois dolomités. L'épaisseur de chaque séquence argileuse est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, atteignant exceptionnellement le mètre. Les niveaux dolomitiques francs ne se trouvent qu'à la base du forage (carottes 45 à 41); ils représentent sans doute le terme supérieur du cycle évaporitique caractéristique de l'Aptien inférieur dans le bassin d'Angola (Bolli, Ryan *et al.*, 1978).

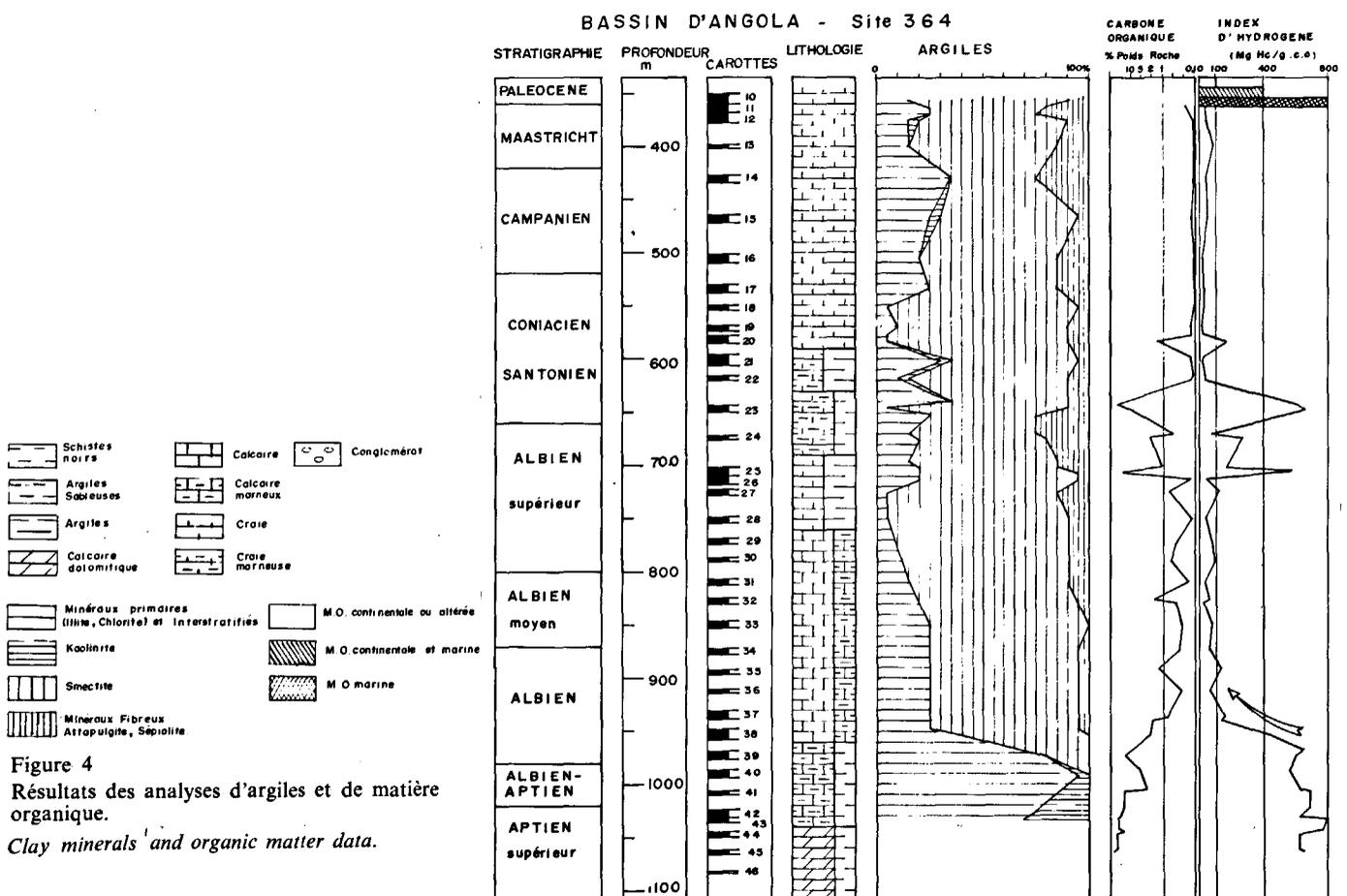
### • Minéraux argileux

Une séparation apparaît au niveau de la carotte 40 :  
 – carottes 43 à 40. Les minéraux primaires et dérivés dominant, formant 80 % de la fraction argileuse, et sont associés à de la kaolinite. Cela suggère l'érosion active de sols peu évolués situés sur des versants instables et soumis à une tectonique active liée à une phase d'élargissement océanique;

– carottes 40 à 38. L'abondance des minéraux primaires décroît, la kaolinite disparaît et la smectite augmente, formant jusqu'à 70 % de la fraction argileuse. Ce passage évoque la stabilisation des versants, liée à une diminution de l'activité tectonique, ainsi que la formation sur les bordures du continent de zones déprimées mal drainées où la smectite peut se développer.

### • Matière organique

Les teneurs en carbone organique des niveaux argileux noirs sont très élevées (jusqu'à 26 %); les échantillons les plus riches se trouvent à la base du forage, intercalés entre les derniers niveaux de la série évaporitique. Tous les niveaux argileux présentent une matière organique de qualité équivalente avec des IH élevés (550 à 880). Les IO sont faibles et tendent à augmenter vers le haut de la série. La matière organique de ces niveaux correspondrait à un matériel aquatique autochtone (plancton) sédimenté dans