

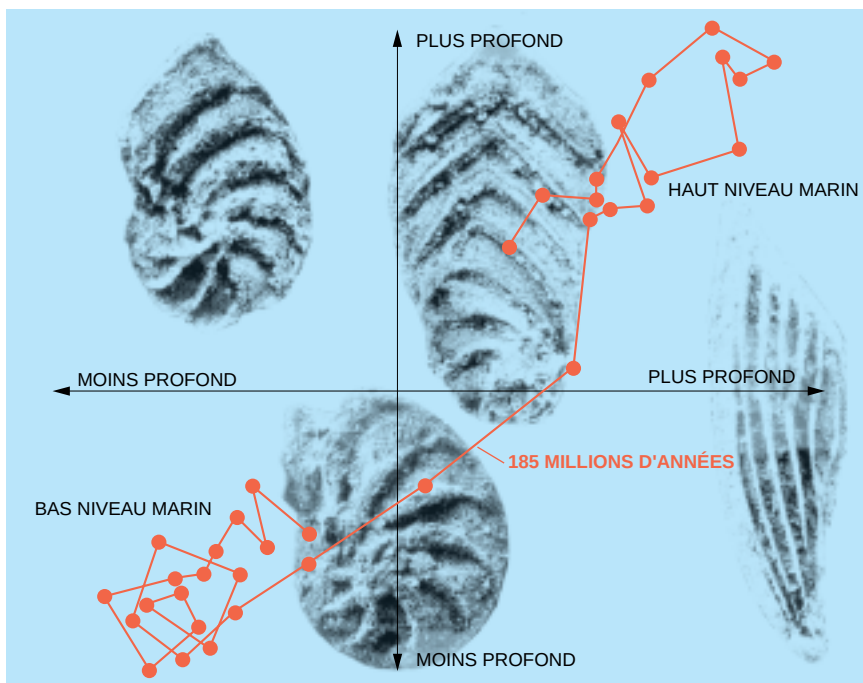
morphologiques aux variations de la profondeur marine. Toutefois ces changements diffèrent suivant la topographie et la géographie du bassin sédimentaire, et la richesse en matières nutritives. Ces micro-organismes

constituent donc d'excellents marqueurs des variations du niveau marin, à condition qu'une analyse précise soit menée dans chaque cas.

En utilisant ces méthodes, notre laboratoire participe au décryptage



5. LES NOMBREUSES COQUILLES DE LAMELLIBRANCHES (des mollusques) qui constituent ce niveau sédimentaire, élément d'un ensemble de couches du Crétacé inférieur, indiquent qu'il s'est formé lors du maximum d'épaisseur de la tranche d'eau. La vitesse de montée du niveau marin était alors telle que les sédiments continentaux ne parvenaient plus dans la mer : seuls les restes d'animaux marins pouvaient s'accumuler.



6. LES PEUPELEMENTS DE FORAMINIFÈRES (animaux marins unicellulaires dont quelques formes sont montrée en fond) ont un comportement chaotique. Une analyse statistique a été réalisée sur des échantillons prélevés dans des couches sédimentaires du bassin d'Aquitaine datées de 185 millions d'années. Pour tracer le diagramme ci-dessus, on porte, pour chaque niveau stratigraphique, en abscisse la profondeur, déduite des associations d'espèces de foraminifères, et en ordonnée la profondeur correspondant au niveau suivant. Les points sont regroupés dans deux zones qui correspondent au haut niveau marin (en haut à droite) et au bas niveau marin (en bas à gauche). La transition entre ces deux états est rapide.