un milieu particulièrement favorable à son accumulation et à sa conservation : il pourrait s'agir d'un bassin confiné sans ouverture vers le milieu océanique. Cette image correspond bien à l'idée que l'on a du début d'ouverture de l'Atlantique Sud avec la barrière Rio Grande-Walvis isolant les bassins Nord et Sud



(Berggren, Hollister, 1977; Sclater *et al.*, 1977). Le passage d'une série argileuse riche en minéraux primaires et kaolinite vers une série à smectite (carottes 40 à 38) ne correspond pas à une variation dans la nature de la matière organique, celle-ci n'intervenant qu'au-delà de la carotte 38.

*De la carotte 37 à la carotte 11. Albien à Maestrichtien*

Cet ensemble est composé principalement de calcaires plus ou moins argileux. Cependant entre les carottes 25 et 20 (Albien supérieur à Coniacien-Santonien) des niveaux silteux et argileux pauvres en CaCO<sub>3</sub> s'intercalent dans la masse des carbonates. Certains de ces niveaux sont enrichis en matière organique figurée (jusqu'à 8 % de débris de plantes). On compte environ une vingtaine d'intercalations de ce type réparties dans les carottes 23, 24 et 25. Toutes ces passées sont très peu épaisses (10 à 20 cm) et résultent probablement d'un phénomène localisé dans le temps (Bolli, Ryan *et al.*, 1978).

• Minéraux argileux

La smectite est constante (80 % en moyenne); les minéraux fibreux apparaissent et augmentent jusqu'à atteindre 10 à 15 % de la fraction argileuse. Ceci montre l'importance croissante des bassins côtiers, probablement à caractère confiné, dans les apports terrigènes. Les fluctuations de l'abondance des minéraux primaires et dérivés (jusqu'à 35 %) sont probablement provoquées par un rajeunissement des reliefs sur les zones émergées.

• Matière organique

Les teneurs en matière organique diminuent progressivement entre les carottes 38 et 36 : en 50 m, les valeurs de carbone organique passent de 10 % à 0,3 %. Au-delà de la carotte 36, quelques niveaux dépassent 1 %, les autres échantillons ayant une teneur inférieure à 0,8 %. Toutefois, dans les niveaux argileux des carottes 23, 24 et 25 (Albien supérieur à Coniacien-Santonien), il existe une récurrence de valeurs fortes en carbone organique, jusqu'à 30 %. Les niveaux silteux encaissants ne dépassent pas 3 % et les carbonates 0,1 %. Les valeurs de l'IH diminuent progressivement entre les carottes 38 et 36, de 434 à 59, cependant que l'IO augmente de

63 à 284. Puis, jusqu'à la carotte 26, l'IH reste inférieur à 125 et l'IO supérieur à 400. Cette transition pourrait correspondre à la submersion de la barrière Rio Grande-Walvis, autrement dit à l'installation d'un système courantologique enrichissant les eaux de fond en oxygène, ce qui entraîne la destruction de la matière organique autochtone au moment du dépôt.

Dans les niveaux argileux de l'Albien supérieur et du Coniacien-Santonien se trouve un matériel organique aquatique autochtone (IH compris entre 550 et 650, IO inférieur à 20). Ce type de matière organique a pu s'accumuler grâce à des conditions de dépôt et de préservation particulièrement favorables. Les niveaux silteux montrent une diminution de IH (entre 70 et 270) et une augmentation de IO (entre 50 et 90) ce qui peut correspondre à un apport de matériel continental. Les niveaux de carbonates encaissants comme les niveaux sus-jacents (carottes 22 à 11) ne renferment qu'une matière organique résiduelle.

DISCUSSION

L'étude comparée des argiles et de la matière organique conduit à envisager, pour les versants des bassins Sud-atlantiques, une histoire marquée par deux phases morphologiques se succédant de manière progressive entre l'Aptien et le Maestrichtien (fig. 5) :

• Phase A. Instabilité marginale : l'abondance de la kaolinite indique le caractère hydrolysant du climat et la présence de versants propices au drainage des éléments. Toutefois, de grandes surfaces paraissent trop activement érodées pour permettre l'aboutissement des sols kaoliniques, ainsi que le suggère l'abondance des minéraux issus de l'érosion directe des roches (illite, chlorite) et des interstratifiés irréguliers issus de leur dégradation incomplète. De plus, dans le bassin du Cap, la matière organique issue du continent masque à diverses reprises dans le sédiment la matière organique autochtone, d'origine planctonique. En dehors des périodes à sédimentation rapide, de type « slump », la matière organique d'origine marine se concentre dans les horizons de « black shales ». Dans le bassin d'Angola, la matière organique est typiquement d'origine marine.

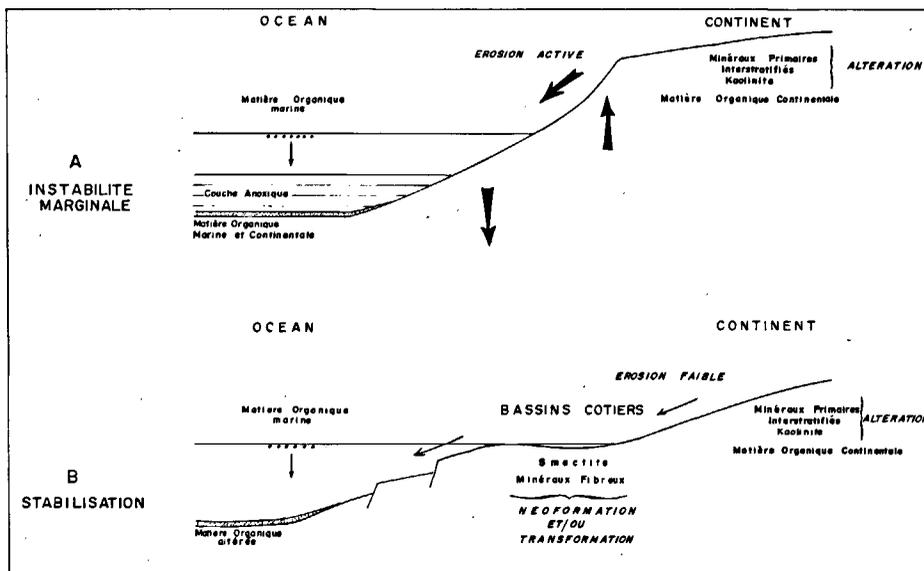


Figure 5  
Évolution morphologique de la marge continentale.  
*Morphological evolution of the continental margin.*

Ce bassin, également euxinique, semble être moins soumis à des apports brusques du continent que le bassin du Cap.