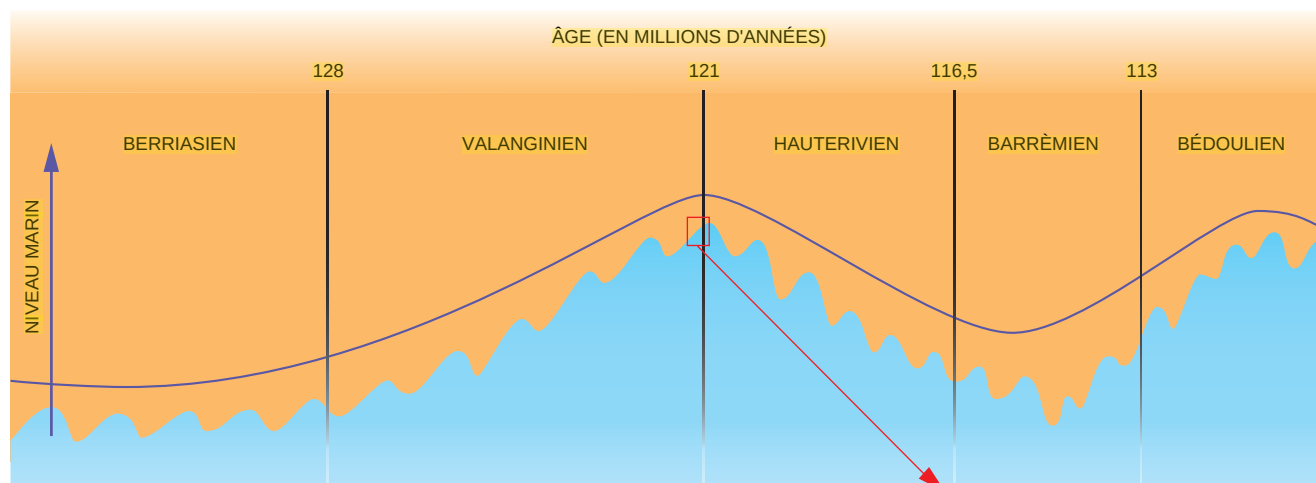
systématique des séquences de dépôt. Nous avons identifié dans le Lias du bassin d'Aquitaine (des couches déposées il y a 200 à 180 millions d'années) 16 séquences qui s'échelonnent sur 14 millions d'années et sur une épaisseur de 200 mètres. Dans le Crétacé inférieur du Portugal (il y a 130 à 100 millions d'années), nous avons distingué 25 séquences pour 23 millions d'années, sur 350 mètres d'épaisseur (voir la figure 7). Dans ces deux cas, les cycles de variation du niveau marin ont une durée moyenne de l'ordre du million d'années. Ils sont enregistrés par une épaisseur de 10 à 20 mètres de roches sédimentaires. L'amplitude des fluctuations du niveau marin serait comprise, selon les cycles, entre 10 et 50 mètres.

La fréquence que nous venons de décrire, à l'échelle du million d'années (comprise selon les cas entre 0,5 et 3 millions d'années), est la mieux visible, mais elle n'est pas la seule. Elle s'inscrit dans un ensemble hiérarchique où elle est qualifiée de séquence de troisième ordre. On décrypte en effet dans la succession des dépôts, à l'intérieur de cette séquence, d'autres cycles d'ordres inférieurs : du quatrième ordre, d'une durée de 100 000 ans à plusieurs centaines de milliers d'années et d'amplitude inférieure à dix mètres ; du cinquième ordre, d'une durée inférieure à 80 000 ans et d'amplitude métrique. Les séquences de troisième ordre s'emboîtent dans des cycles d'ordre supérieur : du deuxième ordre, d'une durée de dix à quelques dizaines de millions d'années et d'amplitude comprise entre 50 et 150 mètres ; du premier ordre, d'une durée supérieure à 50 millions d'années et d'amplitude comprise entre 200 mètres et 350 mètres.

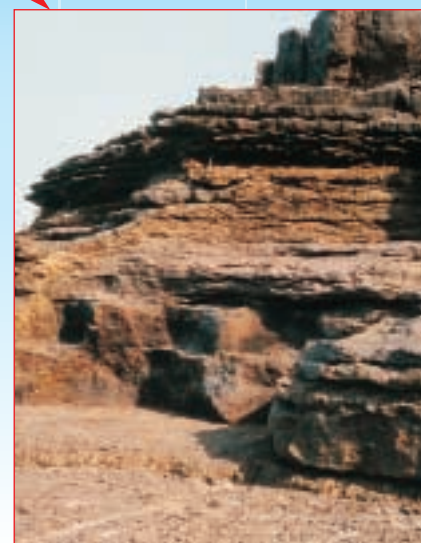
Rassembler les données à l'échelle de la planète

Les variations du niveau marin enregistrées par les sédiments sont-elles identiques sur tout le Globe ? Leurs causes sont-elles régionales ou locales, liées à des irrégularités de la surface des océans ou à des déformations de certaines plaques continentales recouvertes par les mers, ou faut-il rechercher des explications plus générales ?