Ces diverses données suggèrent l'existence d'une morphologie continentale jeune, marquée par des reliefs déclives prolongeant vers l'amont les secteurs marins en voie d'approfondissement. Cette hypothèse s'accorde avec les résultats acquis sur les sédiments détritiques du plateau continental à la même époque (Martin, 1973; Siesser, 1974) ainsi qu'avec la subsidence continue des bassins sud-atlantiques évoquée par la géophysique (Lehner, De Ruiter, 1977).

● Phase B. Stabilisation : l'abondance croissante de la smectite suggère un aplanissement des reliefs à la suite d'une diminution de l'activité tectonique. Dans les zones amont, les roches continuent à s'altérer et les sols bien drainés évoluent vers la kaolinite. L'érosion, plus faible que précédemment, emporte vers les zones basses les ions libérés lors de l'altération ainsi que les argiles des sols. Dans les zones aval, plaines côtières mal drainées tendant au confinement, les smectites se développent dans les sols, voire dans certains sédiments, et des minéraux fibreux peuvent parfois être néoformés (Paquet 1969; Trauth 1974).

Le début de cette phase semble correspondre au commencement de l'ouverture océanique et à la pénétration des eaux oxygénées qui détruisent l'anoxicité du milieu. La matière organique d'origine marine disparaît totalement du bassin du Cap alors qu'elle persiste de façon intermittente jusqu'au Coniacien-Santonien dans le bassin d'Angola, grâce au rôle de la barrière Rio Grande-Walvis. En effet, cette barrière s'oppose au renouvellement rapide des eaux et autorise ainsi épisodiquement la conservation de la matière organique.

Les deux phases se succèdent d'une manière très progressive, et le schéma semble s'appliquer aussi bien au bassin du Cap qu'au Bassin d'Angola, où les apports de matière organique continentale sont toutefois négligeables en regard de la productivité organique marine. La présence de smectite abondante et de matière organique résiduelle sur la barrière Rio Grande-Walvis suggère que cette zone a dû rester relativement stable tout au long de la période concernée. De ce fait, l'histoire sédimentaire de l'Atlantique Sud a pu se dérouler avec une certaine indépendance pour chacun de ses bassins (fig. 6) :

● à l'Aptien les bassins sont fermés aux circulations profondes d'eaux oxygénées, aussi bien vers l'Atlantique Nord ou la Mésogée que vers l'océan Austral (Herbin, Deroo, 1978);

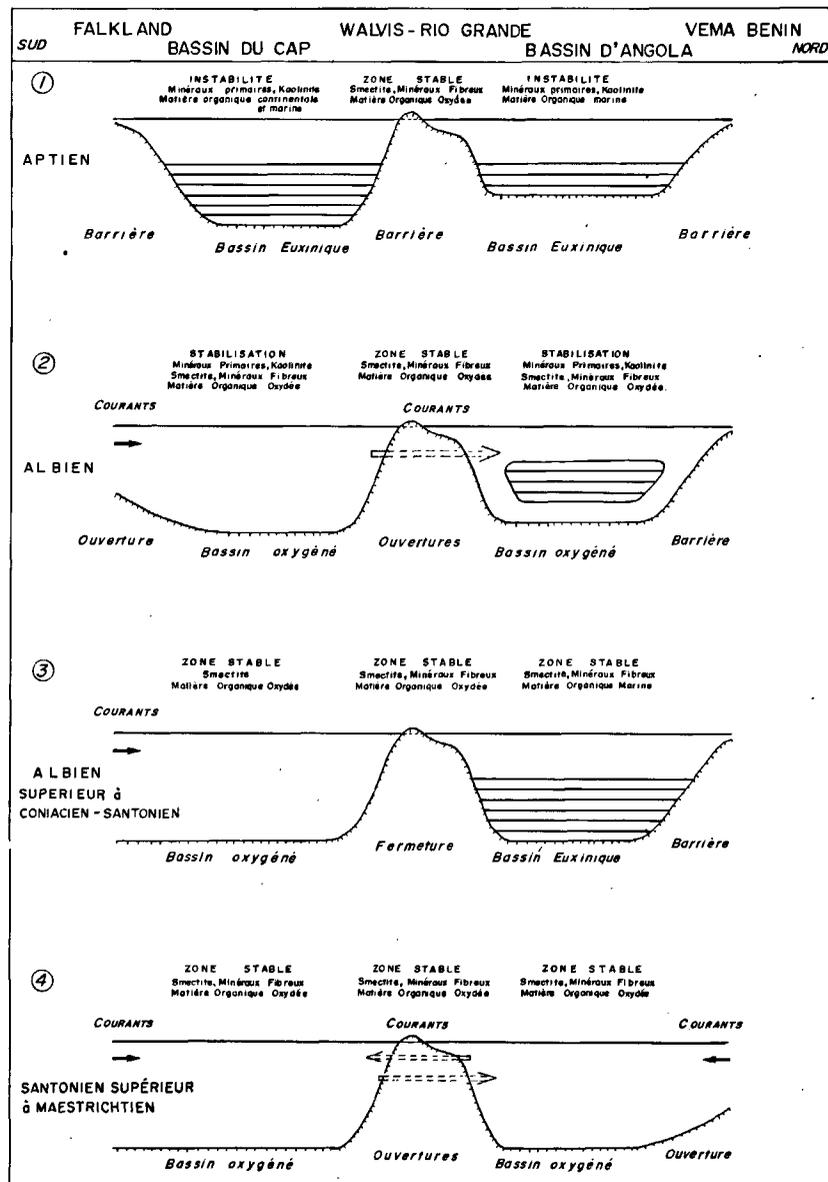
● à l'Albien l'ouverture aux circulations océaniques se produit au Sud, lors du coulisage du plateau des Falkland (Barker, Dalziel, 1977). Le bassin du Cap devient oxygéné, et les courants atteignent le bassin d'Angola, certainement grâce à des ouvertures dans la barrière Rio Grande-Walvis (McCoy, Zimmerman, 1977);

● à l'Albien supérieur, et jusqu'au Coniacien-Santonien, le bassin d'Angola ne se trouve plus que périodiquement alimenté en eaux oxygénées, peut-être à cause de mouvements tectoniques sur la barrière Rio Grande-Walvis. De ce fait, un milieu euxinique favorable à la conser-

vation de la matière organique peut se développer de façon temporaire. La présence de quelques niveaux de sédiments organiques à l'Albien supérieur sur la barrière Rio Grande-Walvis (site 363) est à mettre en parallèle avec le développement du milieu euxinique dans le bassin d'Angola. Ces horizons suggèrent l'existence de fluctuations dans l'extension des masses d'eaux euxiniques qui ont pu, à certaines périodes, atteindre le niveau du site 363 sur le flanc Nord de la ride de Walvis;

● Vers la fin du Crétacé supérieur (Santonien à Maestrichtien), d'importantes circulations océaniques s'établissent dans le bassin d'Angola par des passages à travers la barrière Rio Grande-Walvis d'une part, par le rift du Bénin et la zone de fracture de la Vema d'autre part (Burke, Dewey, 1974; Emery *et al.*, 1975; McCoy, Zimmerman, 1977; Le Pichon *et al.*, 1978). Le milieu anoxique favorable à la conservation de la matière organique marine disparaît totalement, et seule subsiste dans le sédiment une matière organique résiduelle, altérée.

Figure 6  
Évolution des milieux de sédimentation.  
*Evolution of sedimentary environments.*



Les études de minéraux argileux d'une part, de matière organique d'autre part se complètent par les informations qu'elles donnent, les uns surtout sur l'histoire du continent, les autres surtout sur l'histoire marine des régions avoisinant les sites de forage, avec des recoupements et des épaulements mutuels.