Le recensement systématique des séquences de troisième ordre est en cours de réalisation pour les 250 der-



7. DES SÉQUENCES DE MONTÉE ET DE DESCENTE du niveau marin d'une durée de un million d'années environ ont été reconnues dans des couches sédimentaires du Crétacé inférieur au Portugal. Ces 25 séquences s'organisent elles-mêmes en cycles de période plus longue. L'empilement de roches (à droite) correspond à une montée du niveau marin. À la partie inférieure, les bancs calcaires de plus en plus minces sont des dépôts transgressifs, qui résultent d'une augmentation de l'épaisseur de la tranche d'eau. Au-dessus, les dépôts de haut niveau marin, aux bancs calcaires de plus en plus épais, signalent une diminution progressive de la profondeur par accumulation de sédiments.



niers millions d'années, à l'échelle de notre planète, dans tous les bassins sédimentaires et sur les marges des océans. C'est un travail de longue haleine, mais, dans plusieurs cas, on trouve, pour le même intervalle de temps, un nombre identique ou très voisin de séquences dans différentes régions du Globe. Au Crétacé inférieur, il y a entre 134 et 111 millions d'années, nous avons reconnu 25 séquences au Portugal, tandis que 26 ont été identifiées dans le Sud-Est de la France. Les deux cycles du Trias supérieur, il y a entre 215 et 212 millions d'années, observés dans les Alpes ont été retrouvés au Nord-Ouest de l'Australie. Pour les périodes dont les roches sont bien datées, tel le Jurassique dans les différents bassins sédimentaires de France et de Grande-Bretagne où les roches sont riches en ammonites, les séquences paraissent bien partout de même âge. Il semble donc que les fluctuations du niveau marin qui contrôlent l'agencement des sédiments à l'échelle du million d'années sont globales et qu'elles résultent de variations du niveau marin absolu.

Quelles sont les causes de ces variations? Deux explications sont généralement proposées. La première est la modification du volume des masses d'eau océaniques, liée à des changements climatiques qui dépendent eux-mêmes des variations cycliques de paramètres de l'orbite terrestre (l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'axe de son orbite, l'inclinaison de l'axe de la Terre sur le plan de son orbite et l'apla-

tissement de l'orbite elliptique), mis en évidence par Milutin Milankovic dans les années 1940. Ces cycles astronomiques, aux périodes voisines de 20 000, 40 000 et 100 000 ans ont été reliés, pour le Quaternaire, aux cycles climatiques. Aux époques glaciaires, les eaux sont immobilisées dans les calottes polaires et dans les glaciers de montagnes : le niveau marin absolu baisse. Aux époques interglaciaires, les glaces fondent : le niveau marin absolu monte. Ces variations se caractérisent par une durée courte, une grande amplitude (200 à 250 mètres) et une vitesse élevée (jusqu'à un centimètre par an).

Ce contrôle astronomique a fonctionné dans les temps géologiques plus anciens, avec des périodes de durées différentes au cours des 250 derniers millions d'années, et nous connaissons plusieurs âges glaciaires dans l'histoire de la Terre. Des dépôts sédimentaires de milieu marin profond, de 130 millions d'années, portent la trace de ces cycles climatiques. Ils sont constitués de bancs de calcaires et de marnes alternés. Il est acquis que cette alternance résulte de la succession de phases froides et de phases chaudes, avec une période d'environ 20 000 ans.

Nous n'avons toutefois aucune preuve d'événements climatiques aussi importants que les grandes glaciations du Quaternaire à d'autres époques (au Secondaire par exemple), alors que les sédiments enregistrent des variations du niveau marin d'am-

plitude semblable. En outre, les fluctuations exprimées par les séquences de troisième ordre s'étendent sur des durées plus longues que les cycles de Milankovic. Les modifications du volume des eaux prises en glace n'expliquent pas, seules, ces variations à l'échelle du million d'années.

Le fond des mers se soulève

La seconde explication proposée réside dans la modification de la forme du plancher des océans. La croûte océanique se crée au milieu des océans, dans les dorsales médio-océaniques, et s'étale de part et d'autre. À mesure qu'elle refroidit, sa densité augmente et elle s'affaisse. Les dorsales médio-océaniques ressemblent ainsi à des chaînes montagneuses : plus on s'éloigne de la ligne de sortie de la croûte, plus celle-ci est froide et plus l'altitude est faible. Comme la vitesse de refroidissement, donc l'affaissement des contreforts, ne dépend que du

temps, les dorsales médio-océaniques sont plus larges si l'expansion océanique est plus rapide. À quantité d'eau océanique constante, ces gonflements des fonds sous-marins relèvent le niveau marin absolu.

Les variations de la vitesse d'expansion océanique provoquent des fluctuations du niveau marin sur de longues durées, plusieurs dizaines de millions d'années, avec de grandes amplitudes, jusqu'à 350 mètres, et à vitesse moyenne, quatre centimètres tous les 10 000 ans. Ce phénomène doit jouer un rôle fondamental pour les évolutions à long terme, des premier et deuxième ordres. En revanche, il n'est pas directement relié aux cycles du troisième ordre.