## Remerciements

L'étude des sédiments des legs 39 et 40 a été possible grâce à l'autorisation de la National Science Foundation (USA). La minéralogie des argiles a bénéficié des contrats de recherche accordés par le Centre National d'Exploitation des Océans (France). Une partie de l'échantillonnage nous a été communiqué par M. Melguen que nous remercions vivement. Nous remercions également M. Acquaviva et C. H. Froget pour les analyses d'argiles ainsi que la réalisation des dessins, M. Espitalié pour les analyses de carbone organique, G. Pichaud pour la pyrolyse et G. Caillé, M. Da Silva, F. Giraud, J. Roucache pour les analyses de kérogène. Le manuscrit a été revu par J. Blanc, B. Tissot et T. H. Van Andel que nous remercions pour leurs observations.

## REFERENCES

- Barker P., Dalziel I. W. D. *et al.*, 1977. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 36, US Gov. Print. Office, Washington, 1080 p.
- Berggren W. A., Hollister C. D., 1977. Plate tectonics and paleocirculation commotion in the ocean, *Tectonophysics*, 38, 11-48.
- Bolli H. M., Ryan W. B. F. *et al.*, 1978. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 40, US Gov. Print. Office, Washington, sous presse.
- Burke K., Dewey J. F., 1974. Two plates in Africa during the Cretaceous? *Nature*, 249, 5455, 313-315.
- Chamley H., 1975. Sédimentation argileuse en mer Ionienne au Plio-Pléistocène d'après l'étude des forages 125 DSDP, *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 17, 6, 1131-1143.
- Chamley H., 1978. North Atlantic clay sedimentation and paleoenvironment since the late Jurassic, 2<sup>e</sup> M. Ewing Memorial Symposium, New York, *Implications of Deep Drilling results in the Atlantic Ocean*, sous presse.
- Cita M. B., Vergnaud-Grazzini C., Robert C., Chamley H., Ciaranfi N., D'Onofrio S., 1977. Paleoclimatic record of a long deep-sea core from the Eastern Mediterranean, *Quat. Res.*, 8, 205-235.
- Courtois C., Chamley H., 1978. Terres rares et minéraux argileux dans le Crétacé et le Cénozoïque de la marge atlantique orientale, *C. R. Acad. Sci., Ser. D*, 286, 671-674.
- Deroo G., Herbin J. P., Roucache J., Tissot B. Organic geochemistry of some Lower Cretaceous shales from DSDP Site 416, leg 50, Eastern North Atlantic, *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 50, US Gov. Print. Office, Washington, sous presse.
- Dunoyer de Segonzac G., 1969. Les minéraux argileux dans la diagenèse. Passage au métamorphisme, *Sci. Géol.*, Strasbourg, Mém. 29, 320 p.
- Emery K. O., Uchupi E., Phillips J., Bowin C., Mascle J., 1975. Continental margin off Western Africa: Angola to Sierra Leone, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 59, 12, 2209-2265.
- Espitalié J., Madec M., Tissot B., Mennig J. J., Leplat P., 1977 a. Source rock characterization method for petroleum exploration, Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2935.
- Espitalié J., Laporte J. L., Madec M., Marquis F., Leplat P., Paulet J., Boutefeu A., 1977 b. Méthode rapide de caractérisation des roches-mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution, *Rev. Inst. Fr. Pét.*, 32, 1, 23-42.
- Furon R., 1972. *Éléments de paléoclimatologie*, Vuibert, Paris, 216 p.
- Herbin J. P., Deroo G., 1978. Tentative paleogeography of the South Atlantic Ocean during the Cretaceous as deduced from a sedimentological study of organic matter, 10<sup>e</sup> Congrès de Sédimentologie, Jerusalem, sous presse.
- Lehner P., De Ruiter P. A. C., 1977. Structural history of Atlantic margin of Africa, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 61, 7, 961-981.
- Le Pichon X., Melguen M., Sibuet J. C. Aschematic model of the evolution of the South Atlantic, en préparation.