Aucune de ces explication prise isolément ne nous permet de comprendre les variations du niveau marin à l'échelle du million d'années. Nous devons en rechercher les causes dans la dynamique interne et externe de notre planète, mais les mécanismes qui résultent de tels systèmes sont complexes et interdépendants. Les climats sont sous la double influence de facteurs astronomiques et tectoniques. Les topographies créées par la tectonique des plaques conditionnent le climat, mais ce dernier modèle les formes du relief. Les changements de climat font varier le niveau marin, mais les transgressions et les régressions marines agissent sur le climat en modifiant la répartition des terres et des mers. L'accumulation des sédiments provoque l'affaissement des fonds marins, qui favorise à son tour l'accumulation des sédiments.

Le chaos mis à jour

Au total, les enregistrements sédimentaires des variations du niveau marin présentent des caractéristiques des systèmes chaotiques tels que les physiciens et les mathématiciens les décrivent : répétitions quasi périodiques, emboîtement de séquences d'échelles temporelles différentes, alternance de deux états (bas et haut niveau marin) séparés par de rapides transitions de phases (chutes brusques du niveau marin), dépendance vis-à-vis des conditions initiales (les caractéristiques d'une séquence de dépôt dépendent de la séquence précédente).

Nous avons démontré que des variations de la composition des populations de foraminifères (dont nous



8. CES EMPREINTES DE DINOSAURE se sont imprimées sur un fond marin en train de durcir, sous quelques mètres d'eau. La montée du niveau marin empêchait alors la sédimentation.

avons vu qu'elles sont liées aux variations du niveau marin) possèdent ces caractéristiques. Un traitement mathématique, réalisé avec Louis Bonnet, de l'Université Paul Sabatier, à Toulouse, montre une oscillation du système autour de deux états, qui correspondent au haut et au bas niveau marin. Une transition rapide entre ces deux états coïncide avec une régression forcée du niveau marin, dans une séquence datant de 185 millions d'années (voir la figure 6).

Il serait vain de rechercher une explication unique aux fluctuations du niveau marin et encore moins à leur expression dans les successions de roches sédimentaires. Dans le système dynamique qui contrôle le niveau absolu des mers, la modification, même faible, de l'un des paramètres provoque un changement brusque et non prédictible de ce niveau. Selon les bassins, selon les conditions sédimentaires et topographiques locales, cette variation est plus ou moins nettement enregistrée dans l'organisation séquentielle des dépôts, sur des épaisseurs différentes et avec de possibles décalages chronologiques.

Les variations du niveau marin qui rythment, aux diverses échelles, l'histoire de la Terre ont des conséquences importantes sur les reliefs et sur les climats. Aux bas niveaux marins sont associés des climats relativement

froids ; aux hauts niveaux marins, des climats plus chauds. On estime les températures passées des eaux à partir du rapport d'abondance des deux isotopes de l'oxygène, l'oxygène 18 et l'oxygène 16 (dont le noyau contient respectivement 12 et 10 neutrons, en plus des 8 protons), dans le carbonate de calcium de fossiles marins : ce rapport est d'autant plus élevé que les eaux sont plus chaudes. Ces estimations ont confirmé le lien entre la température des eaux et les cycles de deuxième ordre et, dans les rares cas déjà étudiés, de troisième ordre. Les variations du niveau marin nous incitent donc à penser qu'au-delà des cycles climatiques aux périodicités comprises entre 20 000 et 100 000 ans, il doit exister des fluctuations climatiques apériodiques de plus longues durées, de l'ordre du million et de la dizaine de millions d'années, résultant de l'interaction de facteurs astronomiques et de la dynamique terrestre interne.

Les proliférations du plancton dans les mers chaudes et largement étalées des périodes de montée des eaux produisent en quantité importante les matières organiques à l'origine des hydrocarbures. Ces phases sont en outre caractérisées par l'accumulation de sédiments fins, mal oxygénés, favorables à la préservation de cette matière organique. En revanche, les régressions, normales ou forcées, permettent l'accumulation locale de dépôts sableux qui forment ensuite des roches poreuses où migrent et sont stockés les hydrocarbures. Ainsi alternent, dans la succession des dépôts sédimentaires marins, des roches mères et des roches réservoirs d'hydrocarbures dont la localisation, la géométrie et l'âge sont finalement conditionnés par les variations du niveau marin.

Les grandes compagnies pétrolières sont, pour cette raison, particulièrement attentives aux recherches fondamentales et appliquées sur l'enregistrement par les sédiments des variations du niveau marin. L'élaboration de modèles de séquences de dépôt de troisième ordre dans les divers contextes environnementaux de notre planète et le recensement de toutes ces séquences dans les grands bassins sédimentaires fournissent des moyens efficaces pour localiser les gisements potentiels et pour améliorer le pourcentage des forages productifs.