- McCoy F. W., Zimmerman H. B., 1977. A history of sediment lithofacies in the South Atlantic Ocean, in: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, edited by P. R. Supko, K. Perch-Nielsen *et al.*, 39, US Gov. Print. Office, Washington, 1047-1080.
- Martin H., 1973. The Atlantic margin of Southern Africa between latitude 17° South and the cape of Good Hope, in: *The ocean basins and margins*, 1, *The South Atlantic*, edited by A. E. M. Nairn, F. G. Stehli, Plenum Press, New York, 277-298.
- Millot G., 1964. *Géologie des argiles*. Masson, Paris, 499 p.
- Nahon D., 1976. Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : géochimie, structures, relais et coexistence, thèse Sci. Nat., Aix-Marseille 3, 220 p.
- Nairn A. E. M., Stehli F. G., 1973. A model for the South Atlantic, in: *The ocean basins and margins*, 1, *The South Atlantic*, edited by A. E. M. Nairn, F. G. Stehli, Plenum Press, New York, 1-20.
- Paquet H., 1969. Évolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées, *Sci. Géol. Strasbourg, Mém.* 30, 210 p.
- Pastouret L., Goslin J., 1974. Middle Cretaceous sediments from the Eastern part of Walvis ridge, *Nature*, 248, 5448, 495-496.
- Sclater J. G., Hellinger S., Tapscott C., 1977. The paleobathymetry of the Atlantic ocean from the Jurassic to the present, *J. Geol.*, 85, 5, 509-552.
- Siesser W. G., Scrutton R. A., Simpson E. S. W., 1974. Atlantic and Indian ocean margins of Southern Africa, in: *The geology of continental margins*, edited by C. A. Burke, C. L. Drake, Springer-Verlag, New York, 641-654.
- Siesser W. G., Bremner J. M., 1978. X-Ray mineralogy of cores from leg 40 DSDP, in *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, edited by H. M. Bolli, W. B. F. Ryan *et al.*, 40, US Gov. Print. Office, Washington, sous presse.
- Sigl W., Chamley H., Fabricius F., Giroud d'Argoud G., Müller J., 1978. Sedimentology and environmental conditions in sapropels, in: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, edited by K. J. Hsü, L. Montadert *et al.*, 42A, US Gov. Print. Office, Washington, sous presse.
- Supko P. R., Perch-Nielsen K. *et al.*, 1977. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 39, US Gov. Print. Office, Washington, 1140 p.
- Thiede J., 1977. Subsidence of aseismic ridges: evidence from sediments on Rio Grande rise (SW Atlantic Ocean), *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 61, 6, 929-940.
- Thiede J., Van Andel T. H., 1977. The paleoenvironment of anaerobic sediments in the late Mesozoic South Atlantic Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 33, 301-309.
- Tissot B., Durand B., Espitalié J., Combaz A., 1974. Influence of the nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum, *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 58, 3, 499-506.
- Tissot B., Deroo G., Herbin J. P., 1978. Organic matter in Cretaceous sediments of the North Atlantic. Contribution to sedimentology and paleogeography. 2<sup>e</sup> M. Ewing Memorial Symposium, New York, *Implications of Deep Drilling results in the Atlantic Ocean*, sous presse.
- Trauth N., 1974. Argiles évaporitiques dans la sédimentation carbonatée continentale tertiaire. Bassins de Paris, de Mormoiron et de Salinelles (France), Jbel Ghassoul (Maroc), thèse Sci. Nat. Strasbourg, 309 p.
- Van Andel T. H., Thiede J., Sclater J. G., Hay W. W., 1977. Depositional history of the South Atlantic Ocean during the last 125 million years. *J. Geol.*, 85, 6, 651-698.
- Zimmerman H. B., 1977. Clay mineral stratigraphy and distribution in the South Atlantic Ocean, in: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, edited by P. R. Supko, K. Perch-Nielsen *et al.*, 39, US Gov. Printing Office, Washington, 395-400.